

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Ingénierie & Gestion de l'Eau

*ELABORATION D'UN PROTOCOLE DE
NETTOYAGE DES CIRCUITS DE VAPEUR DES
INSTALLATIONS DES STATIONS DE
DESSALEMENT*

Soutenu le/06/2023

Réalisé par :

Boukheloua Ahlem

Encadré par :

Mr. Boussaha Elhadi

Année Universitaire 2022- 2023





Remerciement

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant qui m'a donné le courage, la force et la patience pour commencer ce travail et le terminer au maximum.

Et je remercie ma famille, ma mère et mon père, mon soutien, ma force et ma dignité, qui m'ont soutenu

J'exprime également mes humbles remerciements aux encadrants de Mr. Bousaha pour tout son soutien, ses conseils, son aide et sa patience tout au long de la période de préparation de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à mener à bien ce travail.



Dédicace

Louange à Dieu et que la paix soit sur le Bien-Aimé Mustafa, sa famille et ses compagnons. Après cela :

Louange à Dieu qui m'a donné la chance de valoriser cette étape de ma carrière universitaire avec ce mémoire. C'est le fruit de mes efforts et de mes succès, grâce à Sa grâce, qui m'a guidé vers mes chers parents, qu'Allah les préserve, et qui sont une lumière sur mon chemin.

À ma chère sœur Mayssa, à mon jeune frère Mohamed Mahdi, et à tous les membres de ma famille.

À mon amie Rayane et à tous ceux qui m'ont soutenu dans ce travail.



Résumé

Dans cette étude, nous avons examiné le phénomène d'encrassement, qui peut causer des problèmes en raison de l'accumulation de substances indésirables à la surface, comme la surface des chaudières que nous avons étudiées dans cette étude.

Pour étudier ce problème, nous avons réalisé plusieurs expériences sur différents échantillons. L'objectif de ces expériences était de déterminer la solution capable de supprimer ces taches ou dépôts formés. Les résultats finaux nous ont permis de conclure que la solution d'acide chlorhydrique (HCl) est celle qui peut nettoyer efficacement et éliminer les taches en très peu de temps.

Ainsi, nous pouvons éviter le problème d'encrassement et réduire les problèmes de l'entartrage causés aux chaudières.

Mots-clés : sédimentation - échantillons - sédiments - chaudières - entartrage

Abstract

In this work, we studied the phenomenon of deposition, which can cause problems due to the deposition of unwanted materials on surfaces such as boiler surfaces that we studied in this work.

To study this problem, we conducted several experiments on multiple samples. The aim of these experiments was to determine the solution that can remove these stains or formed deposits. Based on the final results, we can conclude that hydrochloric acid (HCl) solution is capable of effectively cleaning and removing stains in a very short time.

By doing so, we can avoid the problem of deposition and reduce scaling, which can cause several issues for boilers.

Keywords: sedimentation - samples - sediment - boilers – scaling

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة ظاهرة الترسيب والتي يمكن أن تسبب مشاكل بسبب ترسيب المواد الغير مرغوب فيها على السطح كسطح الغلايات التي قمنا بدراستها في هذا العمل.

ولدراسة هذه المشكلة قمنا بعدة تجارب على عدة عينات، الهدف من هذه التجارب هو معرفة المحلول الذي يستطيع ازالة هذه البقع أو الرواسب المتشكلة، حيث من خلال النتائج النهائية يمكننا استنتاج أن محلول حمض الهيدروكلوريك hcl هو المحلول الذي يستطيع تنظيف جيدا وازالة البقع في وقت قصير جدا.

وبهذا نستطيع تجنب مشكلة الترسيب والحد من التحجيم الذي يسبب مشاكل عدة للغلايات.

كلمات مفتاحية: ترسيب - عينات - رواسب - الغلايات - التحجيم

Liste des figures

Figure I.1 : Dépôts concentration de tartre dans une tuyauterie	3
Figure I.2 : Cristallisation de sels minéraux, vue au microscope électronique.....	4
Figure II.1 : Chaudière électrique	13
Figure II.2 : Chaudière à récupération	14
Figure II.3 : Chaudière à foyer.....	15
Figure II.4 : Chaudière à combustibles	16
Figure II.5 : Chaudière à tubes de fumée.....	19
Figure II.6 : Chaudière à tubes d'eau	20
Figure II.7 : Comparaison des performances.....	20
Figure III.1 : Echantillons de l'acier C-1020	27
Figure III.2 : Appareil polisseuse	27
Figure III.3 : Echantillons après le polissage	28
Figure III.4 : Un échantillon sur la balance	28
Figure III.5 : Chlorure de calcium	29
Figure III.6 : Bicarbonate de sodium.....	30
Figure III.7 : Des échantillons entartrés	31
Figure III.8 : L'hydroxyde de sodium.....	32
Figure III.9 : Acide chlorhydrique.....	33
Figure III.10 : Chlorure de sodium	33
Figure III.11 : Acide sulfurique	34
Figure III.12 : Mélange de CaCl_2 et NaHCO_3 et l'eau de robinet	34
Figure III.13 : Les échantillons dans le mélange.....	35
Figure III.14 : Echantillon après le séchage du tartre.....	35
Figure III.15 : Les masses des échantillons avant et après l'entartrage	36
Figure III.16 : Avant et après l'échauffement des huiles	36
Figure III.17 : L'échantillon avant la formation d'encrasse	37
Figure III.18 : L'échantillon après la formation d'encrasse	37
Figure III.19 : Histogramme représente les masses des échantillons avant et après l'encrassement.....	38
Figure III.20 : Solution aqueuse de NaOH (2%).....	39
Figure III.21 : Solution aqueuse de NaCl (1%).....	39
Figure III.22 : Solution aqueuse de HCl (1%)	40
Figure III.23 : Solution aqueuse de HCl (2%)	41
Figure III.24 : Solution aqueuse de H_2SO_4 (1%)	41
Figure III.25 : Les masses des échantillons entartrés après le nettoyage chimique	42
Figure III.26 : Les masses des échantillons encrassés après le nettoyage chimique ...	43

Liste des Tableaux

Tableau III .1 : Propriété mécanique d'acier 1020.....	25
Tableau III .2 : Composition chimique de l'acier C-1020	26
Tableau III .3 : Caractéristiques principales deCaCl ₂	29
Tableau III .4 : Caractéristiques principales de NaHCO ₃	30
Tableau III.5 : Les masses des échantillons avant et après l'entartrage.....	37
Tableau III.6 : Les masses des échantillons avant et après l'encrassement.....	38
Tableau III .7 : Différents pesage de échantillons après nettoyage.....	42
Tableau III .8 : Différents pesage des échantillons après nettoyage	43

Liste des abréviations

PH : potentiel hydrogène

TH : le titre hydrotimétrique de votre eau

CO₂ : le dioxyde de carbone

Hco₃ : le bicarbonate

CaO : oxyde de calcium

Ca²⁺ : calcium élémentaire

SO₄⁻² : sulfate

Mg(OH)₂ : hydroxyde de Magnésium

CaCO₃ : le carbonate de calcium.

NaHCO₃ : bicarbonate de soude

CaCl₂ : chlorure de calcium

NaOH : hydroxyde de sodium

HCl : l'acide chlorhydrique

NaCl : chlorure de sodium

H₂SO₄ : l'acide sulfurique

Table des matières

Introduction général.....	1
Chapitre I : Généralités sur les phénomènes d’encrassement	
.....	2
I.1. Introduction :	2
I.2. Définition l’encrassement :.....	2
I.3. Différents types d’encrassement :.....	2
I.3.1. Encrassement par précipitation :.....	2
I.3.2 Encrassement par corrosion :.....	2
I.3.3 L’entartrage :.....	3
I.3.3.1 Définition.....	3
I.3.3.2 Phénomène d’entartrage :.....	5
I.3.3.4. Paramètres de l’entartrage :	6
I.3.3.5. Prévention et Traitement :	9
I.3.4 Encrassement par biologique :.....	10
I.3.5 Encrassement par réaction chimique :.....	10
I.3.6 Encrassement par solidification :.....	10
I.5. Paramètres influent sur l’encrassement :.....	10
I.4. Conclusion :	11
Chapitre II : Généralités sur les chaudières	
II.1 Introduction :.....	12
II.2 Définition :.....	12
II.3 Rôle d’une chaudière :	12
II .4 Classification des chaudières :.....	12

II.4.1 Classification par source de chaleur :	13
II.4.2 Classifications par type de fluide caloporteur :	17
II.4.3 Classification par gamme de puissance :	18
II.4.4 Classification par construction :	18
II.5 Principe de fonctionnement d'une chaudière :	21
II.6 Problèmes rencontrés avec une chaudière :	22
II.6.1 Manque d'eau d'alimentation :	22
II.6.2 Fatigue et fragilisation du métal :	22
II.6.3 Qualité d'eau :	22
II.7 Caractéristiques des eaux de chaudière :	22
II.7.1 Les dépôts :	23
II.7.2 La corrosion :	23
II.7.3 Le primage :	24
II.8 Conclusion :	24
Chapitre III : Etude expérimentale	
III.1 Introduction	25
III.2 Matériel et matériaux utilisés	25
III.2.1 Méthodes	25
III.2.2 Matériaux utilisés	25
III.2.2.1 Préparation des échantillons	25
III.2.2.2 Produit d'entartage	28
III.2.2.3 Produit d'encrassement	31
III.3 Résultat et discussion	31
III.3.1 Procédés de nettoyage	31

III.3.2 Procédure expérimental	34
III.3.3Préparation des solutions :	38
III.3.3.4Protocole de nettoyage chimique.	42
III.4 Conclusion	43
Conclusion Générale	45
Bibliographie :	46

Introduction Générale

Introduction générale

L'eau est le secret de la vie, car c'est le pilier dont elle dépend dans toutes les parties du monde, et la majeure partie de cette eau à la surface de la terre est constituée d'eau de mer.

L'eau de mer constitue environ 97% de l'eau de la planète, qui contient des substances dissoutes et des sels constitués d'ions. L'eau de mer est utilisée dans de nombreux secteurs et industries, tels que : le dessalement de l'eau (en raison de la rareté de l'eau douce) et les systèmes de refroidissement...

Mais en raison des sels et des substances dissoutes présentes dans l'eau de mer et en raison de plusieurs facteurs tels que la température et le pH élevés... Des problèmes apparaissent qui entravent le travail de ces industries, qui sont représentées dans : le phénomène de l'encrassement et l'entartrage.

L'encrassement c'est l'accumulation de matériaux indésirables sur les surfaces solides qui affecte un large éventail de processus industriels (les échangeurs de chaleur, les chaudières ...) et L'entartrage est l'accumulation de dépôts calcaires dus à la dureté de l'eau.

L'objectif de cette étude est de trouver des solutions pour éviter le phénomène d'encrassement et l'entartrage.

Dans le premier chapitre : Généralités sur les phénomènes d'encrassement (définition, les types de l'encrassement ...)

Le deuxième chapitre : Informations générales sur les chaudières, où nous découvrirons leurs types et les problèmes auxquels elles sont confrontées.

Le troisième chapitre : Nous allons mener une étude expérimentale sur l'entartrage et l'encrassement, en réalisant plusieurs expériences chimiques sur des échantillons d'acier.

Chapitre I

Généralités sur les phénomènes d'encrassement

I.1. Introduction :

Le phénomène de l'encrassement est un problème très complexe à traiter et il demeure parmi les causes qui réduisent le rendement des industries chimiques et les coûts de maintenance et de réparation. [1]

I.2. Définition l'encrassement :

L'encrassement des équipements et des conduites est un phénomène prépondérant dans la réduction du rendement des industries il contribue dans la réduction d'échange thermique, la réduction de la cadence des équipements ainsi que celle du temps de rendement globale due aux arrêts pour nettoyage.

L'encrassement peut être défini comme l'accumulation de dépôt de substances solides indésirables sur une surface causant ainsi un bouchage un colmatage ou bien simplement une réduction de volume. [1]

I.3. Différents types d'encrassement :

I.3.1. 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. [2]

I.3.2. 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. [2]

I.3.3. L'entartrage :

I.3.3.1. Définition

Formation d'un dépôt solide, adhérent aux parois intérieures d'un appareil dans lequel on vaporise une eau contenant certains corps en dissolution, notamment des sels calcaires. [3]



Figure I.1 : Dépôts concentration de tartre dans une tuyauterie [10]

Ce type de dépôt, constitué principalement de carbonate de calcium, est fréquent dans les zones où l'eau est très calcaire. Le débit baisse au fur et à mesure de l'entartrage (à pression équivalente), ce type d'encroutement réduit aussi la conduction thermique entre le fluide et le tube, celui induit une perte d'efficacité thermique dans les chaudières ou les échangeurs thermiques. [10]

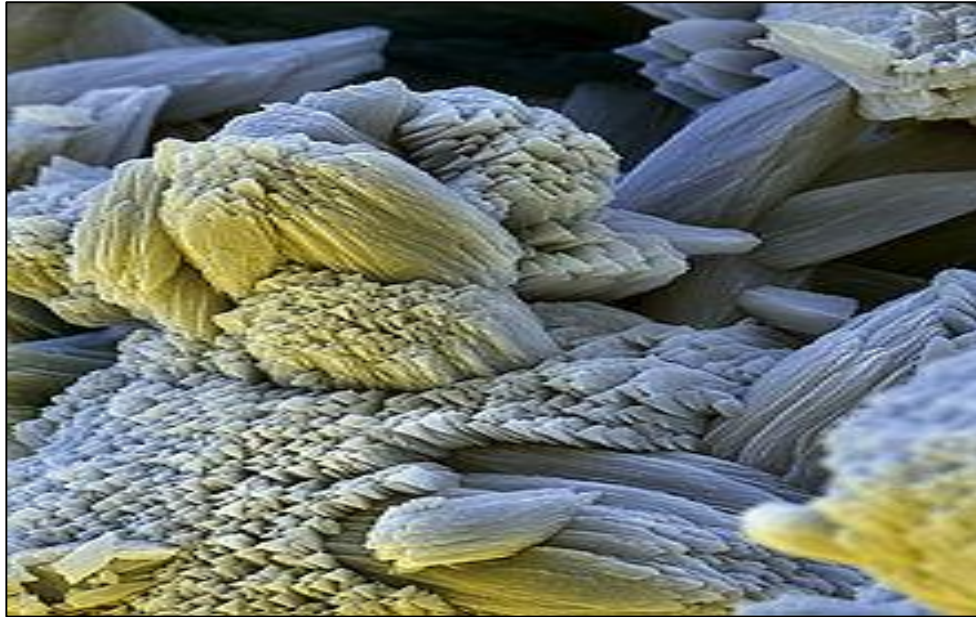


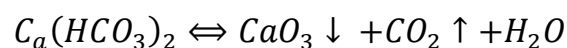
Figure I.2 : Cristallisation de sels minéraux, vue au microscope électronique [10]

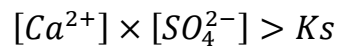
L'entartrage entraîne :

- Dégradation d'état des surfaces.
- Des pertes d'échange thermique.
- Des risques de corrosion sous les dépôts formés.
- Une augmentation des besoins de la maintenance des installations. [4]
- L'entartrage intervient lors de :
 - L'élévation de la température.
 - L'augmentation de la concentration en sels.
 - La variation du pH.
 - Diminution de la teneur en CO₂.

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

Il peut s'agir également du dépassement du seuil de solubilité d'un sel : dès que l'on atteint dans l'eau une quantité suffisante d'ions, un précipité peut se former. Dans le





Cas du sulfate de calcium, par exemple, le produit de la concentration des ions est supérieur à la constante de solubilité, il y aura précipitation des sels excédentaires.

D'une manière générale les tartres rencontrés sont listés ci-dessous :

- Carbonate de calcium : faible produit de solubilité / dépôts durs et adhérents.
- Sulfate de calcium : précipitation à température élevée / dépôts durs et adhérents.
- Tartres silicatés : en fonction du pH et de la température, on peut former des silicates de calcium ou magnésium qui vont donner des tartres difficilement éliminables.
- Phosphates de calcium : en présence de sels de dureté, les phosphates forment des boues relativement peu solubles.
- Hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$: dépôts non adhérents. [4]

I.3.3.2 Phénomène d'entartrage :

Le phénomène d'entartrage, fréquemment rencontré dans les installations hydrauliques, est une fatalité. Les dégâts provoqués sur les parois des conduites d'eau par l'accumulation de tartre seraient, chaque année, considérables et touchent des pans entiers de l'économie. Pour surmonter ce problème, il faut par exemple utiliser un traitement à l'acide, limiter la température de chauffage et remplacer les installations et les membranes défectueuses. Ceci contribue à l'augmentation du coût de production de l'eau traitée. A ces dépôts particulièrement néfastes, il faut ajouter tous les inconvénients relatifs à l'utilisation de l'eau dure dans la vie quotidienne. Pour toutes ces raisons, l'étude de la formation et de la prévention de tartre est une nécessité à la fois scientifique, économique et sanitaire. Cet ouvrage traite les conditions physico-chimiques de précipitation de sels peu solubles formant le tartre dans les unités de traitement des eaux ainsi que les moyens de lutte contre la formation du tartre. [5]

I.3.3.4. Paramètres de l'entartrage :

Il y a quatre paramètres.

- La présence de calcaire dans l'eau.
- La température de l'eau.
- La présence dans l'eau d'éléments favorisants.
- Influence de la nature de la canalisation.

I.3.3.4.1 La présence de calcaire dans l'eau :

- **Définition :**

Substance minérale caractérisée par une composition chimique dans laquelle prédomine le carbonate de calcium (CaCO_3), souvent d'origine organique (calcaires à foraminifères dont la craie, calcaires coquilliers), mais aussi d'origine chimique (calcite, calcaire oolithique, pisolithique, lithographique). Les roches calcaires sont inégalement résistantes, plus ou moins perméables, et susceptibles d'être attaquées par dissolution si l'eau qui les baigne est riche en gaz carbonique.

Suivant sa localisation, le calcaire peut également contenir de la dolomite et de l'argile (aragonite ou marne). [7]

- **La forme de calcaire :**

Les roches calcaires peuvent se former :

Soit, par accumulation de fragments de squelettes ou de coquilles calcaires, comme les coraux, les mollusques ou encore les protozoaires : on parle alors de calcaire d'origine organique, Soit, par précipitation chimique ou biochimique de carbonate de calcium : on parle alors de calcaire d'origine chimique. Parmi les calcaires d'origine organique, on trouve les calcaires à foraminifères comme la craie et les calcaires coquilliers.

Parmi les calcaires d'origine chimique, on trouve la calcite, le calcaire oolithique, pisolithique ou encore lithographique (utilisé en imprimerie avec un grain très fin). [8]

- **La différence entre le calcaire et le tartre :**

Le calcaire correspond au calcium et au magnésium contenus dans l'eau.

Le tartre correspond à des dépôts calcaires qui se solidifient en présence d'eau chauffée : cela peut prendre la forme de traces blanches sur de la vaisselle en train de sécher ou de dépôts blanchâtres au fond d'une bouilloire, dans des canalisations, dans un radiateur etc... [8]

- **Eviter les dépôts calcaires :**

Pensez à régler vos installations (chauffe-eau, ballon d'eau chaude) et appareils ménagers entre 55 et 60°C (les dépôts calcaires se forment plus facilement à partir de 60°C).

Lisez bien les instructions du constructeur sur l'utilisation des systèmes de filtration anticalcaires et antitartres pour vos lave-linge et lave-vaisselle.

Si vous avez une douche avec porte coulissante, passez un coup de raclette sur la paroi de la vitre après votre douche, cela évitera la stagnation de la vapeur et des projections d'eau.

Faites un détartrage de votre ballon d'eau chaude chaque année.

Nettoyez régulièrement le filtre du robinet avec une brosse à dent pour retirer les dépôts de tartre et éviter qu'ils ne s'accumulent.

Utilisez un mélange de gros sel et de vinaigre blanc pour débarrasser le fond de vos carafes et autres récipients des dépôts calcaires. Cela empêche la prolifération de germes et de bactéries dans l'eau et évite d'altérer son goût. [8]

- **La dureté de l'eau :**

La dureté de l'eau, sa concentration en sels minéraux, est appelée son TH, pour « Titre Hydrotimétrique ».

Il se mesure en degrés français (°f). Globalement, on parle d'une eau :

- Très peu calcaire si son TH est inférieur ou égal à 8°f

- Peu calcaire si son TH se situe entre 8 et 15°f
- Calcaire si son TH se situe entre 15 et 30°f
- Très calcaire, très dure, si son TH est supérieur à 30°f [9]

I.3.3.4.2. 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'entartrant 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. [6]

I.3.3.4.3 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. [6]

I.3.3.4.4 Influence de la nature de la canalisation :

Dans le cas des eaux moyennement ou peu entartrantes, 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 entartrantes, 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 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.

- Ecoulement de l'eau chauffée à 52°C dans des échantillons de tubes démontables. On réalise la mesure de l'entartrage par l'augmentation de poids des échantillons de tubes au cours du temps. Ces mesures quantitatives d'apparition du tartre ont été faites dans ces conditions sur trois matériaux : le cuivre, le PER et l'inox.

- Entartrage comparatif, après 30 jours d'écoulement d'une même quantité d'eau, à 55°C. [6]

I.3.3.5. Prévention et Traitement :

L'entartrage peut être combattu préventivement ou a posteriori :

- Préventivement par un contrôle de la minéralisation des fluides, quand cela est possible, par exemple en déminéralisant l'eau circulant dans les conduites, mais avec le risque qu'elle soit plus corrosive et qu'elle se charge en éléments traces métalliques (cuivre, zinc notamment) ou en calcium prélevé dans les conduites de ciment).

- Dans le cas de forages profonds (géothermie), le maintien de l'eau sous très haute pression limite la cristallisation et empêche l'ébullition, mais est une source de danger et de risque à maîtriser pour les installations et le personnel (Cf. risque d'explosion, de brûlures graves ou mortelles par eau ou vapeur).

- Postérieurement par le détartrage.

- Ce dernier peut être mécanique et/ou utiliser des produits chimiques dits détartrants, qui peuvent parfois aussi être source de corrosion ou d'un entartrage facilité (s'il dégrade les surfaces lisses par exemple). [10]

I.3.4. Encrassement par 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.

I.3.5 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. [2]

I.3.6. 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). [2]

I.5. Paramètres influent sur l'encrassement :

L'encrassement, par ses différents types, est contrôlé par plusieurs paramètres opératoires liés au fluide d'alimentation ou à la surface d'échange. Parmi ces paramètres, on peut citer :

- La vitesse d'écoulement du fluide.

- La concentration de la matière encrassant.
- La température de la surface d'échange de chaleur.
- La température du fluide.
- La nature de la surface d'échange.
- La composition de la charge. [2]

I.4. Conclusion :

En conclusion, l'encrassement est un phénomène connu sous le nom d'accumulation de matériaux solides à la surface, qui affecte une variété de processus, et pour cette raison, après l'avoir défini et en connaître chaque type, ce phénomène est encore complexe, et pour cela il est nécessaire de mener plus d'études sur ce problème et de connaître les moyens d'y remédier.

Chapitre II

Généralités sur les chaudières

II.1. Introduction :

Les productions de vapeur ou d'eau chaude occupent une place prépondérante dans la majeure partie des activités industrielles (alimentaires ou non). Ce dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique est la chaudière. [11]

La chaudière est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique. Industriellement, on utilise les chaudières pour produire la vapeur nécessaire au fonctionnement des procédés. La source de chaleur peut être fournie par un combustible (gaz, fioul, charbon) ou une résistance électrique. [12]

II.2. Définition :

Une chaudière est un « générateur de chaleur ». Il s'agit en effet d'un appareil ou d'une installation qui permet de transférer – en continu – de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (porteur de chaleur). Ainsi, tout dispositif produisant de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, ou de l'eau surchauffée est considéré comme une chaudière. Les appareils qui modifient la température d'un fluide thermique (grâce à la combustion) sont également considérés comme étant des chaudières. [13]

II.3. Rôle d'une chaudière :

Le rôle d'une chaudière est essentiellement de transmettre de l'énergie apparaissant sous forme de chaleur (avec ou sans combustion) à de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique devenant de la vapeur par détente. De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique. [14]

II.4. Classification des chaudières :

C'est une gageure que de vouloir établir une classification des chaudières industrielles, celle-ci faisant intervenir trop de critères non significatifs lorsqu'ils sont pris isolément, trop de variantes et trop de combinaisons possibles.

Il est évident que chaque modèle de chaudière possède, de par sa conception et ses dimensions en général, une limitation en capacité de production de vapeur ; mais il est bien rare de buter sur tous les critères de limitation en même temps et il suffit souvent de changer un paramètre pour étendre sensiblement la plage d'utilisation

Donc une description de chaudière se fait par classification :

II.4.1. Classification par source de chaleur :

- **Chaudières électriques :**

L'électricité n'est pas à proprement parler un combustible. C'est cependant une source d'énergie qui est parfois convertie en chaleur dans des chaudières électriques. Il existe plusieurs principes de chauffe. Les chaudières à résistances chauffent l'eau à l'aide d'une résistance électrique immergée dans l'eau. Les chaudières à effet joule chauffent l'eau à l'aide d'électrodes immergées dans l'eau.

C'est alors l'effet joule de l'eau qui permet le chauffage de l'eau ou la vaporisation. Les chaudières ioniques projettent des ions à grande vitesse (280 km/s) à l'aide d'un champ électrique, provoquant l'échauffement du liquide caloporteur. [15]

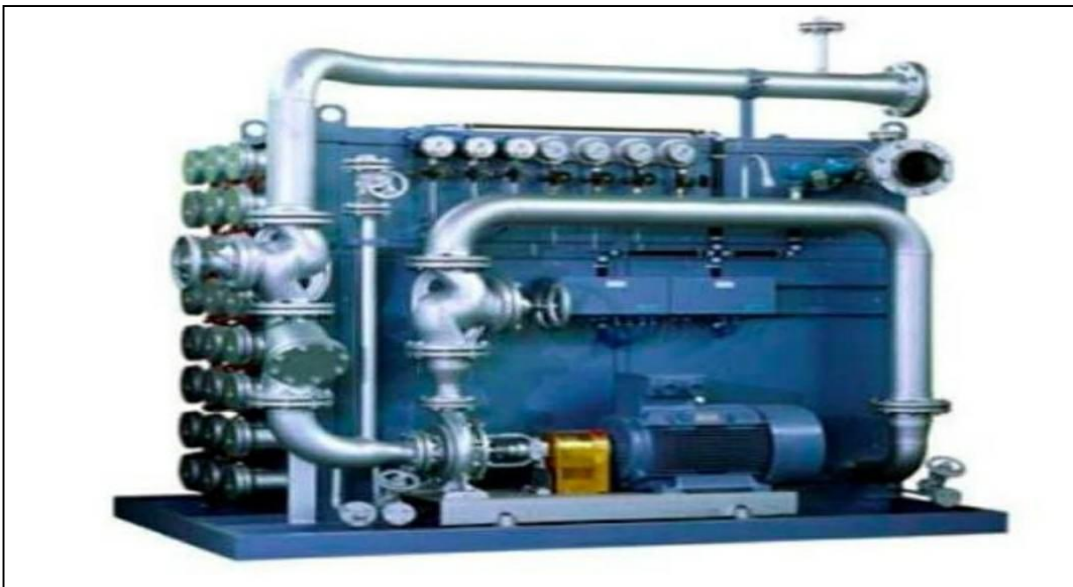


Figure II.1 : Chaudière électrique [15]

- **Chaudières à récupération :**

Une chaudière de récupération est une chaudière qui utilise la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à gaz, elle permet de récupérer les calories contenues dans les fumées pour produire de la vapeur.

La chaudière fonctionne en mode récupération pure (sans post des combustion), elle permet de récupérer l'énergie disponible dans les fumées à l'échappement de la turbine à combustion, pour produire de la vapeur surchauffée à partir d'eau déminéralisée à température ambiante. [15]

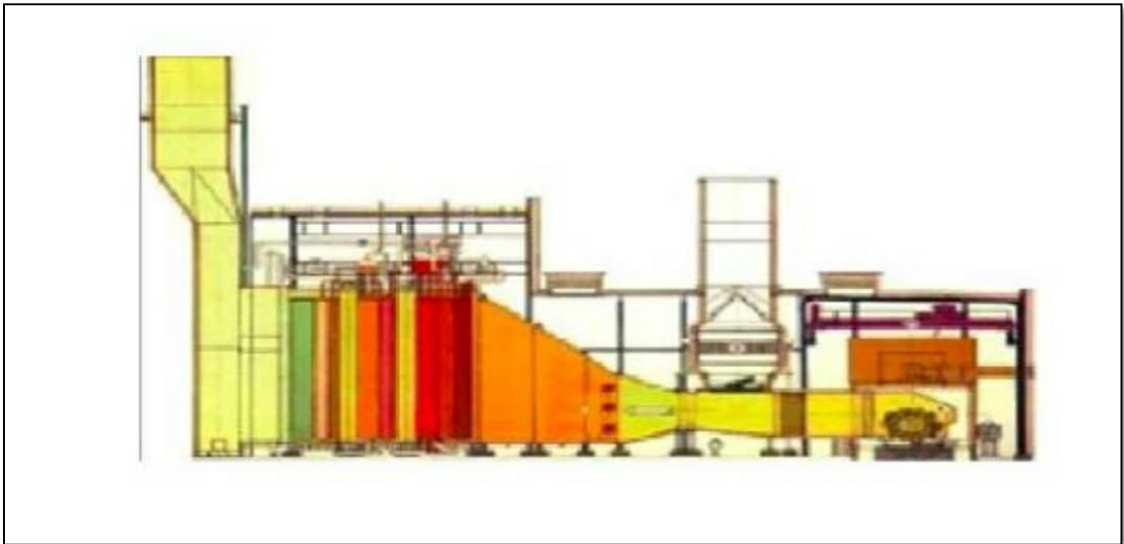


Figure II.2 : Chaudière à récupération [15]

- **Chaudière à combustion :**

- Chaudière à combustibles solide : caractérisé par des foyers les chaudières se sépare en trois types à combustion solide selon leur foyer.

- ✓ Les foyers à grilles
- ✓ Les foyers à charbon pulvérisé
- ✓ Les foyers à lit fluidisé



Figure II.3 : Chaudière à foyer [15]

- **Chaudière à combustibles liquide ou gazeux :**

Ce type de chaudière est généralement doté d'un brûleur qui s'occupe de la combustion.

- ✓ **Chaudière à combustion gazeuse :** le fonctionnement au gaz est un système à combustion : le gaz est brûlé dans une chaudière, avec un corps de chauffe. Celui-ci (petit radiateur) chauffe de l'eau qui est ensuite diffusée dans l'habitation par des tuyaux via une ou plusieurs pompes à eau. Ce type de chaudières est très répandu comme utilisation domestique ou bien dans l'industrie il présente des avantages (prix très abordable du gaz, rendement énergétique excellent...) comme des inconvénients (dégâts d'explosions ou d'intoxications).
- ✓ **Chaudière à combustion liquide :** De nombreuses habitations, ou usines industrielles sont équipées au fioul, les chaudières au fioul ont réalisé de considérables progrès en termes de rendement, d'écologie et d'hygiène. [15]



Figure II.4 : Chaudière à combustibles [15]

- **Centrale solaire :**

Une « chaudière solaire » a en l'occurrence des capteurs solaires thermiques analogues à ceux qui alimentent un chauffe-eau solaire ensuite une distribution par un réseau de tuyauteries semblable à celui utilisé dans les systèmes classiques, un (ou des) dispositif(s) de stockage de l'énergie thermique (ballon-tampon, dalle de béton) sont mis assurant le stockage, envoyant cette énergie à des émetteurs de chaleur (radiateurs basse température, dalle chauffante, etc.) bien qu'une régulation est indispensable.

Un système d'appoint permet de pallier les insuffisances du rayonnement. Il peut être totalement indépendant de l'installation solaire : cheminée, poêle à bois, convecteurs électriques, etc.

Il peut aussi être couplé à la partie solaire de l'installation. Ainsi, la régulation peut gérer la mise en route et l'arrêt de l'appoint, en fonction de l'ensoleillement, de la demande de chauffage ou d'eau chaude sanitaire. Dans ce cas, on utilise une chaudière classique (fioul, gaz, bois, électrique).[15]

II.4.2 Classifications par type de fluide caloporteur :

Une chaudière échange de l'énergie thermique avec différents types de fluides caloporteurs qui ensuite la véhiculent jusqu'au point d'utilisation.

- **L'eau chaude :**

Est principalement utilisée dans les systèmes de chauffage de locaux d'habitation, commerciaux ou industriels. Dans le domaine du chauffage central domestique, c'est quasiment le seul fluide utilisé

- **L'eau surchauffée :**

L'eau surchauffée est principalement utilisée dans le chauffage urbain. On peut aussi la trouver dans l'industrie. Pression et température courantes d'usage tournent au tour de 20 bars à 180 °C avec retour à 90 °C.

- **La vapeur saturée :**

Principalement utilisée dans les procédés industriels. La vapeur produite par la chaudière sert alors à chauffer des fluides au travers d'échangeurs. Des machines spécifiques comme les machines à papier peuvent également avoir besoin d'une alimentation en vapeur.

- **La vapeur surchauffée :**

La vapeur surchauffée sert principalement à être turbiner, généralement dans le but d'entraîner un alternateur pour produire de l'électricité. Ce principe est utilisé par les centrales thermiques. Certaines industries ont de déchets à éliminer, ces derniers utilisés comme combustibles leur permettent de produire de l'énergie électrique et tout ou partie de l'énergie thermique nécessaire à l'usine. On parle alors de cogénération.

- **Fluide thermique :**

Généralement des huiles, permettant d'atteindre de hautes températures sans nécessiter des pressions élevées.

Ils sont utilisés comme énergie thermique par exemple dans l'industrie des panneaux de bois aggloméré. L'utilisation de fluide thermique permet également de meilleures précisions dans la régulation de température. Cependant, l'utilisation de fluide thermique génère de nombreuses contraintes d'exploitation pour les industriels, ils sont de plus en plus remplacés par de la vapeur. [5]

II.4.3. Classification par gamme de puissance :

- **Chaudière domestique** : utilisé pour le chauffage dans les habitas et les bâtiments sa consommation est inférieur à 70 KW.
- **Chaudière industrielle** : dans l'industrie l'utilisation de la chaudière a une importance massive, elle est utilisée dans plusieurs domaines tels que (la production du lait lacté, industrie de textile etc. ...) sa consommation dépasse les 70 KW. [15]

II.4.4. Classification par construction :

- **Les chaudières à tubes de fumée :**

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 1 à 25 tonnes/heure, en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul.

Fonctionnement : Le tube foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière.

Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière de la chaudière, ce troisième caisson débouche sur la cheminée pour évacuation des fumées vers l'extérieur. Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la cuve, la vaporisation par apport de calories.

Précautions : Il est impératif de traiter l'eau de chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression-

température plus long, un risque de surchauffe au niveau de tube foyer, une surconsommation de combustible, une augmentation de la température des fumées au niveau de la cheminée... [16]

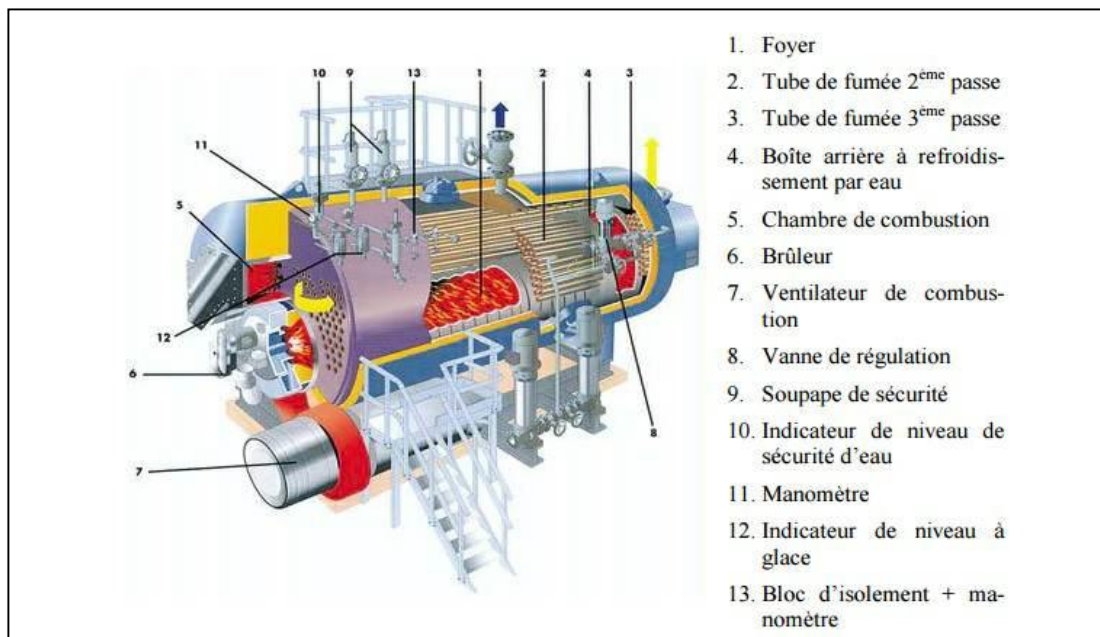


Figure II.5 : Chaudière à tubes de fumée [16]

- **Les chaudières à tubes d'eau :**

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 tonnes/heure, en moyenne et haute pression. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets.

Fonctionnement : Ce type de chaudière possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) 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 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 inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur. Dans le domaine des hautes pressions, une pompe peut être installée pour faciliter cette circulation du haut vers le bas.

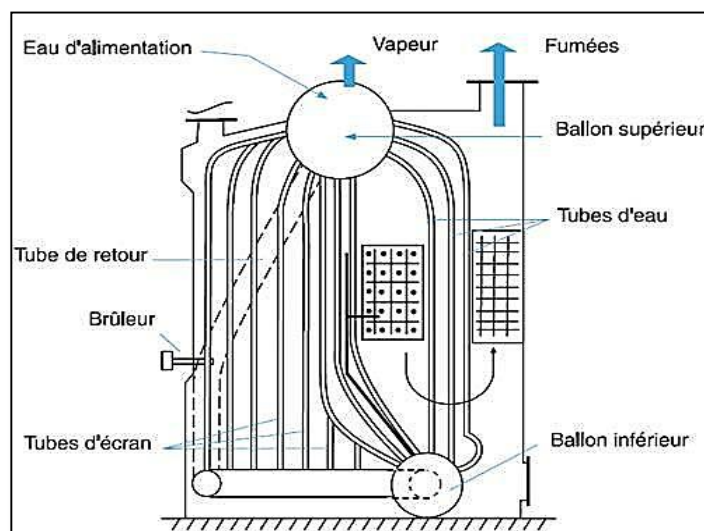


Figure II.6 : Chaudière à tubes d'eau [12]

Il y a donc circulation de l'eau dans des tubes placés à l'intérieur d'une enceinte contenant les gaz chauds.

Précautions : La formation de tartre dans les tubes serait préjudiciable au fonctionnement de la chaudière à tubes d'eau pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des chaudières à tubes de fumée. En outre, l'obturation des tubes pourrait se révéler dangereuse, ce qui ajoute à la nécessité de traiter l'eau de chaudière. La paroi extérieure des tubes est exposée aux dépôts de suies et nécessite une action de ramonage pendant le fonctionnement de la chaudière. Cette action est obtenue par injection de vapeur ou d'air comprimé via un tube perforé. [16]

- Comparaison des performances

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	élevée
Sécurité	médiocres	bonne
Encombrement	faible	fort
Prix	limité	élevé
Applications usuelles	<ul style="list-style-type: none"> • moyennement élevée • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bar 	<ul style="list-style-type: none"> • importante • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)

Figure II.7 : Comparaison des performances [12]

- **Chaudières compactes :**

Elle possède une enveloppe externe cylindrique contenant deux de gros diamètres dans lesquels est placé le foyer. Les gaz de combustion sortent du tube foyer dans une chambre en Brique réfractaire et sont véhiculés à travers les tubes de petits diamètres situés de part et d'autre du Tube foyer. Ces tubes représentent une grande surface d'échange pour chauffer l'eau. Les fumées sont ensuite extraites de la chaudière face avant par un extracteur puis à travers la cheminée. Elle se détermine par deux modèles :

- ✓ Les chaudières compactes à deux passes
- ✓ Les chaudières compactes à trois passes [15]

- **Chaudières à retour de flamme :**

La chambre de combustion est en forme de dé et le brûleur est situé au centre. La flamme revient dans cette chambre vers l'avant de la chaudière. Les tubes de fumées entourent le foyer et permettent l'évacuation des gaz à travers la cheminée située à l'arrière de la chaudière. [15]

II.5. Principe de fonctionnement d'une chaudière :

Quel que soit le modèle que vous avez, le principe de fonctionnement d'une chaudière repose sur des éléments qui varient peu :

- ✓ Une chaudière a besoin d'un carburant, d'une source d'énergie : bois, fioul, gaz, électricité, ou plus récemment, air.
- ✓ Pour les chaudières à combustion, le carburant est brûlé, et c'est cette action qui produit de la Chaleur.
- ✓ Pour les modèles électriques ou thermodynamiques, il n'y a pas de combustion, mais l'utilisation d'une source d'énergie "invisible".
- ✓ Dans tous les cas, l'énergie utilisée ou dégagée par la combustion sert à produire de la chaleur qui se transmet ensuite à des circuits reliés à des émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) et/ou au dispositif d'alimentation en eau chaude.

✓ Les vapeurs dégagées et résidus de combustion sont évacués, sauf dans les modèles à condensation, dans lesquels la vapeur est réutilisée en circuit interne. [5]

II.6. Problèmes rencontrés avec une chaudière :

II.6.1. Manque d'eau d'alimentation :

Le manque d'eau d'alimentation est considéré comme l'accident de référence pour les installations thermiques équipées avec des générateurs de vapeur. Il peut être provoqué par l'arrêt des pompes alimentaires, la rupture de la tuyauterie principale d'alimentation, le blocage de la vanne principale d'alimentation, par négligence ou encore par la défaillance de la régulation. Ces accidents menacent l'intégrité structurale du système et provoquent l'explosion des parties sous pression du générateur de vapeur. [17]

II.6.2. Fatigue et fragilisation du métal :

Les chocs thermiques provoquent des cycles de dilatations restreintes, engendrent des gradients de contraintes qui s'initieront généralement sur les défauts géométriques des surfaces. La fatigue à chaud est un autre facteur qui traduit une évolution en fonction du temps et sous l'effet des contraintes de service qui ont la tendance à accélérer des phénomènes de précipitation. [17]

II.6.3. Qualité d'eau :

La qualité d'eau influe forcément sur les facteurs qui accélèrent la destruction des surfaces internes des tubes vaporisateurs. Il est obligé de traiter l'eau de la chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube du foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression température plus long, un risque de surchauffe au niveau du tube du foyer, une surconsommation du combustible, une augmentation de la température des fumées à la sortie du générateur de vapeur. [17]

II.7. Caractéristiques des eaux de chaudière :

La pression et les caractéristiques de la chaudière définissent la qualité de l'eau qui est nécessaire à la production de vapeur.

La séquence des traitements est fonction de l'espèce et de la concentration des éléments de contamination qui se trouvent dans l'eau d'appoint et de la qualité de l'eau traitée que l'on désire obtenir.

Trois phénomènes indésirables liés à la qualité de l'eau sont redoutés dans les chaudières :

- ✓ La formation de dépôts
- ✓ La corrosion
- ✓ Le primage

II.7.1 Les dépôts :

Les composés les plus courants que l'on retrouve dans les dépôts sont le phosphate de calcium, le carbonate de calcium et les divers oxydes de fer. Les dépôts forment une isolation sur le tube et réduisent par conséquent la diffusion de la chaleur donc le rendement de la chaudière. Des dépôts importants peuvent provoquer des surchauffes locales qui peuvent conduire à des percements voire des ruptures du tube.

II.7.2 La corrosion :

La corrosion de l'acier par l'eau neutre ou légèrement alcaline est lente.

Si le pH de l'eau est légèrement acide, dû le plus souvent à la présence de gaz acide dissous, la corrosion est plus rapide.

Elle est encore accélérée par la présence de traces d'oxygène. Elle peut avoir lieu dans le système d'approvisionnement d'eau, dans le générateur de vapeur et dans les tuyauteries de retour de condensats.

La lutte contre la corrosion des circuits d'eau et de vapeur, passera par l'élimination de l'oxygène par des moyens physiques ou chimiques.

Un autre type de corrosion est dû à une attaque par des produits alcalins (corrosion caustique ou caustique gauging). Elle se produit dans certaines zones lorsqu'il y a concentrations caustiques due à la formation de bulles de vapeur (alternance vapeur /

eau avec formation de dépôt des sels suite à l'évaporation, puis corrosion sous dépôt).

II.7.3 Le primage :

Le troisième problème important est l'entraînement de l'eau de la chaudière dans la phase vapeur. Cela peut être dû à :

- ✓ Un effet mécanique : entraînement de l'eau par la vapeur
- ✓ La volatilité de certains sels de l'eau de chaudière comme la silice ou les sels de sodium
- ✓ La formation de mousse.

Les trois principes fondamentaux qui permettent de maîtriser ces problèmes sont :

- ✓ Le prétraitement de l'eau avant de l'introduire dans la chaudière pour réduire les éléments chimiques non souhaitables (calcium ...) les gaz et les matières en suspension.
- ✓ Le traitement de l'eau d'alimentation de la chaudière, de l'eau de chaudière, des condensats avec des produits de conditionnement.
- ✓ La purge, pour limiter la concentration en produit chimique de l'eau de chaudière par évacuation d'une partie de l'eau contenue dans la chaudière. [18]

II.8 Conclusion :

A la fin de ce chapitre, et après avoir fait une étude générale des chaudières, leur définition et connaissance de leurs types, nous avons pu voir l'évolution de leurs performances et comprendre le principe de travail de chaque type

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les procédures expérimentales que nous appliquerons aux échantillons et aux produits chimiques, ainsi que les méthodes utilisées pour étudier le phénomène d'entartrage et l'encrassement.

III.2 Matériel et matériaux utilisés

III.2.1 Méthodes

Méthode de nettoyage chimique, elle consiste à utiliser une solution de la soude (NaOH) et acide chlorhydrique (HCl), chlorure de sodium (NaCl), L'acide sulfurique (H₂SO₄), ont respectent des concentrations bien défini et températures connus suivant la gravimétrie (méthode perte de masse), elle décrit l'un de méthodes d'analyse chimique quantitative effectuée en déterminant par pesée la masse d'un produit formé ou éliminé.

III.2.2 Matériaux utilisés

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

III.2.2.1 Préparation des échantillons

- **Choix des plaques**

L'acier au carbone (C-1020)

Propriété mécanique d'acier 1020

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

Résistance à la traction	Force de rendement	Dureté brinell
420MPA	350MPA	121

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

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

Elément	%	+ /-	Limite
Ti	<0.00	0.054	
V	0.03	0.024	
Cr	0.01	0.021	0.00-0.20
Mn	0.49	0.062	0.30-0.60
Fe	98.13	0.108	98.00-99.80
Ni	<0.00	0.046	0.00-0.30
Cu	<0.00	0.015	
Nb	<0.00	0.006	
Mo	<0.00	0.007	0.00-0.05
C			0.17-0.23
P	≤0.04		
S	≤0.05		

- **Découpage des plaques**

Nous avons découpé une plaque d'acier sous forme des petites dimensions pour facilite l'utilisation



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

- **Polissage des plaques :**

Utilisant le papier verre utilise 60-80-100-120-220-320-1000-1200-2000-2500 (échelle Italienne), on fait le polissage de notre échantillon avec l'appareil polisseuse pour homogène la surface et éliminer les impuretés, après le polissage l'échantillon est ensuite soigneusement débarrassé des dernières traces d'abrasif par lavage à l'eau et un séchage. Ensuite, il est frotté sur la pâte puis lavé à l'eau.



Figure III.2 : Appareil polisseuse



Figure III.3 : Echantillons après le polissage

- **Pesée les plaques :**

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

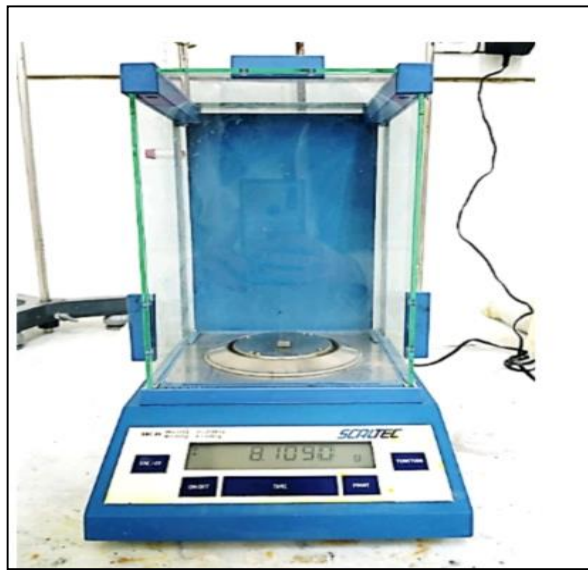


Figure III.4 : Un échantillon sur la balance

III.2.2.2 Produit d'entartage

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

Nous avons utilisés le bicarbonate de soude (NaHCO_3) et le sel de chlorure de calcium (CaCl_2) pour préparer la pâte du tartre (carbonate de calcium CaCO_3) pour faire une couche dur sur nos échantillons.

- **CaCl_2** : Chlorure de calcium (ou déchlorure de calcium).

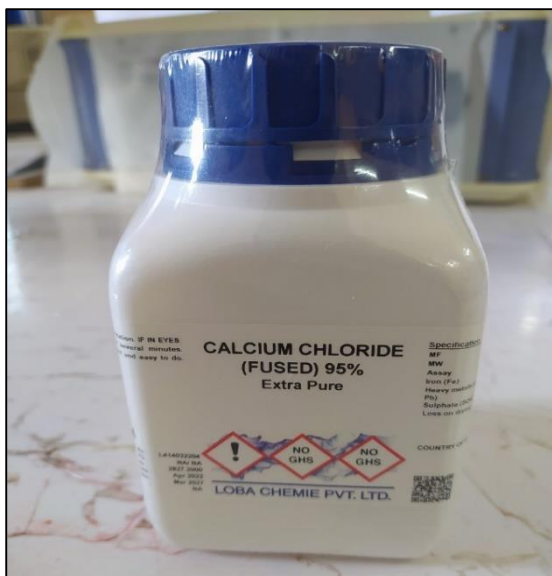


Figure III.5 : Chlorure de calcium

Formule chimique : CaCl_2 (anhydre).

(Cl = 63,89 %, Ca = 36,11 %).

Masse molaire = $110,984 \pm 0,008 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

C'est un composé inorganique, sel solide à la température ambiante, anhydre, déliquescent et très soluble dans l'eau.

Tableau III .3 : Caractéristiques principales de CaCl_2 .

Produit (anhydre)	
% CaCl_2	>96%
Masse volumique	2150 Kg /m ³
Fusion	772°C
Solubilité à 20°C	745g /l

– NaHCO_3 : Bicarbonate de sodium (ou hydrogénocarbonate de sodium).



Figure III.6 : Bicarbonate de sodium

Formule chimique : NaHCO_3

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

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

C'est un solide blanc, de formes variables, qui se présentent souvent sous forme de poudre. Il est le sel de sodium acide de l'acide carbonique [CO_3 , H_2O].

Caractéristiques principales :

Tableau III .4 : Caractéristiques principales de NaHCO_3

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 :**

On mélange de chlorure de calcium CaCl_2 avec bicarbonate de soude NaHCO_3 dans un bicher et mettre de l'eau de robinet pour faire la pâte et un échantillon propre après polissage, et ensuite on met le mélange sur une plaque chauffante à

une température donnée pendant quelques minutes, à la fin donc prendre un échantillon entartré.

- **La formation du tartre :**



Le carbonate de calcium est le composé majeur des calcaires comme la craie.



Figure III.7 : Des échantillons entartrés

III.2.2.3 Produit d'encrassement

- **Fluide encrassant**

Le pétrole brut est une huile minérale d'origine naturelle, constitué d'un mélange d'hydrocarbure et d'impuretés associées (soufre, par exemple). Il existe en phase liquide aux températures et pressions de surface normales et ses caractéristiques physiques (densité, viscosité, etc.) sont extrêmement variables.

III.3 Résultat et discussion

III.3.1 Procédés de nettoyage

- **Choix des solutions :**

- **La soude NaOH :**

L'hydroxyde de sodium (NaOH), également appelé soude caustique, est une base forte et fortement exothermique qui se présente, à température ambiante, sous forme solide. Il est constitué de cations sodium (Na^+) et d'anions hydroxyde

(OH^-). Il est très soluble dans l'eau. Sa solution aqueuse est transparente et souvent appelé soude. Il est provoqué des éclaboussures dangereuses. Car la soude est irritante et corrosive, tant pour la peau que pour les yeux et les voies respiratoires et digestives. Elle doit donc être manipulée avec précaution.

Température d'ébullition 1388°C

Point de fusion 318°C

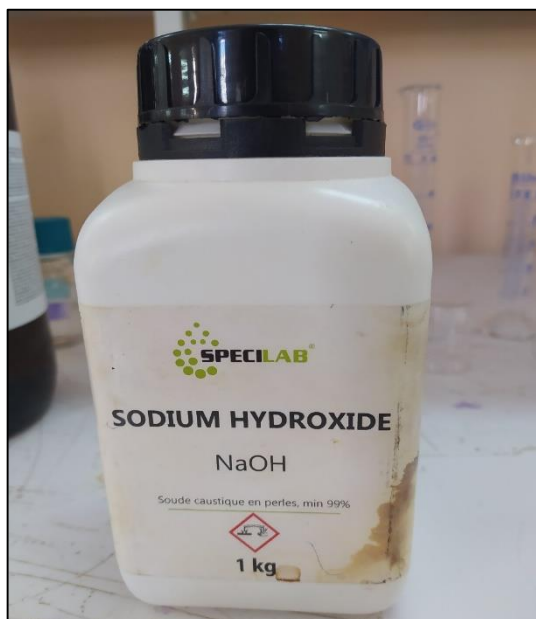


Figure III.8 : L'hydroxyde de sodium

- L'acide chlorhydrique HCl :

L'acide chlorhydrique est une solution de chlorure d'hydrogène dans l'eau. Le chlorure d'hydrogène, un acide fort, et un gaz diatomique de formule chimique HCl qui s'ionise totalement en solution aqueuse pour donner toute une variété d'espèces chimique, notamment des anions chlorure Cl^- des cations hydronium H_3O^+ , c'est derniers étant en moyenne solvates par cinq molécules d'eau. Il se présente sous forme d'un liquide incolore d'aspect aqueux à l'odeur piquante très reconnaissable. L'acide concentré est très corrosif, avec des émanations ou <<fumées>> toxique, et il doit être manié avec précaution.

Température d'ébullition $:-30^\circ\text{C}$, solution à 37%

Point de fusion : 48°C, 38% HCl

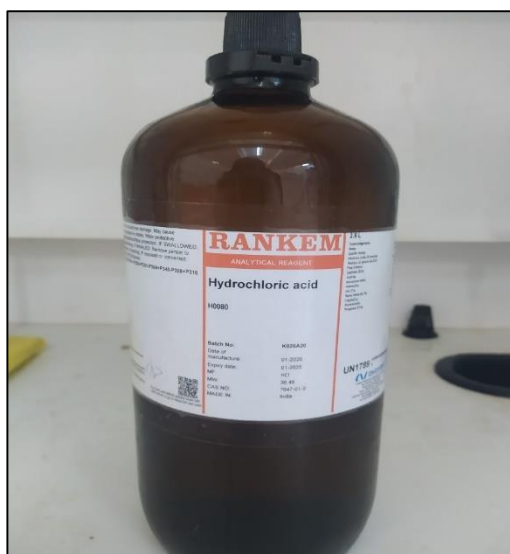


Figure III.9 : Acide chlorhydrique

- **Chlorure de sodium (NaCl)**

Le chlorure de sodium est un composé chimique ionique de formule NaCl, on l'appelle plus communément sel de table ou sel de cuisine.

Masse molaire : 58.44 g/mol

Masse volumique : 2.16g/cm³

Point d'ébullition : 1465 C°



Figure III.10 : Chlorure de sodium

- **L'acide sulfurique (H₂SO₄)**

Appelé aussi « Sulfate d'hydrogène », intervient dans la fabrication d'engrais et de nombreux produits chimiques (détergents, acide phosphorique).

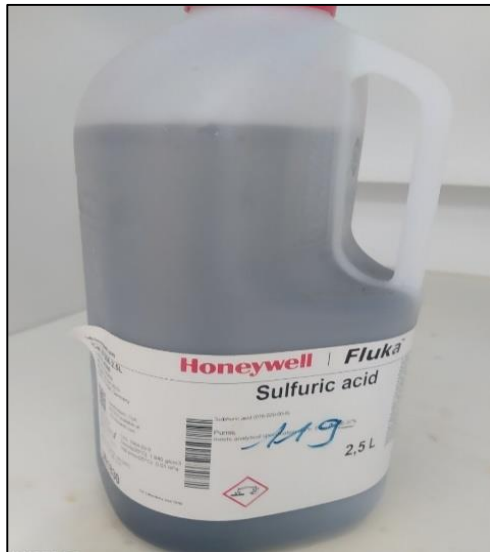


Figure III.11 : Acide sulfurique

III.3.2 Procédure expérimental

- **L'entartrage :**
 - On mélange CaCl₂ et NaHCO₃ et l'eau de robinet dans un cristalliseur

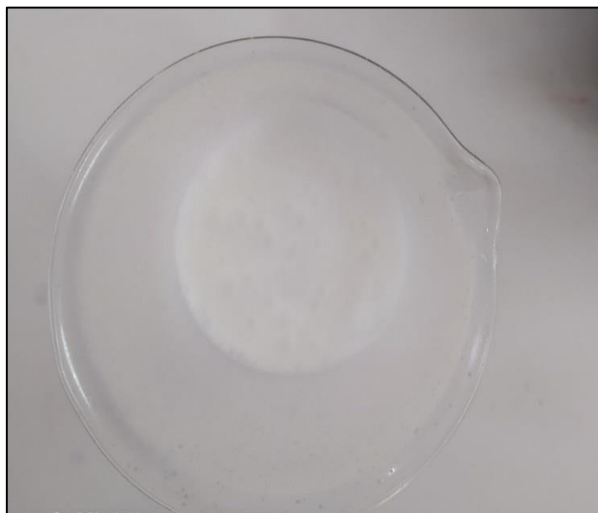


Figure III.12 : Mélange de CaCl₂ et NaHCO₃ et l'eau de robinet

- On met l'échantillon dans le mélange
- On met le cristalliseur sur une plaque chauffante à température 40°C jusqu'à la formation d'une couche de tartre sur l'échantillon

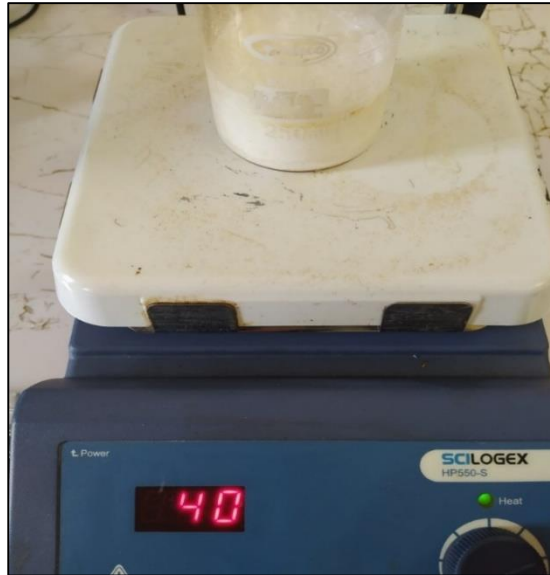


Figure III.13 : Les échantillons dans le mélange

- Après cette étape (formation du dépôt sur l'échantillon) on laisse les échantillons pour le séchage pendant 5 à 8 jours.



Figure III.14 : Echantillon après le séchage du tartre

Tableau III.5 : Les masses des échantillons avant et après l'entartrage.

	m_0	m_1 : échantillon entartré
Echantillon 1	7,15 g	9,13 g
Echantillon 2	7,80 g	9,68 g
Echantillon 3	5,76 g	7,80 g

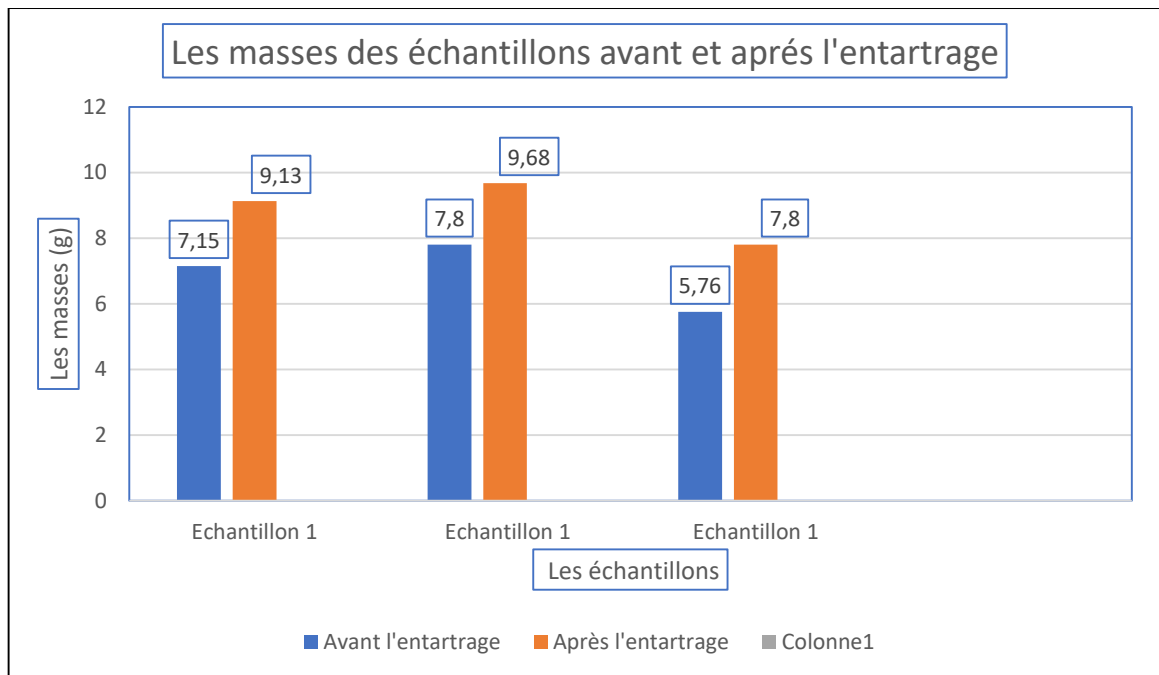
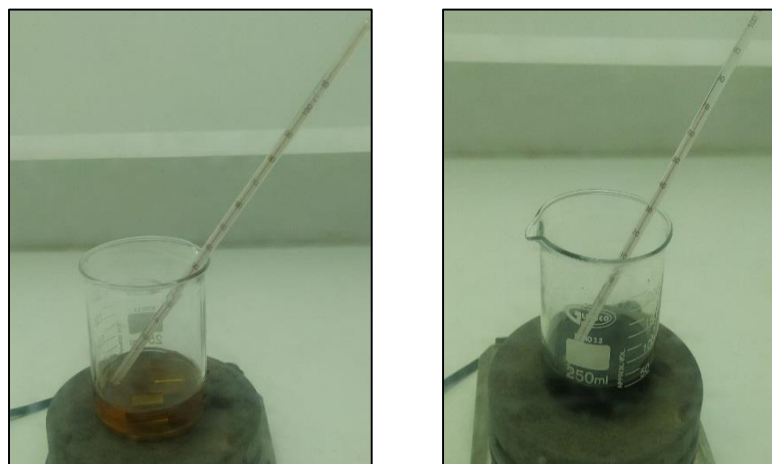


Figure III.15 : Les masses des échantillons avant et après l'entartrage

- **L'encrasse :**

- On prendre trois cristallisoirs et on ajoute à chacune une quantité d'un type d'huile. On met les cristallisoirs sur une plaque chauffant à haute température jusqu'à on obtient une couche d'encrasse.



a

b

Figure III.16 : Avant et après l'échauffement des huiles

- Après un certain temps, on observe la formation d'une couche de sédimentation. Nous le mettons pendant une heure à une température de 70° et pendant deux heures à une température de 60° .



Figure III.17 : L'échantillon avant la formation d'encrasse



Figure III.18 : L'échantillon après la formation d'encrasse

Tableau III.6 : Les masses des échantillons avant et après l'encrassement.

	m_0	m_1 : échantillon encrassé
Echantillon 1	8,5585 g	8,5658 g
Echantillon 2	7,4050 g	7,4155 g
Echantillon 3	6,1697 g	6,1748 g

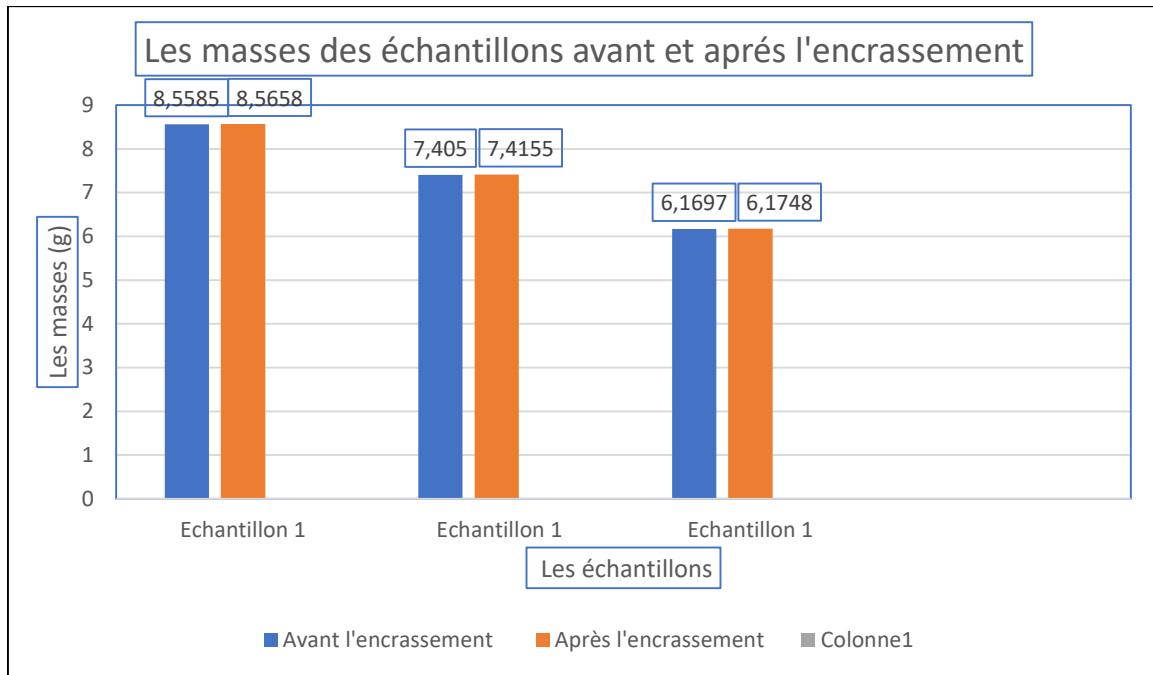


Figure III.19 : Histogramme représente les masses des échantillons avant et après l'encrassement

III.3.3. Préparation des solutions :

- **La soude NaOH :**

On a préparé un solution de la soude de différente concentration à partir de la loi :

$$V_1 \rightarrow m_2 \rightarrow 100\%$$

$$m_1 \rightarrow C_1$$

1. Solution de concentration 2% de NaOH

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

$$m_1 \rightarrow 2 \%$$

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

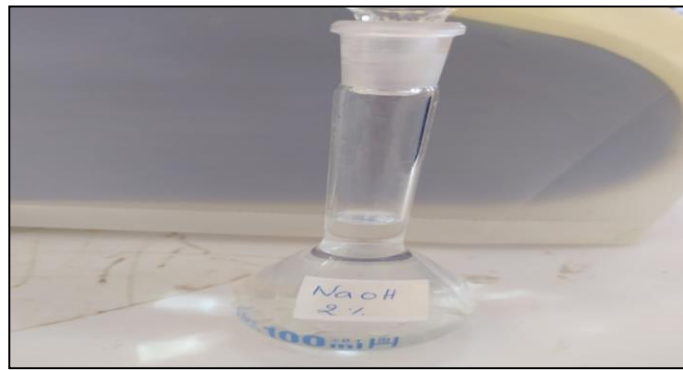


Figure III.20 : Solution aqueuse de NaOH (2%)

- **Chlorure de sodium NaCl**
- On a préparé une solution de la soude de différente concentration à partir de la loi :

$$V_1 \rightarrow m_2 \rightarrow 100\%$$

$$m_1 \rightarrow C_1$$

1. Solution de concentration 1% de NaCl

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

$$m_1 \rightarrow 1 \%$$

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



Figure III.21 : Solution aqueuse de NaCl (1%)

- **L'acide chlorhydrique HCl**

On a préparé 2 solutions de L'acide chlorhydrique HCl de différente concentration pour prendre une concentration d'HCl on a calculé le volume de chaque concentration avec les lois suivantes :

$$C_1V_1 = C_2V_2 \rightarrow V_1 = \frac{C_2V_2}{C_1} \dots\dots\dots (1)$$

$$C = 10 \text{ pd /M} \dots\dots\dots (2)$$

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

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

1. Solution de concentration 1 % d'HCl

$$V_1 = \frac{1}{37} * 100$$

$$V_1 = 2.7 \text{ ml}$$



Figure III.22 : Solution aqueuse de HCL (1%)

2. Solution de concentration 2 % d'HCl

$$V_1 = \frac{2}{37} * 100$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

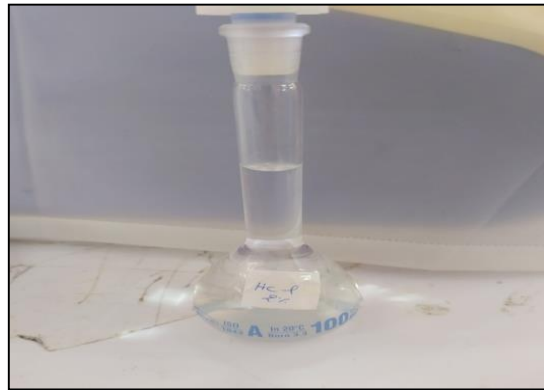


Figure III.23 : Solution aqueuse de HCl (2%)

Figure III.23 : Solution aqueuse de HCL (2%)

- **L'acide sulfurique H₂SO₄**

- On a préparé 1 solutions de L'acide chlorhydrique H₂SO₄ de différente concentration pour prendre une concentration d'H₂SO₄ on a calculé le volume de chaque concentration avec les lois suivantes :

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

1. Solution de concentration 1 % d'H₂SO₄

$$V_1 = \frac{1}{95} * 100$$

$$V_1 = 1.05 \text{ ml}$$



Figure III.24 : Solution aqueuse de H₂SO₄ (1%)

III.3.3.4. Protocole de nettoyage chimique :

On a suivi les protocoles suivants au niveau du laboratoire :

Protocole 1 :

- On prendre l'échantillon entartré après le pesage et on le mettre dans un bicher qui contient solution basique NaOH 30 ml.
- On fait le Nettoyage avec la solution NaOH avec pendant 03 minet chaque 1min on prélève l'échantillon pour peser leur masse.
- Après on obtient l'échantillon et on le met dans un notre solutions aqueuse d'HCl et suivre leur diminution du masse jusqu'à finir le nettoyage.

Tableau III .7 : Différents pesage des échantillons après nettoyage

	NaOH	HCl
m2 (g)	9.5233	8.1197
m3 (g)	8.3870	7.2842
m4 (g)	7.8211	7.1434

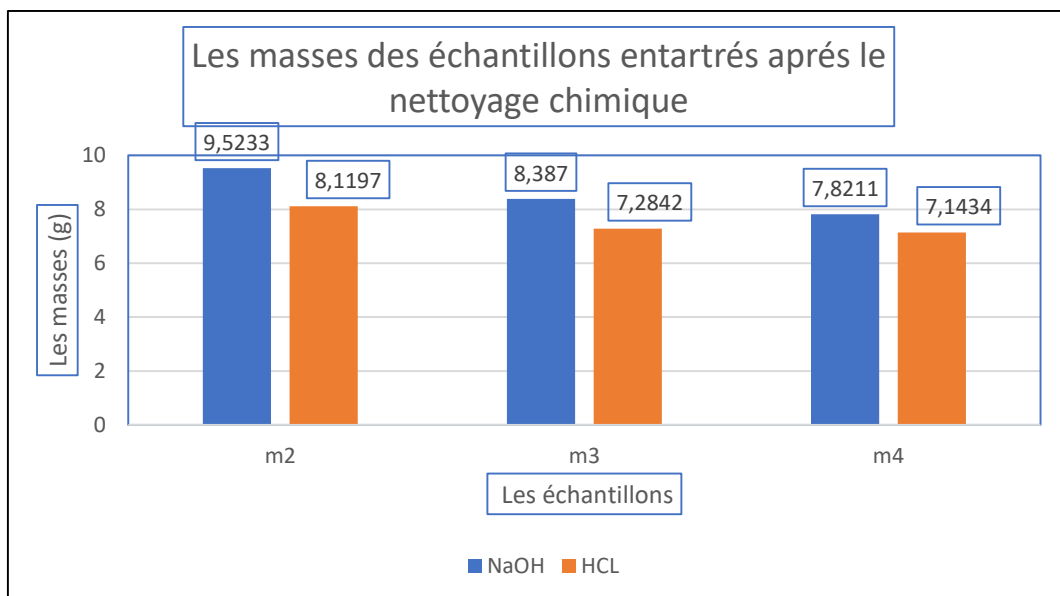


Figure III.25 : Les masses des échantillons entartrés après le nettoyage chimique

Protocole 2 :

Nous prélevons des échantillons encrassés d'huiles et les mettons partout

Un échantillon dans 03 bécher contenant trois solutions (NaOH, H₂SO₄, HCl).

- Le nettoyage est effectué avec une solution d'hydroxyde de sodium, une solution de HCL et une solution de H₂so₄.

- Après 1 minutes et 2 et 3 minutes, nous prélevons l'échantillon et pesons sa masse jusqu'à la fin nettoyage.

Tableau III .8 : Différents pesage des échantillons après nettoyage

	1 min	2 min	3 min
NaCl	6.1705	6.1701	6.1695
HCl	8.5610	8.5587	8.5570
H ₂ SO ₄	7.4066	7.4052	7.4051

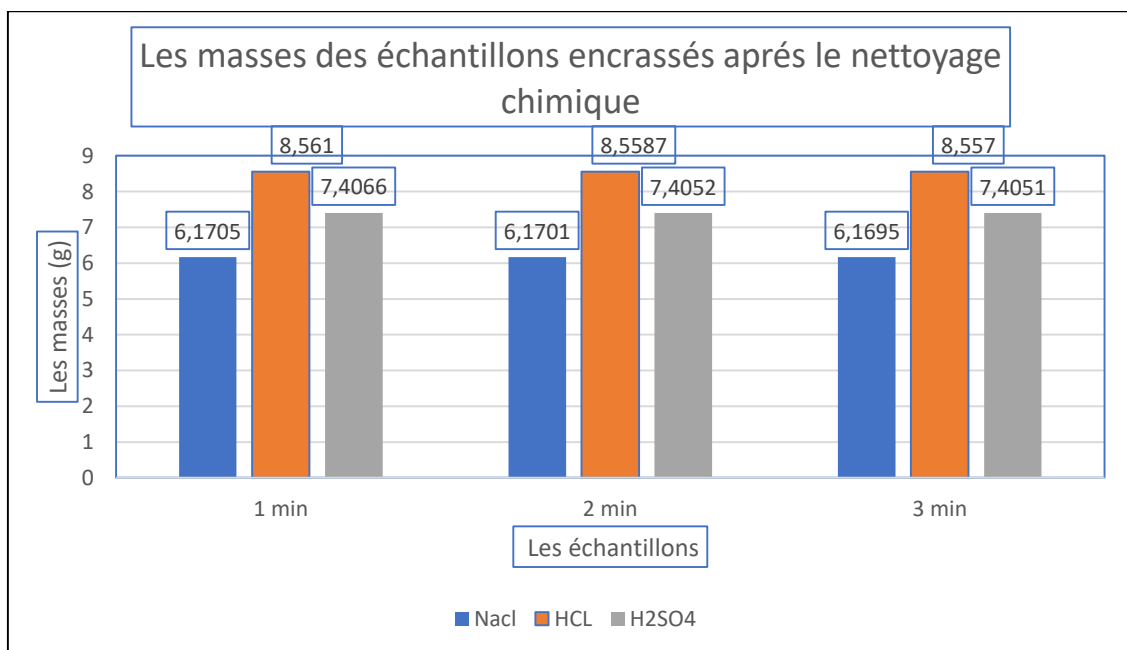


Figure III.26 : Les masses des échantillons encrassés après le nettoyage chimique

III.4 Conclusion

A la fin de ce chapitre, et après l'étude expérimentale que nous avons menée sur les échantillons, nous connaissons la production la plus nettoyante et détachante, nous pouvons conclure que la solution qui nettoie rapidement et très efficacement est une solution de Hcl.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, et après l'étude que nous avons réalisée, dans laquelle nous nous sommes familiarisés avec l'étude du phénomène d'encrassement, qui se définit comme l'accumulation de matériaux indésirables à la surface, qui affecte un groupe d'industries (les échangeurs de chaleur, les chaudières ...)

Et après les expériences chimiques que nous avons réalisées sur un groupe d'échantillons, dont nous avons parlé dans le troisième chapitre, car le but d'eux était de connaître la solution qui peut enlever les taches qui se sont formées et aussi la plus propre.

On peut dire que la solution d'acide chlorhydrique est la solution la plus efficace et a pu éliminer les dépôts, mais a provoqué une diminution de la masse des éléments en raison de la différence notable entre la masse initiale et la masse après nettoyage, on peut donc dire que les solutions de nettoyage nettoient rapidement, mais elles corrodent les métaux ou le fer, et cela affecte négativement les industries.

Et pour cela, comme suggestion que l'on peut présenter pour éviter la corrosion, c'est l'utilisation d'anticorrosion en plus des solutions de nettoyage, et aussi pour réduire la formation de ces dépôts, il faut utiliser anti tartre, anti encrassement et vérification la température et le ph.

Bibliographie :

- [1] Timo Schmitt ; chapitre 3 : le phénomène d'encrassement, SCRIBD
- [2] Définitions : entartag, entartrement, LAROUSSE
- [3] <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/entartrage/29864>
- [4] Problématique liées à la qualité d'eau et aux conditions exploitation, Memento degremont
- [5] <https://www.amazon.com/Lentartrage-dans-unit%C3%A9s-traitement-eaux/dp/3330854049>
- [6] Entartag _ lenntech, lenntech . Fr
- [7] Calcaire _ Définition , Calcaire Dictionnaire environnement , m.actu-environnement.com
- [8] PHILIPPE BEAULIEU Médecin, Responsable du département Qualité-Santé du C.I.eau , Le calcaire : ses origines et son utilité dans l'eau que nous buvons.
- [9] Différence entre tartre et calcaire : définitions et explications

15.OCTOBRE 2021, bwt.com

- [10] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Entartrage>
- [11] mboumboue ; Introduction Générale - Chaudières, SCRIBD
- [12] Introduction : Les chaudières à combustible : Les chaudières à tubes de fumée, DOCPLAYER
- [13] CHAUDIÈRE : DÉFINITION, TYPES, FONCTIONNEMENTS ET RENDEMENTS, 17 septembre 2018, CEDEO
- [14] Jean PARISOT ; Conception et calcul des chaudières : généralités et bilans,10 févr. 1993, technique-ingenieur . fr
- [15] BDOULAYE ILLIA Houkachatou CHONGO Arménio Edson João, Etude de l'optimisation de la combustion d'une chaudière à gaz et réduction des NOx par le procédé « RUBERNING » pour un développement durable. Master 2, Spécialité : Energétique.

- [16] Chaudières à vapeur : un peu d'histoire, quebecochimie.com
- [17] BEKHOUCHE Inas Traitement et conditionnement des eaux de la chaudière de l'usine ENASEL EL-OUTAYA de Wilaya de Biskra, Spécialité : Génie Chimique, Le : lundi 27 juin 2022
- [18] Traitements des eaux de chaudière, Process's .free .fr