

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

*INFLUENCE DE LA QUALITÉ DE L'EAU SUR
LES ÉCHANGEURS DE CHALEUR À PLAQUES*

Soutenu le/06/2023

Réalisé par :

Belabed Rayane

Encadré par :

Mr. Boussaha Elhadi

Année Universitaire 2022- 2023

Résumé

Les eaux d'alimentation nécessitent des différents traitements avant d'entrer au échangeurs de chaleur pour améliorer leur qualité, protéger les installations et les machines industrielles d'entartrage, d'encrassement et de corrosion ainsi que l'amélioration des échanges thermiques entre les fluides.

Dans ce travail nous avons étudié le phénomène de l'entartrage dans les échangeurs de chaleur qui peut augmenter les coûts d'exploitation et perturber la pression des vapeurs dans les échangeurs et entraîner des problèmes de sécurité. Nous avons constaté que pour réduire le tartre dans l'échangeur et améliorer sa durée de vie, l'ajout des inhibiteurs est très efficace.

Mot clés : Echangeur de chaleur – encrassement – Entartrage - Qualité de l'eau - Traitement des eaux.

Abstract

Feed water requires different treatments before entering the heat exchangers to improve its quality, protect industrial installations and machines from scaling, fouling and corrosion as well as improving heat exchange between fluids.

In this work we studied the phenomenon of scaling in heat exchangers which can increase operating costs and disturb the pressure of vapors in the exchangers and lead to safety problems. We have found that to reduce scale in the exchanger and improve its life, the addition of inhibitors is very effective.

Keywords: Heat exchanger - fouling - scaling - water quality - water treatment.

ملخص

تتطلب مياه التغذية معالجات مختلفة قبل دخولها إلى المبادلات الحرارية لتحسين جودتها وحماية المنشآت الصناعية والآلات من التحجيم والقاذورات والتآكل وكذلك تحسين التبادل الحراري بين السوائل. درسنا في هذا العمل ظاهرة التحجيم في المبادلات الحرارية التي يمكن أن تزيد من تكاليف التشغيل وتزعج ضغط الأبخرة في المبادلات وتؤدي إلى مشاكل تتعلق بالسلامة. لقد وجدنا أنه لتقليل الحجم في المبادل وتحسين حياته، فإن إضافة المثبطات فعالة للغاية.

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري - تلوث - تحجيم - جودة المياه - معالجة المياه.



Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier le grand Dieu qui m'a aidé et m'a donné la force et le courage pour accomplir ce travail.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à mon encadreur Monsieur BOUSSAHA ELHADI, pour tous ses conseils et son aide tout au long de la préparation de ce travail.

Je remercie tous les membres du jury, pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, Je remercie également tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

MERCI !



Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

♥ *A ceux qui ont fait de moi ce que je suis, mes très chers parents ZINA et OMAR pour leurs soutiens, leurs encouragements tout le long de mes études.*

♥ *Ma très chère sœur Samiha.*

♥ *Mon très cher frère Youcef.*

♥ *Mon beau-frère Karim.*

♥ *Mon neveu Sadjed et ma petite nièce Eline.*

♥ *Mes très chères amies surtout Abdelhak et Ahlem.*

Rayane

Liste des figures

Figure I.1 : Transfert thermique par conduction	5
Figure I.2 : Transfert thermique par convection	6
Figure I.3 : Transfert thermique par rayonnement	6
Figure I.4 : Schéma simplifié de co-courant	9
Figure I.5 : Schéma simplifié de contre-courant.....	9
Figure I.6 : Schéma simplifié de courants-croisés	10
Figure I.7 : Classification d'un échangeur en fonction de sa compacité.....	10
Figure I.8 : Différents types d'échangeurs tubulaires.....	12
Figure I.9 : Exemple d'un échangeurs à plaques.....	13
Figure I.10 : Encrassement d'un échangeur	14
Figure II.1 : Echangeur de chaleur à plaques.....	18
Figure II.2 : Echangeur à plaques II.....	19
Figure II.3 : Exemple des différentes parties d'un échangeur à plaques (CP/2K, Sonatrach Skikda).....	19
Figure II.4 : Structure générale d'un échangeur de chaleur	20
Figure II.5 : La circulation des fluides.....	22
Figure II.6 : La circulation des fluides.....	22
Figure II.7 : Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire	23
Figure II.8 : Echangeurs à plaques et joints.....	23
Figure II.9 : Echangeur packinox.....	24
Figure II.10 : Echangeur platulaire et schéma canaux	24
Figure II.11 : Echangeur lamellaire	25
Figure II.12 : Echangeur de chaleur à plaques en spirale	26
Figure II.13 : Echangeur brasé.....	26
Figure II.14 : Echangeur compabloc et l'emplacement des plaques	27
Figure II. 15 : Importante corrosion.....	28
Figure II. 16 : Encrassement de l'échangeur de chaleur (photo réelle).....	32

Figure II.17 : Dépôts de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière MP	33
Figure II.18 : Dépôts de slime bactérien, hydrocarbures et oxydes métalliques dans un échangeur de chaleur eau hydrocarbures (raffinerie de pétrole)	34
Figure II.19 : Entartrage d'une chaudière à tube de fumée (p=15 bars)	36
Figure II.20 : Représentation schématique d'encrassement dans le cas d'un liquide...36	
Figure III.1 : Echantillons d'acier C-1020.	41
Figure III.2 : Appareil polisseuse.	42
Figure III.3 : Echantillons après polissage	43
Figure III.4 : Un échantillon sur la balance.	43
Figure III.5 : Bicarbonate de sodium.	44
Figure III.6 : Chlorure de calcium.	45
Figure III.7 : L'hydroxyde de sodium.	46
Figure III.8 : Acide chlorhydrique.....	47
Figure III.9 : Acide sulfurique.	47
Figure III.10 : Pesé de Cacl ₂ et NaHCO ₃	48
Figure III.11 : La pâte formée.....	48
Figure III.12 : Echantillons envelopper de pâte.	49
Figure III.13 : Echantillons après séchage (entartrés).	49
Figure III.14 : Un échantillon entartré sur la balance.	49
Figure III.15 : Les échantillons avant (à gauche) et après (à droite) l'échauffement d'huile.....	50
Figure III.16 : Les échantillons après la formation de dépôts.	50
Figure III.17 : Un échantillon encrassés sur la balance.	51
Figure III.18 : Solutions de NaOH de différentes concentrations.	52
Figure III.19 : Solutions d'HCL de différentes concentrations.....	53
Figure III.20 : Solutions d'H ₂ SO ₄ de différentes concentrations.....	54
Figure III.21 : Masses des échantillons avant et après la formation du tartre	55
Figure III.22 : Masses des échantillons entartrés après le nettoyage chimique.....	56

Figure III.23 : Echantillons entartrés après le nettoyage.	56
Figure III.24 : Masses des échantillons avant et après la formation de la crasse	58
Figure III.25 : Masses des échantillons encrassés après le nettoyage chimique	59
Figure III.26 : Echantillons encrassés après le nettoyage.....	59

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Composantes essentielles d'un échangeur de chaleur	20
Tableau II.2 : Performance thermique des joints	21
Tableau III.1 : Propriété mécanique d'acier C-1020.....	42
Tableau III.2 : Composition chimique d'acier C-1020	42
Tableau III.3 : Caractéristiques principales de NaHCO_3	44
Tableau III.4 : Caractéristiques principales de CaCl_2	45
Tableau III.5 : Masses des échantillons avant et après la formation du tartre.	55
Tableau III.6 : Masses des échantillons après le nettoyage chimique.....	55
Tableau III.7 : Masses des échantillons avant et après la formation de la crasse.	58
Tableau III.8 : Masses des échantillons après le nettoyage chimique.....	59

Liste des équations

(I.1)	4
(I.2)	4

Liste des abréviations et formules chimiques

ECP : échangeur à plaques

EPDM : éthylène, propylène, diène et monomère

Acier C-1020 : acier au carbone 1020

C : carbone

Mn : manganèse

P : phosphore

S : soufre

Fe : fer

PH : potentiel hydrogène

NaHco3 : bicarbonate de soude

Cacl2 : Sel de chlorure de calcium

H : l'hydrogène

Na : sodium

CO3 : trioxyde de carbone

Ca : calcium

Cl : chlorure

OH : hydroxyde

NaoH : hydroxyde de sodium

Hcl : l'acide chlorhydrique

H2SO4 : l'acide sulfurique

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les échanges de chaleur	2
I.1. Introduction	3
I.2. Transfert de chaleur.....	3
I.3. Définitions	3
I.3.1. Régime permanent et régime transitoire.....	3
I.3.2. Surface isotherme	4
I.3.3. Gradient de température	4
I.3.4. Flux de chaleur.....	4
I.3.5. Densité de flux	4
I.4. Modes de transfert de chaleur	5
I.4.1. La conduction	5
I.4.2. La convection.....	5
I.4.3. Le Rayonnement	6
I.5. Les échangeurs de chaleur	7
I.5.1. Définition	7
I.5.2. Critères de classement des échangeurs de chaleur :	7
I.5.2.1. Classement suivant les types de contact.....	7
I.5.2.2. Classement suivant les types d'échange.....	8
I.5.2.3. Classement suivant la disposition des écoulements	8
I.5.2.4. Classement fonctionnel	10
I.5.2.5. Classement suivant la compacité de l'échangeur	10
I.5.2.6. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	11
I.5.2.7. Classement technologique	11
I.5.2.8. Classification selon le nombre des fluides	11
I.5.3. Types des échangeurs de chaleur.....	11
I.5.3.1. Échangeur tubulaire.....	11
I.5.3.2. Échangeur à plaques	12

I.6. L'encrassement des échangeurs de chaleur	14
I.7. Paramètres influençant l'encrassement	15
I.7.1. La vitesse d'écoulement du fluide d'alimentation.....	15
I.7.2. Température de la surface d'échange de chaleur.....	15
I.7.3. Concentration du précurseur	15
I.7.4. Présence de l'oxygène et du soufre	15
I.7.5. Nature et matériaux de construction de la surface.....	16
I.8. L'effet de l'encrassement dans l'industrie pétrolière.....	16
I.9. Conclusion.....	16
Chapitre II : Les échangeurs de chaleur à plaques	17
II.1. Introduction.....	18
II.2. Les échangeurs de chaleur à plaques ECP	18
II.3. Conception d'un échangeur à plaques	20
II.3.1 Matériau du corps des plaques	21
II.3.2 Matériau du joint	21
II.4. Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques	22
II.5. Types des échangeurs à plaques	23
II.5.1 Échangeurs à surface primaire	23
II.5.2. Échangeurs à plaques et joints.....	23
II.5.3. Echangeurs à plaques soudées ou brasées.....	24
II.5.3.1. Échangeur Packinox.....	24
II.5.3.2. Échangeur platulaire	24
II.5.3.3. Échangeur lamellaire.....	25
II.5.3.4. Échangeur à spirales.....	25
II.5.3.5. Échangeur brasé	26
II.5.3.6. Échangeur Compabloc	27
II.6. Avantages et inconvénients des échangeurs à plaques	27
II.6.1. Avantage.....	27

II.6.2. Inconvénients.....	27
II.7. Problèmes de fonctionnement.....	28
II.7.1. Corrosion	28
II.7.1.1. Processus de dégradation	28
II.7.1.1.1. Corrosion chimique	29
II.7.1.1.2. Corrosion électrochimique	29
II.7.1.2. Différents types de corrosion	29
II.7.1.2.1. Corrosion généralisée	29
II.7.1.2.2. Corrosion localisée	29
II.7.1.3. Protection contre la corrosion	31
II.7.3. Vibrations	31
II.7.4. Encrassement.....	31
II.7.4.1. Les causes d'encrassement :	32
II.7.4.2. Les types d'encrassement.....	33
II.7.4.2.1. L'encrassement particulaire.....	33
II.7.4.2.2. L'encrassement biologique.....	34
II.7.4.2.3. L'encrassement par réaction chimique.....	34
II.7.4.2.4. Encrassement par solidification.....	35
II.7.4.2.5. La corrosion	35
II.7.4.2.6. L'entartrage.....	35
II.7.4.3. Mécanisme de l'encrassement	36
II.7.4.3.1. L'initiation	36
II.7.4.3.2. Transport des particules.....	37
II.7.4.3.3. Adhésion des particules	37
II.7.4.3.4. Réentraînement des particules déposées.....	37
II.7.4.3.5. Le Vieillissement	37
II.7.4.4. Prévention de l'encrassement.....	37
II.8. Nettoyage des échangeurs.....	38
II.8.1. Nettoyage mécanique	38
II.8.2. Nettoyage chimique.....	39
II.9. Conclusion	39
Chapitre III : Protocol expérimental et résultats	40
III.2. Matériaux utilisés	41
III.2.1. Préparation des échantillons.....	41

III.2.2. Produits d'entartrage	44
III.2.3. Produits d'encrassement	46
III.2.4. Procédés et solutions de nettoyage.....	46
III.3. Procédure expérimental	48
III.3.2. L'encrassement	50
III.4. Préparation des solutions et protocole de nettoyage chimique.....	51
III.4.1. Préparation des solutions de nettoyage	51
III.4.2. Protocole de nettoyage chimique	54
III.5. Résultats et discussions	54
III.5.1 Résultats d'entartrage.....	54
III.5.2. Pour l'encrassement	58
III.6. Conclusion	60
Conclusion générale	61
Références bibliographique	62

Introduction générale

Les différentes activités industrielles nécessitent des équipements et des installations de bonne qualité pour obtenir un bon rendement, parmi ces équipements on trouve les échangeurs de chaleur qui permettent le bon transfert thermique entre les différents fluides.

Parmi les essentiels fluides qui passent par ces échangeurs on trouve l'eau de différentes sources, soit pour le chauffage ou pour le refroidissement. Lors du transport de l'eau brute dans les installations industrielles, elle sera en contact direct avec des différents matériaux ce qui entraîne des problèmes à cause de la mauvaise qualité de l'eau brute, dont les plus souvent : l'entartrage, l'encrassement et la corrosion.

Ces problèmes sont très grave, ils endommagent les installations par la diminution de leur durée de vie et minimisent leurs rendements ce qui conduit à l'augmentation des coûts d'exploitation. C'est pourquoi il faut que l'eau brute doit être traitée selon sa composition pour éliminer les sels minéraux, l'oxygène dissoute et les matières en suspension avant l'alimentation des échangeurs de chaleur, ainsi que l'addition des inhibiteurs d'entartrage, encrassement et corrosion est nécessaire pour protéger et améliorer le fonctionnement des installations.

L'objectif de ce travail est d'expliquer l'influence de la qualité de l'eau sur les échangeurs de chaleur et de citer les meilleurs nettoyants pour réduire les problèmes cités.

Ce travail est constitué de trois chapitre dont le premier sur les échanges de chaleur, le deuxième sur les échangeurs de chaleur à plaques, et le troisième sur la partie pratique dont nous avons étudiés les phénomènes d'encrassement et d'entartrage.

C *h*apitre *I*

Généralités sur les échanges de chaleur

I.1. Introduction

Les procédés utilisés dans l'industrie sont basés principalement sur l'échange thermique, donc il est nécessaire pour l'ingénieur de production ou de développement de connaître les connaissances de base de ce domaine pour assurer :

- Une bonne compréhension des phénomènes physiques.
- Une bonne maîtrise des procédés.

Ce chapitre consiste à donner une vision générale sur le phénomène de transfert thermique et quelques définitions et théories à ce phénomène, ainsi que des généralités sur les échangeurs thermiques et ces problèmes.

I.2. Transfert de chaleur

Lorsqu'un corps plus chaud se trouve en présence d'un corps plus froid l'expérience nous montre qu'il y a transmission de chaleur, c'est à dire qu'une augmentation de température se produit dans le corps le plus froid et une diminution de température se produit dans le corps le plus chaud ; la transmission de chaleur demeure jusqu'à ce que les températures des deux corps soient égales. Ainsi, dans le même corps il y a transmission de chaleur lorsque deux points ne présentent des températures différentes.

D'après ce que nous venons de dire la transmission de chaleur se produit en cas de différence de températures. En effet c'est l'unique condition car, comme nous le verrons par la suite, il n'est pas nécessaire que les corps soient en contact direct pour qu'il y ait transmission de chaleur. [1]

I.3. Définitions

Quelque définition primaire :

I.3.1. Régime permanent et régime transitoire

La température en un point d'un système à un instant donné dépend de la position de ce point par rapport à un repaire fixe de coordonnées.

$$\vartheta = \vartheta(x, y, z) \quad \vartheta \text{ en } ^\circ\text{C}$$

$$T = T(x, y, z) \quad T \text{ en } ^\circ\text{K}$$

Si la température de tous les points est indépendante du temps on dit que le régime est permanent, si la température dépend du temps on dit que le régime est transitoire. Dans ce cas on peut écrire :

$$\Theta = \Theta(x, y, z, t) \text{ ou } T = T(x, y, z, t)$$

I.3.2. Surface isotherme

On appelle surface isotherme Θ_0 , la représentation dans l'espace de l'équation $\Theta = \Theta_0(x, y, z)$ à un instant donné.

En régime permanent les surfaces isothermes restent fixes.

En régime transitoire les surfaces peuvent se déplacer et se déformer.

I.3.3. Gradient de température

On appelle gradient de température en un point M (x, y, z) d'un système à l'instant donné le vecteur de composantes $\frac{\partial \Theta}{\partial x}, \frac{\partial \Theta}{\partial y}, \frac{\partial \Theta}{\partial z}$. Ce vecteur est normal à la surface isotherme passant par le point M.

I.3.4. Flux de chaleur

On appelle flux de chaleur Φ à travers une surface la quantité de chaleur qui traverse cette surface par unité de temps. Le flux de chaleur est un scalaire qui représente le débit de chaleur à travers la surface.

$$\Phi = \frac{Q}{T} \quad (\text{I.1})$$

I.3.5. Densité de flux

On appelle densité de flux de chaleur D en un point d'une surface, le flux de chaleur ramené à l'unité d'aire qui pré-coule à travers un élément différentiel de surface situé autour de ce point.

La densité de flux est un vecteur qui caractérise la vitesse d'écoulement de la chaleur en point particulier. [2]

$$D = \frac{\Phi}{S} \rightarrow \frac{d\Phi}{dS} \quad (\text{I.2})$$

I.4. Modes de transfert de chaleur

Il y a trois modes de transfert de chaleur :

1. Conduction.
2. Convection.
3. Rayonnement

I.4.1. La conduction

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

[3]

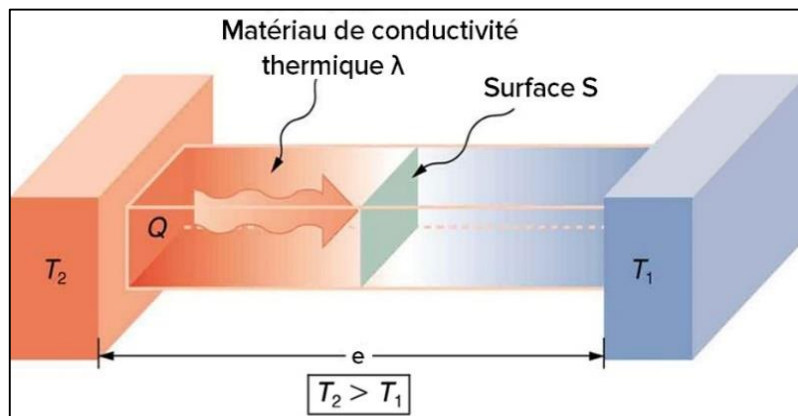


Figure I.1 : Transfert thermique par conduction. [3]

I.4.2. La convection

Consiste en une transmission de chaleur par le mouvement réel des molécules en raison d'une différence de température. C'est un processus caractéristique des liquides et des gaz : les particules proches d'une source de chaleur. Présentent une température plus élevée et, par conséquent, une densité inférieure par rapport aux autres, ces particules s'élèvent à l'intérieur du fluide et sont remplacées par des particules plus froides. Ainsi, une transmission de chaleur se produit par l'intermédiaire du mouvement des différentes particules.

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses. Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz.

La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques.

[3]

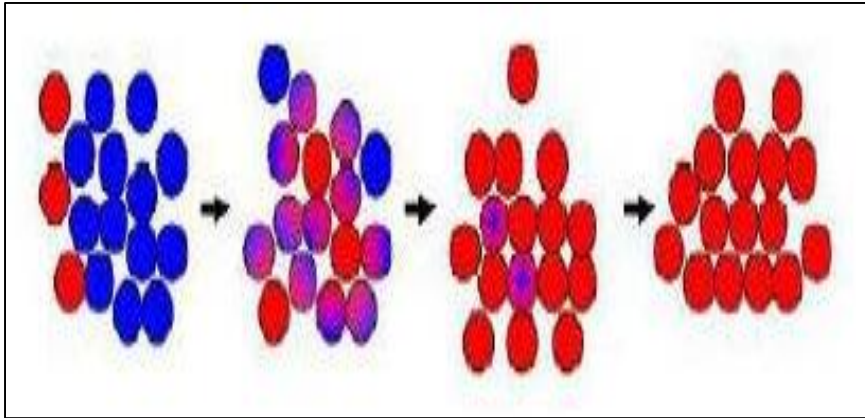


Figure I.2 : Transfert thermique par convection [3]

I.4.3. Le Rayonnement

C'est l'écoulement de chaleur par ondes électromagnétique d'un corps haute température vers un corps à température plus basse. Il y a rayonnement lorsque les corps sont séparés par des molécules soit lorsqu'ils se trouvent dans le vide.

Le rayonnement permet le transfert de chaleur sans aucun intermédiaire matériel (comme le soleil qui transmet la chaleur vers les planètes). [3]



Figure I.3 : Transfert thermique par rayonnement [3]

I.5. Les échangeurs de chaleur

I.5.1. Définition

Comme leur nom l'indique, les échangeurs thermiques sont des dispositifs destinés à favoriser l'échange thermique entre deux fluides, sans que les fluides se mélangent. Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. Généralement pour assurer efficacement cet échange de chaleur au moins un des fluides est mis en mouvement (pompe, ventilateur). Pour augmenter cet échange, et donc le transfert d'énergie, il peut être fait appel au changement de phase (condenseurs, évaporateurs, bouilleurs...) système utilise couramment dans les machines thermiques ou le caloduc. [4]

La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou complexe de refroidir ou réchauffer directement, par exemple l'eau d'un circuit primaire de refroidissement, d'une centrale nucléaire. [5]

I.5.2. Critères de classement des échangeurs de chaleur :

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs, dont les principaux sont :

I.5.2.1. Classement suivant les types de contact

Échangeurs à contact direct

Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.

Échangeurs à contact indirect

Les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi. [6]

I.5.2.2. Classement suivant les types d'échange

Échangeur sans changement de phase

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur.

Échangeur avec changement de phase

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents :

- 1- L'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques
- 2- Le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.
- 3- Le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état.

I.5.2.3. Classement suivant la disposition des écoulements

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en trois catégories :

- **A courant-parallèle « co-courants »**
 - Fluide froid et fluide chaud circulent dans le même sens.
 - Ecart de température :
 - Maximal à l'entrée de l'échangeur (risque de choc thermique).
 - Minimal à la sortie. [6]

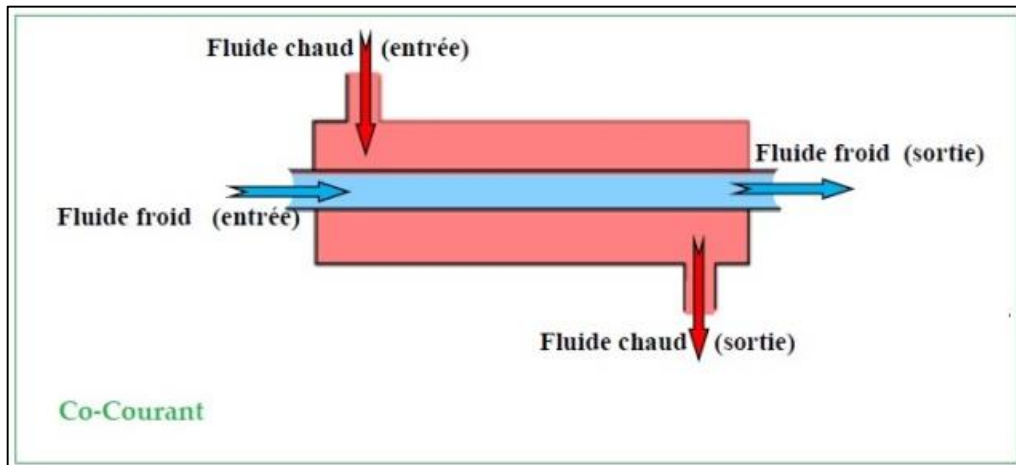


Figure I.4 : Schéma simplifié de co-courant [12]

- **A contre-courant**

- Fluide froid et fluide chaud circulent en sens inverse.
- Ecart de température moyen dans tout l'échangeur (constant).
- La température de sortie du fluide chaud peut être inférieure à la température de sortie du fluide froid. [6]

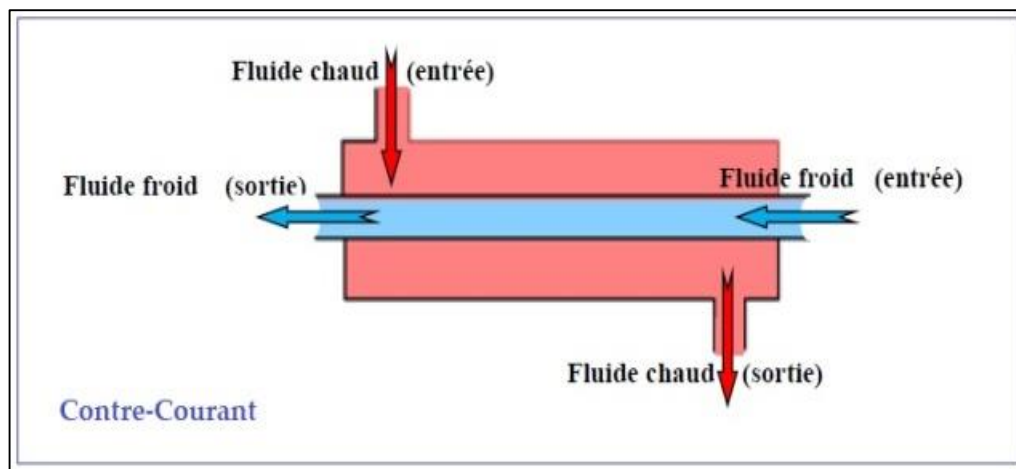


Figure I.5 : Schéma simplifié de contre-courant [12]

- **A courant croisés**

- Fluide froid et fluide chaud se croisent
- Efficacité intermédiaire entre les échangeurs co-courant et les échangeurs contre-courant.
- Souvent utilisé lorsque l'un des flux est gazeux :
 - Echangeurs dans un carnaux de fumées.
 - Aéroréfrigérants. [6]

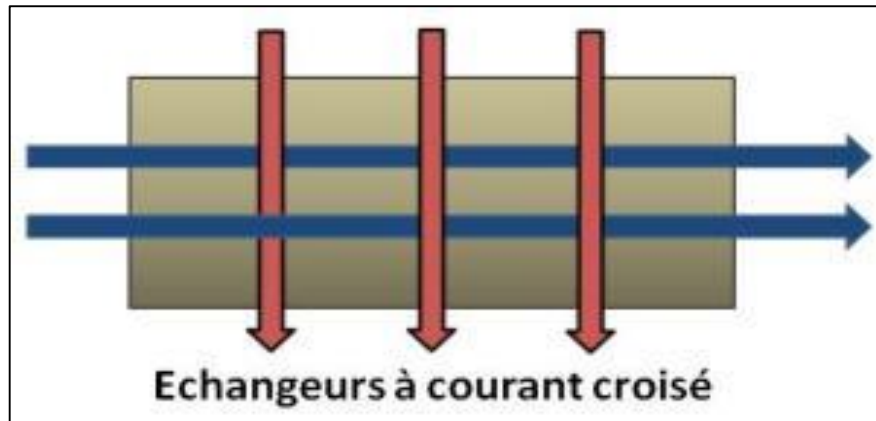


Figure I.6 : Schéma simplifié de courants-croisés [12]

I.5.2.4. Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique.
- Un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs. [4]

I.5.2.5. Classement suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. Un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$; cette valeur est susceptible de varier de 500 à $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$. [6]

Une classification en fonction de la compacité peut être donnée (**Figure I.7**).

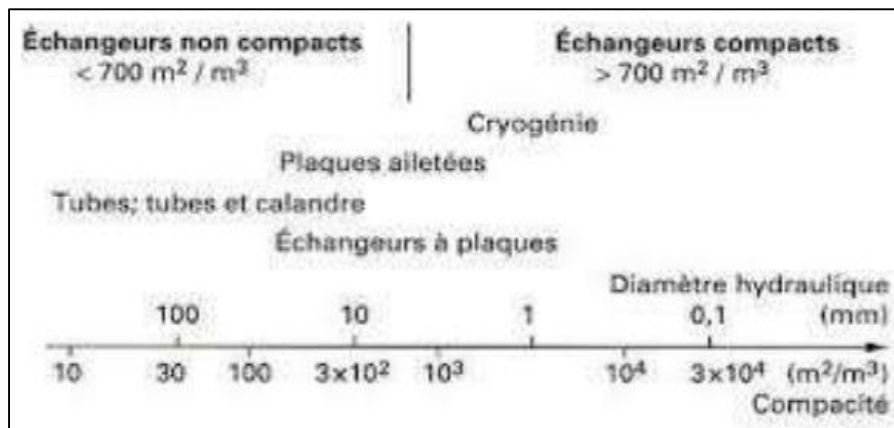


Figure I.7 : Classification d'un échangeur en fonction de sa compacité [6]

I.5.2.6. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

- Les échangeurs métalliques (en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires).
- Les échangeurs non métalliques (en plastique, céramique, graphite, verre...). [6]

I.5.2.7. Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- **À tubes** : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- **À plaques** : à surface primaire ou à surface secondaire.
- **Autres types** : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé. [6]

I.5.2.8. Classification selon le nombre des fluides

- Deux fluides.
- Trois fluides.
- Nombre de fluide >3 . [7]

I.5.3. Types des échangeurs de chaleur

I.5.3.1. Échangeur tubulaire

Un échangeur tubulaire simple est constitué de deux tubes cylindriques coaxiaux. L'autre dans l'espace compris entre les deux tubes. Un fluide (généralement le chaud) circule dans le tube intérieur, Le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid s'effectue à travers la paroi qui constitue le tube intérieur. Ils sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange.

Ils comportent soit un tube unique (serpentin), soit deux tubes coaxiaux (échangeurs bitubes), soit un faisceau de tubes enferme dans une enveloppe appelée calandre.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

- **Échangeur monotube (figure 8a)**, dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin.

- **Échangeur coaxial (figure 8b)**, dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.
- **Échangeur multitubulaire**, existant sous quatre formes :
 - **Échangeur à tubes séparés (figure 8c)** : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.
L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.
 - **Échangeur à tubes rapprochés (figure 8d)** : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux.
Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.
 - **Échangeur à tubes ailettes (figure 8e)** : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.
 - **Échangeur à tubes et calandre (figure 8f)** : c'est l'échangeur actuellement le plus répandu. [4]

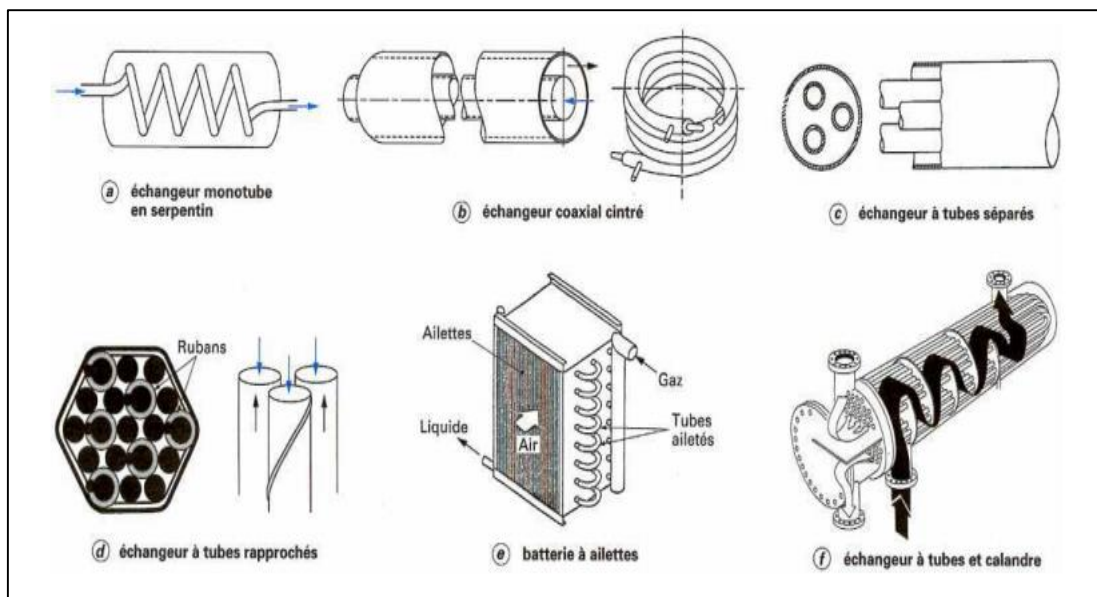


Figure I.8 : Différents types d'échangeurs tubulaires [1]

I.5.3.2. Échangeur à plaques

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie et dans le génie climatique.

Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de mille feuilles et séparées les unes des autres d'un espace de quelques millimètres où circulent les fluides.

[8]

La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter plaques successives. [9]

Les plaques ne sont pas plates mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis afin de créer un flux turbulent synonyme d'un transfert de chaleur plus performant et de répartir les fluides sur toute la surface d'échange. Plus il y a de plaques, plus la surface d'échange est grande et plus l'échangeur est efficace. [8] L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité.

En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limite, ce qui est particulièrement utile lors des utilisations nécessitant des puissances importantes. [4]

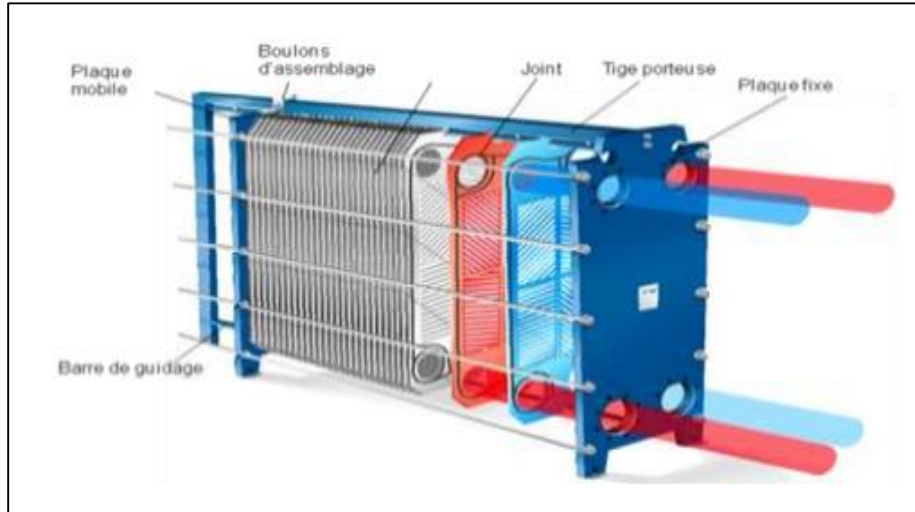


Figure I.9 : Exemple d'un échangeurs à plaques [8]

Ces échangeurs sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire, l'industrie nucléaire ou chimique. Pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique, les plaques sont généralement en acier inoxydable. A noter que la gamme de températures de fonctionnement est réduite par l'utilisation des joints en matières organiques. [9]

I.6. L'encrassement des échangeurs de chaleur

L'accumulation des dépôts indésirables sur les surfaces des échangeurs de chaleur, est habituellement appelée l'encrassement. Ces dépôts engendrent une résistance au transfert de chaleur et réduit donc l'efficacité de l'échangeur de chaleur. L'encrassement peut être une matière cristalline, des produits de réactions chimiques y compris la corrosion, ou de particule. La nature de dépôt dépend du fluide (liquide ou gaz) passant à travers l'échangeur de chaleur.

Il peut être la masse de fluide lui-même qui provoque le problème de la formation de dépôts, par exemple, la décomposition d'un liquide organique, dans les conditions de température dans l'échangeur de chaleur. Le problème d'encrassement est produit par une certaine forme de contaminant dans le fluide, souvent à très faible concentration, par exemple des particules solides ou des micro-organismes. [13]

Selon la classification établie en 1978 par Epstein [Epstein 1978], il existe six grands types d'encrassement différents :

- L'encrassement particulaire.
- L'encrassement biologique.
- L'encrassement par réaction chimique.
- L'entartrage.
- Encrassement par solidification.
- La corrosion.



Figure I.10 : Encrassement d'un échangeur [13]

I.7. Paramètres influençant l'encrassement

Il existe plusieurs paramètres influençant sur l'encrassement. Ces paramètres sont liés en général au fluide d'alimentation ou à la surface d'échange :

I.7.1. La vitesse d'écoulement du fluide d'alimentation

La vitesse d'écoulement a une influence très importante sur la formation du dépôt sur une paroi. L'augmentation de cette dernière, due au débit élevé du fluide, fait décroître la résistance d'encrassement. D'autre part, pour une faible température de surface, l'augmentation de la vitesse d'écoulement est une méthode efficace pour réduire le phénomène d'encrassement des équipements thermiques.

I.7.2. Température de la surface d'échange de chaleur

La température de la surface d'échange est aussi un paramètre très important, car la déposition des particules solides sur une surface d'échange est favorisée lorsque la température est élevée, d'où la formation d'un encrassement plus rapide et plus sévère.

Les travaux d'Oufer relatifs à l'encrassement par réaction chimique, la variation de la vitesse d'écoulement par rapport à la température obéit à la loi d'Arrhenius.

La vitesse d'encrassement est liée à la constante de vitesse de la réaction chimique qui, elle-même, est fonction de la température.

I.7.3. Concentration du précurseur

Plus la concentration du précurseur est élevée, plus la formation du dépôt est grande pour l'encrassement particulaire. Dans une autre étude, il a été trouvé qu'à température élevée et à faible vitesse, les concentrations élevées du styrène augmente les vitesses d'encrassement par le polystyrène formé.

I.7.4. Présence de l'oxygène et du soufre

Selon les études réalisées par Oufer sur la polymérisation du styrène sur les jets fuels, la formation du dépôt par réaction chimique est favorisée par la présence de l'oxygène et du soufre dans la charge d'alimentation.

I.7.5. Nature et matériaux de construction de la surface

Les surfaces rugueuses ont tendance à favoriser l'initiation de l'encrassement. Le dépôt formé par la suite modifie cette rugosité. D'où un bon choix des matériaux de construction devra éviter l'encrassement par corrosion.

I.8. L'effet de l'encrassement dans l'industrie pétrolière

- Augmente la surface d'échange de chaleur.
- Réduit l'efficacité thermique.
- Diminue le flux de chaleur.
- Augmente la température sur le côté chaud et diminue sur le côté froid.
- Induit la corrosion.
- Augmente l'utilisation de l'eau de refroidissement.
- Réduit le débit.
- Augmente la chute de pression.
- Augmente la pression en amont.
- Augmente la dépense d'énergie. [13]

I.9. Conclusion

A la fin de ce chapitre et après avoir fait une étude bibliographique assez générale sur les échangeurs de chaleur utilisés dans de nombreuses applications et différents domaines industriels. Les échangeurs de chaleur souffrent de différents problèmes qui peuvent réduire leur rendement, qui dépend souvent de l'état de surface des échangeurs ainsi que leur fonctionnement.

L'étude des échangeurs de chaleur à plaques et ces problèmes de fonctionnement feront l'objet du chapitre suivant.

C *Chapitre II*

Les échangeurs de chaleur à plaques

II.1. Introduction

Les échangeurs à plaques ECP, sont constitués par un empilage de plaques écartées les unes des autres par des entretoises pour former un ensemble de conduits plats. Un fluide circule dans les conduits pairs, l'autre dans les conduits impairs.

La conception de base d'un échangeur à plaques reste inchangée mais des améliorations constantes ont fait passer les pressions de fonctionnement de 1 à 25 atmosphères dans les machines actuelles.

II.2. Les échangeurs de chaleur à plaques ECP

Les échangeurs à plaques sont constitués par un assemblage de plaques cannelées indépendantes. Les plaques sont encastrées et serrées dans un bâti.

Chaque paire de plaques adjacentes forme un canal et les deux fluides (produits et fluide caloporteur) circulent alternativement dans les canaux.

Des profils spéciaux sont utilisés pour augmenter la turbulence, augmenter ainsi le coefficient de convection. Les plaques sont équipées de joints permettant d'éviter tout mélange des fluides.

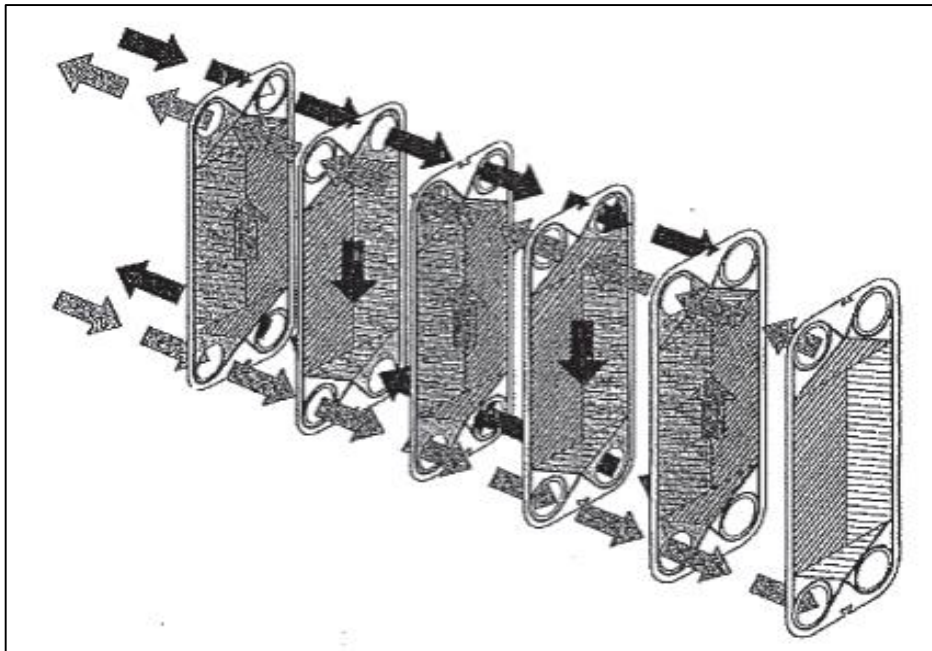


Figure II.1 : Echangeur de chaleur à plaques [4]

L'échangeur à plaques est un appareil qui permet un transfert de chaleur entre deux fluides ayant des températures différentes sans aucun contact direct. Ce sont des plaques d'acier inoxydable qui assurent le passage de la chaleur d'un fluide à l'autre.

A noter que la gamme de températures de fonctionnement est réduite par l'utilisation des joints en matières organiques. Les échangeurs de chaleur à plaques assurent la récupération de chaleur et offrent un rendement élevé. Il est durable et pratique car il est facile à entretenir. En outre, ils se caractérisent par :

- Grande efficacité dans le transfert de chaleur.
- Prennent peu de place avec sa structure compacte.
- Peuvent être complètement démontés et nettoyés facilement.
- Disposent d'une large gamme de plaques et de joints.



Figure II.2 : Echangeur à plaques II [9]



Figure II.3 : Exemple des différentes parties d'un échangeur à plaques (CP/2K, Sonatrach Skikda) [9]

II.3. Conception d'un échangeur à plaques

Le schéma et le tableau ci-dessous présente la structure de base et les différents composants d'un échangeur de chaleur à plaques.

La réalisation finale est spécifique à chaque application.

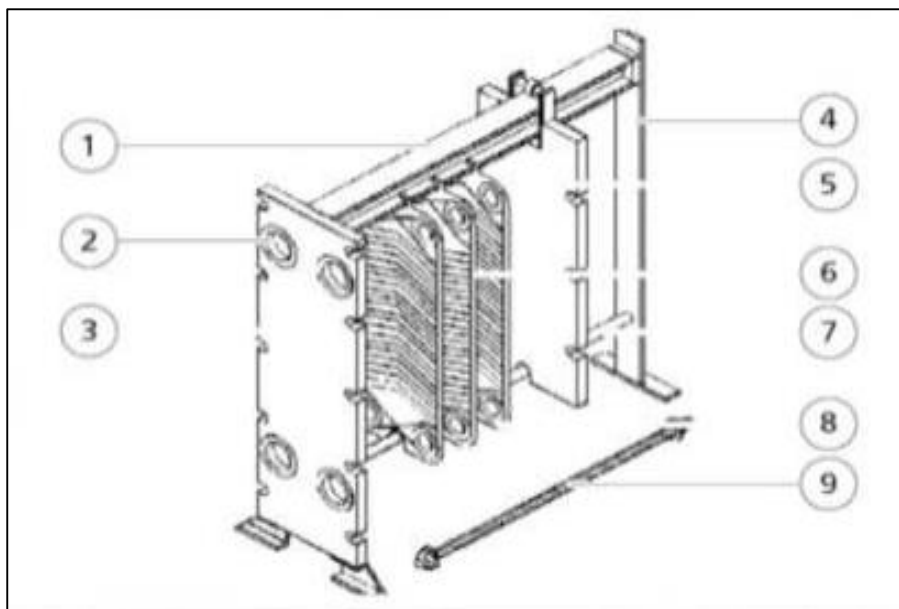


Figure II.4 : Structure générale d'un échangeur de chaleur [10]

Tableau II.1 : Composantes essentielles d'un échangeur de chaleur. [10]

N°	Pièce
1	Poutre de Support
2	Connexions
3	Plaques fixe
4	Colonne de Support
5	Plaques mobile
6	Plaques de l'échangeur
7	Barre de Guidage inférieure
8	Joints
9	Tirants

II.3.1 Matériau du corps des plaques

Les plaques sont fabriquées à partir d'une gamme de matériaux, par exemple, les plaques sont pressées en acier inoxydable, titane, Hastelloy, Avesta 254 SMO, Avesta 254 SLX ou tout autre matériau suffisamment ductile pour être formé en une presse. La conception spéciale du modèle d'auge renforce les plaques, augmente la zone de transfert de chaleur efficace et produit des turbulences dans l'écoulement du liquide entre les plaques. Les plaques sont pressées dans des matériaux entre 0,5 et 1,2 mm d'épaisseur et les plaques sont disponibles avec une surface de transfert thermique efficace de 0,03 à 3,5 m². Jusqu'à 700 plaques peuvent être contenues dans le cadre du plus grand échangeur, offrant plus de 2400 m² de surface. Les orifices d'écoulement et la tuyauterie associée sont dimensionnés proportionnellement à la surface de la plaque et contrôlent le débit maximum de liquide. [18]

II.3.2 Matériau du joint

Tableau II.2 : Performance thermique des joints [18]

Matériau du joint	Température max moy. de fonctionnement °C	Application
Nitrile moyen	135	Résistant aux matières grasses
EPDM	150	Haute résistance à large température pour une gamme de produits chimiques
Butyle durci à la résine	150	Aldéhydes cétones
Fluor carbone	170	Huiles ménagères, carburants, huiles végétales et animales (à base de caoutchouc)

Comme détaillé dans le tableau II.2, divers élastomères de joint sont disponibles qui ont une résistance chimique et thermique associée à de bonnes propriétés d'étanchéité.

Les températures indiquées sont maximales, par conséquent, une éventuelle action chimique simultanée doit être prise en compte lors du choix du matériau le plus approprié pour une application particulière. [18]

II.4. Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

L'échangeur de chaleur à plaques comprend des plaques profilées et empilées présentant des orifices de passage et formant un paquet de fentes d'écoulement. Les canaux (créés par l'empilement des plaques) sont parcourus, à raison d'un sur deux, par les deux fluides participant à l'échange de chaleur. Les canaux sont formés entre les plaques et les passages de coins sont disposés de façon que les deux milieux circulent par des canaux alternatifs. La chaleur est transférée à travers la plaque entre les canaux et le flux à contre-courant est créé pour assurer une plus grande efficacité.

L'ondulation des plaques fournit le passage entre elles, supportent chaque plaque contre adjacente, et augmente la turbulence, donnant lieu à un transfert de chaleur plus efficace.

[17]



Figure II.5 : La circulation des fluides

Est latérale [17]



Figure II.6 : La circulation des fluides

est diagonale [17]

II.5. Types des échangeurs à plaques

II.5.1 Échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact. [10]

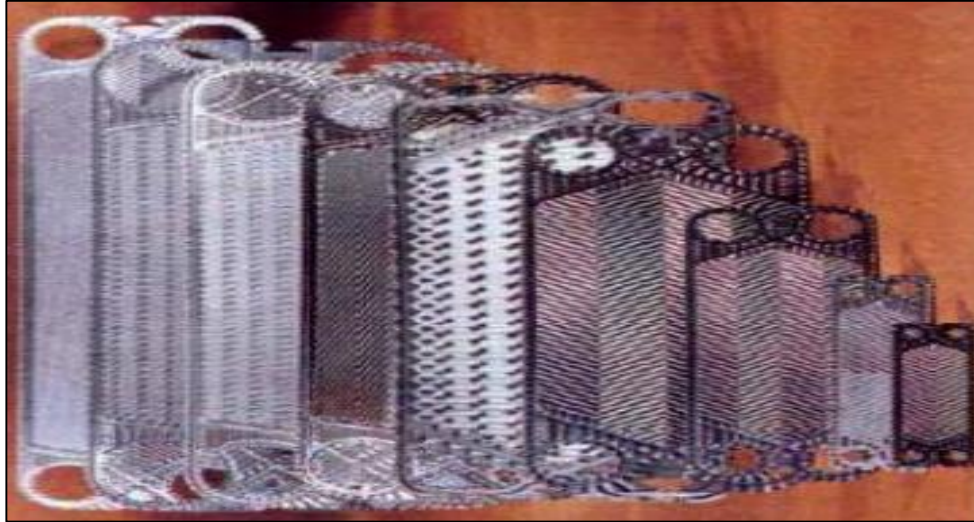


Figure II.7 : Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [10]

II.5.2. Échangeurs à plaques et joints

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile. [16]



Figure II.8 : Echangeurs à plaques et joints [16]

II.5.3. Echangeurs à plaques soudées ou brasées

Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agroalimentaire, etc. Parmi leur différent type :

II.5.3.1. Échangeur Packinox

C'est un échangeur à plaques soudées de grandes dimensions. Le faisceau est constitué d'un empilement de plaques formées par explosion et insérées dans une calandre pouvant atteindre une longueur de plus de 10 m. Cet échangeur peut fonctionner jusqu'à des températures de l'ordre de 600 °C et des pressions de 50 bar. [4]

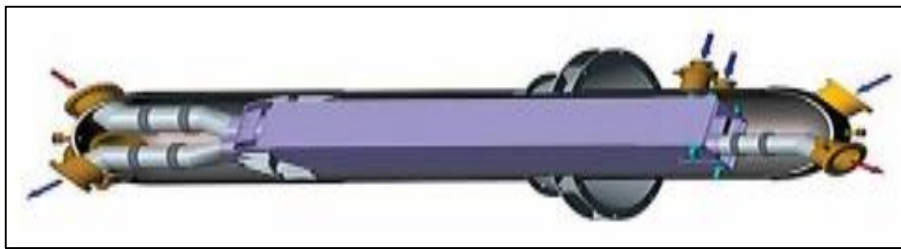


Figure II.9 : Echangeur packinox [4]

II.5.3.2. Échangeur platulaire

Il est constitué d'un assemblage de tôles planes embouties. Il existe différents types d'appareils : les uns sont composés de chambres planes munies de turbulateurs, les autres constitués de picots emboutis et soudés. [17]

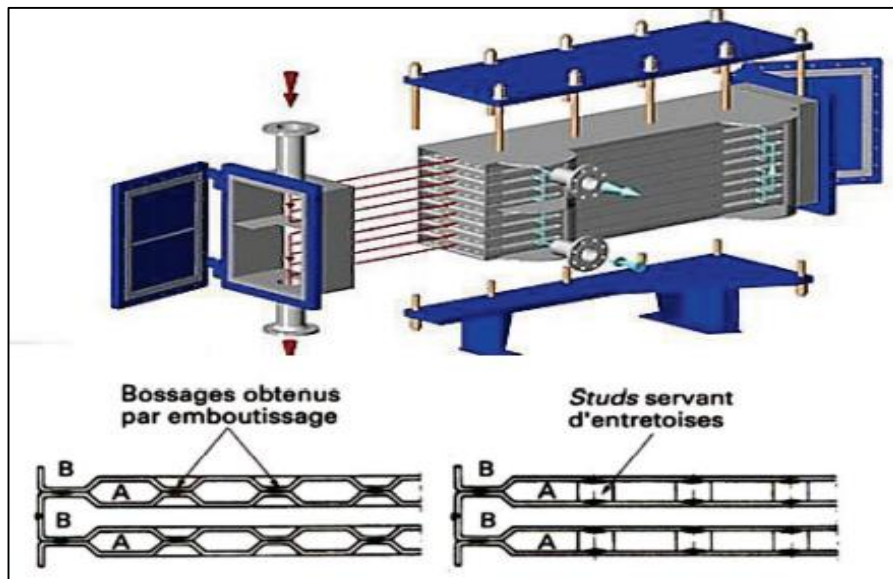


Figure II.10 : Echangeur platulaire et schéma canaux [4]

II.5.3.3. Échangeur lamellaire

C'est une variante de l'échangeur de type tubes et calandre, dans lequel le faisceau est constitué de tubes aplatis ou lamelles. Ces lamelles sont réalisées à l'aide de deux plaques formées et soudées ensemble et constituant un canal dans lequel circule l'un des fluides. Chaque lamelle peut contenir un élément interne (turbulateur) qui permet d'obtenir une meilleure tenue à la pression et un meilleur échange thermique. [17]

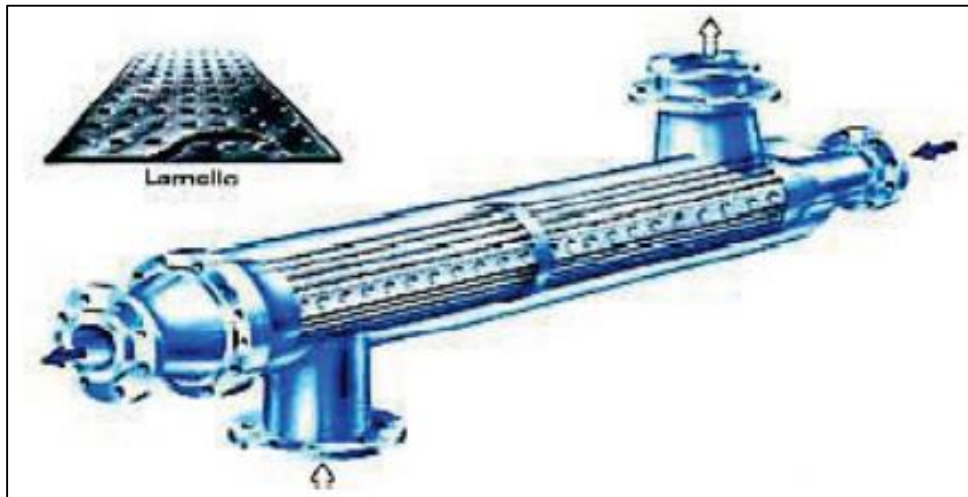


Figure II.11 : Echangeur lamellaire [17]

II.5.3.4. Échangeur à spirales

Un échangeur à spirales consiste en 2 plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale pour former une paire de canaux en spirale. D'une part, l'un des fluides circule de la périphérie vers le centre de l'appareil et du centre à l'autre périphérie (la sortie).

D'autre part, le deuxième fluide qui est souvent le fluide primaire circule directement et perpendiculairement à travers l'échangeur.

Le diamètre de l'échangeur est relativement grand, avec une surface d'échange maximale d'environ 450 m² pour un diamètre de 3m, ce qui le place dans la catégorie des échangeurs non-compacts.

L'échange de chaleur n'est pas aussi bon que celui de l'échangeur à plaques, car la surface d'échange ne possède pas en règle générale de profil, mais pour une même capacité d'échange, un échangeur spiral nécessite 20 % de moins de surface d'échange qu'un échangeur à faisceau tubulaire. Il est utilisable pour les liquides visqueux ou pour les mélanges liquide-solide et possède une Capacité autonettoyante garantissant un

encrassement réduit par rapport à l'échangeur à faisceau tubulaire. Il ne peut travailler qu'avec des différences de températures et de pression limitées. [4]

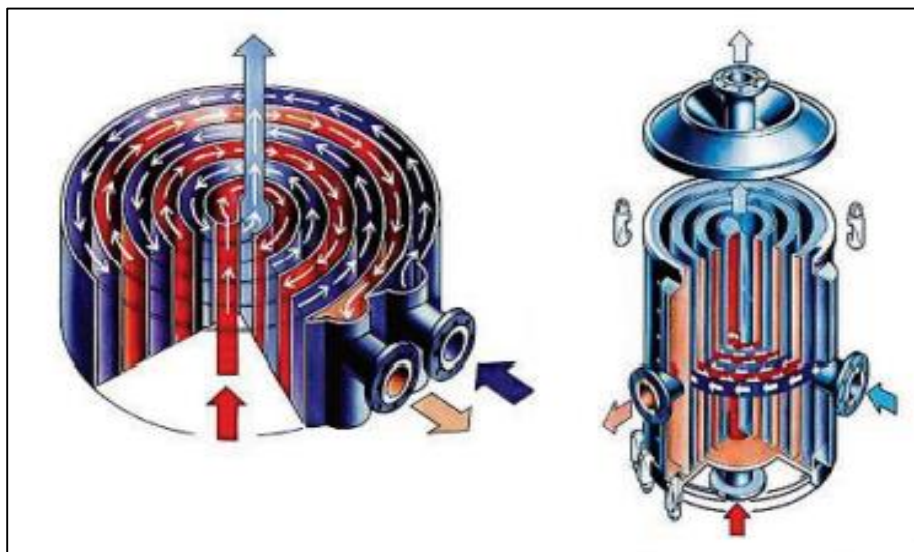


Figure II.12 : Echangeur de chaleur à plaques en spirale

les deux fluides circulent en contre-courant [9]

II.5.3.5. Échangeur brasé

C'est une variante de l'échangeur plaques et joints conventionnels, car sa surface d'échange est constituée d'une série de plaques métalliques à cannelures inclinées. [17]

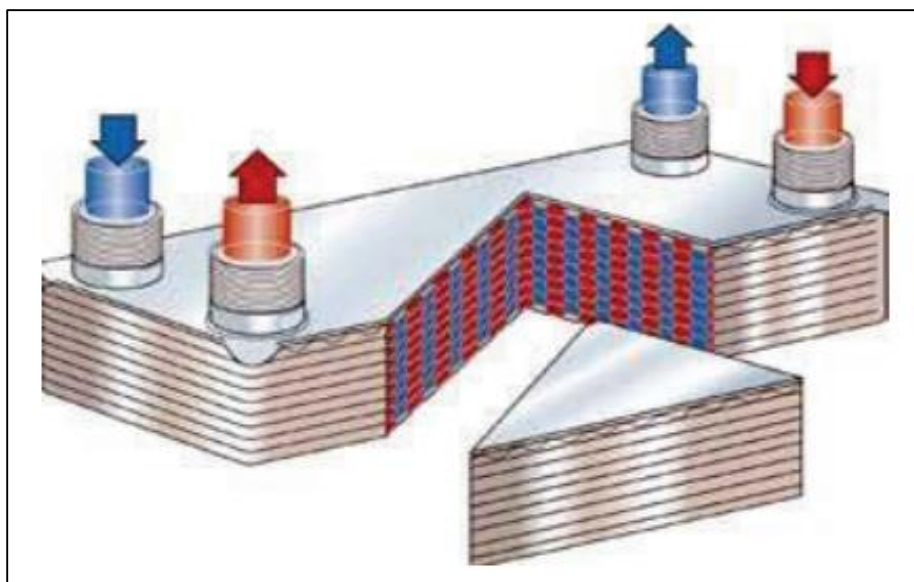


Figure II.13 : Echangeur brasé [17]

II.5.3.6. Échangeur Compabloc

Il est constitué d'un assemblage de plaques corruguées identiques à celles utilisées dans les échangeurs à plaques et joints ; la circulation des fluides est à courants croisés. [17]

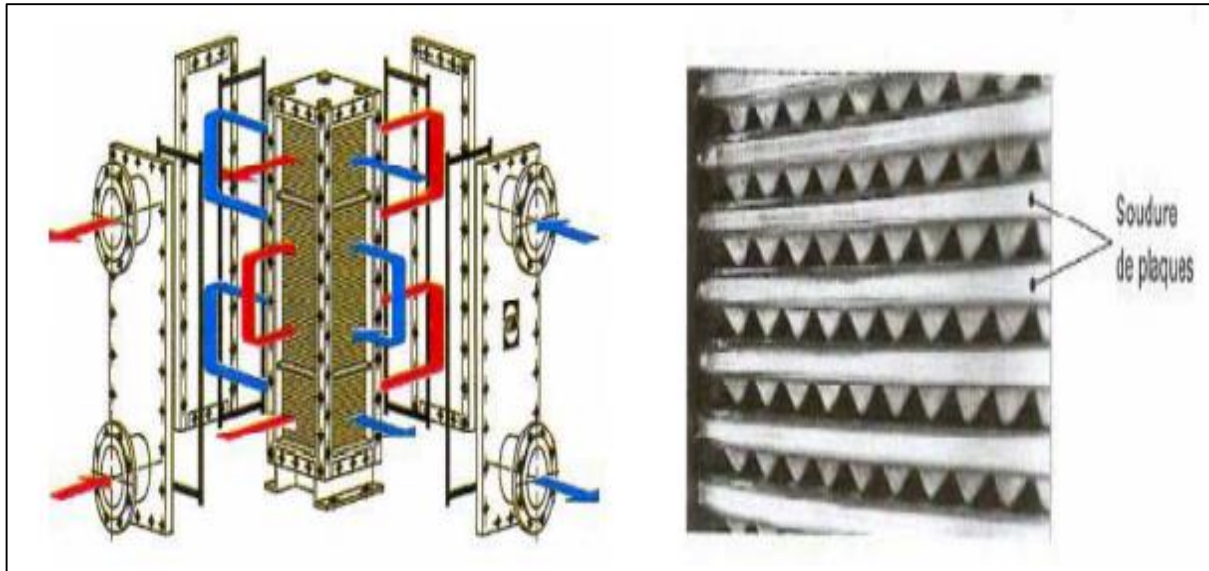


Figure II.14 : Echangeur compabloc et l'emplacement des plaques [17]

II.6. Avantages et inconvénients des échangeurs à plaques

II.6.1. Avantage

- Simple et faible.
- Grande durée de vie et pratiquement pas de panne.
- Absence de pièces en mouvement, sécurité de fonctionnement.
- Peu de maintenance nécessaire.
- Faible risque de contamination de l'air frais en cas de bonne conception.
- Exécution en divers matériaux et nombreuses combinaisons possibles.

II.6.2. Inconvénients

- Ne peut pas être utilisé pour des fluides très visqueux ou des fluides contenant des particules solides à cause du faible espace entre les plaques.
- Domaine de température relativement faible même si certains échangeurs à plaques peuvent aller jusque au 300 C°. [20]

II.7. Problèmes de fonctionnement

Les principaux problèmes de fonctionnement rencontrés par les utilisateurs d'échangeur de chaleur ont trait aux phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibration et de tenue mécanique

II.7.1. Corrosion

La corrosion est la dégradation des matériaux sous l'action du milieu ambiant. Initialement, le terme corrosion a été utilisé pour le processus de dégradation des matériaux métalliques par un milieu agressif. Il a été entendu ultérieurement à la dégradation par un milieu agressif des matériaux non métallique. Souvent, dans la littérature spécialisée, la notion de corrosion est évoquée par le terme résistance chimique ou physico-chimique. Les mécanismes de dégradation des matériaux métalliques et non métalliques sont pratiquement toujours différents dans leur principe mais ils conduisent au même résultat pratique, c'est-à-dire la destruction du matériau.

[7]



Figure II. 15 : Importante corrosion [14]

II.7.1.1. Processus de dégradation

La dégradation des matériaux métalliques par un milieu agressif peut se faire suivante des processus chimique ou électrochimique.

II.7.1.1.1. Corrosion chimique

C'est un processus d'oxydoréduction entre le métal et le milieu corrosif qui se déroule conformément à la cinétique chimique. Dans ce type de corrosion, l'oxydation du métal et la réduction de l'agent agressif se font au même endroit et sans échange de charge électrique. De même, les produits de corrosion se forment directement dans la zone corrodée. Ce mode de corrosion concerne notamment l'oxydation à haute température des métaux et alliages dans l'air et la corrosion dans ces milieux diélectrique (non conducteurs de courant électrique).

II.7.1.1.2. Corrosion électrochimique

Elle est due à l'attaque des métaux par des liquides électro-conducteurs. Dans ce cas, le processus de corrosion s'accompagne d'un courant électrique qui circule à l'intérieur du réseau métallique. Les zones où se produisent l'oxydation du métal et la réduction du milieu peuvent être pratiquement confondues ou relativement éloignées (quelques micromètres à quelques centimètres). [7]

II.7.1.2. Différents types de corrosion

Plusieurs cas types de corrosion peuvent être distingués suivant l'aspect (la morphologie) des dégradations.

II.7.1.2.1. Corrosion généralisée

La corrosion se produit avec la même vitesse sur toute la surface du métal en contact avec le milieu agressif. On a l'habitude d'adopter une surépaisseur de corrosion qui tient compte de la durée de vie que l'on désire pour l'appareil en fonction de la vitesse de corrosion. [7]

II.7.1.2.2. Corrosion localisée

La corrosion se produit avec des vitesses différentes à divers endroits de la surface du métal ; elle peut présenter les formes suivantes :

- Corrosion par piqûres, localisée dans certains endroits ponctuels ; sur le reste de la surface, le métal n'est pas corrodé.
- Corrosion inter cristalline, se manifestant uniquement aux joints des grains du métal.

- Corrosion sous tension, se produisant dans une zone sollicitée par une contrainte mécanique. Ce type de corrosion provoque des fissures perpendiculaires à la direction de contrainte.

- Fatigue-corrosion ; la fatigue en milieu corrosif conduit à la fissuration et à la rupture pour un nombre de cycles et une contrainte bien inférieurs au cas de fatigue en milieu non corrosif.

- Corrosion galvanique, se produisant lorsque deux métaux différents (ayant un potentiel électrochimique différent) sont entre eux dans un milieu corrosif. Le contact des deux métaux forme une pile électrique qui débite un courant provoquant corrosion du métal le plus négatif.

- Corrosion caverneuse, au contact imparfait entre un métal et un non-métal se forme une fente (caverne) dans laquelle le liquide stagne. Dans le cas où l'on a affaire à de l'eau ou à une solution aqueuse, l'oxygène dissous dans l'eau se consomme dans un processus de corrosion.

L'eau stagnant dans la fente est ainsi appauvrie en oxygène et forme avec l'eau ambiante (extérieure) une pile de concentration ; le courant de cette pile corrode le métal non aéré par un processus électrochimique.

- Corrosion biologique ; le métal est attaqué par des produits secondaires dus à la présence en micro-organismes (par exemple, corrosion par des sulfures provenant de la réduction des sulfates par des bactéries).

- Corrosion sélective ; dans un alliage, seul un des composants est attaqué, ce qui détruit la pièce qui devint poreuse et perd toute sa résistance mécanique.

Le processus de corrosion est influencé par une série de paramètres lesquels on peut citer les suivants :

- La nature de l'alliage ou du métal.
- La nature du fluide agressif.
- Les conditions physico-chimiques (température, agitation, vitesse d'écoulement...)

- L'état de surface du métal. [7]

II.7.1.3. Protection contre la corrosion

La protection contre la corrosion doit répondre à des sollicitations complexes et variées du point de vue matériaux, mécanismes, milieux agressifs, facteurs mécaniques et physicochimique, etc. il existe une multitude de moyens de lutte contre la corrosion : la très grande majorité d'entre eux font appel à un des deux modes d'action suivant :

- Action sur le matériau.
- Action sur le milieu agressif.

Dans le premier groupe sont compris :

- L'utilisation des métaux et alliages ou des matériaux non métalliques résistant à la corrosion.
- Les traitements de surface améliorant le comportement global de la pièce.

Dans le deuxième groupe sont comprises toutes les actions susceptibles de diminuer l'agressivité du milieu ambiant et notamment l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion.

Un groupe à part dans la protection contre la corrosion est constituée par les méthodes électrochimiques, à savoir la protection cathodique et la protection anodique. [7]

II.7.3. Vibrations

Les vibrations constituent un paramètre essentiel à prendre en compte dans la conception d'un échangeur, au même titre que les transferts de chaleur ou les pertes de charge. Outre les aspects classiques (chocs, spectre de vibrations) issus du milieu extérieur, les échangeurs induisent leurs propres vibrations sous l'effet du fluide qui les parcourt. Suivant la vitesse d'écoulement du fluide côté calandre, les tubes qui vibrent à leurs fréquences propres peuvent se déplacer suffisamment pour entrer en collision.

Il s'ensuit un phénomène de fatigue pouvant aller jusqu'à la fuite ou la rupture. [7]

II.7.4. Encrassement

L'encrassement peut être défini comme l'accumulation des éléments solide indésirables sur l'interface, affecte une grande variété d'opérations industrielles.

Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments. Après un certain temps de fonctionnement, les anomalies les plus courantes sont en générale due à l'encrassement et à la corrosion qui provoquent la diminution du coefficient d'échange thermique, et peuvent aller jusqu'au bouchage, et la perforation des échangeurs.

L'encrassement et la corrosion restent les phénomènes les moins compris de l'industrie ; ils se traduisent par :

- Un surdimensionnement des appareils dans les bureaux d'études.
- Une dépense d'énergie supplémentaire.
- Le remplacement des appareils corrodés.
- Des couts d'arrêt des installations pou démontage et nettoyage. [7]



Figure II. 16 : Encrassement de l'échangeur de chaleur (photo réelle) [19]

II.7.4.1. Les causes d'encrassement :

Les causes d'encrassement sont diverses selon les origines, on peut distinguer essentiellement :

- Encrassement due aux matières de suspension sous forme insolubles, sableuses ou argileuses apporté par l'eau avant l'introduction dans le circuit. Elles peuvent être déposé par tout ou la vitesse de circulation est réduite.

- Encrassement due aux organismes : surtout dans le circuit de refroidissement à recyclage, les conditions (aération, lumière, température...) sont très favorables au développement des organismes vivants (algues, champignons...).
- Encrassement due à la précipitation des sels minéraux, déposés sur les parois des échangeurs. [7]

II.7.4.2. Les types d'encrassement

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt selon les conditions d'utilisation de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant de l'encrassement est conduit à distinguer les six types différents peuvent alors être définis :

II.7.4.2.1. L'encrassement particulaire

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation sur les surfaces d'échange des 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 (oxyde et hydroxyde de fer).
- Les écoulements gazeux peuvent être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion. [13]

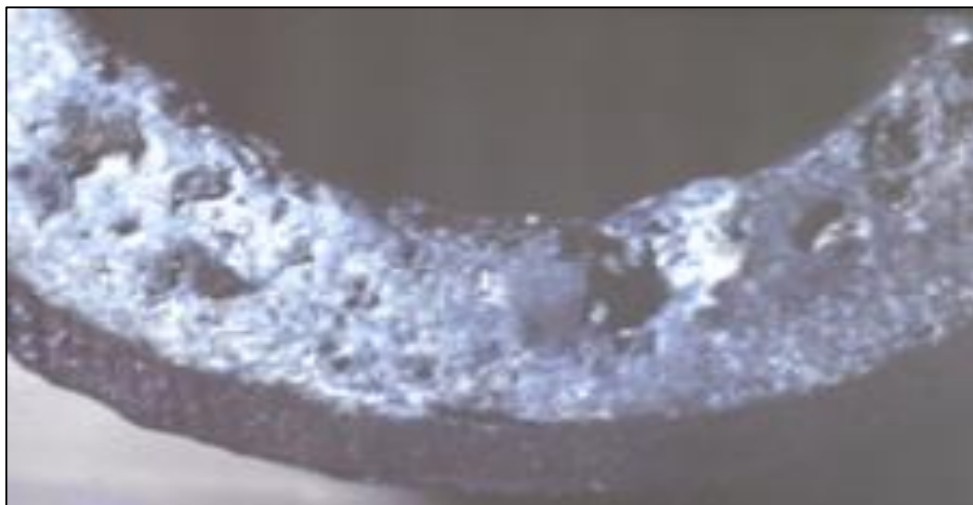


Figure II.17 : Dépôts de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur de chaudière MP [14]

II.7.4.2.2. L'encrassement biologique

L'encrassement biologique est dû au développement de micro-organismes qui créent un film encrassant au contact de la surface d'échange. Il peut être causé par trois grands types de micro-organismes :

- Les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif de type hydrocarbures.
- Les algues dont le développement est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse.
- Les champignons dont le développement est dû aux changements des conditions ambiantes telles que l'humidité, la température ou le PH. Dans certains cas extrêmes, il peut même être caractérisé par l'apparition de coquillages. [13]



Figure II.18 : Dépôts de slime bactérien, hydrocarbures et oxydes métalliques dans un échangeur de chaleur eau hydrocarbures (raffinerie de pétrole) [14]

II.7.4.2.3. L'encrassement par réaction chimique

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit au niveau de la surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent polymérisation ; il est en la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques.

Les vitesses de telles réactions chimiques dépendent fortement de la température, de la pression, de la concentration et de la présence d'éléments catalyseurs. Toutefois, la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes de surface et de transfert. [13]

II.7.4.2.4. 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 forcées ou de givre) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide.

Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre). [13]

II.7.4.2.5. La corrosion

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement. Les produits de la réaction qui se forment et restent sur la surface d'échange créent l'encrassement.

Il s'agit là d'un mécanisme de corrosion. Lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générés, en amont l'encrassement correspondant est du type particulaire. [13]

II.7.4.2.6. L'entartrage

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide [Rodier 1971]. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles.

L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

- La limite de solubilité du sel contenu dans l'eau doit être dépassée.
- La vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.

L'entartrage peut se produire dans les échangeurs refroidis à l'eau, dans les unités de dessalement d'eau de mer ou saumâtre, dans les chaudières, dans les échangeurs de l'industrie agroalimentaire, et dans les systèmes géothermiques. [13]



Figure II.19 : Entartrage d'une chaudière à tube de fumée ($p=15$ bars) [14]

II.7.4.3. Mécanisme de l'encrassement

Phénoménologiquement, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes.

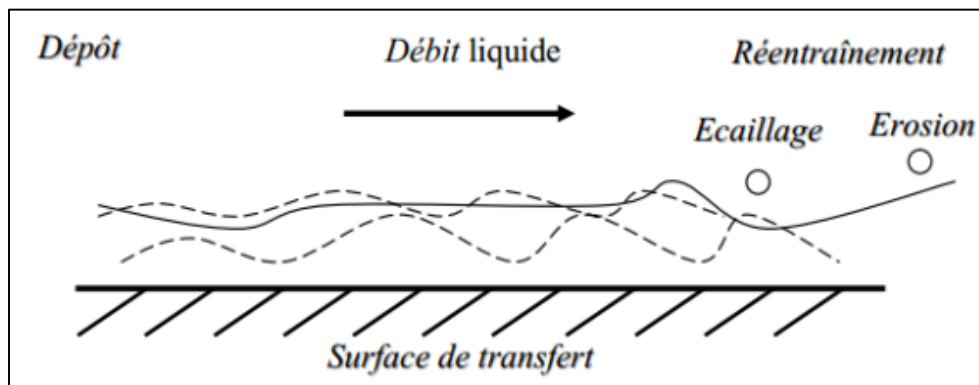


Figure II.20 : Représentation schématique d'encrassement dans le cas d'un liquide [20]

Les mécanismes d'encrassement sont décomposés de cinq événements séquentiels :

II.7.4.3.1. L'initiation

Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.

II.7.4.3.2. Transport des particules

Ce transport peut être mécanique par impaction sur un obstacle diffusif, par mouvement turbulent ou bien généré par un champ de force extérieur thermique ou électrique.

Dans de nombreux cas, ces différents mécanismes peuvent coexister. [20]

II.7.4.3.3. Adhésion des particules

Toutes les particules amenées au voisinage de la paroi n'adhèrent pas obligatoirement sur celle-ci, les phénomènes sont essentiellement contrôlés par les force d'adhésion et de cohésion de dépôt. [20]

II.7.4.3.4. Réentraînement des particules déposées

Certaines des particules déposées peuvent être réent rainées sous forme d'agglomérats arrachés à la couche de dépôt sous l'action des forces aérodynamiques.

II.7.4.3.5. Le Vieillissement

Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline du dépôt du phénomène tels que la déshydratation ou la polymérisation, il y'a alors diminution des forces d'adhésion du dépôt qui peut être arraché sous l'action des forces aérodynamique. [20]

II.7.4.4. Prévention de l'encrassement

Plusieurs méthodes existent pour limiter l'encrassement dans les échangeurs. Le choix de l'une ou de plusieurs de celles-ci dépend bien entendu de l'efficacité de la méthode, du type d'encrassement et aussi de nombreux paramètres économiques. Les efforts les plus importants pour atténuer les effets néfastes de l'encrassement se situent essentiellement pendant les phases de fonctionnement et d'arrêt de l'échangeur. [7]

Mais en fait, il est possible d'avoir une action positive pendant les quatre stades suivant de la vie d'un échangeur :

- Dimensionnement.
- Construction et montage.
- Fonctionnement.
- Arrêt.

Les procédés mécaniques ou chimiques de prévention de l'encrassement pendant la phase de fonctionnement de l'échangeur peuvent améliorer de façon significative les performances de l'appareil, mais également permettent d'augmenter le temps de service entre deux arrêts de maintenance. Les techniques utilisées pour les liquides sont bien adaptées lorsque les dépôts sont tendres et friables. Diverses techniques sont disponibles sur le marché pour le nettoyage en continu de la surface interne d'échangeurs tubulaires : à boules, à brosses ou à ressort. Ces procédés nécessitent une filtration en amont de l'échangeur, Le dimensionnement devra prendre en compte les recommandations suivantes :

- Utiliser de préférence un faisceau à pas carré pour faciliter le nettoyage manuel.
- Equiper l'échangeur de plusieurs évents pour permettre le relâchement des vapeurs corrosives, ainsi que équipements annexes pour recueillir ces vapeurs.
- Essayer de maintenir à une valeur aussi élevée que la vitesse de circulation de fluide pour minimiser l'épaisseur des dépôts.
- Un surdimensionnement des surfaces de contact.
- D'utilisation de surface lisse pour résister l'adhérence des très petits cristaux. [7]

II.8. Nettoyage des échangeurs

II.8.1. Nettoyage mécanique

Desserrer le paquet de plaques, ôter les tirants, déplacez le fond mobile contre le pied et faites glisser les plaques suivant des parts pour permettre de les nettoyer séparément avec une brosse ou de l'eau sous pression. Quand vous utilisez de l'eau sous pression, les plaques doivent être posées à plat pour éviter de la abîmées.

- N'utilisez jamais de brosse métallique qui pourrait créer des amorces de corrosion des plaques.
- Soyez prudent de ne pas endommager les joints et de s'assurer qu'ils sont en bon état avant de les remonter sur l'échangeur. [17]

II.8.2. Nettoyage chimique

Le nettoyage des plaques sans démonter les plaques de l'échangeur est possible. Monter un système de nettoyage en place sur les orifices de l'échangeur et faites circuler sur chaque circuit un produit de nettoyage approprié. Assurez-vous de la bonne tenue des plaques et des joints par rapport à ce produit. [17]

II.9. Conclusion

De nos jours, par suite de l'accroissement relatif du prix de revient de l'énergie, on recherche dans tous les cas à obtenir le rendement maximal d'une installation pour une dépense d'énergie minimale. C'est pour ça les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie. Le bon fonctionnement de l'échangeur de chaleur demande des interventions complexes et de la main d'œuvre qualifié ainsi qu'un bon entretien conduit toujours à un bon fonctionnement d'un équipement et à une réduction des temps d'arrêtes.

C *Chapitre III*

Protocol expérimental et résultats

III.1. Introduction

Cette partie présente les procédures expérimentales, les produits chimiques, le matériel et les résultats obtenus au cours de cette étude au niveau du laboratoire de l'université (labo 16 hall technologique).

III.2. Matériaux utilisés

Le matériau que nous avons travaillé avec, a été choisi par rapport au types des essais et au but de cette étude.

III.2.1. Préparation des échantillons

❖ Choix et découpage des plaques

Les échantillons que nous avons choisis sont en acier C-1020 SAE (acier au carbone 1020), ce type des matériaux est le plus couramment utilisé, il a une faible teneur en carbone qui offre de meilleures propriétés mécanique et physiques telles que la soudabilité, la ductilité et une grande résistance à la corrosion.

Nous avons découpé une plaque d'acier en petites tailles pour être facile à utiliser.



Figure III.1 : Echantillons d'acier C-1020.

Propriété mécanique de l'acier C-1020

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

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

Composition chimique d'acier C-1020

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

C	Mn	P	S	Fe
17 - 0.23	0.3-0.6	≤ 0.04	≤ 0.05	99,0 - 99,5

❖ Polissage des plaques

On fait le polissage des plaques à l'aide d'une appareil polisseuse dont l'élément principale de cette dernière c'est le papier verre avec des différents numéros (60, 80, 120, 400, 1200, 2000).



Figure III.2 : Appareil polisseuse.

Le polissage permet de retirer par abrasion les impuretés et les défauts d'une surface pour obtenir une surface de haute qualité, brillante et homogène. Le polissage est toujours lié d'un petit lavage à l'eau distillée et un simple séchage sans frottement.

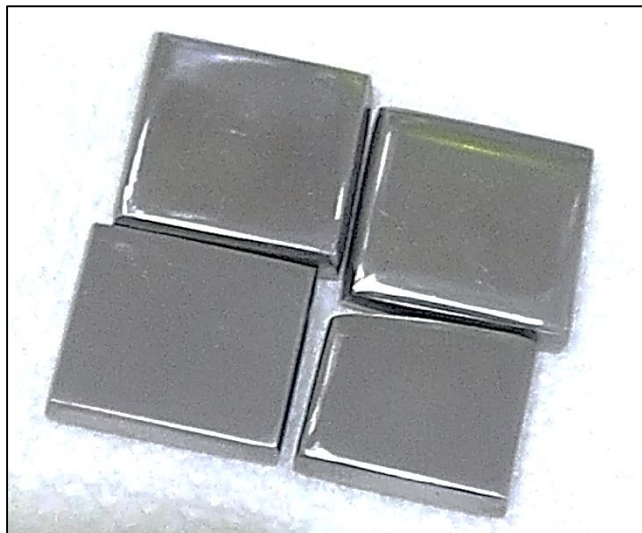


Figure III.3 : Echantillons après polissage

❖ Pesée les plaques

On utilise dans cette étape une balance électronique pour savoir la masse exacte de chaque échantillon.



Figure III.4 : Un échantillon sur la balance.

III.2.2. Produits d'entartrage

❖ Préparation du tartre

Pour préparer la pâte du tartre, nous avons utilisés le bicarbonate de soude (NaHCO_3) et le sel de chlorure de calcium (CaCl_2), cette pâte permet la formation d'une couche dure sur nos échantillons.

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

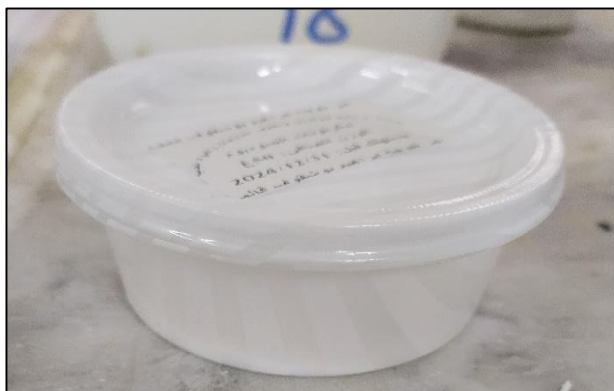


Figure III.5 : Bicarbonate de sodium.

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.3 : 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

- ❖ **CaCl₂** : Chlorure de calcium (ou dichlorure de calcium).

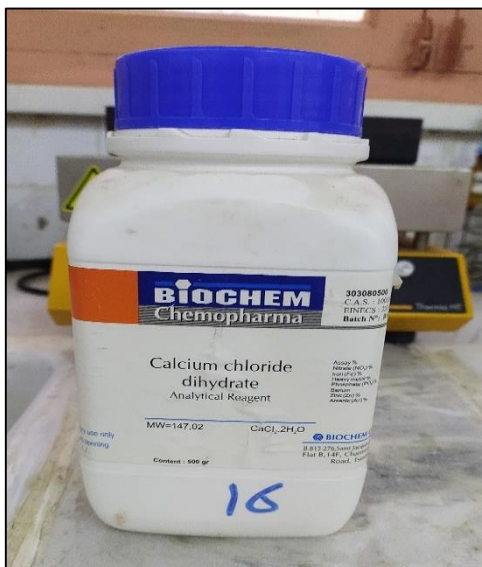


Figure III.6 : Chlorure de calcium.

Formule chimique : CaCl₂ (anhydre).

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

Masse molaire = 110,984 ± 0,008 g·mol⁻¹

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

Caractéristiques principales

Tableau III.4 : Caractéristiques principales de Cacl₂.

Produit anhydre	
% Cacl ₂	>96 %
Masse Volumique	2150 kg/ m ³
Fusion	772°C
Solubilité maximum	745 g/l

III.2.3. Produits d'encrassement

❖ L'huile de machine

L'huile de machine est une huile minérale dite « **huile moteur** », elle est utilisée pour réduire les frottements entre les différents éléments mécaniques, dissiper la chaleur dans le moteur ainsi que le nettoyage et la protection des éléments du moteur.

III.2.4. Procédés et solutions de nettoyage

La soude NaOH

La soude caustique c'est une base forte sous forme solide, constitué de cations sodium (Na^+) et d'anions hydroxyde (OH^-), très soluble dans l'eau. 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

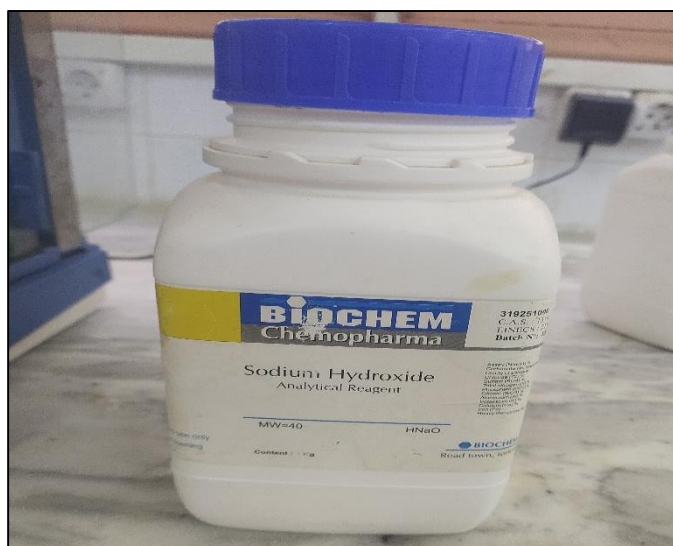


Figure III.7 : L'hydroxyde de sodium.

L'acide chlorhydrique HCl

Acide chlorhydrique ou solution aqueuse de chlorure d'hydrogène est un acide fort de formule chimique HCl . Son apparence est incolore. Il est utilisé comme réactif chimique. 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°C, solution à 37%

Point de fusion : 48°C, 38% HCl

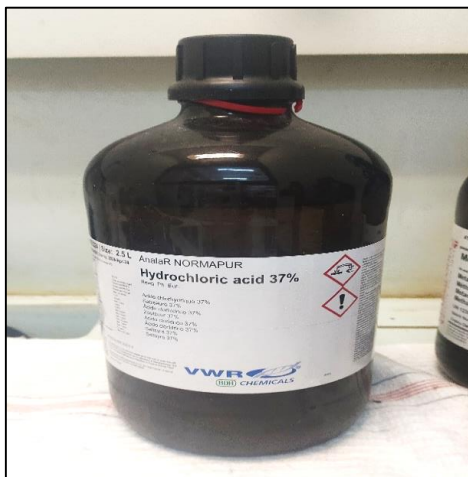


Figure III.8 : Acide chlorhydrique.

L'acide sulfurique H₂SO₄

L'huile de vitriol ou vitriol fumant, est un composé chimique de formule H₂SO₄. C'est un acide minéral, liquide, visqueux, incolore et inodore, miscible à l'eau en toutes proportions, en libérant des cations hydroniums en dissolution. Température d'ébullition : 337 °C, Point de fusion : 10,31 °C

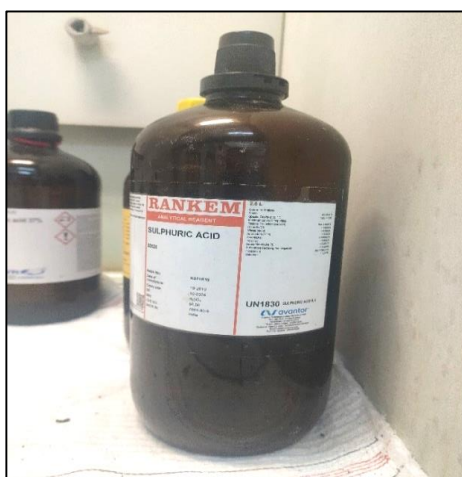


Figure III.9 : Acide sulfurique.

III.3. Procédure expérimental

III.3.1. L'entartrage

- En utilisant la balance électronique on a pesé 4g de CaCl_2 et 4g de NaHCO_3 .

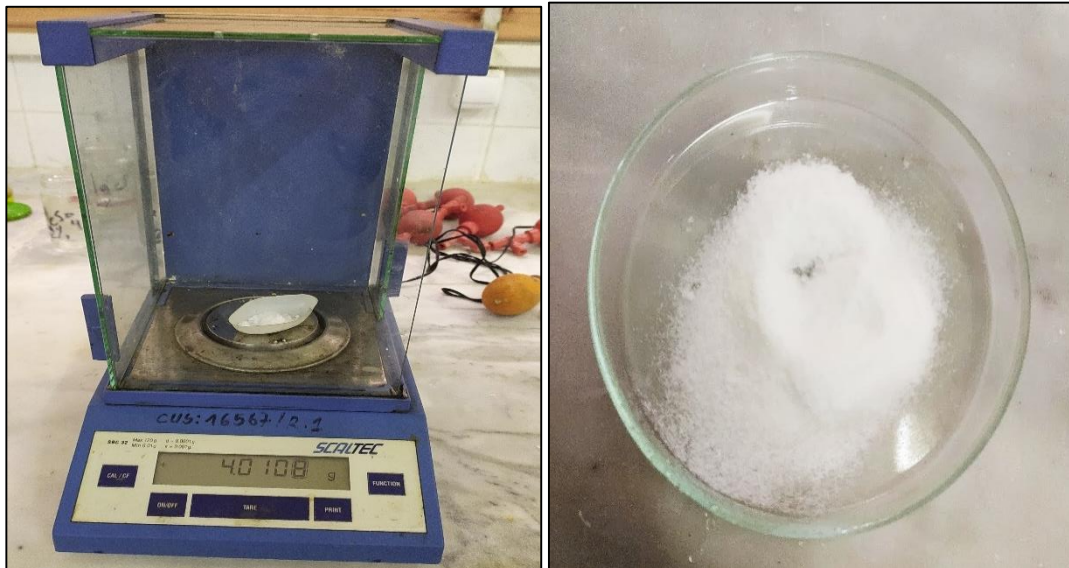


Figure III.10 : Pesé de CaCl_2 et NaHCO_3 .

- On mélange les deux substances et on les rajoute 7 gouttes d'eau de robinet, goutte par goutte jusqu'à la formation d'une sorte de pâte montrée ci-dessous.



Figure III.11 : La pâte formée.

- Après cette étape on enveloppe toute la surface des échantillons avec cette pâte et on les laisse pour le séchage pendant 3 à 5 jours.

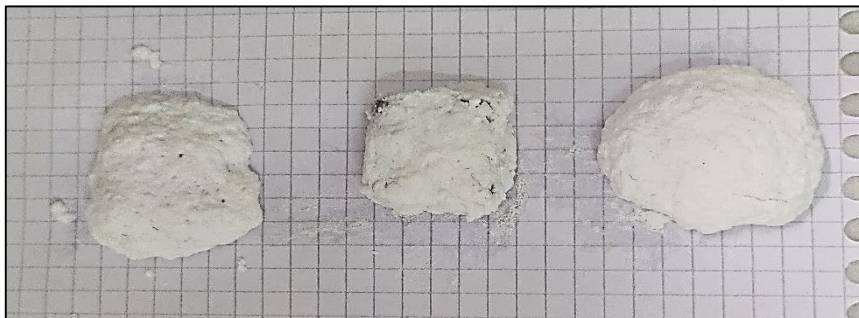


Figure III.12 : Echantillons envelopper de pâte.



Figure III.13 : Echantillons après séchage (entartrés).

- Ensuite on pèse les échantillons entartrés.

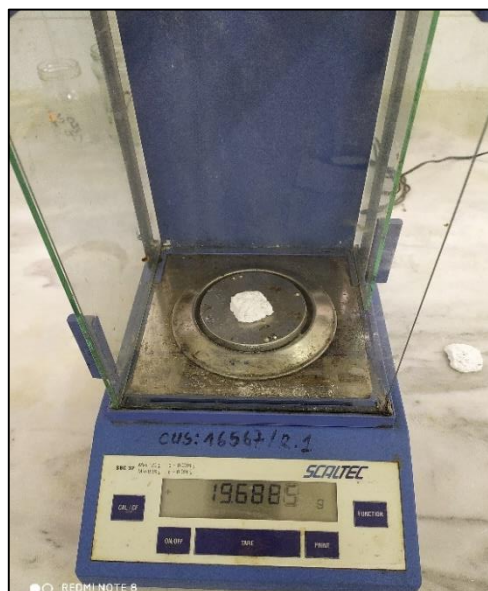


Figure III.14 : Un échantillon entartré sur la balance.

III.3.2. L'encrassement

- On met une quantité d'huile de machine dans un cristallisoir.
- On ajoute les échantillons dans le cristallisoir.
- Ensuite on le met sur la plaque chauffante à haute température (de 250 °C à 350 °C) jusqu'au changement de couleur d'huile et la formation d'une couche de crasse.

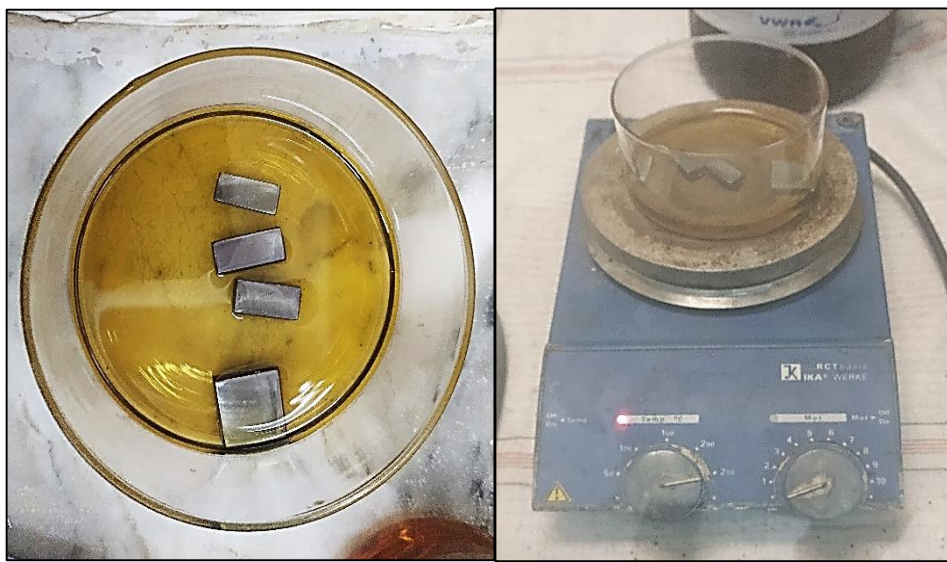


Figure III.15 : Les échantillons avant (à gauche) et après (à droite) l'échauffement d'huile.

- Après un bon moment on observe une couche de dépôts qui se forme sur toutes la surface des échantillons.
- On retire les échantillons et on les laisse sécher.



Figure III.16 : Les échantillons après la formation de dépôts.

- Ensuite on pèse les échantillons encrassés.

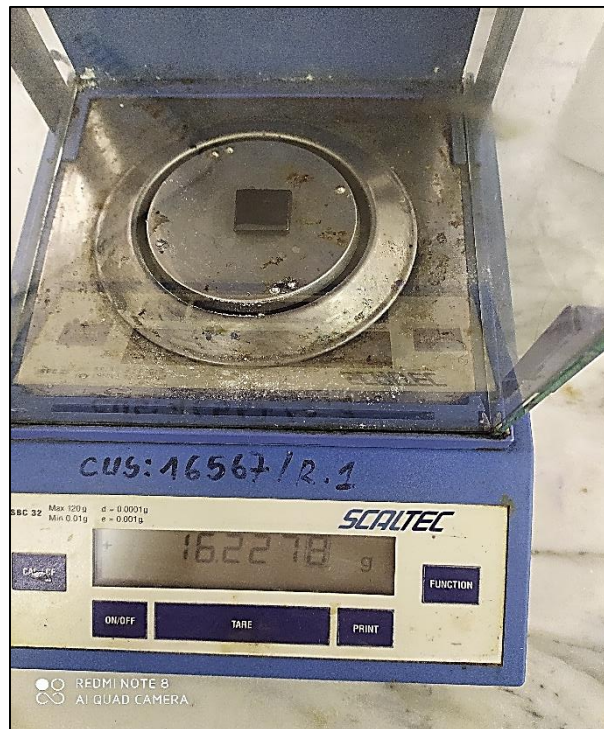


Figure III.17 : Un échantillon encrassés sur la balance.

III.4. Préparation des solutions et protocole de nettoyage chimique

III.4.1. Préparation des solutions de nettoyage

- La soude NaOH

On a préparé 3 solutions de la soude de différente concentration (1% 3% 5%) à partir de la loi :

$$V1 \rightarrow m2 \rightarrow 100\%$$

$$m1 \rightarrow C1$$

1. Solution de la soude NaOH à 1%

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

$$m1 \rightarrow 1\%$$

$$m1 = \frac{1 \times 100}{100} \rightarrow m1 = 1 \text{ g}$$

2. Solution de la soude NaOH à 3%

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

$$m1 \rightarrow 3\%$$

$$m1 = \frac{3 \times 100}{100} \rightarrow m1 = 3 \text{ g}$$

3. Solution de la soude NaOH à 5%

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

$$m1 \rightarrow 5\%$$

$$m1 = \frac{5 \times 100}{100} \rightarrow m1 = 5 \text{ g}$$



Figure III.18 : Solutions de NaOH de différentes concentrations.

- L'acide chlorhydrique HCL

On a préparé 3 solutions de L'acide chlorhydrique HCl de différente concentration (1% 3% 5%) on a calculé le volume de chaque concentration avec les lois suivantes :

$$C1V1 = C2V2 \quad V1 = C2V2 / C1 \dots\dots\dots (1)$$

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

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

$$V1 = \frac{C2}{C1} * V2$$

1. Solution d'HCL à 1%

$$V1 = \frac{1}{37} * 100 \text{ ml} \rightarrow V1 = 2.7 \text{ ml}$$

2. Solution d'HCL à 3%

$$V_1 = \frac{3}{37} * 100 \text{ ml} \rightarrow V_1 = 8.1 \text{ ml}$$

3. Solution d'HCL à 5%

$$V_1 = \frac{5}{37} * 100 \text{ ml} \rightarrow V_1 = 13.5 \text{ ml}$$



Figure III.19 : Solutions d'HCL de différentes concentrations.

- **L'acide sulfurique H₂SO₄**

On a préparé 3 solutions de L'acide sulfurique H₂SO₄ de différente concentration (1% 3% 5%) on a calculé le volume de chaque concentration avec la même loi :

$$V_1 = \frac{C_2}{C_1} * V_2$$

1. Solution d'H₂SO₄ à 1%

$$V_1 = \frac{1}{96} * 100 \text{ ml} \rightarrow V_1 = 1 \text{ ml}$$

2. Solution d'H₂SO₄ à 3%

$$V_1 = \frac{3}{96} * 100 \text{ ml} \rightarrow V_1 = 3.1 \text{ ml}$$

3. Solution d'H₂SO₄ à 5%

$$V_1 = \frac{5}{96} * 100 \text{ ml} \rightarrow V_1 = 5.2 \text{ ml}$$



Figure III.20 : Solutions d' H_2SO_4 de différentes concentrations.

III.4.2. Protocole de nettoyage chimique

- On prendre un échantillon (entartré/ encrassé) après le pesage et on le mettre dans un premier bicher qui contient la solution de NaOH à 1% pendant 3 min.
- On prélève l'échantillon pour le peser.
- On remettre l'échantillon après pesage dans un deuxième bicher qui contient la solution de NaOH à 3% pendant 3 min.
- On prélève l'échantillon pour le peser une autre fois.
- On remettre l'échantillon après pesage dans un troisième bicher qui contient la solution de NaOH à 5% pendant 3 min.
- On prélève l'échantillon pour le peser une dernière fois.

On fait les mêmes étapes avec un deuxième échantillon et les différentes concentrations d'HCL, et un troisième échantillon avec différentes concentrations d' H_2SO_4 et on suivre la diminution de masse jusqu'à la fin de nettoyage.

1. On a fait le même protocole de nettoyage et avec les mêmes étapes pour les échantillons encrassés.

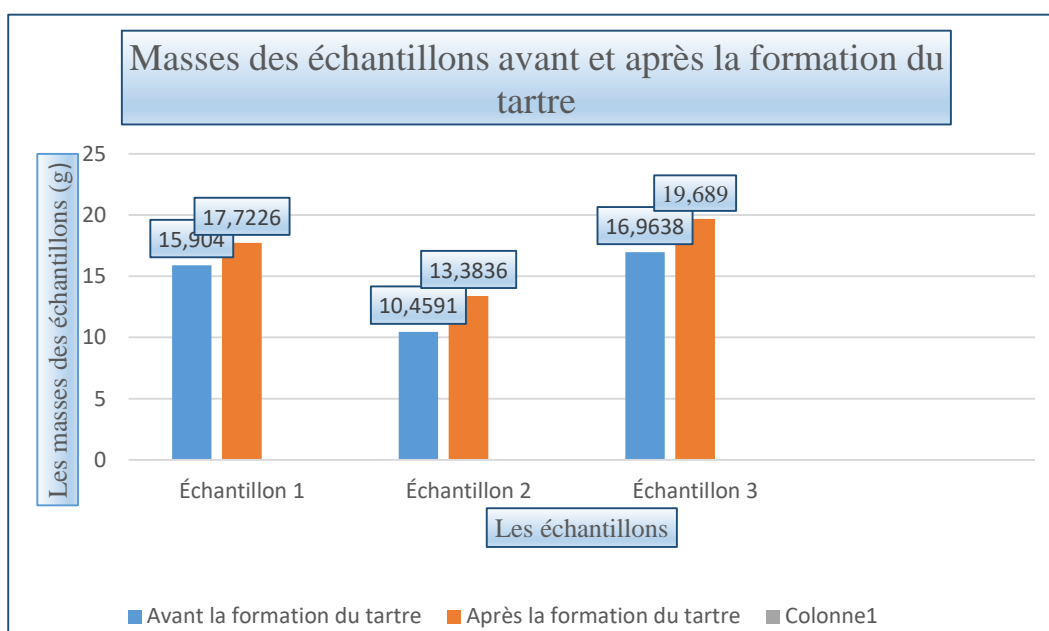
III.5. Résultats et discussions

III.5.1 Résultats d'entartrage

Les masses des échantillons avant et après la formation du tartre sont exprimés sur le Tableau ci-dessous.

Tableau III.5 : Masses des échantillons avant et après la formation du tartre.

	Masse avant la formation du tartre	Masse après la Formation du tartre
Échantillon 1	$m_1 = 15.9040 \text{ g}$	$m_1' = 17.7226 \text{ g}$
Échantillon 2	$m_2 = 10.4591 \text{ g}$	$m_2' = 13.3836 \text{ g}$
Échantillon 3	$m_3 = 16.9638 \text{ g}$	$m_3' = 19.6890 \text{ g}$

**Figure III.21 :** Masses des échantillons avant et après la formation du tartre

D'après le tableau et l'histogramme on remarque une augmentation des masses des échantillons entartrés par rapport à leurs première masse (m_1 , m_2 , m_3) après la formation du tartre sur leurs surfaces.

Tableau III.6 : Masses des échantillons après le nettoyage chimique.

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
	NaOH	HCL	H2SO4
Solution à 1%	$m_1'' = 16.0569 \text{ g}$	$m_2'' = 10.5729 \text{ g}$	$m_3'' = 17.0271 \text{ g}$
Solution à 3%	$m_1''' = 15.9334 \text{ g}$	$m_2''' = 10.4516 \text{ g}$	$m_3''' = 16.9640 \text{ g}$
Solution à 5%	$m_1'''' = 15.9186 \text{ g}$	$m_2'''' = 10.4420 \text{ g}$	$m_3'''' = 16.9364 \text{ g}$

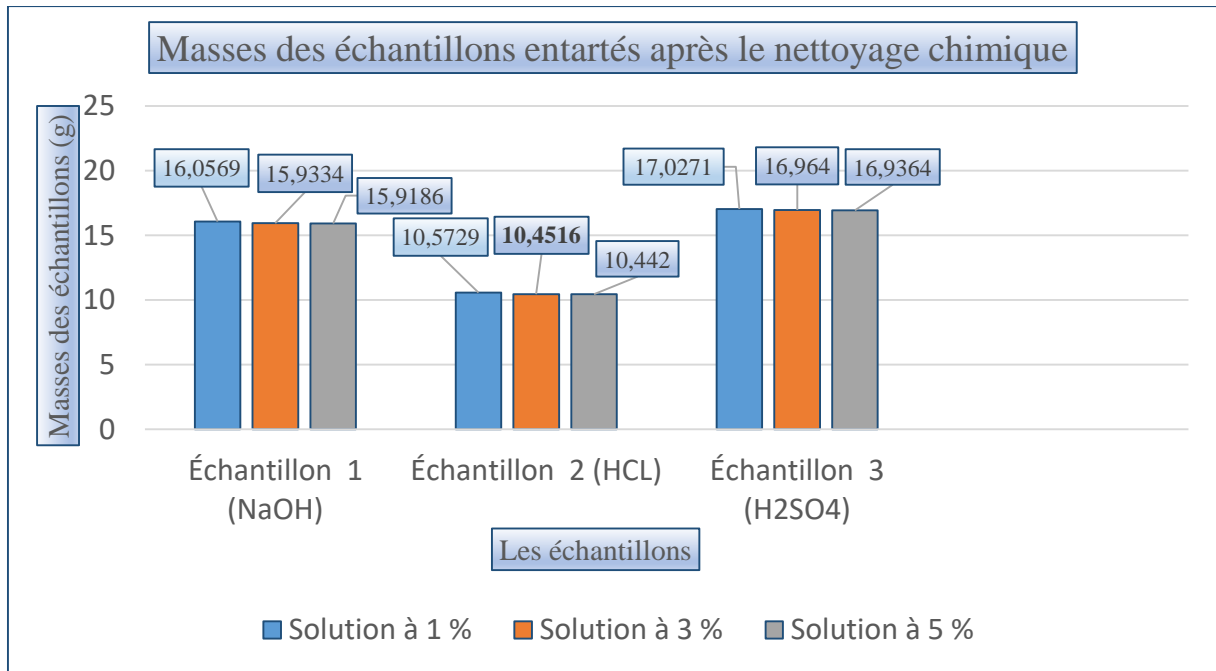


Figure III.22 : Masses des échantillons entartés après le nettoyage chimique

Le tableau et l'histogramme montrent les masses finales des trois échantillons entartés après le nettoyage chimique à l'aide de trois différents produits (NaOH, HCL, H2SO4), à trois différentes concentrations (1%, 2%, 3%).



Figure III.23 : Échantillons entartés après le nettoyage.

D'après le tableau III.6 et l'histogramme on peut dire que :

1. Pour le premier échantillon, on remarque que sa masse a été diminuée de 17,7226 g à 16,0569 g dans la solution de NaOH à 1%. Donc par rapport à sa première masse ($m_1 = 15,904$ g) l'échantillon n'est pas nettoyé à 100%, il a toujours des dépôts sur sa surface avec des traces de corrosion. Le même échantillon dans la solution à 3% on remarque aussi une diminution de la masse jusqu'à 15,9334 g mais y'a toujours des

dépôts de tartre. Dans la solution à 5% la masse est devenu 15.9186 g c'est toujours pas la première masse $m_1 = 15.9040$ g.

A la fin on peut dire que la soude NaOH n'est pas vraiment un fort nettoyant elle élimine les dépôts de tartre mais elle corrode le matériau.

2. Pour le deuxième échantillon, à 1% : $m_2 (10.4591\text{g}) < m_2'' (10.5729\text{ g}) \rightarrow$ diminution de masse mais le nettoyage n'est pas totale. Dans la solution à 3% : $m_2(10.4591\text{ g}) = m_2''' (10.4516\text{g}) \rightarrow$ c'est la meilleure concentration pour éliminer tous les dépôts de tartre sans endommager le matériau. Dans la solution à 5% $m_2'''' (10.4420) < m_2 (10.4591) \rightarrow$ le matériau a été légèrement détruit.

On peut dire à la fin que l'HCL c'est un bon nettoyant de tartre dans une solution de concentration à 3% ou on voit des bons résultats.

3. Pour le troisième échantillon dans la solution à 1% on voit que la masse a été diminuer mais : $m_3 = 16.9638\text{ g} < m_3'' = 17.0271\text{ g}$, pour la solution à 3% : $m_3 (16.9638\text{ g}) = m_3''' (16.9640\text{ g})$ donc c'est la meilleure concentration pour éliminer tous les traces du tartre sans endommager le matériau, à 5% on remarque que $m_3 (16.9638\text{ g}) > m_3'''' (16.9364\text{ g})$ et on voit que l'échantillon commence à se détruire donc cette concentration est trop forte pour le nettoyage.

Après le nettoyage des trois échantillons on peut dire :

- Le meilleur produit nettoyant pour l'entartrage c'est l'HCL (NaOH et S_2SO_4 influence sur la qualité du matériau).
- La meilleure concentration d'HCL c'est 3%(% n'élimine pas tous les dépôt et 5% corrode l'échantillon).

III.5.2. Pour l'encrassement

Les masses des échantillons avant et après la formation de la crasse sont exprimés sur le tableau ci-dessous.

Tableau III.7 : Masses des échantillons avant et après la formation de la crasse.

	Masse avant la formation de la crasse	Masse après la Formation de la crasse
Échantillon 1	$m_1 = 7.0057\text{g}$	$m_1' = 7.0071\text{ g}$
Échantillon 2	$m_2 = 16.2268\text{ g}$	$m_2' = 16.2280\text{ g}$
Échantillon 3	$m_3 = 7.6499\text{ g}$	$m_3' = 7.6515\text{ g}$

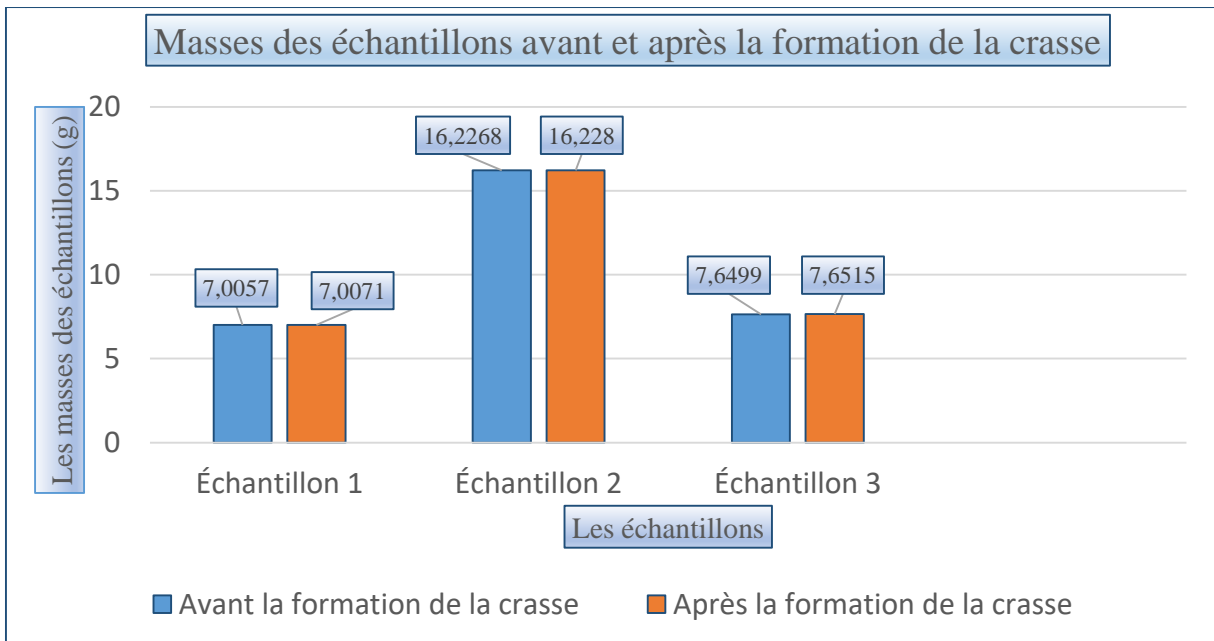
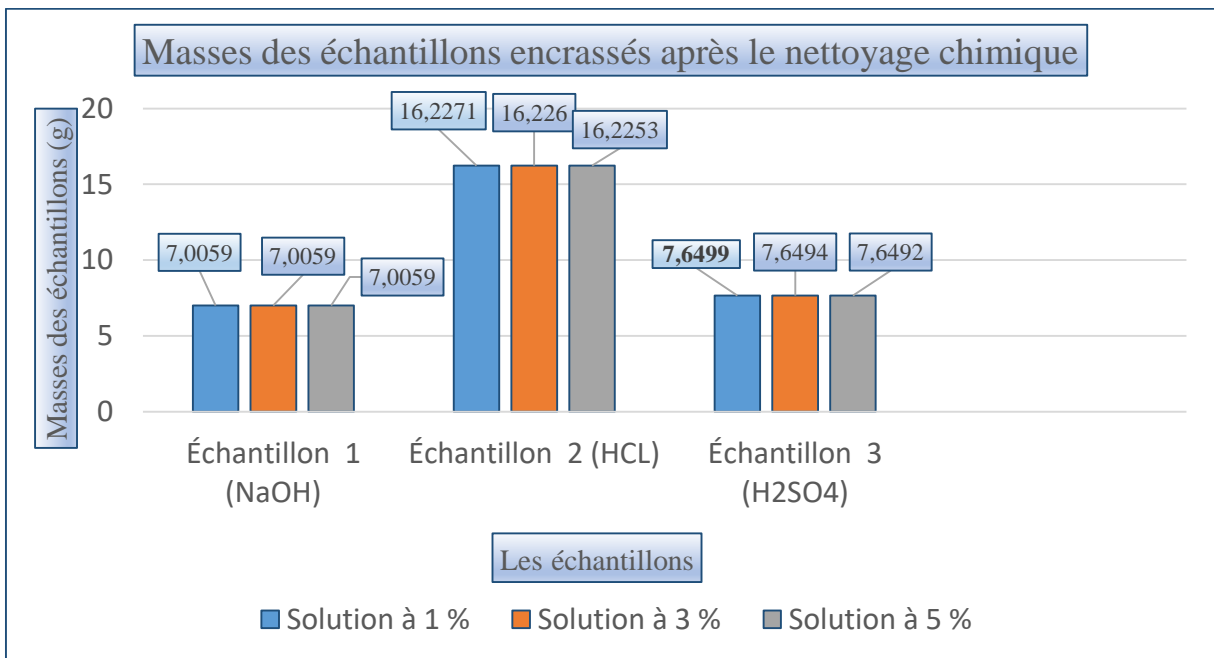


Figure III.24 : Masses des échantillons avant et après la formation de la crasse

D'après le tableau et l'histogramme on remarque une augmentation des masses des échantillons encrassés par rapport à m_1 , m_2 et m_3 après la formation de la crasse sur leurs surfaces.

Tableau III.8 : Masses des échantillons après le nettoyage chimique.

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
	NaOH	HCL	H2SO4
Solution à 1%	$m1'' = 7.0059 \text{ g}$	$m2'' = 16.2271 \text{ g}$	$m3'' = 7.6499 \text{ g}$
Solution à 3%	$m1''' = 7.0059 \text{ g}$	$m2''' = 16.2260 \text{ g}$	$m3''' = 7.6494 \text{ g}$
Solution à 5%	$m1'''' = 7.0059 \text{ g}$	$m2'''' = 16.2253 \text{ g}$	$m3'''' = 7.6492 \text{ g}$

**Figure III.25 :** Masses des échantillons encrassés après le nettoyage chimique

Le tableau III.8 et l'histogramme montrent les masses finales des trois échantillons encrassés après le nettoyage chimique à l'aide de trois différents produits (NaOH, HCL, H2SO4) à trois différentes concentrations (1%, 2%, 3%).

**Figure III.26 :** Échantillons encrassés après le nettoyage.

1. Pour le premier échantillon la masse se diminue jusqu'à 7.0059 g dans toutes les solutions (1%, 3%, 5%) $m_1 (7.0057g) < m_1'', m_1''', m_1'''' (7.0059g) \rightarrow$ nettoyage pas trop efficace, y'a toujours les traces de la crasse.
2. Pour le deuxième échantillon dans la solution à 1% $m_2 (16.2268 g) < m_2'' (16.2271 g) \rightarrow$ l'échantillon n'est pas totalement nettoyé, dans la solution à 3% $m_2 (16.2268 g) = m_2'''' = 16.2260 g \rightarrow$ élimination totale de la crasse, dans la solution à 5% $m_2 (16.2268 g) > m_2'''' 16.2253 g \rightarrow$ élimination de la crasse et détruite de matériau.
3. Pour le troisième échantillon dans la solution à 1% la masse a été diminuer jusqu'à $m_3 = 7.6499 g$ dès la première solution à 1% donc :
 $m_3 (7.6499 g) = m_3'' (7.6499 g) \rightarrow$ nettoyage efficace, élimination de toute la crasse sans influence sur le matériau.

Pour les solutions à 3% et à 5% :

$m_3 (7.6499 g) > m_3'''' (7.6494 g)$ et $m_3'''' (7.6492 g) \rightarrow$ nettoyage totale avec influence sur la qualité d'échantillon.

Après le nettoyage des échantillons on peut dire :

- Le meilleur produit nettoyant pour l'encrassement c'est l'H₂SO₄.
- La meilleure concentration d'H₂SO₄ c'est 1% (3% et 5% influence sur la qualité des échantillons).

III.6. Conclusion

A la fin de cette étude expérimentale nous avons pu déterminer un produit nettoyant efficace pour le nettoyage chimique d'entartrage et d'encrassement avec la concentration appropriée afin de protéger les équipements et les installations industrielles des différents problèmes de fonctionnements et assurer leur bon rondement.

Conclusion générale

La qualité de l'eau d'alimentation des échangeurs de chaleur (surtout à plaque) est très importante à l'industrie car elle influence directement sur le fonctionnement de ces installations, leur durée de vie, et leur rendement final.

Au cours de cette étude nous avons expliqué les différents problèmes de fonctionnements des échangeurs de chaleur à plaques, les causes de ces problèmes, l'influence de la qualité de l'eau de différentes compositions chimiques.

Nous avons étudié aussi à la partie pratique les phénomènes d'entartrage et d'encrassement et les nettoyants les plus efficace pour chaque phénomène au niveau de laboratoire de l'université de Skikda.

Grâce à cette étude, nous avons atteint plusieurs points importants :

- La qualité de l'eau doit être souvent contrôlée de l'entrée à l'usine jusqu'au passage et sortie des installations pour éviter les problèmes de fonctionnements.
- Le nettoyant le plus efficace pour l'entartrage c'est l'HCL.
- Le nettoyant le plus efficace pour l'encrassement c'est l'H₂SO₄.
- Un bon traitement de l'eau avec les méthodes appropriés permis d'un bon fonctionnement des échangeurs, un bon transfert thermique, moins de perte de charge, langue durée de vie et un rendement idéale.
- L'utilisation des inhibiteurs de tartre, d'encrassement et de corrosion est très importante.
- Il faut confirmer à chaque arrêt de l'usine, que les machines sont parfaitement entretenues.

Références bibliographique

- [1] OUGANA Abdel Moumene ; Etude et dimensionnement d'un système de refroidissement Tchou-lait, Candia, Mémoire de Master, Spécialité : Installations Energétique et turbomachines, Universités de Bejaia, (2018-2019), 3p.
- [2] Chapitre 01 : Introduction aux transferts de chaleur sur le lien : « https://www.univusto.dz/images/coursenligne/ctcd_yk.pdf »
- [3] BELHADI Nouredine ; Étude Thermique D'un Échangeur de Chaleur à Faisceau Tubulaire et Calandre (Eau de mer/Ammoniac), MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER, Spécialité : Génie Energétique, Université badji Mokhtar Annaba, (2019/2020).
- [4] Chapitre 01 : Généralités sur les échangeurs de chaleur sur le lien : « http://dSPACE.univtlemcen.dz/bitstream/112/5218/4/Chapitre_I_.pdf », Université de Tlemcen.
- [5] BEKOUICHE ABD BAKI ; Chapitre I : Généralités sur les échangeurs de chaleur, MEMOIRE FINAL (2020)
- [6] TAOURIT FARIDA ; Étude du comportement dynamique et Thermique de deux écoulements des fluides dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes), Mémoire de Master en Génie Energétique, Université Abou Bakr Belkaid-TLEMCEM (2012/2013)
- [7] BENYAHIA NADIRA, LAHMAR MERIEM ; Étude thermique de l'échangeur a faisceau et calandre E05 existant dans le complexe gazier du RHOURDE NOUSS (SONATRACH ALGERIE), MEMOIRE pour l'obtention du diplôme de MASTER En : Génie Mécanique, Spécialité : Génie Energétique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, (2017)
- [8] BOUZID FERIEL ; Simulation thermique d'un échangeur de chaleur a faisceau tubulaire et calandre, Mémoire d'obtention du diplôme de Master, Université badji Mokhtar Annaba (2020/2021)

- [9] Docteur Fatah MEBAREK OUDINA ; Échangeur de chaleur, Master en Mécanique énergétique, physique énergétique, Edition Al-Djazair
- [10] BOUDAUD Sabrina Amina, EL HACI Aicha ; Étude d'un échangeur à plaques, Mémoire de fin d'étude MASTER ACADEMIQUE, Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem, (2018/2019)
- [11] Chapitre : 4e année secondaire ; Chaleur et énergie thermique, Khan Academy
- [12] BOUKHAROUBENE Samy, MOKRANI Billal ; Etude et dimensionnement d'un échangeur a plaques a cevital Bejaia, Mémoire de Master en Énergétique, Université Abderrahmane MIRA, Bejaia, (2020/2021)
- [13] BERKAI Sylia, AISSAOUI Sabrina ; Études expérimentales d'encrassement des préchauffeurs de l'unité de traitement du brut sud, Mémoire de Master en Énergétique, Université Akli Mhand Oulhadj, Bouira, (2018/2019)
- [14] HARKAT Yasmina ; Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur, Mémoire du Master en Fiabilité et maintenance industrielle, Université M'hamed Bougara, Boumerdes (2007)
- [15] C. DUFFAU, J-M. GRILLOT, J-M. NAVARRO, R. VIDIL. Echangeurs de chaleur, l'encrassement dans les échangeurs : description, prévention et remèdes, Paris : Edition Tec et Doc, 19
- [16] BENTATA Karima ; ETUDE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A PLAQUES, Mémoire de Master, spécialité Génie chimique, Université de Abdel Hamid Ibn Badis, Mostaganem (2021)
- [17] ALI NEHARI Amine ; Étude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques et joints : Application aux fluides géothermiques, Mémoire de Master en Physique Énergétique et Matériaux, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen (2010-2011)
- [18] DAIRI Youcef, AOUIFI Seyyid ali ; Etude paramétrique d'un échangeur à plaques. Effets des conditions thermiques et de construction sur les paramètres thermo-

dynamiques, Mémoire de Master en Génie climatique, Université Yahia Fares, Medea (2021)

[19] DAEL Dael Hamoud, HAMMIA Ramzi, ALTAWILY Amjad ; « L'étude d'un échangeur de chaleur dans l'unité de récupération de gaz associée (unité de réinjection) », Mémoire de Master en Génie de Raffinage, Université Echahid Hamma Lakdhar, ELoued (2020-2021)

[20] BOUABDELLAH fatma Zohra, NASRI Meriem ; « Contribution numérique à l'étude des performances thermiques d'un échangeur de chaleur à plaques lors de traitement thermique d'une solution protéique avec la présence de plusieurs déflecteurs pour différents types de matériaux », Mémoire de Master en Chimie macromoléculaire, Université de Medea, (2019-2020)