REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie chimique

Réalisé par

Khelladi Nahla

Salem Zineb

Calcul numérique de la résistance thermique d'encrassement due au traitement thermique d'un pétrole brut dans un échangeur de chaleur

---

Le jury composé de :

M. R. Allouaoui	MCA, FT/UYF	Président
Mme. F/Z. Saidoune	MCB, FT/UYF	Examinatrice
M. A. Abiza	MAA, FS/UYF	Examinateur
M. Y. Mahdi	Professeur, FT/UYF	Directeur de Thèse

Année Universitaire : 2022 /2023

ملخص:

تعتبر رواسب احدى أكبر المشكلات التي تواجه معدات معالجة النفط الخام، الذي يؤدي الى انخفاض أ دائها الحراري وهيدروليكية ورداءة جودة الخام المعالج وبالتالي خسارة اقتصادية كبيرة لصناعة البترول. مع ذلك هناك العديد من ا لساليب الوقائية التي تحد من هذه الظاهرة ولكنها تتطلب معرفة وقت التدخل المناسب. يتعلق هذا العمل بالمحاكاة العددية للمقاومة الحرارية للترس بات التي تم تطويرها أ ثناء المعالجة الحرارية للنفط الخام في مصفاة مكونة من عدة بطاريات للمبادلات. تم تقديم نموذج رياضي ثم تمت محاكاته بواسطةAnsysFluent . تظهر نتائجالنموذج المصادق عليه بشكل عام أ ن درجة الحرارة تزداد في مبادلات الملف تعتمد زيادتها على وجود أو عدم وجود ترسب عازل. هذا يترجم الى انخفاض في معامل التبادل الكلي. يتبع تطورالمقاومة الحرارية للقاذورات شكل ن وع Kern-Seaton. الكلمات المفتاحي ة: بترول خام، مبادلات حرارية أ نبوبية، ترسب، مقاومة حرارية للترس بات، نموذج، Ansys .

Résumé :

L'encrassement fait partie des plus grands problèmes rencontrés au cours du fonctionnement des équipements de traitement de pétrole brut, il entraine une réduction des performances thermohydrauliques ce qui résulte à une mauvaise qualité de brut traité et des pertes économiques considérables. Cependant il existe plusieurs méthodes préventives qui limitent ce phénomène mais qui nécessitent la connaissance du temps approprié d'intervention.

Ce travail concerne la simulation numérique de la résistance thermique à l'encrassement développée lors du traitement thermique d'un pétrole brut dans une raffinerie composée de plusieurs batteries d'échangeurs. Un modèle mathématique est présenté puis simulé par Ansys Fluent. Les résultats du modèle validé montrent globalement que la température augmente dans les échangeurs de la batterie. Son augmentation dépend de la présence ou non de l'encrassement de nature isolante. Ceci se traduit par une diminution du coefficient d'échange global. L'évolution de la résistance thermique d'encrassement suit une forme type Kern-Seaton.

Mots clés : Pétrole brut, Echangeurs de chaleur tubulaires, Encrassement, Résistance thermique d'Encrassement, Modèle, Ansys.

Abstract:

Foulingis one of the biggestproblemsencountered in the operation of crudeprocessingequipment, resulting in reducedhydraulic-thermal performance resulting in poorquality of processedcrude and considerableeconomicloss to the petroleumindustry. However, there are severalpreventivemethodswhichlimitthisphenomenon but whichrequireknowledge of the appropriate intervention time.

This workconcerns the numerical simulation of the thermal resistance to foulingdevelopedduring the thermal treatment of crudeoil in a refinerycomposed of several batteries of exchangers. A mathematical model ispresented and simulated by Ansys Fluent. The results of the validated model show overallthat the temperatureincreases in the exchangersbattery. Itsincreasedepends on the presence or absence of depositedfouling. This translatesinto a decrease in the overall coefficient of exchange. The evolution of thermal resistance to foulingfollows a Kern-Seaton type shape.

Keywords: Crudeoil, Tubularheatexchangers, Fouling, Fouling thermal resistance, Model, Ansys.

Remerciements

A vant tout, notre remerciements vont à ALLAH le tout puissant, pour le courage qu'il nous a donné et la force pour mener ce travail jusqu'à la fin.

N**ous souhaitons tout d'abord adresser un très grand remerciement et le plein respect de la vertu au personne qui nous a encadré Mr.* ***Youcef MAHDI*,*

Professeur Docteur à l'université de Médéa, nous volons le remercier pour son accueil, son aide, sa gentillesse, sa disponibilité tout le long de ce travail

Et ces précieux conseils constructifs.

N**ous voulons exprimer par ces quelques lignes de remerciements à* ***Mr. Mounir ZIRARI *Professeur Docteur à l'université de Médéa,pour son aide pour la formation de Logiciel Ansys et pour ses encouragements.*

***E**n fin, nous ne pouvons achever ce mémoire sans exprimer notre gratitude à tous les enseignantes et les enseignants du département de génie des procédés de l'université de Médéa pour leur dévouement et leur assistance tout au long de nos études universitaires.*

Dédicaces

J'exprime ma gratitude et mes remerciements les plus sincères et les plus Profonds à Dieu tout puissant qui m'a donné la force et la patience pour pouvoir accomplir ce travail à terme.

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à mes parents les trois chères du monde qui m'ont appris les grandes valeurs et le sens de l'humanité que dieu les protège.

A mes chère sœurs Manel, Meriem, Sabrine, Amina, Souhila, Soumia. Pour les encouragements, la confiance et le soutien moral.

A mon binôme" ZINEB" Qui a donné beaucoup de motivation.

A toute la famille Khelladi
Mes amis

A toute la promotion 2018
A tous ceux qui me sont chers

Nahla

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

en guise d'amour, de respect et de reconnaissance

Aux deux être les plus chères au monde, mon père et ma mère,

pour leurs soutien, sacrifice, patience, ainsi pour leurs conseilles

dont ils ont fait preuves pour m'avoir à la première réussite dans

ma vie, que dieu les protèges et les entoure de sa bénédiction.

A mes très chères sœurs et frère.

A toute ma famille.

Votre soutien réserve et vos encouragements m'ont permis

d'affronter beaucoup d'épreuves.

A touts mes proches et mes amis sans exception

A ce que j'aime et qui m'aiment et que me sont très chères.

A toute la promotion génie chimique.

Salem Zineb

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Introduction générale……01

Chapitre I : Pétrole brut et encrassement

I- Pétrole brut…… 05

I-1. Introduction…….. 05

I-2. Historique……. 05

I-3. Origine et formation de pétrole…… 06

I-4. Composition du pétrole brut …… 07

I-4-1. Les principales familles d'hydrocarbures……. 08

I-5. Classification du pétrole brut……11

I-5-1. Selon le degré API…… 12
I-5-2. Selon le facteur KUOP……..12

I-5-3. Classification chimique……. 13

I-5-2. Selon teneur en soufre……... 13

I-6. Caractéristiques des pétroles bruts……... 13

I-7. Raffinage…… ……..
14

I-7-1. Définition…….……..14

I-7-1. Procédés de fractionnement…….……..14

I-8. Avantages des produits pétroliers……. 16

I-9. Inconvénients des produits pétroliers……... 16

I-9-1. La pollution atmosphérique…….. 17

I-9-2. La marée noire…….. 17

I-9-3. Le réchauffement climatique…… 17

II. Généralités sur l'encrassement dans les échangeurs de chaleur 17

II-1. Introduction …… 17

II-2. Définition de l'encrassement ……. 18

II-3. Différents types d'encrassement (classification) ……... 19

II-3-1. Encrassement particulaire…… 20

II-3-2. Entartrage……. 20
II-3-3. Encrassement dû à la corrosion……... 20

II-3-4. Encrassement biologique …… 21

II-3-5. Encrassement par réaction chimique …….. 21

II-3-6. Encrassement par solidification……... 21

II-4. Nature du dépôt …….. 22

II-4-1. Dépôt dur …… 22

II-4-2. Dépôt poreux …….. 23

II-4-3. Dépôt mou …….. 23

II-5. Les processus fondamentaux de l'encrassement……. 23

II-5-1. Initiation…… ……. 23

II-5-2. Transport des particules dans le fluide jusqu'au

voisinage de la paroi…… …….. 23

II-5-3. Adhésion des particules…… 23

II-5-4. Réentraînement des particules déposées……..... 24

II-5-5. Vieillissement du dépôt……... 24

Chapitre II : Les échangeurs de chaleur

I-Notions générales sur les échangeurs de chaleur…… 27
I-1. Définition……..27

I-2. Le principe de fonctionnement……. 27

I-3. Mode de transfert thermique…… 28

I-3-1. La conduction……..... 28

I-3-2. La convection…….……... 29

I-3-3. Le rayonnement……. 30

II- Mode d'écoulement des deux fluides……. 30

II-1. Ecoulement co-courants (écoulement des deux fluides

Parallèles et sens)…… …… …….. 30

II-2. Ecoulement contre –courants (écoulement

des fluides parallèles mais……... 31

II-3. Ecoulement des fluides croisés avec ou sens brassage……... 32

III- Classement technologique……. 32

III-1. Echangeur tubulaire……..... 32

III-1-1. Echangeur monotube…….. 33

III-1-2. Echangeur coaxial ……. 33

III-1-3. Echangeur multitubulaire …….. 34

III-2. Echangeur à plaques…….. 34
III-2-1. Échangeurs à surface primaire……... 35

III-2-2. Echangeurs à plaque et joints……. 36

III-2-3. Echangeurs à plaques soudées ou brasées…….. 36

IV- Autres types d'échangeurs……. 37

IV-1. Les échangeurs à faisceaux et calandres……... 38

IV-1-1. Échangeur de chaleur à plaques tubulaires fixe……. 38

IV-1-2. Échangeur de chaleur à compensateur de

dilatation thermique……..... 39

IV-1-3. Echangeur de chaleur à tête flottante……. 40

IV-1-4. Echangeur de chaleur à tubes en U…… 40

IV-2. Pièces faisant partie des échangeurs de chaleur à faisceau

et calandre…… …….. 41

IV-2-1. La calandre……. 41

IV-2-2. Le faisceau de tubes……... 41

IV-2-3. Disposition des tubes…….. 42

IV-2-4. Plaques tubulaires…….. 43

IV-2-5. Les Chicanes…….. 43

V- Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques……..... 44
V-1. Avantages……44

V-2. Inconvénients…… ……..
45

VI. Méthode de dimensionnement……... 45

VI-1. Introduction……... 45

VI-2. Coefficient d'échange global et partiel……..46

VI-3. Critères de performance d'un échangeur ……. 48

Chapitre III : Modélisation et simulation de l'encrassement

I- Introduction……... 50

II- Présentation de la raffinerie……...50

III- Mécanisme et Modélisation mathématique……. 51

III-1. Présentation……..... 51

III-2. Modèle de la résistance thermique d'encrassement et coefficient global de transfert de chaleur…… 55

III-3. Modélisation de la turbulence…… 59

IV- Etude numérique……..... 60
V- Programme Ansys …….. 63

V-1. Introduction……. 63
V-2. Définition d'Ansys……..64

V-3. Ansys CFD…….. 65

V-4. Ansys CFX…….. 66

V-4-1. Interface Utilisateur …… 67

V-4-2. La géométrie (Design Modeler) ……. 67

V-4-3. Maillage……... 68

V-4-4. Le solveur Fluent……. 69

V-4-5. Pré-Processing……. 69

V-4-6. Post-processing…… 69

Chapitre IV : Résultats et discussions

I-Introduction…….. 71

II-Résultats…… 72

II-1. Validation du modèle…….. 72

II-2. La résistance thermique d'encrassement……. 73

II-3. Le coefficient d'échange global……..... …….. 74

II-4. Effet de l'encrassement sur de la vitesse du brut dans les

tubes des échangeurs……... 75

II-5. Effet de l'encrassement sur le diamètre intérieur
des tubes des échangeurs…….76

II-6. La perte de pression en fonction du temps dans les échangeurs….

.77 II-6. La pression de pompage en fonction du temps

dans les échangeurs……. 78

III-Conclusion……... 79

Conclusion Générale……. 80

Références bibliographiques

Annexes

Liste des Tableaux.....6

Tableau I-1 : Classification de pétrole brut selon la densité 15

Tableau I.2 : Les types d'encrassement.....24

Chapitre III :*Modélisation et simulation de l'encrassement*.....*53*

Tableau III-1 : Etapes des réactions chimiques de l'auto-oxydation des hydrocarbures.....56

Tableau III-2 : Valeurs des paramètres relatives au modèle de la déposition des oxydes de fer.....57

Tableau III-3 : Valeurs des paramètres relatives au modèle de la cristallisation du $CaSO_4$ 58

Tableau III-4 : Conditions auxlimites.....66

Tableau III.5. : Propriétés du mélange.....67

Chapitre I :*Pétrole brut et encrassement*

Tableau III-6 : Propriétés du mélange……... 64

Tableau III-7 : Conditions de simulation…… …….. 66**Liste des Figures**

Chapitre I : *Pétrole brut et encrassement*

Figure I.1: Les étapes de formation du pétrole…… 07

Figure I.2: Hydrocarbures cycliques saturés…… 09

Figure I.3 : Hydrocarbures cycliques non saturés…… 10

Figure I.4: Classification des hydrocarbures……... 10

Figure I.5 : Réserves prouvées de pétrole dans le monde en 2005……... 11

Figure I.6: Rendements en coupes pétrolières offerts par différents pétroles bruts …… 14

Figure I.7 : Photo d'un échangeur encrassé…… …….. 19

Figure I.8 : L'encrassement dans l'échangeur……... 24

Chapitre II : *Les échangeurs de chaleur*

Figure II.1 : Echangeur de chaleur…… ……. 27

Figure II.2 : Transfert thermique par conduction dans un mur simple…… 29

Figure II.3 : Transfert thermiquepar convection……. 29

Figure II.4: Phénomène de rayonnement thermique…… 30

Figure II.5 : Evolution des températures dans un échangeur à co-courant.. 31

Figure II.6 : Evolution des températures dans un échangeur à contre-courant…… …….. 31

Figure II.7 : Les deux types du courant croisé…… …….. 32 **Figure II.8 :** Echangeur monotube……. 33

Figure II.9 : Echangeur à tube coaxiaux…… …….. 33

Figure II.10 : Echangeur thermique à tubes et calandre…… …….. 34

Figure II.11 : Composition d'un échangeur à plaques……. 35

Figure II.12 : Echangeur de chaleur à plaques et joints…….36

Figure II.13 : Echangeur de chaleur à plaques tubulaires fixe…… 39

Figure II.14 : Echangeur de chaleur à tête flottante……. 40

Figure II.15 : Echangeur de chaleur à tubes en U…… 41

Figure II.16 : Calandre simple à une seule phase……. 41

Figure II.17 : Disposition des tubes……. 42

Figure II.18 : Disposition des chicanes……. 44

Figure II. 19 : Echangeur de chaleur entre deux conduites……. 47

Chapitre III : ***Modélisation et simulation de l'encrassement***

Figure III.1 : Diagramme simplifié du train de préchauffage de la raffinerie…… 52

Figure III.2 : Diagramme du mécanisme en chaine de l'auto-oxydation… 53

Figure III.3 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS…66

Figure III.4 : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI)…….. 69

Figure III.5 : Le maillage……. 69

Chapitre IV : *Résultats et discussions*

Figure IV.1.a : Validation du modèle par rapport au modèle…….73

Figure IV.1.b : Validation du modèle par rapport à l'expérience… 74

Figure IV.2 : Evolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction du temps pour les trois échangeurs…… 75

Figure IV.3 : Evolution de la résistance thermique d'encrassement…… 76

Figure IV.4 : Evolution de l'encrassement en fonction de la vitesse dans les tubes…….....77

Figure IV.5 : Evolution de l'encrassement en fonction des diamètres des tubes…… 78

Figure IV.6 : Evolution de de la perte de pression en fonction du temps dans les échangeurs…… 79

Figure IV.7 : Evolution de de la pression de pompage en fonction du temps dans les échangeurs……...80

Nomenclature

Symboles :

β	Constante du temps	[unité /jour]
γ	Viscosité cinématique	[pa.s]
ρ	La masse volumique	[kg /m^3]
$\boldsymbol{\mu}$	Viscosité dynamique	[kg m^{-1} s^{-1}]
λ	Conductivité thermique	[w/m.K]
σ	Nombre du Prandtl turbulent	
ΔP	Perte de charge	bar
L	Longueur d'un tube	[m]
D	Diamètre	[m]
e	Epaisseur	[m]
M	Masse moléculaire	[g/mol]
m	Débit massique	[Kg/s]
C	Concentration	[mol/l]
Cp	Capacité thermique massique	[J kg^{-1} K^{-1}]
Cp_c	Capacité calorifique	[J/kg K]
P	Pression	[Pa]
V_i	Vitesse à l'entrée	[m/s]

S	Surface d'échange thermique à la distance axiale x	[m^2]
Ti	Température à l'entrée	[K]
T_{op}	Température de sortie du système de chauffage	[K]
t□	Temps à la résistance asymptotique	[s]
t_c	Temps de résidence moyen	[s]
T_f	Température du film	[K]
T_S	Température de surface	[K]
Q_d	Débit massique du dépôt	[Kg/s]
Q	La quantité de chaleur transférée	[J]
Q_{ph}	Puissance thermique d'un échangeur	[W]
$R_{f)t(}$	Résistance thermique d'encrassement	[$m^2.^0C/W$]
$U_{()t(}$	Coefficient d'échange global	[$W/m^2.^0C$]
E_a	Énergie d'activation	kg^{-1} mol^{-1}]
K	Coefficient de transfert de chaleur global propre	[W m^{-2} K^{-1}]

Listes d'abréviation :

API	American petroleuminstitute
OPEP	l'organisation des pays exportateurs de pétrole
CFD	ComputationalFluidDynamic
ASTM	American society for testing and materials

Indice :

e	Entrée s
Sortie f	Froid c
Chaud d	Dépôt p
Paroi	

Introduction Générale

Depuis de nombreuses années, le pétrole est considéré comme matière première très importante jouant un rôle primordial dans l'industrie, il est le plus gros commerce de la planète en valeur (et en volume). D'après les statistiques récentes l'Algérie est le 17^{ième} producteur de pétrole donc, elle joue un rôle majeur dans le commerce international de l'énergie.

La commercialisation du pétrole à l'état brut doit subir un traitement préliminaire afin de répondre aux normes. Ce traitement peut comprendre plusieurs procédés à mettre en œuvre pour la mise aux spécifications commerciales en qualité de tension de vapeur riel. Les procédés les plus connus sont : la séparation, le dessalage, le dégazage, la désulfuration …etc.

L'encrassement est un phénomène prépondérant agisse de la formation d'un dépôt solide à l'intérieure des équipements de traitements de brut, ce qui entraîne la réduction des performances thermo-hydrauliques de ces équipements.L'effet néfaste de l'encrassement apparaît notamment dans la réduction de l'efficacité thermique des équipements et l'augmentation de la perte de charge. Il conduit, par conséquent, à des pertes économiques très importantes traduites par les dépenses supplémentaires dues à un plus de pompage et au nettoyage fréquent des installations. A titre d'exemple et selon une étude effectuée en 1984 [1], l'encrassement a coûté à l'industrie Américaine près de 5 milliards de dollars annuellement. En dépit des progrès et le développement scientifique, le phénomène de l'encrassement reste le problème le plus obsession en souffre des sociétés pétrolières.

Dans cette étude, nous considérons le phénomène de l'encrassement des d'échangeurs tubulaires d'un circuit de préchauffage d'une raffinerie typique. En effet, les cellules d'échangeurs de chaleur destinées au chauffage du brut avant son fractionnement, sont exposées au problème de l'encrassement du côté tube des échangeurs.

La partie bibliographie de ce travail concerne dans le premier chapitre des généralités sur le traitement du pétrole brut. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de l'encrassement des équipements thermiques. Elle comprend les différents types d'encrassement, son mécanisme de développement, le calcul de la résistance d'encrassement, les différents modèles établis et enfin, l'influence des paramètres opératoires sur la formation du dépôt.

Dans le deuxième chapitre, quelques définitions sur les échangeurs de chaleur, les principaux types rencontrés dans l'industrie ainsi que les méthodes utilisées pour le calcul d'échangeurs sont présentées.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée, dans le troisième chapitre, à la modélisation et la simulation de l'encrassement d'une batterie d'échangeurs de chaleur tubulaire d'une raffinerie de pétrole brut. Un modèle de l'encrassement par le pétrole brut est présenté. Un organigramme de calcul de la résistance thermique d'encrassement est principalement présenté. L'outillage numérique employé pour la résolution du modèle mathématique est à la fin du chapitre présenté (Ansys).

Le quatrième chapitre du mémoire est consacré à la présentation des résultats. Nous développerons principalement la résistance thermique d'encrassement en fonction des dimensions de l'échangeur et en fonction du temps est présentée. Nous terminons par une conclusion qui présentera les principaux résultats et des recommandations futures.

Chapitre I

Pétrole brut et encrassement

I- Pétrole brut

I-1. Introduction

Le pétrole, vient du mot latin « Petra » pierre et « oléum » huile, soit 'Huile de pierre'. C'est un liquide brun plus ou moins visqueux d'origine naturelle, mélange complexe d'hydrocarbures. Son exploitation est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car il fournit la quasi-totalité des carburants liquides. Le pétrole est aussi souvent appelé « Or noir » en référence à sa couleur et à son coût élevé [1].

D'après le Micro Robert, le Pétrole est défini comme : une huile minérale naturelle (bitume liquide) accumulée en gisements et utilisée comme une source d'énergie, notamment sous forme d'essence [2].

I-2. Historique

Il y a 51 ans, l'Algérie a rejoint l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) après avoir découvert du pétrole à l'intérieur du pays, avec le fait que le secteur du pétrole et du gaz naturel était et est toujours l'épine dorsale de l'économie du plus grand État membre de l'OPEP et en Afrique par région. La plupart du pétrole algérien a deux caractéristiques, être une huile douce légère de haute qualité et sa proximité avec les marchés européens. Cependant, l'industrie pétrolière en Algérie souffre de plusieurs problèmes. Certains d'entre eux sont dus à l'âge de certains domaines et à la difficulté à les gérer.

Découverte du pétrole :

L'histoire de la production pétrolière réelle en Algérie remonte au début des années 1950, lorsque le premier gisement pétrolier important a été découvert dans le champ de Hassi Messaoud en 1956. Après l'indépendance du pays en 1962, l'économie de l'Algérie était fragile. La première chose que le

gouvernement Algérien a faite a été de créer la Société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures, Sonatrach, en 1963, avant d'adhérer à l'OPEP en 1969.

I-3. Origine et formation de pétrole [3]

Le terme pétrole vient du latin Pétra-oléum qui signifie littérairement « huile de pierre ». C'est une huile inflammable variant de la couleur jaune à la couleur noire. Elle est constituée d'une grande variété d'hydrocarbures trouvés dans les strates sédimentaires de la terre. Le pétrole provient à l'origine d'organismes microscopiques (animaux et végétaux). La matière organique résiduelle s'est enrichie en carbone et en hydrogène par un processus de décomposition (Figure I.1). La transformation de ces matériaux en pétrole est toujours en discussion. Deux théories émergent : la première estime que le pétrole brut provient d'une accumulation de matières organiques depuis plus de 500 millions d'années sous la croûte terrestre. La seconde suppose que le pétrole prend son origine dans les mers, du fait de la présence d'iode et de bromine (Br_2). La transformation à partir de dépôt marin est due en partie à une décomposition anaérobique par les bactéries. Les pétroles sont issus d'une transformation par des réactions réductrices de la matière organique en kérosène dans un milieu peu oxygéné et sous-pression. La transformation en hydrocarbures commence vers une température de 60 °C. Les pétroles sont par nature de composition très différente selon leur histoire géologique. Ils sont désignés du nom des champs dont ils ont été extraits. Les réserves les plus importantes se situent dans la péninsule arabique avec 743 milliards de barils (31% de la production totale). Le Venezuela et la Russie possèdent également de grosses réserves avec 80 milliards de barils chacun.

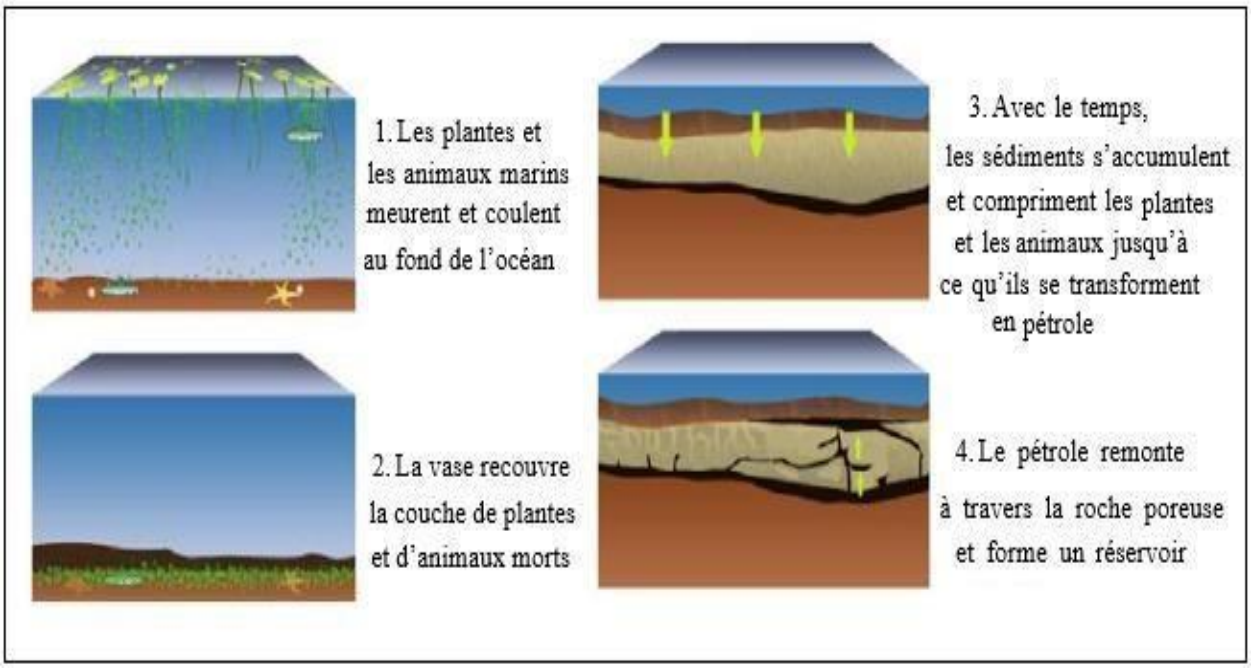


Figure I.1. : Les étapes de formation du pétrole.

I-4. Composition du pétrole brut [4]

Pétrole brut, aussi appelé hydrocarbures, selon cette nomenclature on distingue les mots hydrogène et carbone, qui sont les constituants de base de tous les pétroles bruts ; ils ont une teneur en carbone de (83-87%) et une teneur en hydrogène de (11-14 %). Ces deux éléments forment trois grandes familles d'hydrocarbures qui sont

- Hydrocarbures Aliphatiques.
- Hydrocarbures Cycliques.
- Les hydrocarbures mixtes.

Mais, on trouve aussi d'autres éléments qui le compose, qui sont plus au moins nocifs dans le traitement de brut ou lors de l'utilisation des fractions pétrolières finies. Ces éléments sont : l'oxygène, le soufre, et l'azote (au total jusqu'à 6÷ 7%) sous forme de composés.

Aussi, on a pu détecter par l'analyse des cendres du pétrole la présence d'autres composés tels Cl, I, P, As, Si, Na, Fer…

I-4-1. Les principales familles d'hydrocarbures

Compte tenu de la tétravalence de l'atome de carbone et de la monovalence de l'atome d'hydrogénées différentes possibilités de combinaison de ces atomes peuvent se classer selon deux règles générais : addition des atomes de carbone en chaines ou en cycles avec saturation ou non entre les atomes de carbone [5].

I-4-1-1. Hydrocarbures aliphatiques : Il s'agit d'hydrocarbures paraffiniques, d'oléfines et d'acétylène à chaîne ouverte.

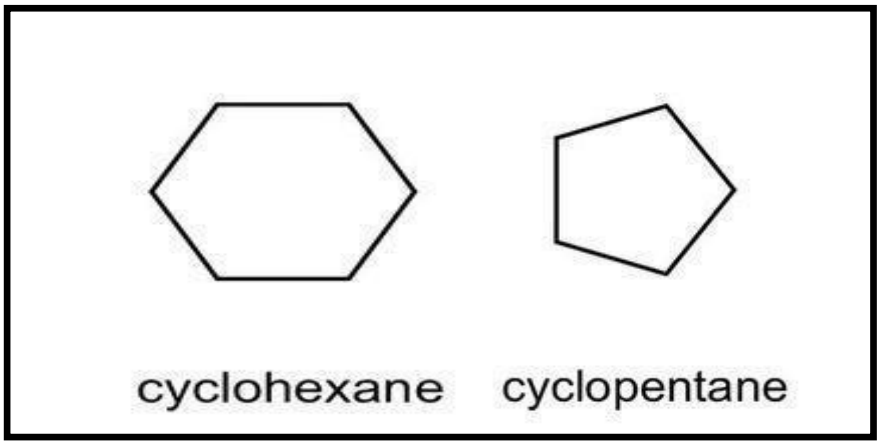
Saturés : Parafinique de formule générale C_nH_{2n+2} ce sont les alcanes qui sont soit à structure normale, soit ramifiée (isoméries). Les pétroles paraffinés contiennent environ 50% de paraffine [5].

Non saturés : Ils sont formés pendant le traitement du pétrole par les procédés de craquage thermique ou thermo catalytique. Ces non saturés sont appelés les oléfines dont la formule générale est C_nH_{2n} pour les alcènes et C_nH_{2n-2} pour les alcynes [5].

I-4-1-2. Hydrocarbures cycliques : Il est possible de réaliser le cycle ou le noyau avec n'importe quel nombre d'atomes de carbone mais le cycle à six carbones est le plus fréquent car il correspond à l'ongle normal de raccordement de 109° des atomes de carbone. Non isolé cependant des cycles à 3, 4 ,5 ,7 et 8 atomes de carbone surtout dans les séries cycliques saturées. De plus, deux ou plusieurs cycles peuvent se condenser entre eux pour donner des hydrocarbures polycycliques.

Généralement le cycle comprend 05 ou 06 atomes de carbone [5].

Saturés : Sont les hydrocarbures naphténiques ayant la formule C_nH_{2n}



Exemples : C_6H_{12} ou C_5H_{10}

Figure I.2: Hydrocarbures cycliques saturés.

Non saturés :

Ces sont les aromatiques dont la formule chimique est C_nH_{2n-6}.

En ne considérant que le cycle à six atomes de carbone la non saturation pourra se présenter que sous trois formes : simple, double ou triple car dans ce noyau deux double liaisons consécutives sont impossibles [5] :

- Double liaison : cyclo oléfinique tels que le cyclohexane.
- Double liaison : cyclodioléfiniques tels que le cyclohexadiène.
- Doubles liaisons : benzénique ou aromatique.

En outre, plusieurs cycles peuvent se condenser et donner des molécules lourdes et compactes qui sont recherchées dans les industries des parfums des colorants et pharmaceutiques.

Exemple : le benzène C_6H_6

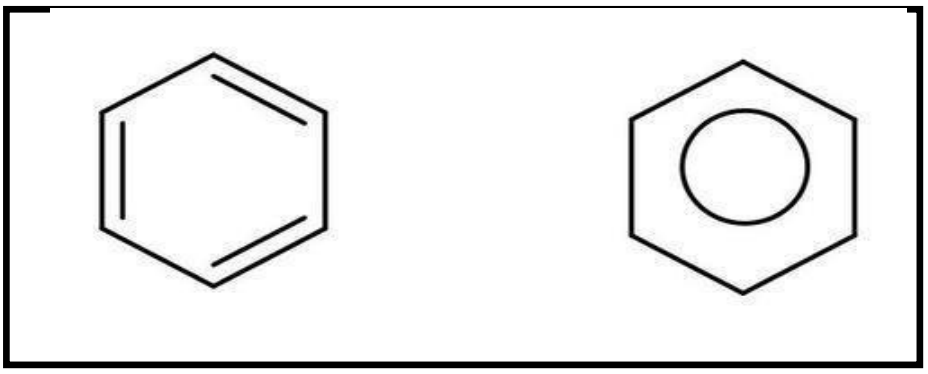


Figure I.3. : Hydrocarbures cycliques non saturés.

1-4-1-3. Les hydrocarbures mixtes

Les deux familles précédentes peuvent être qualifiées de race pure. L'union des hydrocarbures cycliques et aliphatiques donne des molécules mixtes (cycle+chaîne). Les propriétés de ces molécules mixtes sont en fonction de l'importance du cycle ou des chaînes dans la structure.

Remarque : La composition chimique du pétrole brut est donnée par la teneur en paraffine, oléfine, naphtène et en aromatique dite le PONA de la fraction pétrolière [6].

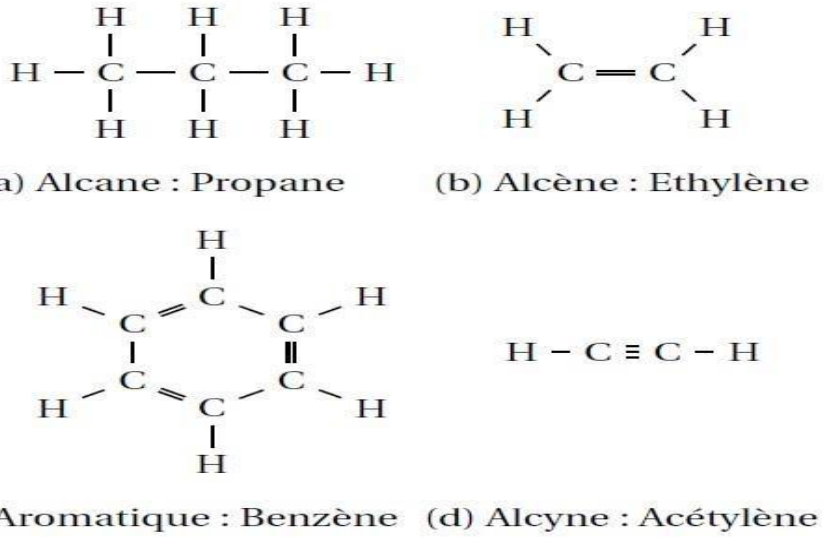
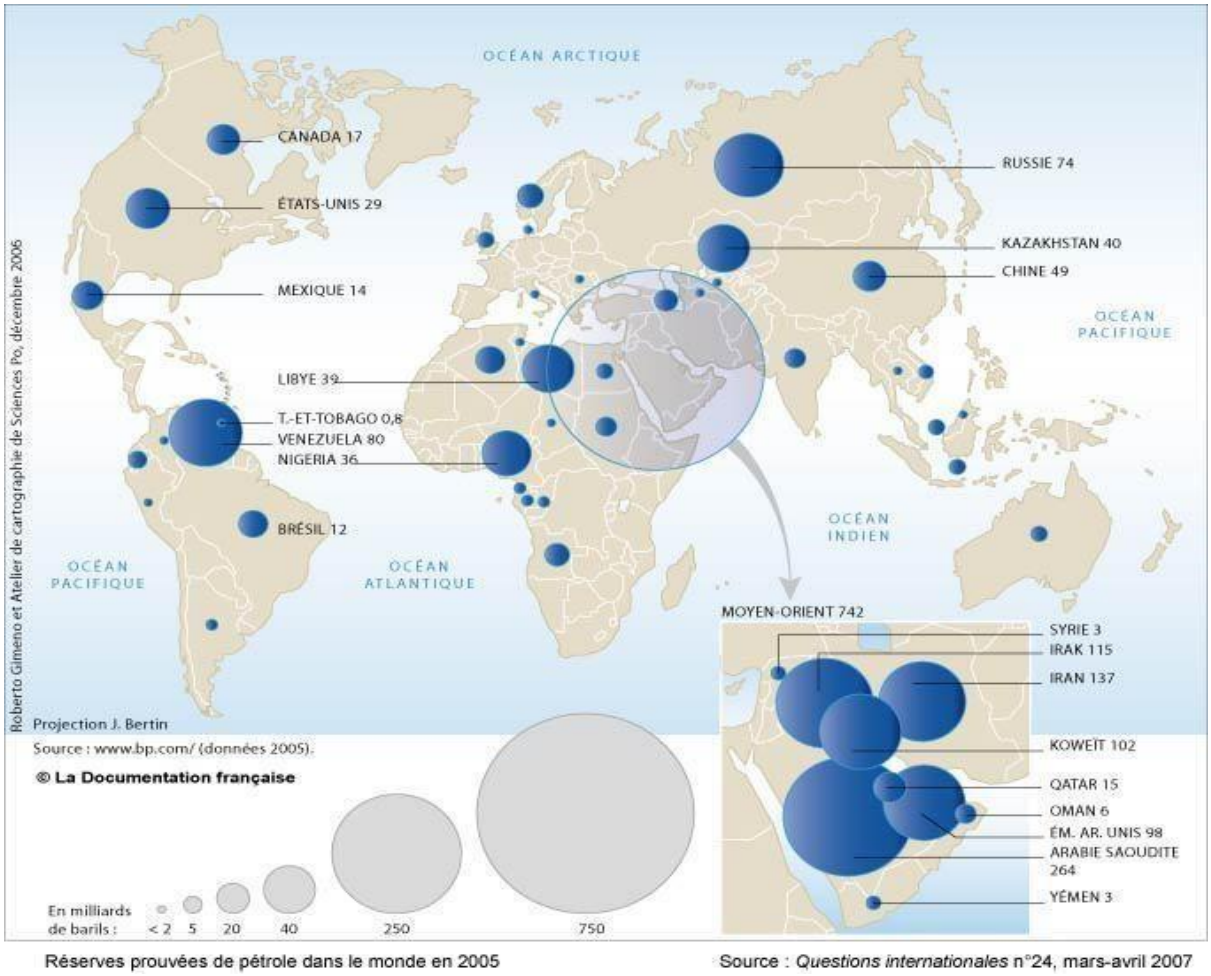


Figure I.4.: Classification des hydrocarbures.

Les réserves mondiales de brut sont données dans la figure I.5.



Réserves prouvées de pétrole dans le monde en 2005

Source : *Questions internationales* n°24, mars-avril 2007

Figure I.5. : Réserves prouvées de pétrole dans le monde en 2005 [3].

I-5. Classification du pétrole brut [7]

À la découverte d'un gisement du pétrole, ce dernier subit une série d'analyse permettant sa classification. La classification du pétrole est d'une extrême importance car elle nous permet de connaitre les méthodes de traitement de ce même pétrole depuis le plus léger et le moins sulfureux qui est le condensat jusqu'au plus lourd et plus sulfureux qui est le brut, l'assortiment et les qualités des produits à obtenir. On distingue quatre types de classification.

Les bruts sont classés selon leur degré API (American Petroleum Institute) qui est une fonction de leur densité (Tableau I-1). L'équivalence entre la densité et le degré API° est exprimée par la formule :

141.5

$$API = \frac{}{d(15°c)} - 131.5(1)$$

I-5-1. Selon la valeur API°

On distingue :

Tableau I.1. : Classification de pétrole brut selon la densité.

Classification	**API°**	**Densité**
Pétrole léger	>31.1°	<0.870
Pétrole moyen	22.3 – 31.1°	0.870 – 0.920
Pétrole lourd	10 – 22.3°	0.920 – 1
Pétrole extralourd	< 10°	> 1

Les pétroles plus légers sont les plus demandés par les raffineurs, car ils donnent directement beaucoup de coupes légères de grande valeur (diesel, essence, naphta).

I-5-2. Classification selon le facteur de correction KUOP

Ce facteur peut mesurer la nature des paraffines et prendre les valeurs suivantes selon la nature de pétrole :

- KUOP=10 pour les aromatiques pures.
- KUOP=11 pour les naphtènes purs.
- KUOP=12 pour les hydrocarbures où les poids des chaînes et cycles sont équivalents.
- KUOP=13 pour les paraffines.

I-5-3. Classification chimique

C’est le classement du brut selon les familles prédominantes des hydrocarbures. Le pétrole peut être de types :

- Paraffines.
- Naphténique.
- Aromatiques.

I-5-4. Selon teneur en soufre

La teneur en soufre distingue le pétrole brut soit en doux (faible teneur en soufre) soit en sulfuré dans le cas contraire. Des gisements de pétrole doux sont notamment trouvés en Afrique, ceux de pétrole sulfuré en Amérique du Nord.

- Pétrole peu sulfureux si la teneur ne dépasse pas 0.5%.
- Pétrole sulfureux si la teneur est comprise entre 0.5 -2 %.
- Pétrole très sulfureux si sa teneur > 2 %.

I-6. Caractéristiques des pétroles bruts

Les pétroles bruts possèdent des caractéristiques différentes en fonction de leur origine géographique. Ces caractéristiques sont regroupées dans la figure I.6, pour des bruts de différentes origines. Les rendements en fractions pétrolières sont représentés, ainsi que la densité et la teneur en soufre de chaque brut [8] :

- Un brut léger : API entre 43.5 et 47.5.
- Un brut à très basse teneur en soufre : moins de 0.1%.

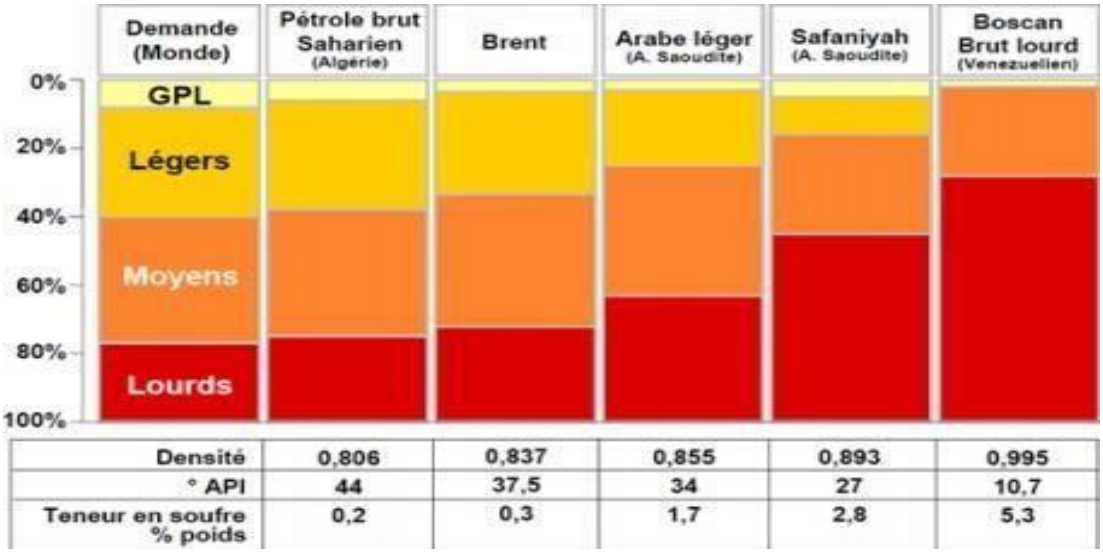


Figure I.6. : Rendements en coupes pétrolières offerts par différents pétroles bruts [8].

I-7. Raffinage du pétrole

I-7-1. Définition

Le raffinage du pétrole débute par la distillation, ou fractionnement, du pétrole brut en vue de le séparer en différents groupes d'hydrocarbures. Les produits obtenus dépendent directement des caractéristiques du brut traité. On transforme ensuite la plupart de ces produits de distillation en produits plus facilement utilisables, en modifiant leurs structures physique et moléculaire par craquage, reformage et par d'autres procédés de conversion, puis on soumet les produits obtenus à divers procédés de traitement et de séparation tels que l'extraction, l'hydrocraquage et l'adoucissement pour aboutir aux produits finis [9].

I-7-2. Procédés de fractionnement

Les procédés de fractionnement permettent de séparer un mélange pétrolier en fractions plus simples ou plus étroites. Dans le raffinage, les principaux procédés de séparation sont la distillation atmosphérique du pétrole brut et la distillation sous vide du résidu atmosphérique [10].

I-7-2-1. Distillation du pétrole brut

La distillation atmosphérique ou distillation primaire constitue la première et la principale étape du raffinage. Précédée d'une opération de dessalage (lavage à l'eau et à la soude) pour enlever les minéraux, cette opération permet de fractionner le pétrole brut en différentes coupes pétrolières, traditionnellement nommées coupes Straight Run (SR). En tête de colonne, il est récupéré la coupe gaz puis les coupes essence, kérosène et gazole sont obtenues sur les plateaux intermédiaires de la colonne. Ces coupes seront ensuite soumises à des procédés d'amélioration de propriétés et/ou à des procédés de finition pour obtenir les produits pétroliers à haute valeur commerciale. La fraction non distillée du brut, appelé aussi résidu atmosphérique (RA), est soit utilisée directement comme fuel industriel, soit envoyée à la distillation sous vide [10].

I-7-2-2. Distillation sous vide du résidu atmosphérique

La distillation sous vide est une étape complémentaire de la distillation primaire. En effet, le résidu atmosphérique contient les molécules avec un point d'ébullition supérieur à 340-380°C. Au-delà de cette gamme de températures, les molécules commencent à subir des réactions de craquage thermique avant de s'évaporer. C'est pourquoi, la distillation du résidu atmosphérique est effectuée sous pression réduite. Cette opération permet de récupérer en tête de colonne, le distillat sous vide (DSV) qui sera ultérieurement soumis à des procédés de conversion pour obtenir des produits valorisables. La fraction non distillée correspond à la coupe résidu sous vide (RSV) qui contient la majeure partie des impuretés du brut, comme le soufre, l'azote, les métaux et les asphaltènes. Le RSV peut être utilisé dans la fabrication des bitumes, la production de fuels lourds ou comme charge pour des procédés de conversions, comme l'hydro conversion, la cokéfaction ou la viscoréduction [10].

Pourquoi raffiner le pétrole avant de l'utiliser ?

L'essence ou le gazole que l'on met dans sa voiture, le fioul que l'on brûle pour se chauffer en hiver, le gaz naturel que l'on utilise pour cuisiner sont autant de carburants et sources de chaleurs dérivées du pétrole et du gaz exploités dans les différents gisements dans le monde. Le pétrole brut est en quelque sorte un « mélange » de tous ces produits de consommation énergétique ; il faut donc le raffiner pour extraire, séparer et transformer ces produits, de manière à répondre aux besoins des consommateurs.

I-8. Les avantages des produits pétrolières

Les avantages du pétrole sont les suivants :

- C’est une énergie disponible sur un peu tous les continents.
- Son transport est facile et peu couteux par les bateaux.
- La chimie du pétrole est très riche.

En effet, grâce au pétrole, on peut obtenir des gaz tels que le méthane, le propane et le butane, des carburants tels que l’essence, le kérosène, le gazole et le fioul et des composés aromatiques,

- C’est la forme d’énergie liquide la plus concentrée disponible actuellement.

I-9. Les inconvénients des produits pétroliers

La production de pétrole classique est en déclin.

- Le taux de récupération du pétrole classique s’échelonne de 20 à 30%.
- Le pétrole est responsable de 38,2% des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'industrie.
- De ces émissions, 8 % sont dues aux véhicules fonctionnant aux hydrocarbures.
- La récupération du pétrole non classique est onéreuse, ce qui diminue le rendement du capital investi.

- L’opinion publique se préoccupe vivement des risques de pollution par les hydrocarbures et de l’impact environnemental des méthodes d’extraction.
- L’industrie du pétrole a un impact sur les sources d’eau locales. Les conséquences de l’utilisation du pétrole sur l’homme et sur l’environnement

I-9-1. La pollution atmosphérique

La combustion des essences (des dérives pétrolières) dans les moteurs libre des gaz comme le dioxyde de carbone et le dioxyde d’azote. Ces gaz contribuent au réchauffement climatique et à la formation des pluies acides.

I-9-2. La marée noire

Une marée noire est une catastrophe industrielle et écologique se traduisant par l’écoulement en zone côtière d’une nappe d’hydrocarbures. Il y a une multitude d’espèces touchées par la marée noire tels que les oiseaux, les animaux marins.

I-9-3. Le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique se traduit par la fonte des glaciers des pôles nord et sud qui devrait provoquer une augmentation du niveau des mers et des océans.

II- Généralités sur l’encrassement dans les échangeurs de chaleur

II-1. Introduction

L’encrassement, des équipements de transfert thermique, ayant un impact significatif sur le parcoure de production. L’encrassement entraine une consommation importante et une perte d’énergie en affectant les performances telle que : la diminution du coefficient de transfert de chaleur, la réduction de la conductivité thermique, l’augmentation de la chaleur des liquides chauds, la réduction de la section de passage du fluide entrainant de réduit du débit de fluide

(augmentation de perte de charge), d'autre part le début et l'aide de corrosion.
Sans doute à ce que la corrosion et l'encrassement sont deux problèmes majeurs qui affectent toutes les activités industrielles. Les actifs se dégradent et nécessitent une surveillance et un entretien continus pour éviter les problèmes à grande échelle ou des méthodes bien planifiées doivent être trouvées pour le commander et traiter [11].

II-2. Définition de l'encrassement

L'encrassement est défini comme la déposition des substances indésirable sur les surfaces des équipements industrielle. Dans les échangeurs de chaleurs, l'encrassement est une couche de dépôt qui s'accumule à la surface d'échange de chaleur et qui entravent le transfert de chaleur. Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments [12]. Les échangeurs de chaleur industriels fonctionnent rarement avec des liquides qui ne provoquent pas l'encrassement. La croissance des dépôts provoque une dégradation des performances thermo hydrauliques de l'échangeur de chaleur avec le temps. L'encrassement affecte la consommation d'énergie des procédés industriels. Les couches d'encrassement ont une conductivité thermique plus faible que les fluides ou la paroi de conduction, d'où elles augmentent la résistance thermique globale. L'encrassement des échangeurs de chaleur représente une dépense élevée. C'est quelque chose qui est indésirable et contreproductif. La présence d'encrassement sur les surfaces d'échange de chaleur entraîne des coûts supplémentaires.

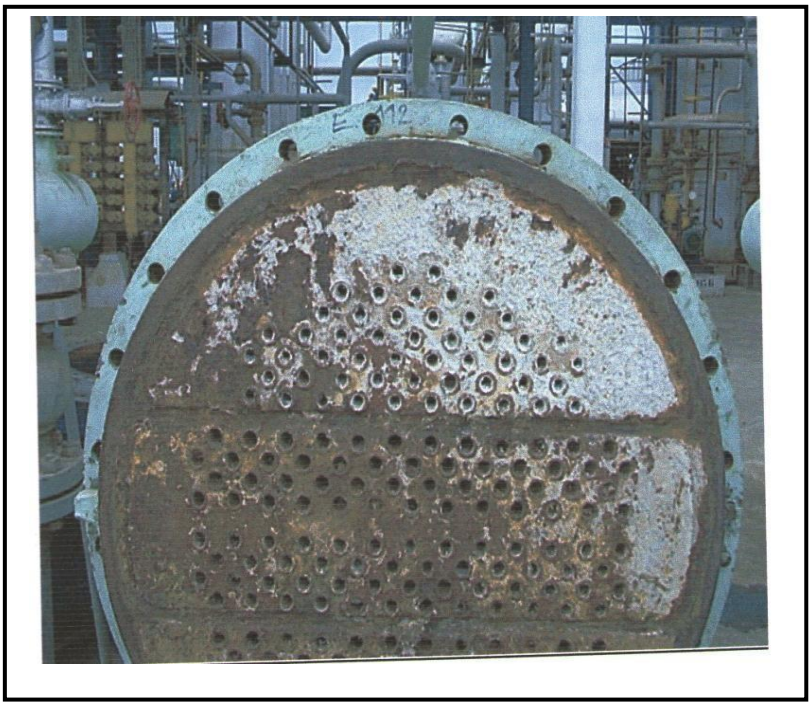


Figure I.7. : Photo d'un échangeur encrassé.

II-3. Différents types d'encrassement (classification)

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, régime d'écoulement, et selon les conditions d'utilisation des équipements d'échange thermique ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt [13]. Six types différents peuvent alors être

- Encrassement particulaire.
- Entartage.
- Corrosion.
- Encrassement biologique.
- Encrassement par réaction chimique.
- Encrassement par solidification.

II-3-1. Encrassement particulaire

C'est la forme la plus courante de l'encrassement [14], La plupart des écoulements, de fluides industriels (liquides ou gazeux) transportent des particules en suspension dont la taille varie d'une fraction de µm à quelques dizaines de µm ; le dépôt est inévitable d'une partie de ces particules sur la surface d'échange [11] :

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

II-3-2. Entartrage

Il est généralement associé à la production d’un solide cristallin (tartre) à partir une solution liquide. Il dépend donc de la composition de l’eau industrielle [15]. L’entartrage se matérialise par une formation d’incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d’échanges généralement métalliques. Pour qu’il y ait entartrage, deux conditions doivent être réunies [11]. La limite de solubilité doit être dépassée, c’est à dire qu’il y ait saturation : c’est l’aspect thermodynamique. La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c’est l’aspect cinétique.

II-3-3. Encrassement dû à la corrosion

Comme on a mentionné précédemment, l'un des problèmes rencontrés par les échangeurs de chaleur est la corrosion, où elle considéré comme une cause de l'encrassement. A partir ce titre, on donne une définition de la corrosion et on détermine la relation entre elle et l’encrassement [11].

II-3-4. Encrassement biologique

Il est dû au développement de micro-organismes [11] en contact avec la surface d'échange et qui provoque la formation d'un film, ces organismes sont : les bactéries, champignons et les algues. Il existe des conditions chimiques et physiques dans les échangeurs de chaleur sont favorable à leur développement, Les hydrocarbures et l'ammoniac renforcent la présence des bactéries, tandis

que les algues et les champignons se développent dans la présence des autres facteurs catalyseurs, notamment le soleil, l'humidité, etc.…Le chlore est souvent utilisé comme une moyenne préventive car il est considéré comme un biocide toxique à effet rapide pour la plupart des micro-organismes.

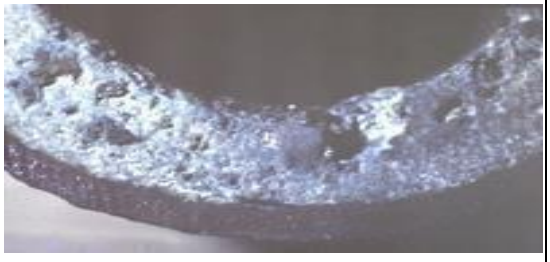
II-3-5. Encrassement par réaction chimique

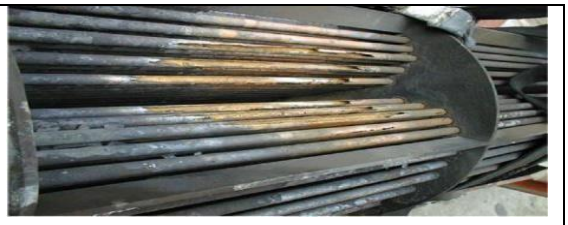
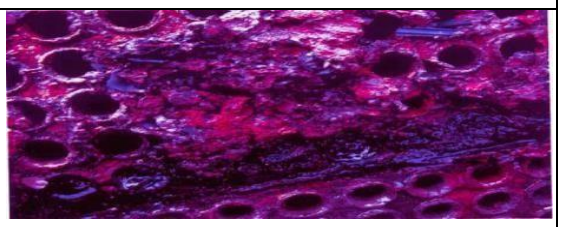
On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation ; il en résulte la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds).

II-3-6. Encrassement par solidification

Il s'agit de solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace ou de givre 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 d'hydrocarbures par affinité). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre) [15]. Le tableau I.2 suivant montre des exemples de forme d'encrassement.

Tableau I.2 : Les types d'encrassement.

Encrassement particulaire : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur	

Entartrage	
Dégradation (encrassement sous corrosion)	
Encrassement biologique : Dépôt Bactérien	

II-4. Nature du dépôt

II-4-1. Dépôt dur

Il s'agit d'une structure dense et renforcée qui ne s'atténue pas lors d'un simple jet d'eau ou de vapeur mais qui nécessite un traitement mécanique ou un nettoyage chimique approprié.

C'est le cas de dépôt corrosif ou cristallin. La résistance thermique d'un dépôt dur est directement proportionnelle à son épaisseur.

II-4-2. Dépôt poreux

C'est le matériau d'un dépôt dur qui se présente en une structure moins dense, sous l'effet des conditions opératoires. Ce cas est plus sérieux que le précédent

quand le fluide emprisonné dans les pores à une conductivité thermique plus faible que le matériau solide.

I-4-3. Dépôt mou

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

II-5. Les processus fondamentaux de l'encrassement (Mécanismes)

Les mécanismes d'encrassement sont décomposés en cinq (5) évènements séquentiels [15] :

II-5-1. Initiation

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

I-5-2. Transport des particules dans le fluide jusqu'au voisinage de la paroi

Il peut être contrôlé par la diffusion turbulente, l'impaction inertielle ou un champ de forces extérieures (thermiques, électriques, etc.) ; ces mécanismes peuvent coexister.

II-5-3. Adhésion des particules

Les particules transférées à la paroi peuvent s'y maintenir grâce aux forces d'adhésion dues à l'attraction moléculaire (forces de Van der Waals), aux forces électriques ou capillaires.

II-5-4. Réentraînement des particules déposées

Certaines des particules déposées peuvent être rengainées sous forme d'agglomérats arrachés à la couche de dépôt sous l'action des forces aérodynamiques [16].

II-5-5. Vieillissement du dépôt

Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline du dépôt dû à des phénomènes tels que la déshydratation ou la polymérisation, il y'a diminution des forces d'adhésion du dépôt qui peut être arraché sous l'action des forces aérodynamiques [16].



Figure I.8. : l'encrassement dans l'échangeur.



Figure I.8. : L’encrassement au fond de la colonne de distillation.

Conclusion

Les équipements thermiques lors des traitements du pétrole brut sont des équipements très importants dans les procèdes de traitement d’une manière générale. Il est nécessaire de maximiser le transfert de chaleur pour augmenter la performance thermique de ces équipements. Cette performance est liée directement au problème de l’encrassement.

Chapitre II

Les échangeurs de chaleur

I-Notions générales sur les échangeursde chaleur

I-1. Définition

Un échangeur de chaleur comme celui représenté sur (la figure II.1.) est un appareil où le transfert de chaleur se fait entre deux fluides possédant des températures différentes. Il permet l'échange de chaleur sans les mélanger et sans transfert de matière entre eux. Ils sont utilisés dans plusieurs secteurs comme : l'industrie, le transport, le résiduel ou le tertiaire.

Le transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur implique la présence de l'effet de la convection dans chaque fluide et la conduction à travers la paroi séparant les deux fluides [17].



Figure II.1. : Echangeur de chaleur.

I-2. Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur est défini par la circulation de deux fluides (chaud et froid) à travers des conduites qui les mettent en contact thermique à travers une paroi généralement métallique. Ce qui favorise l'échange entre eux, de manière générale, c'est le fluide chaud qui transfère de la chaleur au fluide froid.

La difficulté réside dans la définition d'une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour le transfert d'une quantité de chaleur donnée. Cette dernière ne dépend pas uniquement de la surface, mais aussi des températures d'entrée, des caractéristiques thermiques (chaleur spécifique, conductivité thermique) et des coefficients d'échange par convection [18,19].

I-3. Mode de transfert thermique

Le transfert thermique se fait :

- Par conduction.
- Par convection.
- Par rayonnement.

Dans la pratique, il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode ; Le plus souvent, deux sinon trois modes entrent.

En réalité tout échange thermique s'effectue simultanément sous ces trois formes mais, généralement, l'une d'elles est prédominante et les autres peuvent être négligées.

I-3-1. La conduction

La conduction est la transmission provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu en contact direct, par simple interaction moléculaire, les molécules les plus chaudes transmettent leurs énergies de vibration aux molécules voisines.

Ce transfert est défini par la loi de Fourrier :

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dt} \quad \text{(1)}$$

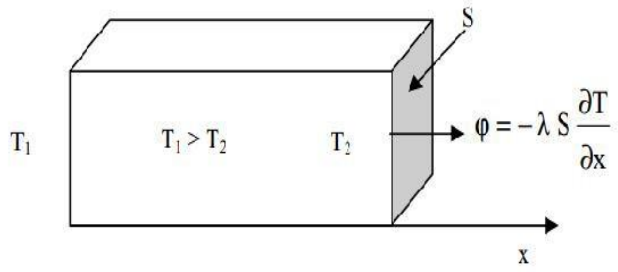


Figure II.2. : Transfert thermique par conduction dans un mur simple.

I-3-2. La convection

Ce mode d'échange de chaleur existe entre les fluides ou lorsqu'un fluide circule autour d'un solide. Ce type d'échange est définit par la loi suivante :

$$Q = hS\,(T_s - T_f) \quad (2)$$

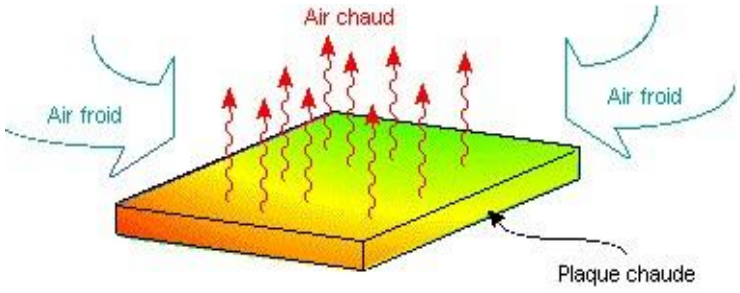


Figure II.3. : Transfert thermiquepar convection.

On distingue deux types de convection :

- La convection forcée : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, un ventilateur, …).
- La convection naturelle : le mouvement du fluide est engendré par les

Variations de densité causées par les variations de température du fluide.

I-3-3. Le rayonnement

Le rayonnement thermique est caractérisé par un échange d'énergie électromagnétique, sans que le milieu intermédiaire ne participe nécessairement à cet échange. Par exemple, le rayonnement solaire est capable de réchauffer la terre bien que le milieu traversé soit à une température plus basse que celle de la terre.

L'échange de chaleur est défini par la loi de S. Boltzmann :

$Q=\sigma ST^4$(3)

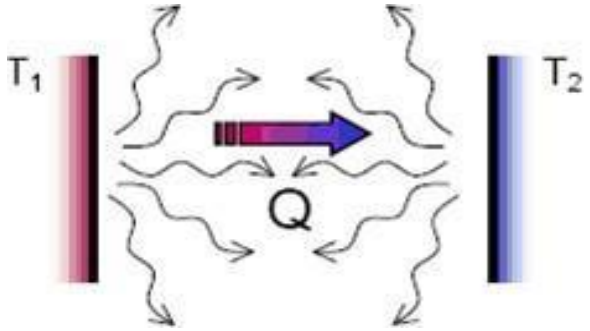


Figure II.4. : Phénomène de rayonnement thermique.

II- Mode d'écoulement des deuxfluides

II-1. Ecoulement co-courants (écoulementdes deux fluides parallèles et sens)

Il s'agit d'échangeurs dits à co-courants ou la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie de fluide chaud ; les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase.

La figure (II.5.) donne l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur tubulaire à co-Courants très simple, la longueur de l'échangeur a été

portée en abscisse, les températures sont repérées à l'aide d'indices signifiant entrée et sortie, 1 désignant le fluide chaud et 2 le fluide froid [20].

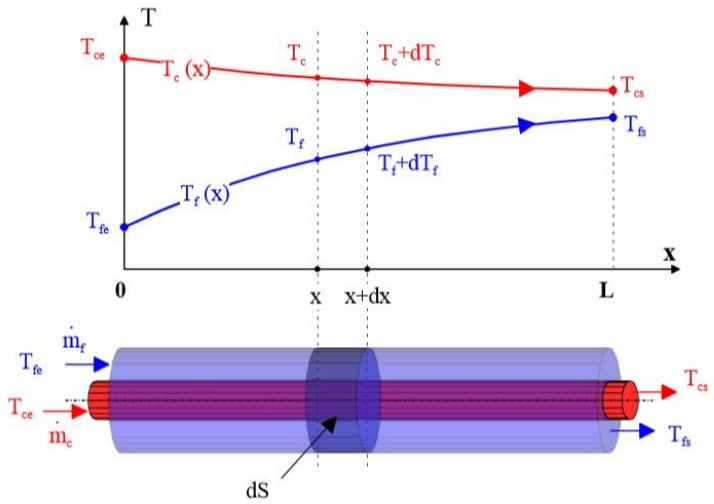


Figure II.5. : Evolution des températures dans un échangeur à co-courant.

II-2. Ecoulement contre –courants (écoulement des fluides parallèlesmais

Pour ce type d'échangeur, les deux fluides circulent en sens opposé, par exemple à x=0 sera l'entrée du fluide chaud, tandis que le fluide froid aura une entrée à x=L [21]. L'évolution de la température est représentée sur la figure ci-dessous :

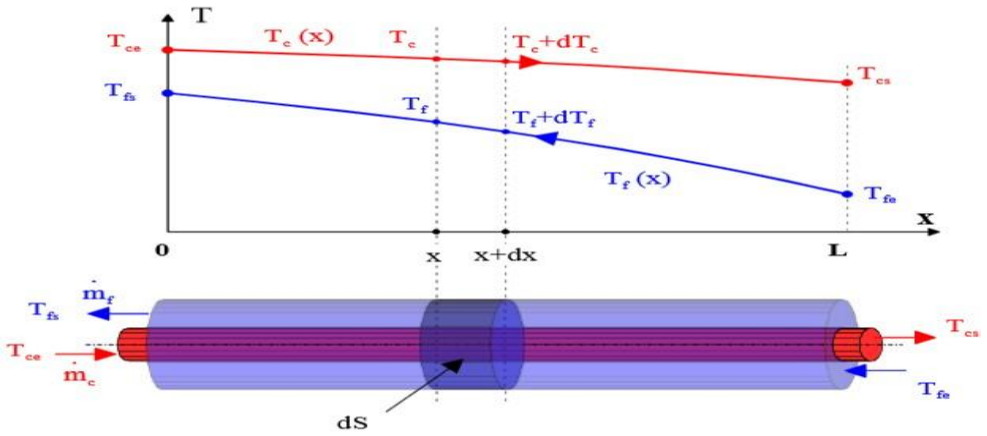


Figure II.6. : Evolution des températures dans un échangeur à contre-courant.

II-3. Ecoulement des fluides croisés avec ou sens brassage

Dans ce cas de figure, les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Il existe deux types de ce courant. Le premier est dit non brassé si un des fluides s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section et le second est dit brassé dans le cas contraire. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans la section droite de la veine.

Les échangeurs à courant croisé sont beaucoup plus utilisés pour des échanges entre gaz (dans la calandre) et un liquide (dans les tubes) [22].

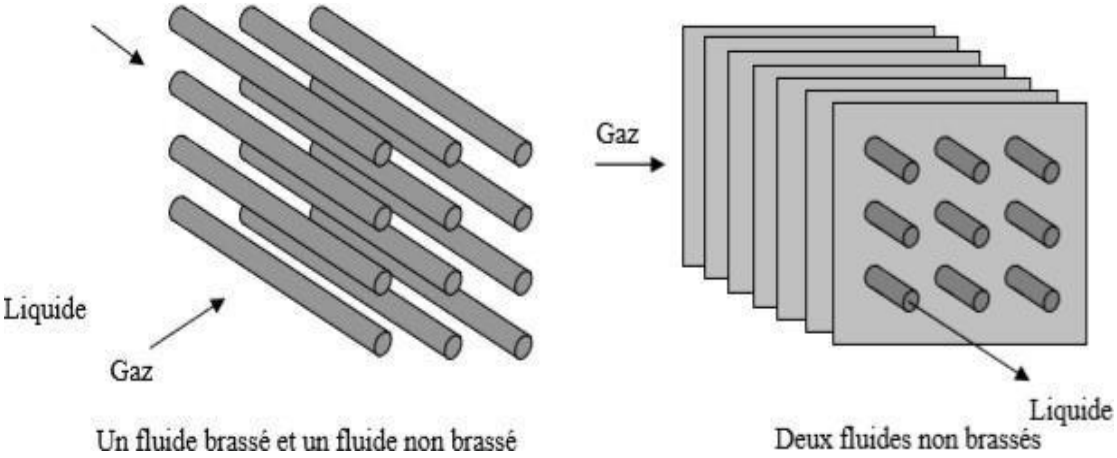


Figure II.7. : les deux types du courant croisé.

III- Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants [23] :

- A tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- A plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.
- Autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

III-1. Echangeur tubulaire

Les échangeurs tubulaires sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange, ce type d'échangeurs est les plus répondus pour des raisons historiques et économiques [17], il existe trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement pour une meilleure efficacité :

III-1-1. Echangeur monotube

Pour lesquels le tube est placé dans un réservoir, et a généralement la forme d'un serpentin.

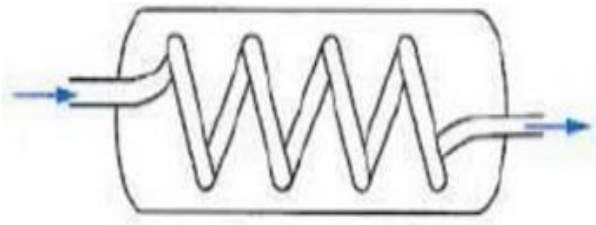


Figure II.8. : Echangeur monotube.

III-1-2. Echangeur coaxial

La configuration la plus simple est celle dans laquelle les deux fluides s'écoulent soit dans le même sens soit en sens contraire dans des tubes coaxiaux (ou concentriques).

En pratique, les échangeurs à tubes coaxiaux ne permettent pas d'obtenir des surfaces d'échange de grande étendue.

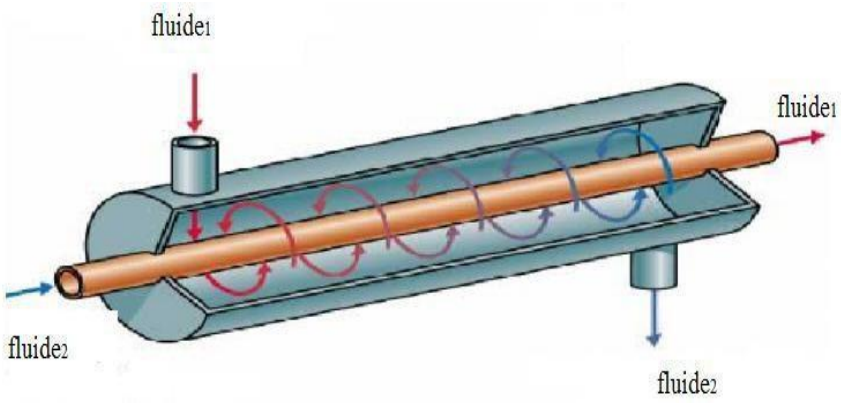


Figure II.9. : Echangeur à tube coaxiaux.

III-1-3. Echangeur multitubulaire

Ce type est appelé échangeur multitubulaire ou à faisceau de tubes. Il dispose fréquemment un faisceau de tubes à l'intérieur d'une enveloppe dénommée "calandre", L'un des fluides circulant à l'intérieur des tubes et l'autre autour des tubes à l'intérieur de la calandre.

En général, on ajoute des chicanes qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et Donnent naissance à une composante de vitesse orthogonale aux tubes. Ce type est appelé Échangeur à tubes et calandre. On parle d'échangeur à multi tubes.

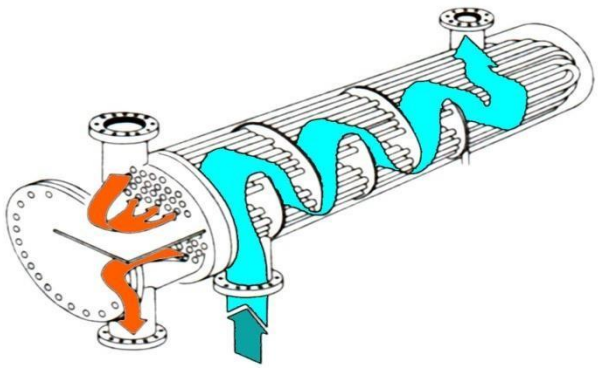


Figure II.10. : Echangeur thermique à tubes et calandre.

III-2. Echangeur à plaques

Un échangeur à plaques (Figure II.11) est constitué d'un ensemble de plaques métalliques embouties à travers lesquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. Il est constitué de :

1) **Les plaques :** sont serrées entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont positionnées et guidées par deux barres support inférieur et supérieur.

2) **Les bâtis :** maintiennent les plaques serrées au moyen de tirants. Les deux barres guides sont-elles mêmes supportées par un pied support.

3) **Un joint :** par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par les deux plaques.
Le raccordement des fluides s'effectue généralement sur le bâti fixe de l'appareil.

L'emboutissage des plaques en chevrons ou en cannelures (industries alimentaires) favorise la turbulence des fluides et assure une bonne tenue à la pression.

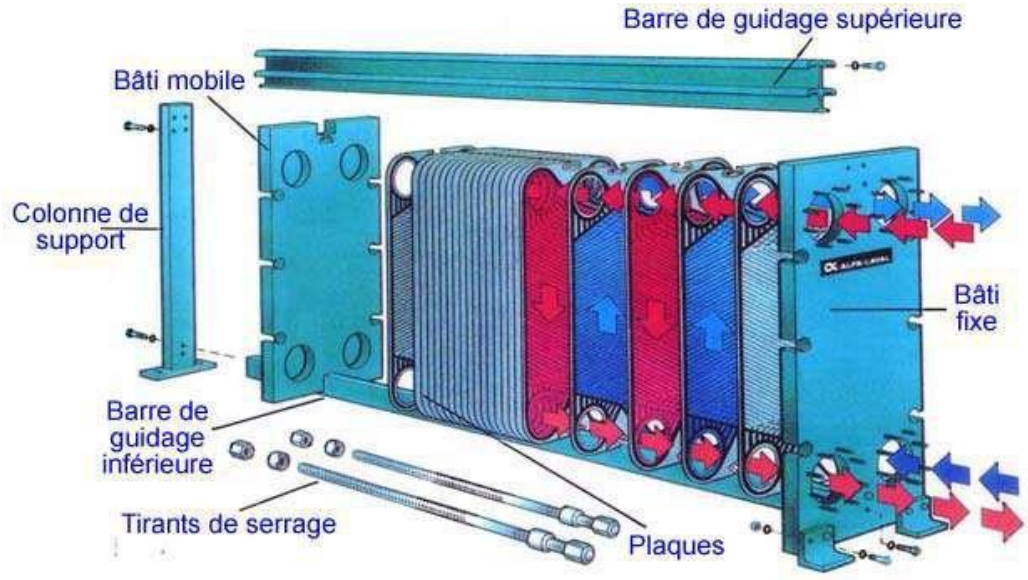


Figure II.11. : Composition d'un échangeur à plaques.

Les fluides circulent alternativement entre les plaques. Grâce aux corrugations, l'écoulement est souvent turbulent même à faible vitesse, générant ainsi des coefficients d'échange très élevés.

On distingue, selon la géométrie du canal utilisé, les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire.

III-2-1. Échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques, pouvant être lisses oucorruguées (ondulées ou à cannelures en chevrons), 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.

III-2-2. Echangeurs à plaque et joints

Ce sont des échangeurs composés d'un grand nombre de plaques métalliques minces conçues pour le transfert de chaleur d'un liquide à un autre. Un jeu de joints en caoutchouc sépare et étanchéiste les plaques minces pour avoir la distribution voulue des liquides sur les plaques. Un jeu de tirants est utilisé pour fournir les raccordements pour les liquides.

Grace à cet assemblage de blocs, on obtient le compromis recherché entre un bon coefficient de transfert et une perte de charge admissible. Malgré la forme des plaques leur rôle est d'assurer une bonne distribution du liquide et l'augmentation de la turbulence ainsi la surface d'échange.

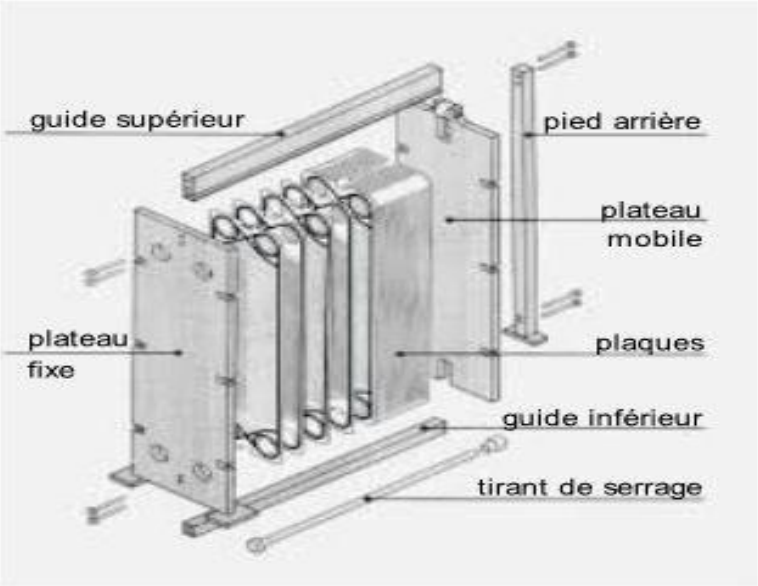


Figure II.12. : échangeur de chaleur à plaques et joints.

III-2-3. Echangeurs à plaques soudées ou brasées

Ils sont utilisés en récupérateurs de chaleur dans les domaines de l'industrie chimique, de la pétrochimie ainsi de dans d'autres domaines. Il en existe différents types et parmi eux :

- **Échangeur platulaire** : Il est constitué d'un assemblage de tôles planes embouties. Il peut fonctionner à des températures allant jusqu'à 600°C de température et des pressions de 30 à 40 bars.

- **Échangeur compabloc** : Il est constitué de plaques corruguées identiques à celles des échangeurs à plaque et joints, la circulation des fluides est à courant croisé. Il peut être utilisé jusqu'à des températures de 300°C et des pressions de 40 bars.

- **Échangeur packinox** : C'est un échangeur à plaque soudée de grande dimension et ayant un nombre d'unités de transfert élevé. Il peut atteindre des températures de 600°C et des pressions de 50 bars.

- **Échangeur lamellaire** : C'est la variante de l'échangeur de type tubes et calandres. Leur faisceau est constitué de tubes aplatis ou lamelles. Les limites de fonctionnement de ce type d'échangeur sont de 350°C en température et 25 bars en pression.

- **Échangeur à spirale** : Il est constitué de deux rubans de tôle gaufrée, enroulés et maintenus en parallèles. Il peut atteindre des températures de 300°C et des pressions de 25 bars.

- **Échangeur brasé** : c'est en fait un échangeur plaques et à joints conventionnel, mais qui ne possède pas des joints d'étanchéité, ni tirants de serrage. Cet échangeur est petit de taille, en peut atteindre des pressions de 30 bars et des températures de 225°C.

IV-Autres types d'échangeurs

Parmi les échangeurs thermiques, il convient également de citer les échangeurs où l'un des deux fluides change de phase. Il s'agit du cas particulier des évaporateurs tubulaires ou à plaques (où le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux), et des condenseurs tubulaires ou à plaques (où le fluide chaud passe de l'état gazeux à l'état liquide). Ils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide ou produire de la vapeur. La technologie de ces types porte surtout sur le matériau de construction ainsi que sur les conditions d'amenée des fluides. Les matériaux les plus utilisés dans les échangeurs sont les aciers inoxydables et le titane, mais d'autres matériaux sont également employés, notamment pour limiter l'effet des phénomènes de corrosion, comme le graphite, la céramique, le verre et les plastiques. L'objectif est d'améliorer la résistance des échangeurs afin de les rendre plus faibles lorsqu'ils sont utilisés dans des cycles thermiques [24].

IV-1. Les échangeurs à faisceaux et calandres

L'échangeur à faisceau et calandre est le plus répondu au niveau des unités de traitement des hydrocarbures. Le principe du faisceau logé à l´intérieur d´une calandre a été également retenue dans la construction de condenseur et rebouilleur.

L´appareil est constitué par un faisceau de tubes monté sur deux plaques tubulaires et portant un certain nombre de chicanes [25].

D'après la construction on distingue quatre types d'échangeur à faisceau et calandre :

- À plaque tubulaire fixes (construction rigide).
- À compensateur de dilatation thermique.
- À tête flottante.
- À tube en U.

IV-1-1. Échangeur de chaleur à plaques tubulaires fixe

Ces échangeurs de chaleur possèdent deux plaques tubulaires à la calandre, ceci favorise de l'apparition des contraintes thermiques dans les tubes et dans la calandre à cause de l'écart de température entre les deux fluides circulés.

L'échangeur repose sur deux supports dont l'un est fixe (coté boite de distribution) et l'autre mobile, ce dernier assure les dilatations thermiques libres de la calandre par rapport à la fondation de béton.

L'écart de la température entre les tubes et la calandre égale à 50°C est la limite supérieure d'application de ces échangeurs [25].

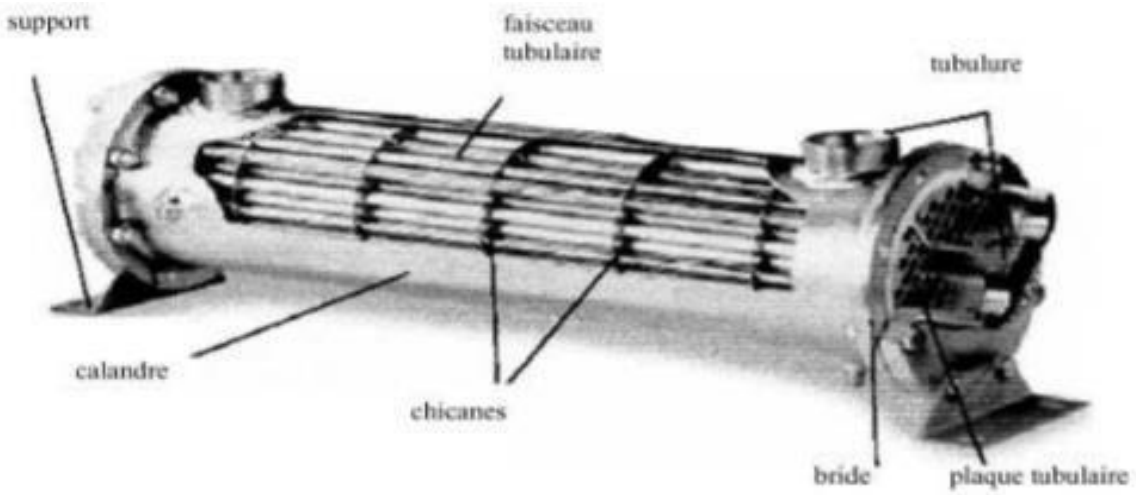


Figure II.13. : Echangeur de chaleur à plaques tubulaires fixe.

IV-1-2. Échangeur de chaleur à compensateur de dilatation thermique

A part le compensateur, l'appareil est semblable à l'échangeur de type rigide et possède les mêmes avantages et inconvénients. Mais grâce au compensateur, il peut s'employer dans les conditions thermiques plus rudes, mais diminue leur grandeur.

Dans ces appareils, la charge axiale due à la pression intérieure s'applique presque totalement aux tubes, comme la charge supportée par la calandre peut être négligée grâce à la faible rigidité des gaufres ne s'usent presque pas en service et résiste toujours à la charge axiale.

IV-1-3. Echangeur de chaleur à tête flottante

Etant très répondu, cet appareil possède une dite tête flottante, montée par l'intermédiaire de la plaque tubulaire mobile sur une extrémité du faisceau. Dans ces appareils, la première plaque tubulaire est bridé à la calandre, par contre la deuxième et mobile. Elle forme avec le couvercle, la tête flottante, le faisceau tubulaire du côté de la plaque mobile n'est pas très lié à la calandre et peut se pouvoir librement pendant les variations des températures des tubes, ceci diminue de l'intensité des contraintes thermiques dans la construction [25].

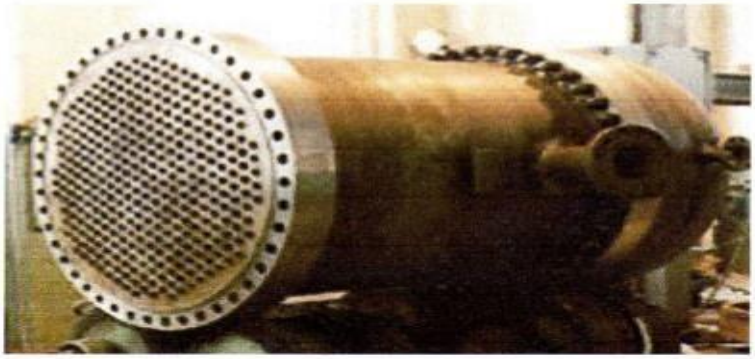


Figure II.14. : Echangeur de chaleur à tête flottante.

IV-1-4. Echangeur de chaleur à tubes en U

Grâce à la dilation libre des tubes en U, la construction est aussi exemple de la contrainte thermique. Remplacement de la tête flottante par des tubes en U rend l'appareil moins couteux, mais le nettoyage mécanique à l'intérieur à des tubes est impossible. Il est aussi impossible de changer tubes détériorés. L'avantage de ces échangeurs est le fait que les tubes peuvent se dilater librement ce qui diminue les contraintes thermiques dues à la différence de température entre les parois des tubes et de la calandre [25].

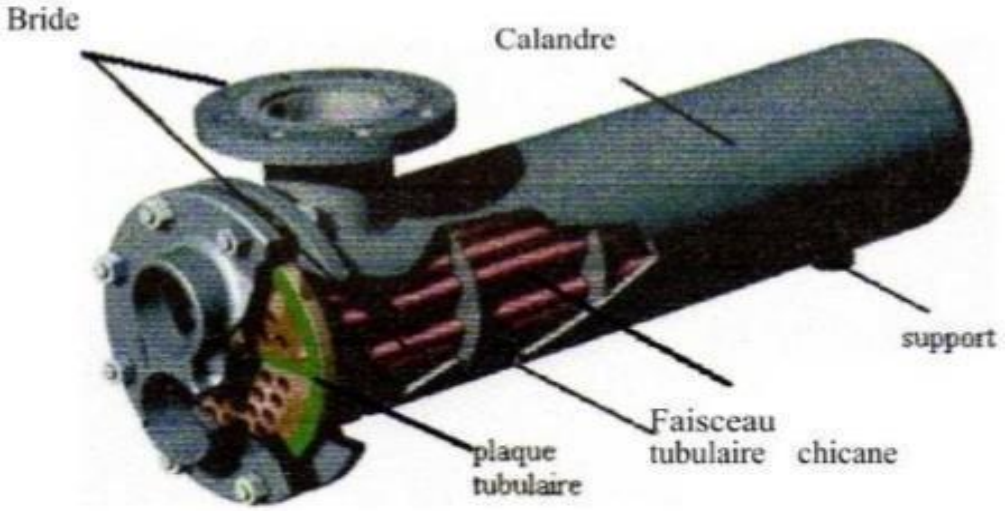


Figure II-15. : Echangeur de chaleur à tubes en U.

IV-2. Pièces faisant partie des échangeurs de chaleur à faisceau et calandre

IV-2-1. La calandre

L´ acier au carbone est le matériau le plus couramment utilisé pour la construction des calandres. A chaque extrémité sont soudées des brides avec plaques de renforcement selon la pression de service. Enfin la calandre pourra être équipée d´anneau de levage et portera la plaque d´identification de l´appareil.



Figure II-16. : Calandre simple à une seule phase.

IV-2-2. Le faisceau de tubes

Les tubes constituants les faisceaux forment une classe spéciale répondant aux spécifications des normes TEMA (TubularExchanger Manufacture Association).

Le diamètre nominal correspondant au diamètre extérieur pour lequel les tolérances sont sévères. Les épaisseurs des tubes sont normalisées selon le calibre BWG (Birmingham Wire Gage).

IV.2.3. Disposition des tubes

Les tubes sont fixés à leurs extrémités par mandrinage ou dudgeon nage dans deux plaques tubulaires.

La perforation des trous s´effectue selon une disposition soit au pas carrée, soit au pas triangulaire fig. (II.17).

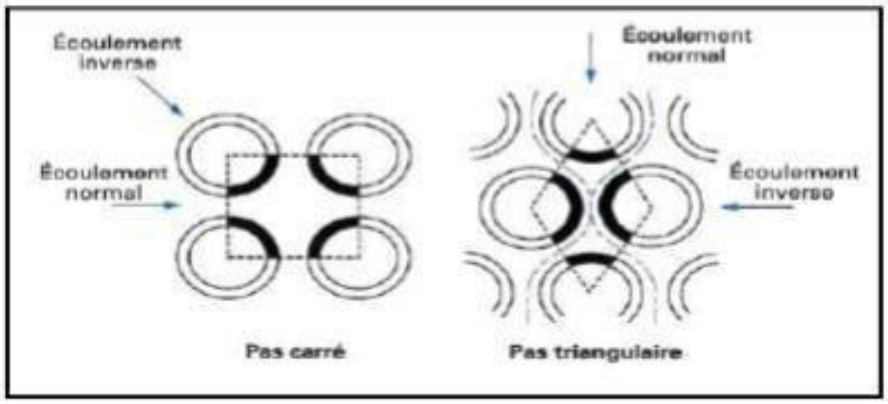


Figure II.17. : Disposition des tubes.

-Choix du pas :

Le pas triangulaire permet de placer environ 10% des tubes de plus que le pas carrée sur une plaque tubulaire de diamètre donné, mais en contrepartie, la disposition des tubes ne permet pas leurs nettoyages extérieurs par insertion de grattoirs ou de racloirs à travers le faisceau.

Pour choisir la configuration géométrique, on utilise le rapport pas /diamètre extérieure de tubes (P/dext, tube). Il doit être supérieur ou égale à 1,25.

Cette définition est conditionnée pour le facteur de parte de charge dans les conduitescylindriques.

Notons que :

- Les tubes sont fixés sur les plaques tubulaires soit par dudgeon nage (mandrinage) ou par soudage (grand température et pression).
- Les tubes utilisés dans ces appareils sont généralement en acier au carbone bien soudable ; pour la calandre et les autres accessoires en acier bien résistant que les tubes.

IV-2-4. Plaques tubulaires

Ces sont des plaques percées supportant les tubes à leur extrémité. Leur épaisseur (5 à 10 cm) est calculée en fonction de la différence de pression entre le fluide dans la calandre et le fluide dans les boites d'une part, et les contraintes dues aux différences de dilatation entre les tubes et le calandre d'autre part.

Les plaques tubulaires sont dimensionnées spécifiquement dans le respect des impositions des codes ou des standards TEMA. En aucun cas l´épaisseur doit être inférieur à ¾ in, surépaisseur de corrosion ne dépasse pas 3 mm

IV-2-5. Les Chicanes

Elles sont pour rôle de diminuée la vitesse du fluide dans la calandre et la rigidité du faisceau, et augmenter la rigidité du faisceau, pour éviter des phénomènes de vibration et de flambage.

Des chicanes transversales de différents types peuvent être mises en place pour régler le coefficient de convection côté calandre : la solution chicanes segmentées permet de réaliser une circulation transversale au faisceau Sauf conception spéciale, le pas B entre deux chicanes consécutives n´est jamais inférieur à Dc/5 ou 2 in.

- L´ouverture de segmentation est définie par h/Dc. Les tubes du faisceau sont enfilés dans les trous aménagé dans les chicanes ; Celles-ci sont maintenues en place par un ensemble de tirants et entretoises, ces dernières étant le plus souvent des tronçons de tubes [18].

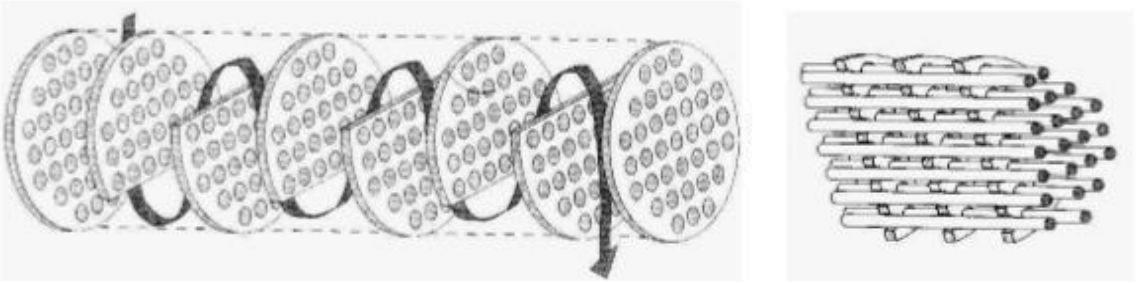


Figure II.18. : disposition des chicanes.

V- Avantages et inconvénientsde l'échangeur à plaques

V-1. Avantages

- Coefficient de transfert de chaleur élevé.
- Grande adaptabilité.
- Structure compacte, taille réduite et consommables réduits.
- Coefficient de transfert de chaleur élevé et faible consommation de métal, rendant le transfert de chaleur efficace (85% à plus de 90%).
- Facile à enlever, laver et réparer.
- Le facteur d'encrassement est faible. En raison de la perturbation importante du débit, la saleté n'est pas facile à déposer ; la plaque utilisée est de bonne qualité et rarement corrodée, ce qui rend le coefficient d'encrassement faible.
- Les échangeurs de chaleur à plaques sont fabriqués en tôle, de sorte que le prix des matières premières est inférieur à celui du même type de conduites.

V-2. Inconvénients

- Mauvaiseétanchéité et facile à fuir. Il est plus difficile de remplacer le joint fréquemment.
- La pression d'utilisation est limitée, généralement pas plus de 1,5 MPa.

- La température de fonctionnement est limitée par la résistance à la température du matériau du joint.
- La voie d'écoulement est petite, elle ne convient pas aux échanges thermiques de gaz à gaz ni à la condensation de vapeur.
- Il est facile de bloquer. Je ne suis pas adapté aux fluides contenant des solides en suspension.
- La résistance à l'écoulement est plus grande que la coque et le tube.

VI- Méthode de dimensionnement

VI-1. Introduction

Lors du dimensionnement d'un échangeur, l'objectif est de déterminer les différents paramètres de fonctionnement (nombre de tubes, longueur des tubes, diamètre de la calandre…) qui lui permettront d'échanger une puissance donnée avec un minimum de surface d'échange et le moins de pertes de pression [26].

Etude de dimensionnement d'échangeur thermique est basée sur différentes disciplines :

- Discipline thermique.
- La mécanique des fluides.
- Technologie des matériaux.
- Architecture.

VI-2. Coefficient d'échange global et partiel

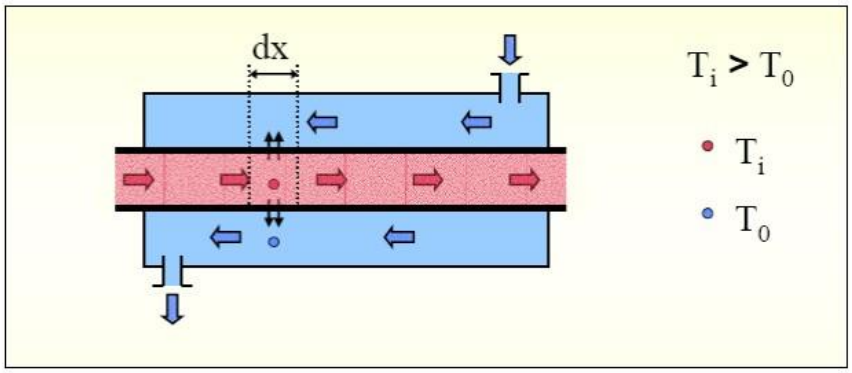
Si on considère un échangeur de chaleur constitué de deux conduites dans lesquelles s'écoulent deux fluides tels qu'illustré sur la (figure (II.19) (a) et (b)). Nous avons trois résistances au transfert : Sur la paroi interne du tube,

convection hi Dans l'épaisseur du tube conduction, k Sur la paroi externe du tube, convection *h*. En régime permanent, le flux de chaleur s'exprime :

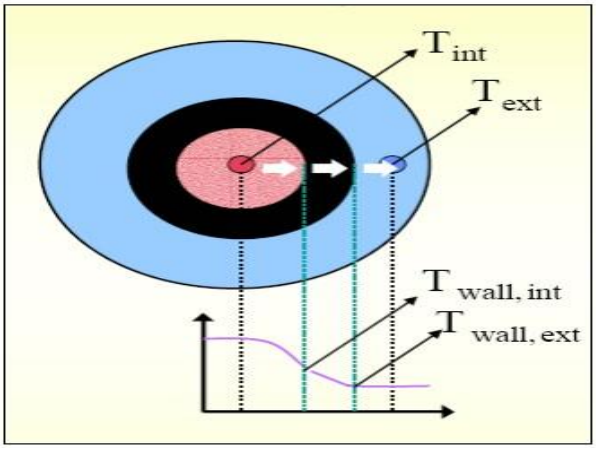
$$Q = \frac{T - T_{12}}{\frac{1}{h S_i} + \frac{\ln(\quad)}{2\pi k L} + \frac{1}{h S_e}} \quad (4)$$

On introduit le coefficient global d'échange *o K*, le flux s'écrit :

$$Q = K S T_0 \quad _{moyenne} \quad (5)$$



(a)



(b)

Figure II.-19. : Echangeur de chaleur entre deux conduites :

(a) Représentation des conduites ;

(b) Vue de coup de l'échangeur ;

Le coefficient de transfert est basé sur l'utilisation de la surface externe ou interne de la Conduite selon le choix de l'utilisateur.

Si la surface interne est utilisée alors le coefficient global d'échange et le flux de chaleur s'exprime :

$$Q = \frac{T - T_{ie}}{\frac{1}{h_i} + \frac{S_i \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{S_i}{h S_{ee}}} \quad (6)$$

$$Q = K S T_{0\,i} \text{ moyenne} \quad (7)$$

Si la surface externe est utilisée alors le coefficient global d'échange et le flux de chaleur s'exprime par :

$$Q = \frac{T - T_{ie}}{\frac{1}{\frac{S_e}{S h_{ii}} + \frac{S \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{S_e}{h S_{ee}}}} \quad (8)$$

$$Q = K S_{0\,e} T_{\text{moyenne}} \quad (9)$$

La détermination du flux de chaleur nécessite la détermination d'une différence de température moyenne.

Remarque :

L'expression précédente ne tient pas compte des problèmes d'encrassement, exemple le dépôt du tartre sur les conduites d'eau. Le dépôt du tartre dans ou sur les tubes provoque une résistance thermique supplémentaire.

On introduit une résistance d'encrassement R^{int} et une résistance d'encrassement f R et une résistance d'encrassement externe R^{ex} [26].

VI-3. Critères de performance d'un échangeur

Il existe plusieurs critères de performance d'un échangeur :

- L'efficacité d'un échangeur est un critère de performance important.
- Le coefficient d'échange global U est aussi un des plus utilisé. Plus ce dernier est important, plus l'échangeur est performant. Il faut néanmoins que les pertes de charge soient les plus faibles possibles (mais suffisante afin d'assurer une bonne distribution des fluides) mais soient totalement dépendantes du design de l'échangeur. Enfin, le critère de compacité est aussi important car il est défini par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah

[21, 27] propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité

(rapport de la surface d'échange sur le volume de l'échangeur) est supérieure à 700 m^2/m^3, cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m^2/m^3.

Chapitre III Modélisation et simulation de l'encrassement

I- Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation numérique, à l'aide du logiciel Ansys Fluent, des phénomènes physiques et chimiques régnant l'écoulement et le traitement du pétrole brut dans les tubes de l'échangeur étudié, y compris le mécanisme de formation de l'encrassement.

Les hypothèses du modèle, les équations qui gouvernent l'écoulement et les conditions aux limites correspondantes sont développées en premier. Par la suite, les méthodes de discrétisations choisies pour la résolution numérique du système sont présentées.

Les résultats de la validation numérique du modèle sont présentés dans ce qui suit.

II-Présentation de la raffinerie

Une raffinerie est conçue pour traiter le pétrole brut. Elle peut être simple ou complexe, constitue de quelques unités de traitement ou bien de plusieurs.

L'Algérie est l'un de ces pays producteurs de pétrole. Elle est membre fondateur de l'organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP). L'Algérie dispose de cinq raffineries situées : la première à Alger, la deuxième à Hassi Messaoud, la troisième à Arzew dans l'Oranie, la quatrième à Skikda, et enfin la dernière à In Amenas dans la wilaya d'Illizi. Elles sont gérées par la société nationale Sonatrach-activité aval- Division Raffinage [28].

Un schéma simplifié d'un exemple de raffinerie considéré est présenté sur la Figure III.1. Le pétrole brut du stockage est pompé vers le premier échangeur (HE-01) sous forme de flux froid jusqu'à l'échangeur 4 (HE-04). Après avoir quitté (HE-04), le pétrole brut est envoyé au dessalement pour éliminer le sel du pétrole brut. Le pétrole brut du dessaleur est envoyé à l'échangeur suivant

(HE05) sous forme de flux froid jusqu'au dernier échangeur (HE-11). Après avoir quitté cet échangeur, le pétrole brut est envoyé au réchauffeur de traitement pour être chauffé à 350 °C pour un traitement ultérieur.

Le train du préchauffage de la raffinerie considéré est constitué de plusieurs batteries d'échangeurs comme la montre la figure suivante :

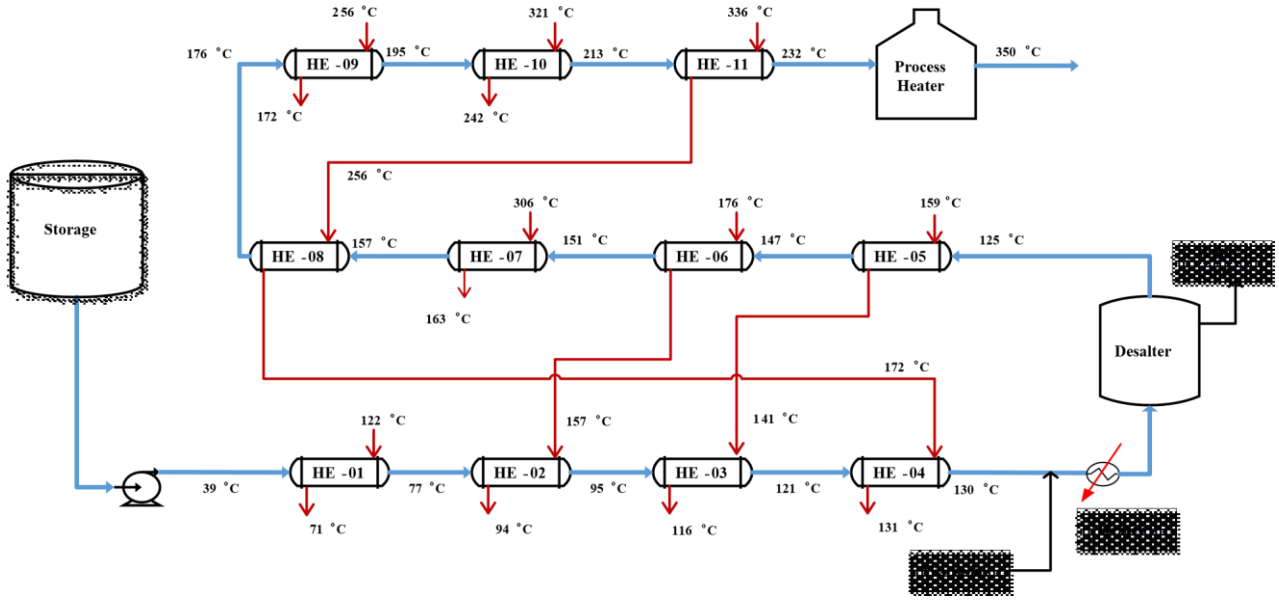


Figure III.1. : Diagramme simplifié du train de préchauffage de la raffinerie.

III- Mécanisme et Modélisation mathématique

III-1. Présentation

L'encrassement par le pétrole brut est proposé en formules mathématique, avec trois voix de déposition, en supposant les trois mécanismes suivants :

Auto –oxydation des hydrocarbures (formation des gommes insolubles) :

Le modèle proposé par Zabarnik et al. [31] exprime la masse du dépôt encrassant. Ce modèle très complexe est de cinétiques chimies pseudo-détaillées est présenté sur la Figure III.2. :

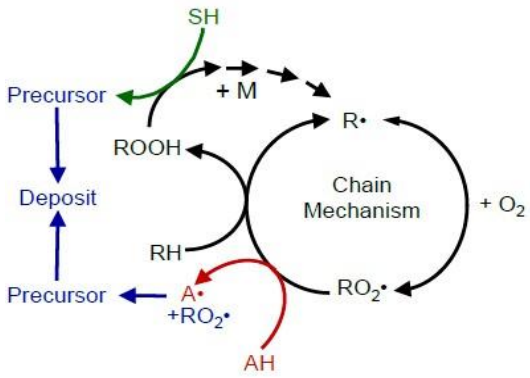


Figure III.2. : Diagramme du mécanisme en chaine de l'auto-oxydation [29].

Le modèle est amélioré par West et al. 2011 [32] pour contenir vingt-sept réactions avec les étapes de la déposition, Tableau III.1.

Tableau III.1. Etapes des réactions chimiques de l'auto-oxydation des hydrocarbures.

No.	Reaction	Arrhenius Factor (mol, L, s)	E_a (kcal/mol)
1	$R\cdot + O_2 \rightarrow RO_2\cdot$	3.0×10^9	0
2	$RO_2\cdot \rightarrow R\cdot + O_2$	1.0×10^{14}	15
3	$RO_2\cdot + RH \rightarrow RO_2H + R\cdot$	3.0×10^9	12
4	$RO_2\cdot + RO_2\cdot \rightarrow ROH + Aldehyde + O_2$	3.0×10^9	0
5	$RO_2\cdot + AH \rightarrow RO_2H + A\cdot$	3.0×10^9	5
6	$A\cdot + RH \rightarrow AH + R\cdot$	1.0×10^5	12
7	$A\cdot + RO_2\cdot \rightarrow Products_{AH}$	3.0×10^9	0
8	$RO_2H \rightarrow RO\cdot + \cdot OH$	2.0×10^8	25
9	$RO_2H + M \rightarrow RO\cdot + \cdot OH + M$	1.0×10^9	12
10	$RO\cdot + RH \rightarrow ROH + R\cdot$	3.0×10^9	10
11	$RO\cdot \rightarrow R'\cdot + Carbonyl$	1.0×10^{16}	15
12	$\cdot OH + RH \rightarrow H_2O + R\cdot$	3.0×10^9	10
13	$R'\cdot + RH \rightarrow Alkane + R\cdot$	3.0×10^9	10
14	$RO_2H + SH \rightarrow Products_{SH}$	3.0×10^9	18
15	$RO_2\cdot + R\cdot \rightarrow RO_2R$	3.0×10^9	0
16	$R\cdot + R\cdot \rightarrow R_2$	3.0×10^9	0
17	$R\cdot + O_2 \rightarrow Olefin + HO_2\cdot$	3.0×10^9	5
18	$HO_2\cdot + RH \rightarrow H_2O_2 + R\cdot$	3.0×10^9	10
19	$HO_2\cdot + HO_2\cdot \rightarrow H_2O_2 + O_2$	3.0×10^9	0
20	$RO_2\cdot + HO_2\cdot \rightarrow RO_2H + O_2$	3.0×10^9	0
21	$Products_{AH} \rightarrow Solubles_{AH}$	1.0×10^9	0
22	$Products_{AH} \rightarrow Insolubles_{AH}$	3.8×10^{10}	6.5
23	$Insolubles_{AH} \rightarrow Surface\ Deposits_{AH}$	3.0×10^3	16.3
24	$Products_{SH} \rightarrow Solubles_{SH}$	1.0×10^9	0
25	$Products_{SH} \rightarrow Insolubles_{SH}$	3.8×10^{10}	6.5
26	$Insolubles_{SH} \rightarrow Surface\ Deposits_{SH}$	3.0×10^3	16.3
27	$RH \rightarrow R'\cdot + R'\cdot$	1.0×10^{16}	65

Déposition des produits de la corrosion

Les produits de la corrosion se présentent comme des colloïdes dans la solution et sous l'effet de l'élévation de la température ces colloïdes tendent à se précipiter sur la paroi de l'échangeur de chaleur.

Selon Bott [33], la formation du dépôt est exprimée mathématiquement par l'équation suivante :

$$Q\ K\ C_d = {}_d\square\ {}_b \quad (1)$$

Avec :

$$1/\ K_d = 1/\ K_t + 1/\ K_a \quad (2)$$

Il est à noter que le coefficient d'attachement est fonction de la température de la paroi par la relation de type Arrhenius :

$$K_a = K \exp E / RT_a^{\ 0} \qquad (\ _a \quad {}_s) \quad (3)$$

Les valeurs de E_a et de K^0_a employées sont celles proposées par Turner [34] dans le Tableau III.2.

Tableau III.2. Valeurs des paramètres relatives au modèle de la déposition des oxydes de fer.

Paramètres	**K_a^0(m/s)**	**E_a/R (K^{-1})**
T inférieur à 100 °C	2392	6840
T entre 240 et 300 °C	5.7	9187

○Cristallisation des sels

Le modèle le plus utilisé dans la littérature pour décrire l'encrassement par la cristallisation du sulfate de calcium est celui proposé par Nancollas et Liu [35] selon l'équation :

$$m'_p = k\, C_r \left(_{si} - C^*_s \right)^n (4)$$

Avec :

$$k_r = k \exp E / RT_0 \qquad \left(\quad _s \right)(7)$$

Le facteur k_0 et l'énergie d'activation E choisie pour le modèle de ce travail sont donnés dans le Tableau III.3. Il est à noter que les valeurs de ces paramètres sont déterminées expérimentalement par A. Helalizadeh et al. Pour la précipitation et la déposition du $CaSO_4$ [36].

Tableau III.3. Valeurs des paramètres relatives au modèle de la cristallisation du $CaSO_4$ [36].

Paramètres	**N**	**E (j/mol)**	**K_0 (m^4/kg s)**
Valeur	1.95	106747	$3.2\ 10^{11}$

Finalement, le modèle mathématique totale englobe les trois précédents mécanismes proposés. La vitesse massique globale de la déposition est déterminée par la somme de celle des trois voix de l'encrassement selon :

$$Q^{Tot}_d = \sum_{3} Q_i (7)$$

i 1=

III-2. Modèle de la résistance thermique d'encrassement et coefficient global de transfert de chaleur

Afin de pouvoir résoudre le présent problème, certaines hypothèses simplificatrices ont été adoptées :

- Le pétrole brut est considéré comme étant un fluide Newtonien.
- L'écoulement du pétrole brut dans les tubes des échangeurs de chaleur se fait en régime turbulent.
- L'écoulement est incompressible, axisymétrique.
- Le mélange pétrole brut-espèces d'encrassement est considéré comme monophasique. Cela revient d'une part à la faible concentration des espèces d'encrassement dans le pétrole (ordre de ppm) et d'autre part aux faibles dimensions des particules.

Le schéma simplifié de la raffinerie proposé est présenté sur la figure III.1. Elle est composé de plusieurs batterie d'échangeurs tubulaires (HE-1 à 4 ; HE-5 à 8 et HE-9 à 11). Nous considérons dans cette contribution la deuxième batterie par manque de temps et d'outils de calcul. La première batterie a été considérée dans un travail antérieur.

Il est à noter que tous les échangeurs sont identiques pour les trois batteries. Par conséquent, les coefficients d'échanges globaux, les surfaces d'échanges, les débits massiquessont identiques pour tous les échangeurs de chaque batterie.

D'autre part, la résistance thermique asymptotique et la constante de temps doit être déterminée de façon empirique.

Plusieurs modèles empiriques, semi-empiriques et théoriques ont été proposés dans la littérature pour décrire l'encrassement dans les échangeurs de chaleur [37,38].

Le modèle d'encrassement de Kern et Seaton asymptotique et exponentiel est l'un des modèles d'encrassement les plus couramment proposés dans le programme de nettoyage d'optimisation des échangeurs de chaleur en raison de la simplicité du modèle [37-38]. Il est [39] est proposé pour déterminer l'état d'encrassement de l'échange comme suit :

$$R_{f(t)} = R_{\infty}\left(1 - \exp^{-\alpha t}\right) \quad (8)$$

Le coefficient d'échange globale est donné par :

$$U_{f(t)} = \frac{U_c}{1 + U R_{cf(t)}} \quad (9)$$

La quantité de chaleur transférée dans un échangeur est donné par :

$$U_{f(t)} = \frac{U_c}{1 + U R_{c\,f(t)}\left(1 - \exp^{-\alpha t}\right)} \quad (10)$$

Par substitution de l'équation (8) dans l'équation (9) :

$$Q = m \cdot c_{ph}(T_{hi} - T_{ho}) \quad (11)$$

$$Q = m \cdot c_{pch}(T_{co} - T_{ci}) \quad (12)$$

$$Q = U_f \cdot A \cdot LMTD \quad (13)$$

La température moyenne logarithmique utilisée dans l'équation ci-dessus est donnée par :

$$LMTD = \frac{(T_{ho} - T_{ci}) - (T_{hi} - T_{co})}{\ln\left[\frac{T_{ho} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{co}}\right]} \quad (10)$$

La résolution de ces équations donne $T_{h,o}$ and $T_{c,o}$ [40]:

$$T_{co} = \frac{\left(1 - \frac{m c_{pc}}{m c_{ph}}\right)\left(\exp\left[\left(\frac{m c_{ph}}{m c_{pc}} - 1\right)\left(\frac{U_{f(t)} A}{m c_{ph}}\right)\right] T_{ci} + \left(\frac{m c_{ph}}{m c_{pc}}\right)\exp\left[\left(\frac{m c_{ph}}{m c_{pc}} - 1\right)\left(\frac{U_{f(t)} A}{m c_{ph}}\right)\right] T_{hi}\right)}{\left(\frac{m c_{ph}}{m c_{pc}} - 1\right)} \quad (15)$$

$$\left[\exp\left[\left(\frac{U_{f(t)} A}{m c_{ph}}\right)\left(\frac{m c_{ph}}{m c_{pc}} - 1\right)\right]\left(\frac{m c_{ph}}{m c_{pc}}\right) - 1\right]$$

$$\exp\left[\left(\frac{U_{f(t)} A}{m c_{ph}}\right)\left(\frac{m c_{ph}}{m c_{pc}} - 1\right)\right]$$

□ □

□ □ U A □ m c □ □ □ □

□

$$T_{ho} = \frac{\exp\left(-\frac{U_{f(t)h} A_{ph}}{m_{hc} c_{phhc}}\left(1-\frac{1}{F}\right)\right)\left(1-\exp\left(-\frac{U_{f(t)h} A_{ph} F}{m_{hc} c_{phhc}}\right)\right)}{1-\exp\left(-\frac{U_{f(t)h} A_{ph} F}{m_{hc} c_{phhc}}\right)\exp\left(-\frac{U_{f(t)c} A_{pc} F}{m_{c} c_{pc}}\right)} T_{ci} + \frac{\left(1-\exp\left(-\frac{U_{f(t)h} A_{ph} F}{m_{hc} c_{phhc}}\right)\right)\left(1-\exp\left(-\frac{U_{f(t)c} A_{pc} F}{m_{c} c_{pc}}\right)\right)}{1-\exp\left(-\frac{U_{f(t)h} A_{ph} F}{m_{hc} c_{phhc}}\right)\exp\left(-\frac{U_{f(t)c} A_{pc} F}{m_{c} c_{pc}}\right)} T_{hi}$$

□exp□□− m cF□ m c − −1□□ □ □ □ □ □ □m c □ m c □ m c □ □

□

□

k_1 et k_2 sont données par [41] :

$$k_1 = \frac{mc_{h\,ph}}{m\,c_{c\,pc}} \quad (17)$$

$$k_{2(t)} = \frac{U_{f(t)} A}{mc_{h\,ph}} \quad (18)$$

$$T_{co} = \frac{(1-k_1)\exp\left(-k\,F\,k_2\left(\,_1-1\right)\right)}{1-k_1\exp\left(-k\,F\,k_2\left(\,_1-1\right)\right)} T_{ci} + \frac{\left(1-\exp\left(-k\,F\,k_2\left(\,_1-1\right)\right)\right)}{1-k_1\exp\left(-k\,F\,k_2\left(\,_1-1\right)\right)} T_{hi} \quad (19)$$

□ □ □exp(−k F k₂(₁− −1) k₁)□ □

$$T_{ho} = \frac{\exp\left(-k\,F\,k_2\left(\ _1 - 1\right)\right) - 1}{\left(k_1 - 1\right)} T_{ci} + \frac{\left(k_1 - 1\right)}{\exp\left(-k\,F\,k_2\left(\ _1 - \ - 1\right)\ k_1\right)} T_{hi}(20)$$

Le facteur F est égal à 1 pour un écoulement en contre-courant avec un débit massique constant pour chaque échangeur.

La puissance thermique d'un échangeur donné, notée Q_{ph}, est donnée par :

$$Q_{ph} = \int_0^t m_c\, Cp\, T_c\left(\ _{op} - T_{cot}^{ECn}{}_{(\ -)}\right) dt(21)$$

Avec :

T_{op} : La température de sortie du système de chauffage.

$T_{cot}^{ECn}{}_{(\ -)}$: La température de sortie froide de l'échangeur précédent le calcul actuel de Q_{ph} de l'échangeur en cours du réseau de chauffage.

L'intégration de Riemann est employée pour la discréditation [42] :

$$Q_{ph} = \sum_{t=0}^{H} m_c\, Cp\, T_c\left(\ _{op} - T_{cotECn(\ -)}\right) \Delta t(22)$$

Avec H un facteur temps qui peut s'étendre à un horizon de 360 jours.

Il est à noter aussi que les valeurs de la $R_{f\infty}$ et le sont considérées comme identiques pour tous les échangeurs d'une seule batterie.

Également, il n'y a pas des détecteurs de températures à l'entrés et à la sortie de chaque échangeur. Alors, les résistances à l'encrassement sont déterminées seulement à l'entrés et à la sortie de chaque batterie.

La constante du temps est calculée avec la formule suivante [40] :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{(23)t_c(0.63\tau t_\tau)}$$

Avec :

t_c : est le temps de résidence moyen t_τ : temps nécessaire

pour arriver à la résistance asymptotique **III-3. Modélisation**

de la turbulence

Les mécanismes d'encrassement par le pétrole brut sont généralement associés à des écoulements turbulents, principalement en raison des vitesses élevées du fluide et de la géométrie complexe des échangeurs de chaleur [43].

La simulation d'écoulement turbulent à l'aide des équations de Navier-Stokes est peut-être effectué avec le modèle de simulation numérique directe (DNS), néanmoins cette méthode nécessite une énorme quantité de temps de calcul et de mémoire.

Par conséquent, la plupart des cas impliquant des écoulements turbulents sont résolus par des équations de Navier Stokes (RANS) moyennées de Reynolds qui sont développées en adaptant des techniques de moyenne temporelle appropriées sur les équations de Navier-Stokes. Plusieurs modèles de turbulence tels que k-ε, k-ω, Reynolds Stress Model (RSM), etc., sont disponibles dans les équations RANS pour approximer l'influence des fluctuations turbulentes dans le domaine d'écoulement [44].

Dans le modèle de turbulence k-ε, l'énergie de la turbulence est calculée à partir de l'énergie cinétique turbulente (k) et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente est calculé à partir de la dissipation turbulente (ε), obtenus à partir des équations de transport suivantes [45] :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} k)}{\partial \bar{x}} = G_k - \rho\varepsilon + \frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial \bar{x}}\right] \quad (24)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}\varepsilon)}{\partial \bar{x}} = C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - Y_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial \bar{x}}\right] \quad (25)$$

Dans ces équations, G_k représente la génération d'énergie cinétique de la turbulence due aux gradients de vitesse moyens. $C_{1\varepsilon}$ et $C_{2\varepsilon}$ sont des constantes. $\sigma_k$et $\sigma_\omega$représentent les nombres turbulents de Prandtl. Ces paramètres sont plus détaillés dans [46].

Le modèle de turbulence k-ω prédit la turbulence avec l'énergie cinétique de turbulence (k) avec un taux de dissipation spécifique (ω) [44].

L'énergie cinétique turbulente k et la fréquence turbulente ω sont données comme suit :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} k)}{\partial \bar{x}} = G_k - Y_k + \frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial \bar{x}}\right] \quad (26)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}\omega)}{\partial \bar{x}} = G_\omega - Y_\omega + \frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial \bar{x}}\right] \quad (27)$$

G_k Et $G_\omega$sont des termes de production et Y_k et $Y_\omega$sont les taux de destruction [46].

Le modèle de turbulence le plus couramment considéré dans le domaine de l'encrassement du pétrole brut est le modèle de transport de contrainte de

cisaillement (Shear-Stress Transport SST) [47, 45]. Ce dernier combine le modèle de turbulence k-ω et le modèle de turbulence k-ε de telle sorte que k-ε est utilisé dans l'écoulement de cisaillement libre qui est le cœur du fluide. D'autre part, le k-ω est appliqué dans la région interne de la couche limite qui est la zone de formation du dépôt d'encrassement [45].

IV- Etude numérique

Les simulations numériques sont réalisées par le logiciel Ansys Fluent (version académique 17.2).

L'échangeur de chaleur est modélisé par un tube cylindrique de 6 m de longueur et 0.017 m de diamètre. Une géométrie 2D axisymétrique est considérée pour réduire le temps de calcul. Le domaine de calcule est discrétisé en 454000 cellules quadrilatérales avec un raffinement dans la direction Y.

Les conditions aux limites adaptées dans le modèle sont présentées par le Tableau. III.4.

Tableau III.4. Conditions aux limites.

Surface	**Conditions aux limites**
Entrée	Velocityinlet
Paroi	Paroi (no slip)
Sortie	Pressure outlet

Le régime turbulent est calculé en se basant sur le modèle K-Omega standard. Le mélange est supposé être constitué du pétrole brut et des asphaltènes ces derniers se transportent au sein du pétrole vers la paroi chaude des tubes pour former un dépôt carboné similaire au coke.

Les propriétés du pétrole brut et des espèces du modèle sont présentées dans le Tableau. III.5.

Tableau III.5. Propriétés du mélange.

	Densité (kg/m^3)	**Capacité Calorifique (j/kg-K)**	**Viscosité (kg/m-s)**	**Masse moléculaire (kg/kmole)**
Pétrole brut	799	3000	0.002	210
Asphaltène	900	1600	0.2	600
Coke	1200	1600	10	1500

Le transport et les réactions chimiques des asphaltènes sont modélisé par le Species Transport Model. La formation du coke sur la paroi du tube est exprimée par des réactions chimiques sur la surface.

Les paramètres de la vitesse des réactions considérées dans cette étude sont similaires à celles utilisées par Mahmoud et al. [44].

Les conditions de simulation reproduisent les conditions opératoires du train de préchauffage du pétrole brut de la raffinerie, Tableau III.6.

Tableau III.6. Conditions de simulation.

Condition opératoire	**Valeur**
La vitesse à l'entrée	1-2.2 m/s
La température à l'entrée	300 K
La fraction massique des Asphaltènes	0.0007

La température à la sortie	370 K
Le flux thermique à la surface	510^4 W/m^2

En régime permanant, l'équation de continuité, de mouvement, de l'énergie et de transport des espèces sont résolue numériquement par la méthode de volume finit.

V- Programme Ansys

V-1. Introduction

Dans cette partie de ce chapitre nous allons présenter les différentes étapes qui ont permis de réaliser l'étude numérique de l'écoulement aérodynamique autour du SKywalker. En effet dans ANSYS Workbench nous avons travaillé et configurer la géométrie importée de l'environnement solide Works avec un format d'échange standards le model est pris dans un bloc englobant représentant le domaine de calcul. Sur ANSYS MESCHING un grand travaille a été réalisé cette partie représente les trois quarts du travaille il faut lui prêter une grande attention un bon maillage adapté aux problèmes donnera une bonne solution physique de l'écoulement le choix et l'imposition des conditions aux limites dans cette étape doit se faire convenablement pour une solution numérique logique. Enfin le système algébrique définis préalablement dans chaque volume élémentaire formera un système d'équations que l'on résout avec des algorithmes numériques de volumes finis et d'éléments finis sur le

SOLVEUR FLUENT. Les résultats sont traités et présenté dans le post-traitement CFD-post outil.

V-2. Définition d'Ansys

Pour les simulations, le choix s'est porté sur le logiciel commercial CFX-14.5 développé par ANSYS.CFX est un logiciel général de simulation numérique des écoulements en mécanique des fluides et de transferts thermiques. Il permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète, de la modélisation de lagéométrie, au post-traitement, en passant par la génération du maillage et le calcul. CFX est particulièrement bien adapté aux machines tournantes, qui forment l'objectif de la présente étude. Ce logiciel représente un pont entre la constructionet le calcul.

CFX est divisé en 4 modules à savoir : ICEM, CFX-pre, CFX-solveret CFX-post.

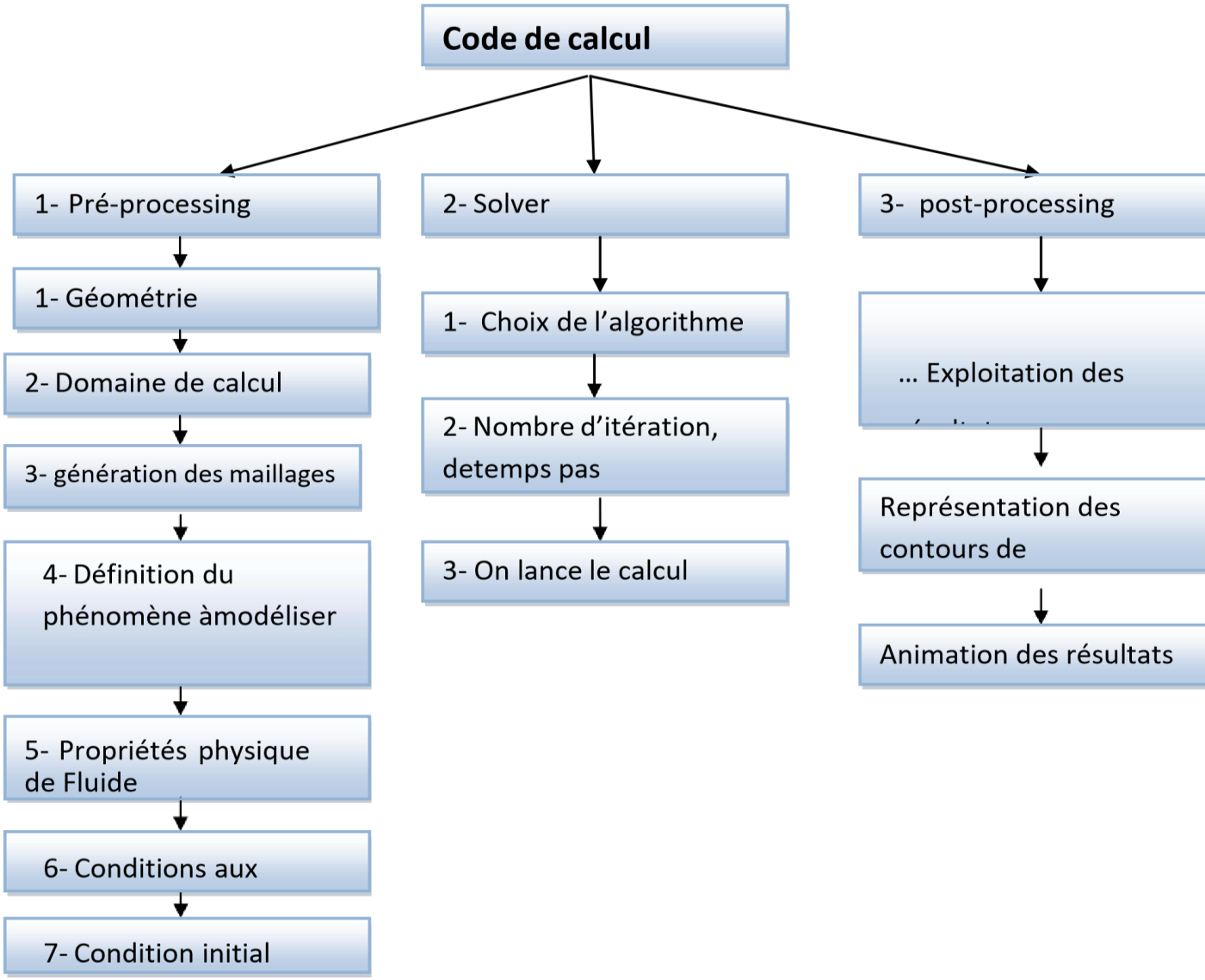


Figure III.3. : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS.

V-3. Ansys CFD

La dynamique des fluides numérique (CFD) est une partie de la mécanique des fluides qui utilise des structures de données et des calculs numériques pour analyser et résoudre les problèmes d'écoulement des fluides (gaz et liquides) tels que les compositions chimiques, la densité et la vitesse.

Et l'outil pour effectuer une analyse CFD et résoudre les problèmes d'écoulement de fluide est le logiciel CFD. Il garantit que les meilleurs concepts de flux sont utilisés dès les premières étapes de la conception du produit pour permettre aux composants de fonctionner efficacementdans diverses conditions.

La CFD facilite l'analyse de problèmes complexes d'écoulement de fluide impliquant des interactions liquide-gaz,fluide-solide ou fluide-fluide. Il utilise des solveurs avancés pour transformer les lois physiques des équations aux dérivées partielles en équations algébriques et les résoudre efficacement.

Les ingénieurs et les analystes utilisent des ordinateurs pour effectuer ces calculs afin de simuler le fluide qui s'écoule librement et soninteraction avec les surfaces.
À l'aide d'ordinateursou de superordinateurs.

V-4. Ansys CFX

Ansys CFX est une solution intégrée à AnsysWorkbench tirant parti de sa puissance et de son automatisation pour les applications de turbomachines. Son interface intuitive et moderne participe d'autant plus à sa position de leader de la simulation accessible à tous.

Réduisez significativement vos temps de développement grâce à son workflow dédié et éprouvé.

Vous êtes un industriel dans la turbomachine ou vous concevez des produits qui en contiennent, Ansys CFX répondra à vos problématiques d'optimisation et de performance.

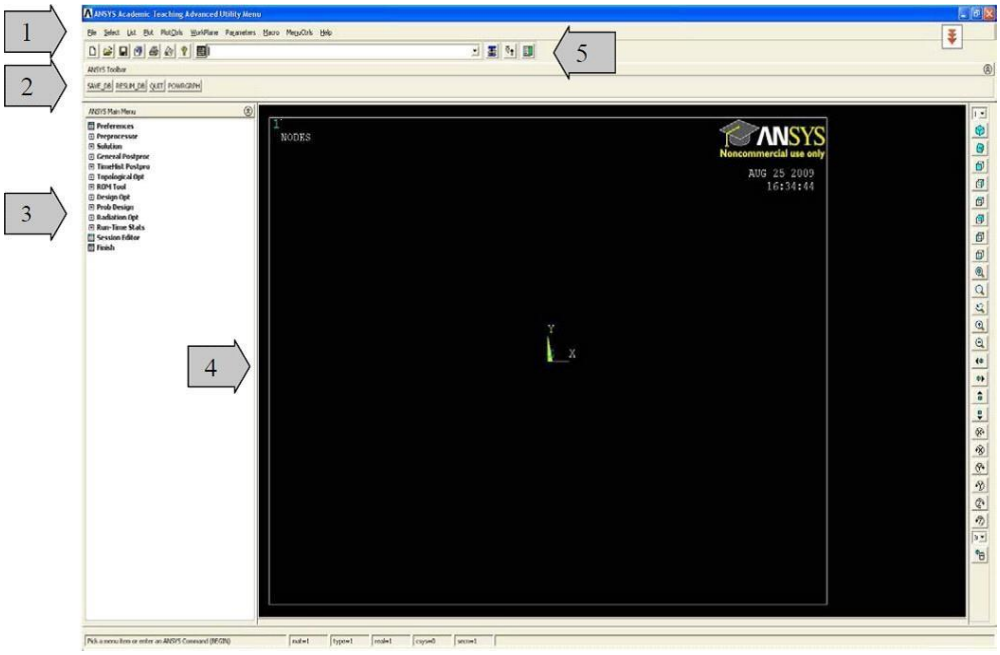


Figure III.4. : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI).

V-4-1. Interface Utilisateur

La partie graphique est interactive et permet la visualisation 3D, incluant les gradients, les iso surfaces, les flux de particules et les coupes de volumes. Il est possible de générer des images en Postscript,HPGL ou systèmes de coordonnéesTIFF

V-4-2. La géométrie (Design Modeler)

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler : coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré : du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne ; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

V-4-3. Maillage

Le maillage est souvent sujet de contraintes imposées par la méthode de discrétisation. Quand la géométrie est régulière, le choix du maillage est très simple. Les linges du maillage suivent souvent les directions des coordonnées, tandis que pour des géométries complexes, les choix du maillage ne sont pas tout à fait simples. Pendant la génération de maillage, au niveau de la couche limite, il faut satisfaire la condition sur y^+ selon le modèle de turbulence et la loi de paroi utilisé.

Dans les cas de cette présente étude cette condition a été vérifiée ($y^+<5$), une étude au de sensibilité du maillage par rapport à la solution a été faite. Le maillage figure III.5 est obtenue à l'aide du générateur de maillage ICEM, choisi pour un nombre de Reynolds environ de 10^5 et pour un écoulement visqueux (couche limite), il contient :

- 881619 Nœuds.
- 1803887 Éléments.

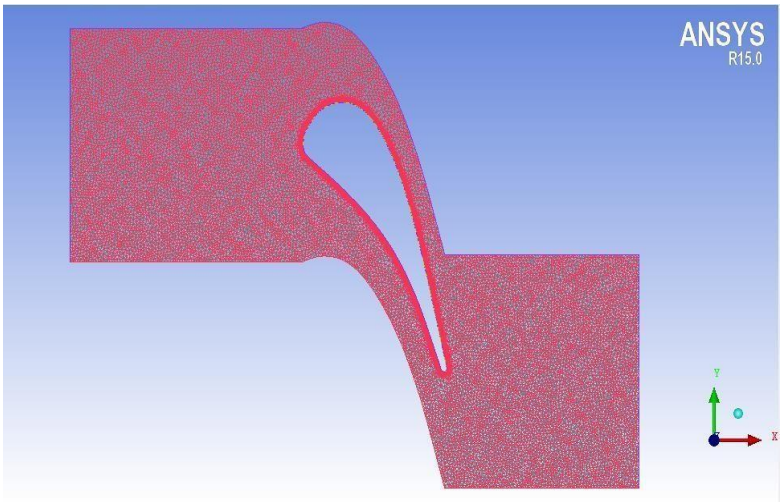


Figure III.5. : Le maillage.

V-4-4. Le solveur Fluent

Le code de calcul Fluent est commercialisé par le groupe Fluent. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (ComputationalFluid Dynamics) généralistes qui simulent tous les écoulements fluide, compressible ou incompressible, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe FLUENT aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques. (LIPEME KOUYI, 2004)

V-4-5. Pré-Processing

Dans l'interface CFX-Pre sont introduit les différents paramètres concernant l'écoulement

- Conditions initiales et conditions aux limites.
- Choix du modèle de turbulence
- Choix du nombre d'itération.

V-4-6. Post-processing

Dans l’étape du post, tous les résultats de la simulation peuvent être exploités, tels que la vitesse, la pression et autres obtenus lors des calculs. Il est possible de visualiser les contours de pression, le champ de vitesses, les lignesde courant, etc.

Chapitre IV

Résultats et discussions

I-Introduction

Cette contribution concerne l'analyse de l'encrassement dans une batterie d'échangeurs de chaleur tubulaires à calandre qui compose une batterie d'une raffinerie de pétrole brut.

La géométrie étudiée concerne un échangeur tubulaire, remplie par le pétrole brut, un liquide ayant un fort pouvoir encrassant en raison particulièrement de sa composition. Le transfert de chaleur nécessaire pour traiter le brut peut affecter indirectement la surface de l'échangeur au cours du temps. Un dépôt résultant de la transformation chimique de certaines composantes du brut sous l'effet de la température, est formé sur les surfaces d'échanges du canal. C'est le phénomène d'encrassement de nature organique et inorganique.

Les simulations numériques sont basées sur la résolution des équations de transport modélisant des écoulements turbulents dans une conduite tubulaire remplie par le brut au cours du temps. Les parois d'un tube sont chauffées à une température uniforme et constante. Le fluide entre dans la conduite avec une vitesse donnée et à une température uniforme en moyenne. L'intensité de turbulence à l'entrée a été fixée dans le modèle de turbulence considéré. La longueur du tube est choisie de sorte que l'écoulement soit dynamiquement et thermiquement établi dans la section de sortie pour les nombres de Reynolds considérés.

Le but du modèle est de montrer différents aspects de l'encrassement dans les tubes.

Dans cette étude, pour des considérations pratiques et par manque de temps surtout, nous allons considérer uniquement la deuxième batterie d'échangeurs de chaleur tubulaires de la raffinerie composée des échangeurs HE-01, HE-02,

HE03 et HE-04. Il est à noter que la raffinerie est composée de trois batteries avec un total de onze échangeurs tubulaires.

II-Résultats

Nous allons considérer en premier la validation du modèle proposé en fonction du modèle théorique de Kern et Seaton puis par rapport à des valeurs expérimentales. L'effet de différents paramètres thermiques et hydrodynamiques sur l'encrassement sont par la suite étudiés.

II-1. Validation du modèle

Le modèle proposé a été validé en comparaison avec le modèle de Kern et Seaton sur la Figure IV.1.a et à l'aide des résultats expérimentaux de Harch [3] sur la Figure IV.1.b en adoptant les mêmes donnés et surtout la même configuration géométrique. Les résultats numériques montrent globalement de bons accords avec les données théoriques de Kern et Seaton et semi-empiriques de Harch avec des erreurs largement tolérables.

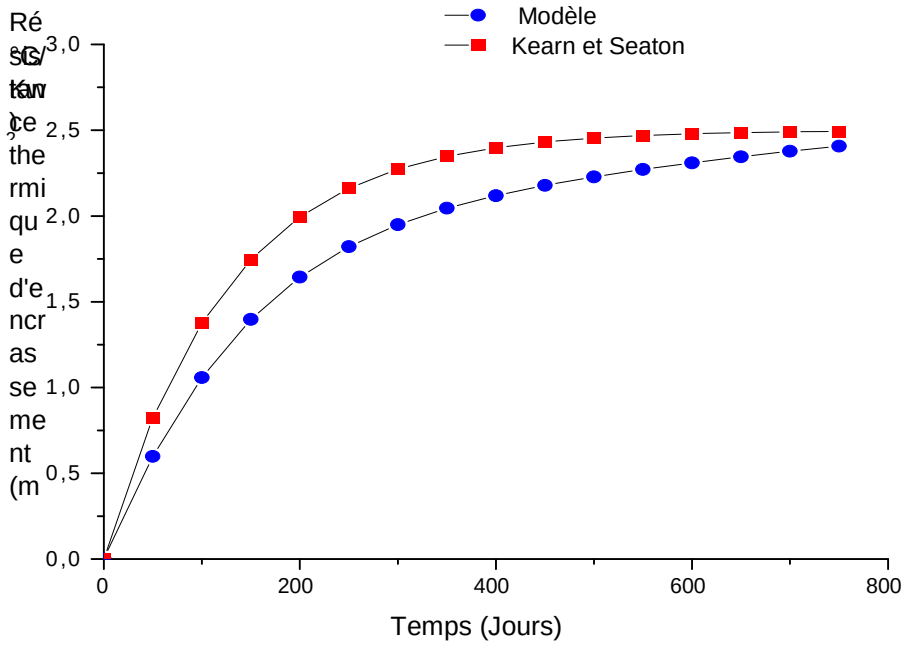


Figure IV.1.a. Validation du modèle par rapport au modèle de Kern et Seaton.

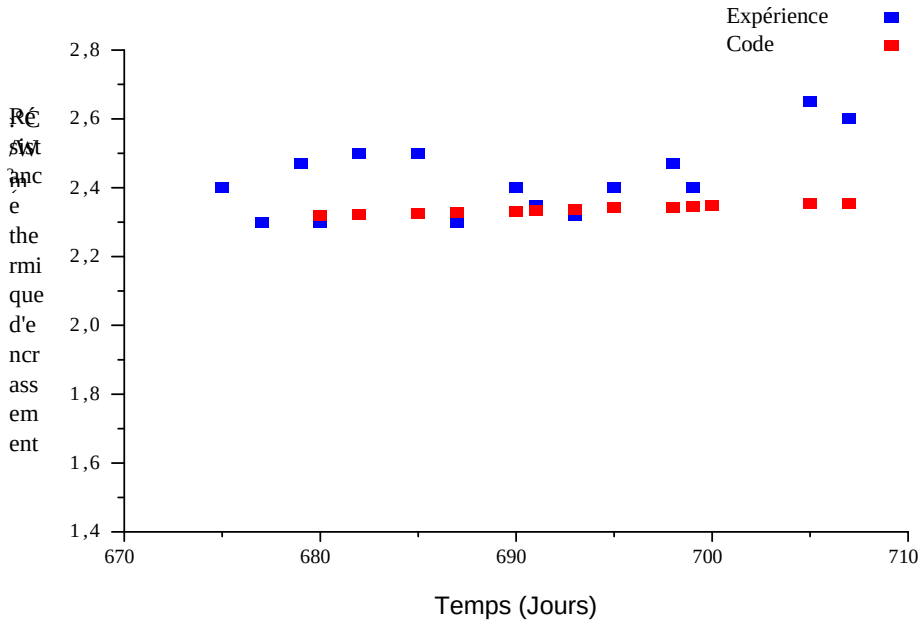


Figure IV.1.b. Validation du modèle par rapport à l'expérience.

II-2. La résistance thermique d'encrassement

La résistance thermique d'encrassement a été calculée par le modèle pour 800 jours environ de fonctionnement de la batterie. Les résultats sont présentés sur la

Figure IV.2. A l'image de ce graphique il apparait clairement que la résistance thermique d'encrassement augmente avec le temps de fonctionnement le long des trois échangeurs de la batterie. Les valeurs les plus élevées sont notées pour le premier échangeur avec une allure asymptotique contrairement aux deux autres échangeurs. Ceci est expliqué par la nature du mécanisme complexe d'encrassement. Selon beaucoup d'auteurs l'encrassement inorganique prédomine dans les échangeurs à forte valeur d'encrassement [48].

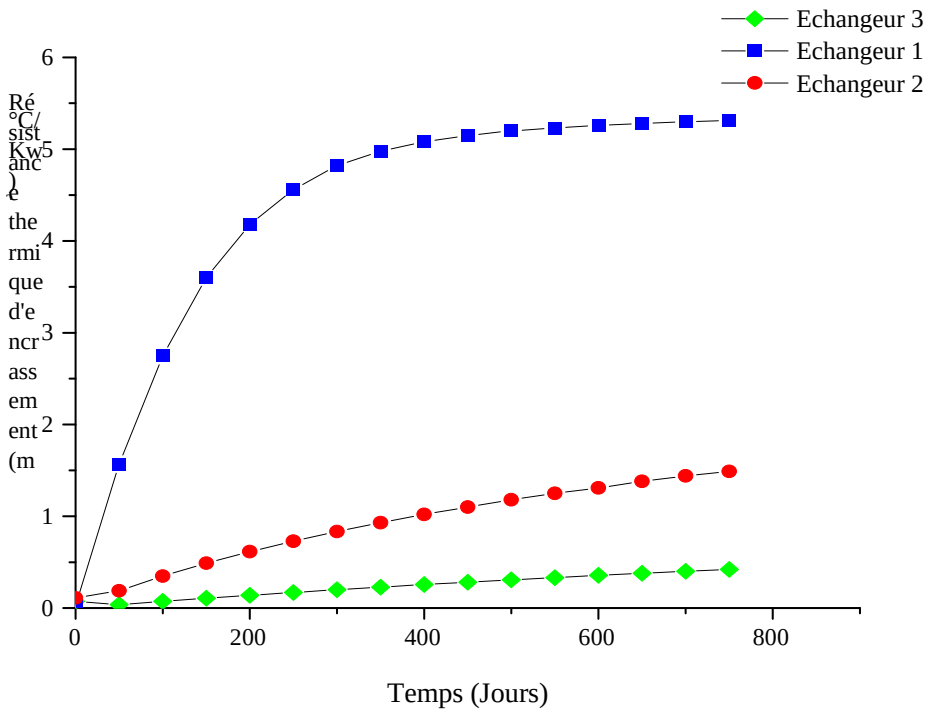


Figure IV.2. Evolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction du temps pour les trois échangeurs.

II-3. Le coefficient d'échange global

L'effet de l'encrassement sur le coefficient d'échangeur global est observé sur la Figure IV.3. Au fur et à mesure que le temps de fonctionnement s'écoule, on observe une chute du coefficient en raison de l'augmentation de la résistance thermique d'encrassement de nature isolante qui affecte directement l'efficacité thermique des échangeurs de la batterie. La chute la plus importante est observée au niveau du premier échangeur sujet d'une résistance thermique la plus élevée observée sur la Figure IV.2. L'arrêt pour nettoyage des équipements est en général préconisé pour une chute du coefficient de l'ordre de 40% par rapport à la valeur initial avec un échangeur propre.

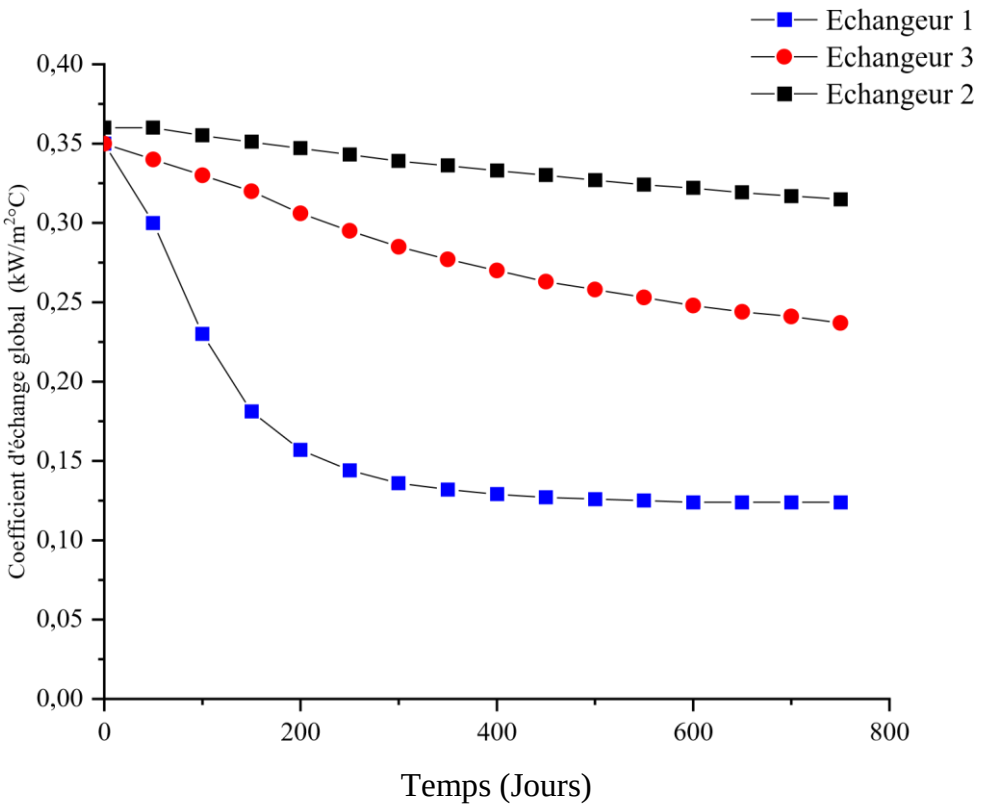


Figure IV.3. Evolution de la coefficient thermique d'encrassement.

II-4. Effet de l'encrassement sur de la vitesse du brut dans les tubes des échangeurs

L'effet de l'encrassement sur la vitesse de l'écoulement est considéré dans cette section pour la batterie d'échangeurs de chaleur et présenté sur la figure IV.4. La figure montre une augmentation significative de la vitesse le long du premier échangeur de la batterie puis se stabilise. Cette augmentation conduit à une contrainte de cisaillement de surface plus élevée et par conséquent une augmentation de l'élimination des dépôts de crasse.

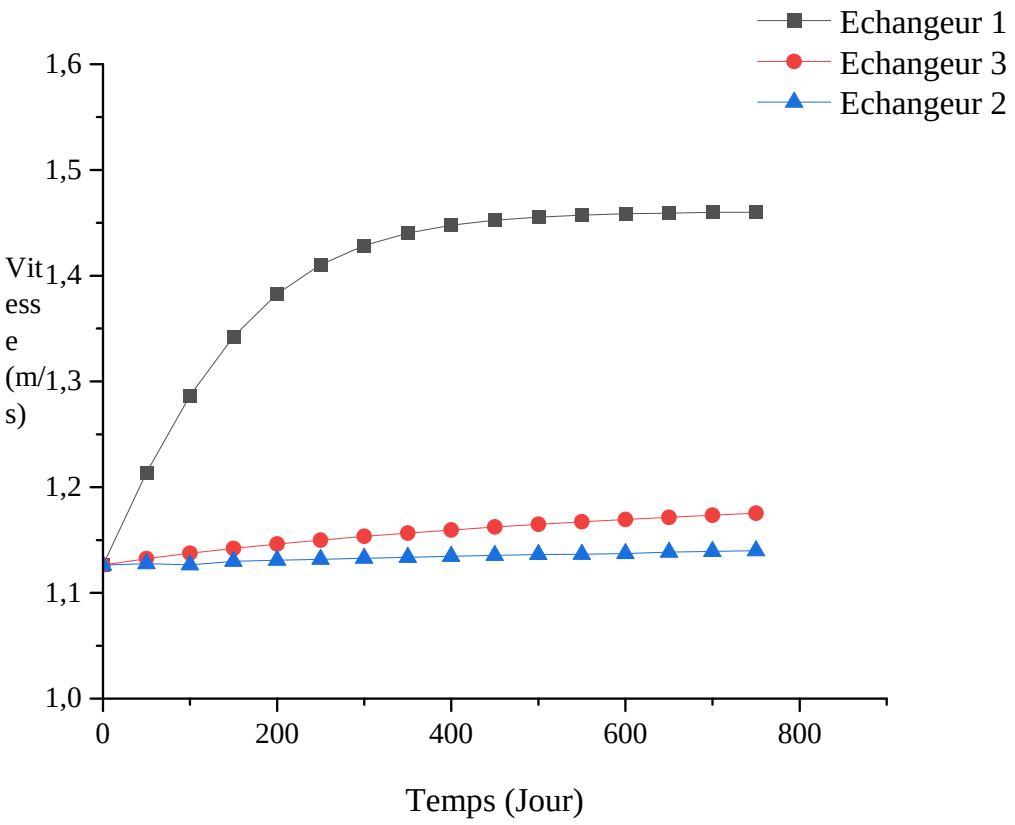


Figure IV.4. Evolution de l'encrassement en fonction de la vitesse dans les tubes.

II-5. Effet de l'encrassement sur le diamètre intérieur des tubes des échangeurs

L'effet de l'encrassement sur le diamètre des tubes est considéré dans cette section pour la batterie d'échangeurs de chaleur et présenté sur la figure IV.5. Les diamètres des tubes diminuent considérablement pour le premier échangeur de la batterie puis se stabilise. Ils semblent négligeables pour les deux autres échangeurs de la batterie. Les dépôts de nature organique sont plus épais par rapport aux dépôts de nature inorganique [48].

Les performances hydrodynamiques à savoir le diamètre des tubes et la vitesse sont moins importants pour le deuxième et le troisième échangeurs de la batterie comparativement aux performances thermiques.

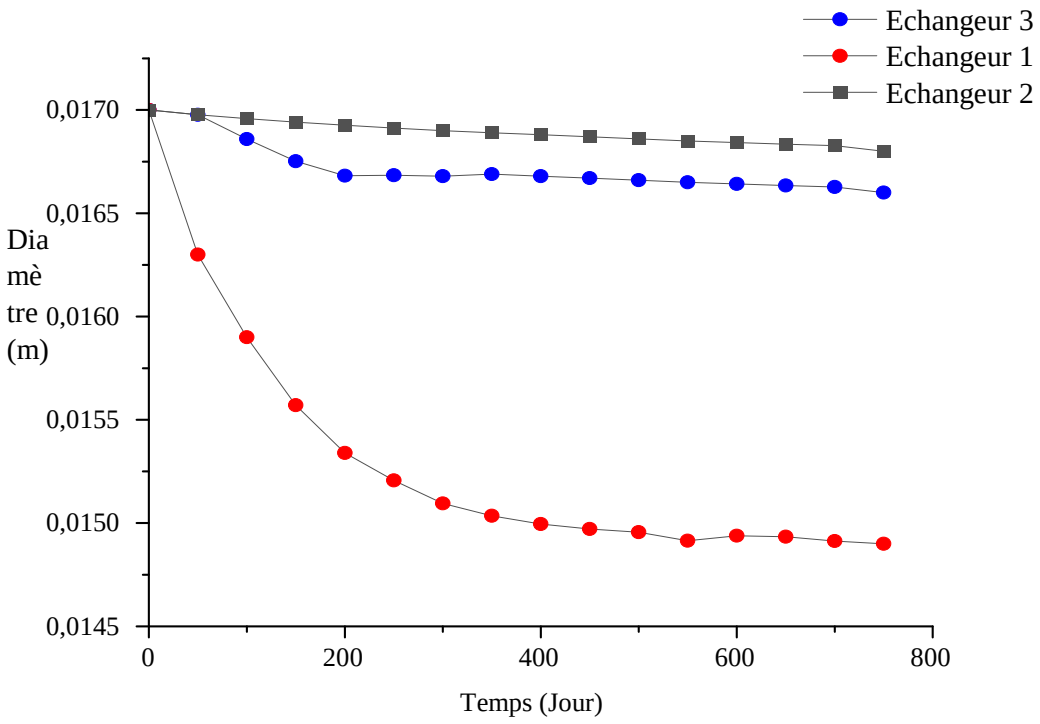


Figure IV.5. Evolution de l'encrassement en fonction des diamètres des tubes.

II-6. La perte de pression en fonction du temps dans les échangeurs

La perte de pression est un paramètre qui affecte considérablement les performances des échangeurs de chaleur. Son effet sur l'encrassement est considéré dans cette section pour la batterie d'échangeurs de chaleur et présenté sur la figure IV.6. Les résultats montrent une augmentation le long du premier échangeur de la batterie. Une valeur limite est nécessaire pour lancer le processus de nettoyage des équipements affectés. Elle est insignifiante dans le reste de la batterie.

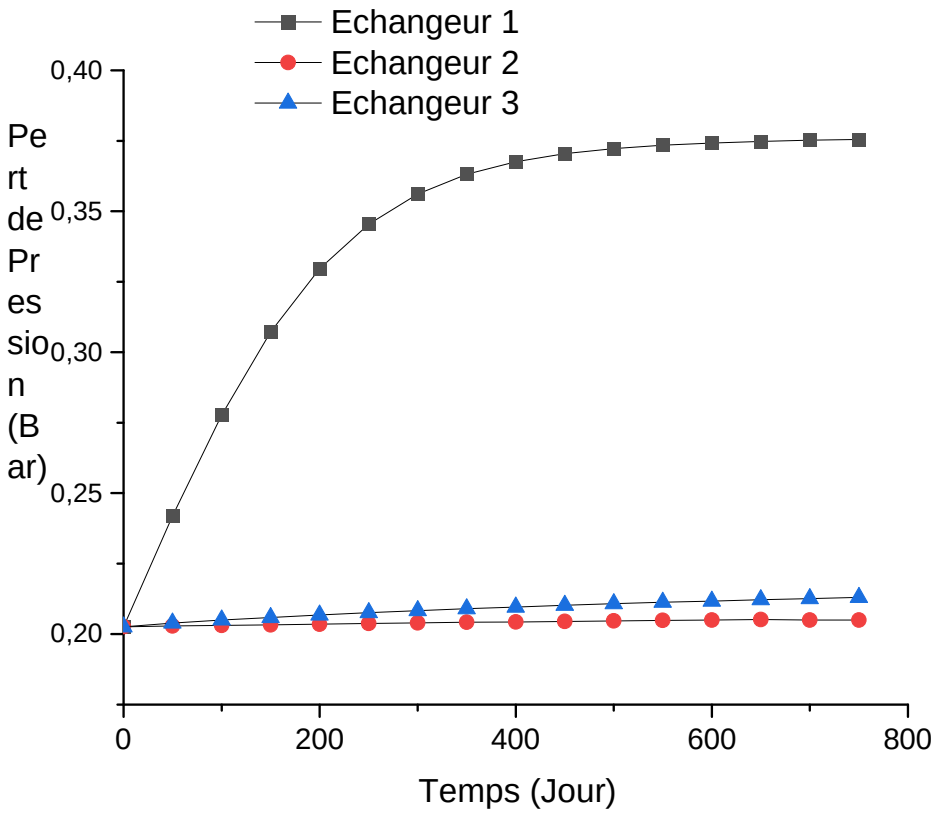


Figure IV.6. Evolution de de la perte de pression en fonction du temps dans les échangeurs.

II-6. La pression de pompage en fonction du temps dans les échangeurs

La perte de pression évoque dans la section précédente montre qu'il est nécessaire de la compenser pour un pompage supplémentaire qui engendre des couts supplémentaires. La figure IV.7 décrit cette puissance en fonction du temps pour le premier échangeur de la batterie. Des études économiques à travers la littérature spécialisée montrent que les couts de pompage supplémentaire sont minimes par rapports aux couts causés par l'encrassement.

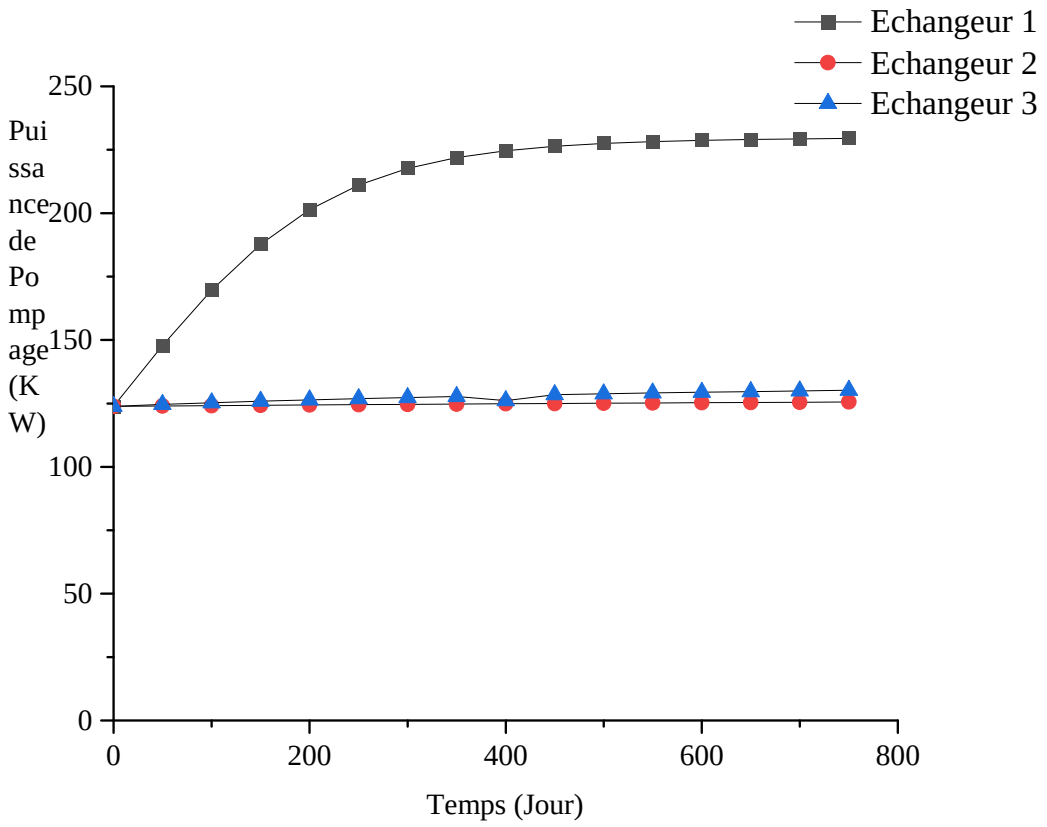


Figure IV.7. Evolution de de la pression de pompage en fonction du temps dans les échangeurs.

III-Conclusion

Les résultats montrent globalement que le phénomène de l'encrassement lors du traitement thermique du pétrole de nature isolante engendre des perturbations thermo-hydraulique qui affectent considérablement le procédé de traitement. Cet encrassement est caractérisé par la résistance thermique d'encrassement. Elle influe négativement sur les différents paramètres qui montrent la chute des performances thermo-hydrauliques tels que le coefficient d'échange global et la vitesse d'écoulement.

Conclusion Générale

Cette contribution concerne la compréhension du phénomène de l'encrassement lors d'une phase de traitement thermique d'un pétrole brut dans le train de préchauffage d'une raffinerie classique.

La bibliographie étudiée nous a permis de comprendre que le phénomène de l'encrassement par le pétrole brut est difficile à comprendre car plusieurs mécanismes peuvent intervenir, simultanément ou successivement avec des réactions organiques et inorganiques très complexes.

Notre étude a portée sur une batterie composée d'échangeurs de chaleur tubulaires à calandre. On a pu comprendre son fonctionnement, son rôle important dans l'installation de raffinage et voir les différents éléments qu'ils la constituent. L'un des problèmes existant dans notre échangeur est l'encrassement, si on ne le prend pas en compte, il y'aura un des perturbations thermohydrauliques et des pertes énergétiques et des frais de nettoyage élevé. Mais s'il est pris à temps, peut être nettoyé à moindre coût.

Notre étude a concerné la formulation d'un modèle mathématique basé sur un modèle physique qui concerne le traitement thermique du pétrole brut procédé dans une raffinerie constituée principalement de batteries d'échangeurs de chaleur tubulaires. Le modèle fournit par la suite, principalement, un calcul numérique de la résistance thermique à l'encrassement à l'aide de l'Ansys Fluent. En effet, l'une des méthodes classiques utilisées le plus couramment pour détecter l'encrassement repose sur la mesure de la variation de l'efficacité de l'échangeur à travers le coefficient de transfert de chaleur.

D'après les résultats de calculs de vérification thermique qu'on a réalisés, on a pu voir l'évolution de la résistance d'encrassement qui augmente avec le temps dans l'ensemble des échangeurs de la batterie, qui entraine une diminution remarquable du coefficient de transfert résultant un mal fonctionnement de l'échangeur. Le modèle, qui a été validé montre que la résistance thermique à

l'encrassement suit une loi cohérente avec le modèle théorique de Kern et Seaton.

Les résultats montrent également l'augmentation de la vitesse et la diminution du diamètre des conduites suite à la formation de l'encrassement de nature isolante.

Comme suite à ce travail, il serait intéressant de considérer le reste des équipements de la batterie et étudier l'encrassement dans toutes les batteries en même temps. Il serait également intéressant d'améliorer certains aspects des simulations.

Référence bibliographique

[1] L. Nouh, M. Bebboukha, « Optimisation de la TVR de l'Essence par l'Etude des Paramètres de March du Débutaniseur et la Vérification du Rebouilleur », 2015.

[2] Benkezim, R, Adjir, M. S., & Zaidi, L... Raffinage du pétrole et caractérisation d'un sous-produit" huile moteur commerciale pour véhicules lourds de type diesel" (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane mira), 2018.

[3] R. Harche ;Origine de pétrole : Etude de l'encrassement des échangeurs de chaleur de la raffinerie d'Alger, Thèse de doctorat, FGMGP, USTHB, Alger 2016.

[4] S. B. Mhaske and N. P. Argade, "The chemistry of recentlyisolatednaturallyoccurringquinazolinonealkaloids," Tetrahedron.Viewat: Publisher Site: Google Scholar, vol. 62, no. 42, pp. 9787–9826, 2006.

[5] R. Rajput and A. P. Mishra, "A review on biologicalactivity of quinazolinones,"
International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, vol. 4, no. 2, pp. 66–70, 2012.

[6] B. Vijayakumar, P. Prasanthi, K. M. Teja et al., "Quinazolinederivatives and pharmacologicalactivities:areview," International Journal of MedicinalChemistry&Analysis, vol. 3, no. 1, pp. 10–21,2014.

[7] Classification de pétrole brute : Cours de Raffinage I : Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie (FHC), Université Boumerdes, Groupes : IGCR99 et IGCP99, 2004.

[8] Eyssautier J,Caractéristiques de pétrole brut : « Caractérisation et Modélisation des Asphaltènes en Conditions Réactionnelles d'Hydrotraitement », Thèse de PhD, IFP Energies nouvelles, France, 2012.

[9] Mark A. Nicholls, Then Do, Peter R. Norton, MasoudKasrai, G. Michael Bancroft. "Review of the lubrication of metallic surfaces by Zinc dialkyldithiophosphates", Elsevier edition, Tribology International, 38, 15-39, 2005.

[10] Mridul Gautam, KarthikChitoor, MuraliDurbha, Jerry C. Summers," Effect of diesel sootcontaminatedoil on engine wear – investigation of noveloil formulation", Elsevier edition, Tribology International, 32, 687-699, 1999.

[11] Y. Harkat, « Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur », Mémoire Magister, Université Mohammed Bougerra, Boumerdes, 2007.

[12] J. Croix, « Généralités Sur L'encrassement Des Echangeurs », Note Technique Greth, 83/12, 1983.

[13] M. Bennejah, N. Chaouni, « Echangeur de Chaleur, Technologie, calcule et design », Edition TECHIP, Paris, 2014.

[14] Hassan Al. Hadj Ibrahim « Fouling in HeatExchangers », 2012.

[15] A. Bontemps, « Echangeur de chaleur problème de fonctionnement », 1995.

[16] Epstein, "Thinking About Heat Transfer Fouling: A 5x5 Matrix", Heat Transfer Engineering, 1983.

[17] C. Weber et A. Magnificat, « Encyclopédie de l'énergie ; Article 055 : les échangeurs de chaleur », 2015.

[18] A. Bontemps, « Technique de l'ingénieur : échangeurs de chaleur ; Description des échangeurs », BE9515.

[19] M. Benjanah et N. Chaoun, « Echangeur de chaleur, technologie, calcul et design », 2012.

[20] J. Padet, « Echangeur thermique », Masson, Paris, 1994.

[21] M. Moussa, J. M. Perrircornet, Echangeur de chaleur (Echangeur à surface raclée), Jean Casting Lasvinottes, 2002.

[22] H. J. Linhard, H.," Heat transfert text book, 3rd edition, V 1.23, 2005.

[23] J.R. Lopez, N.K. Anand, L.S. Flecher, « A numericalanalysis of laminar convective heattransfer in a three-dimensional Channel with baffles », in :Proceedings of the Third U.S. National Congress on ComputationalMechanics, Dallas, TX, vol.1, p (406-416), 1995.

[24] J.F. Sacadura, « Initiation aux transferts thermiques », 1993.

[25] E.F. Somerscales, E.F. Knudsen, » J. G, personal Communication », (1), 1-4. 1997.

[26] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier et R. Vidil, « Echangeur de chaleur, problèmes de fonctionnement et aspects réglementaires », Technique de l'ingénieur, Traitée Génie Énergétique, B 2344, 1997.

[27] N. Bellel, » Les échangeurs de chaleur, cours, », Université Mentouri Constantine, 2008.

[28] B. Thononh, P. Mercier, M. Feidt, " Flow distribution in plate heatexchanger and consequence on thermal and hydraulic performances", Euro-thermseminar, Hamburg, 1991.

[29] A.P. Watkinson, "DepositionfromCrudeOils in HeatExchanger;Heat Transfer Engineering," 28 :177-184, 2007.

[30] M. Nasseredine, « Simulation et optimisation des paramètres technologie de l'unité de fractionnement des GPL à 1 laoudBerkaoui », Mémoire de magister en génie de procédés ; option Technologie des hydrocarbures ; Université MohamedBougaraBoumerdes ; 2013.

[31] A. Zabarnik et al., “ Sustainable Aviation Fuel Review of TechnicalPathways”, Renewalenergy, 2007.

[32] West et al. ;Employee engagement and NHS performance;university of Sheffield 2011.

[33] T.R. Bott, L.F. Melo,” Fouling of heatexchangers”, Exp. Therm. FluidSci., 14, pp 315–321, 1995.

[34] C.W., Turner, “Fouling of nuclearsteamgenerators :fundamentalstudies, operating experience and remedialmeasuresusing”, chemical additives, AECL NuclearRev, 2 :61–88, 2013.

[35] A. Nancollas et H. Liu, «Uneétudecinétiqueetorphologiquedelacroissanceensemencéedusulfatedecalciumdihydratéenprésence»,Journal of Colloid and Interface Science, 1975.

[36] A Helalizadeh, H Müller-Steinhagen, «Encrassement par cristallisation au sel mélangé» , Elsevier Edition, 2000.

[37] A.P. Watkinson, “Depositionfromcrudeoils in heatexchangerHeat Transfer”, Eng, 28 :177–184, 2007.

[38] W. Ebert, C.B. Panchal, “Analysis of Exxon CrudeOil-Slip-Stream Coking Data”, Fouling Mitigation Ind. Heat-Exch. Equip., Proc. ; Int. Conf., 451–460. 1995.

[39] Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., PughS.J. ; Evaluation of LaboratoryCrudeOilThresholdFouling Data for Application to RefineryPre-HeatTrains ;Appl.
Therm. Eng. ; 22(7): 777–788 2002.

[40] S. Sanaye, B.Niroomand, “Simulation of HeatExchanger Network (HEN) and Planning the Optimum Cleaning Schedule”, EnergyConvers ; Manage, 48 (5) :1450–1461, 2007.

[41] T.R. Biyanto, M.D. Khairansyah, R. Bayuaji, H. Firmanto, T. Haksoro, “ImperialistCompetitiveAlgorithm (ICA) for HeatExchanger Network (HEN) Cleaning Schedule Optimization”, Procedia Computer Science., 72 : 5–12 2015.

[42] D.Q. Kern, R. E. Seaton, “A TheoreticalAnalysis of Thermal Surface Fouling”, Br. Chem. Eng., 4 (5) : 258–262 1959.

[43] D. Hughes-Hallet, “Calculus Single Variable”, 7th ed. New York: John Wiley& Sons. Inc., 2017.

[44] M.Y.Mahmoud, G. Bassou, A. Taalbi, Z.M. Chekroun, »Filtresdechutedecanaloptiquebaséssurdesrésonateursàanneaudecristalphotonique-Communications optiques, 2012.

[44] A. ChickhTouhami, « Calcul des déformation Elastohydrodynamique dans un papier », Université Yahia Fares Médéa, 2012.

[45] Y.L. Chan Y.L, Tien, “A numericalstudy of two-dimensionallaminar Natural

Convection in shallow open cavities", International Journal of Heat and Mass Transfer, 28 ; pp 603-612,1985.

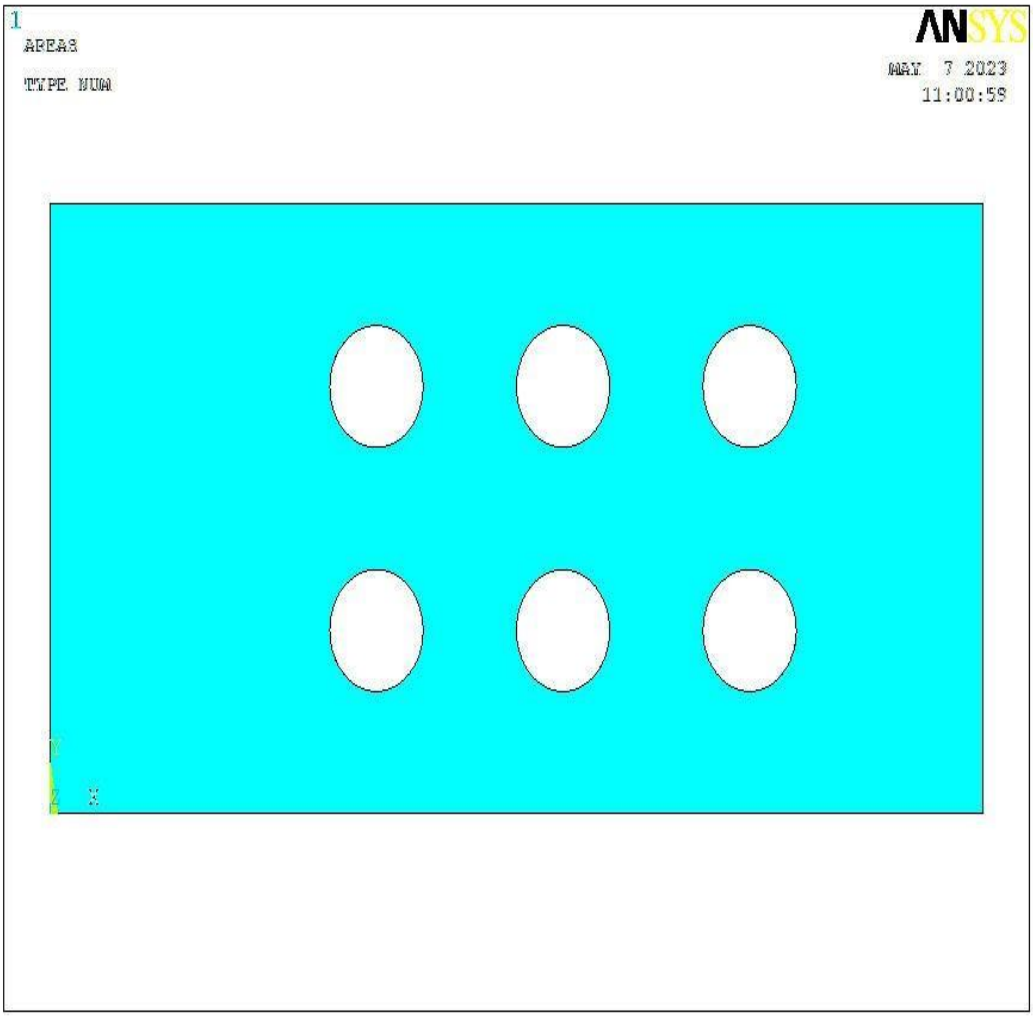
[46] S. Tabet, « Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte fermée partiellement chauffée », Thèse de Doctorat, Thermique et mécanique des machines industrielles, Université d'Oran, 2017.

[47] M. Guit, B. Loues, « Simulation Numérique de l'impact des gouttelettes de métal creuses sur une surface inclinée », Master en génie mécanique, Université Dr, Yahia Farés Médéa, 2103.

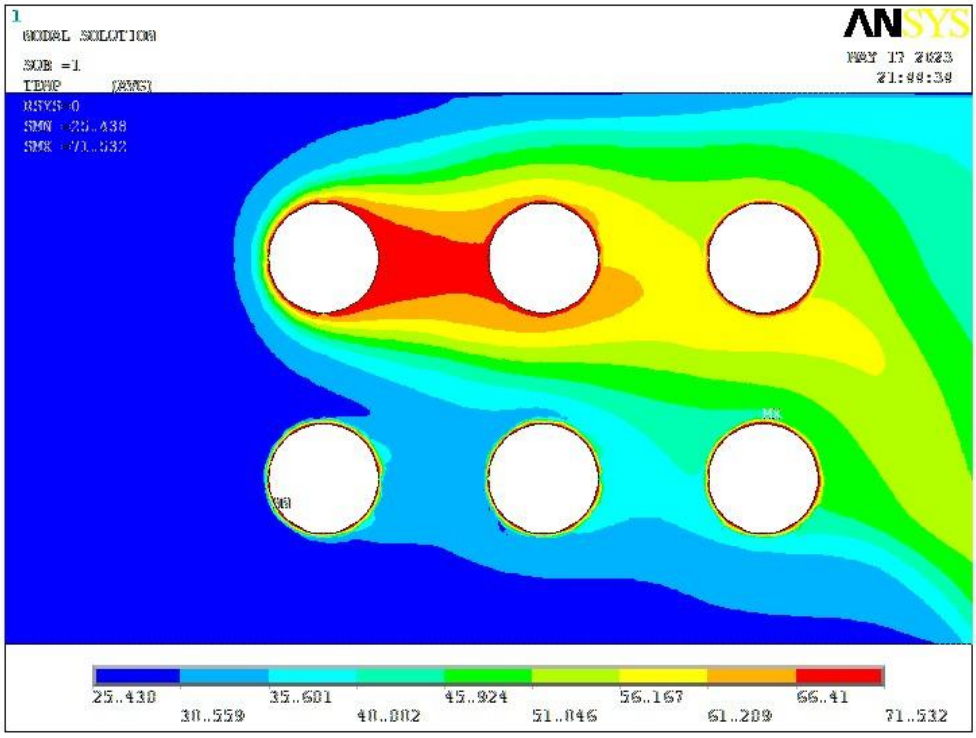
[48] I. Kerraoui, « étude de l'encrassement par le pétrole brut dans le train de préchauffage de la raffinerie d'Alger » Thèse de doctorat, USTHB, 2022.

Annexes

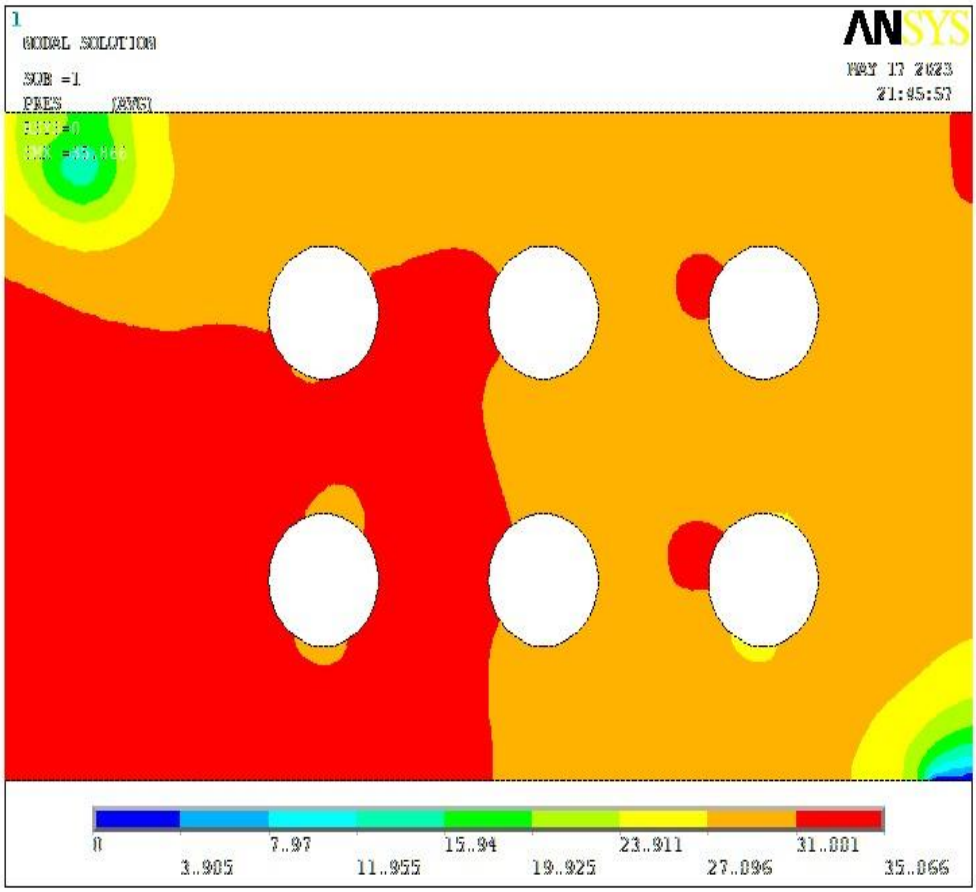
Géométrie sans encrassement.



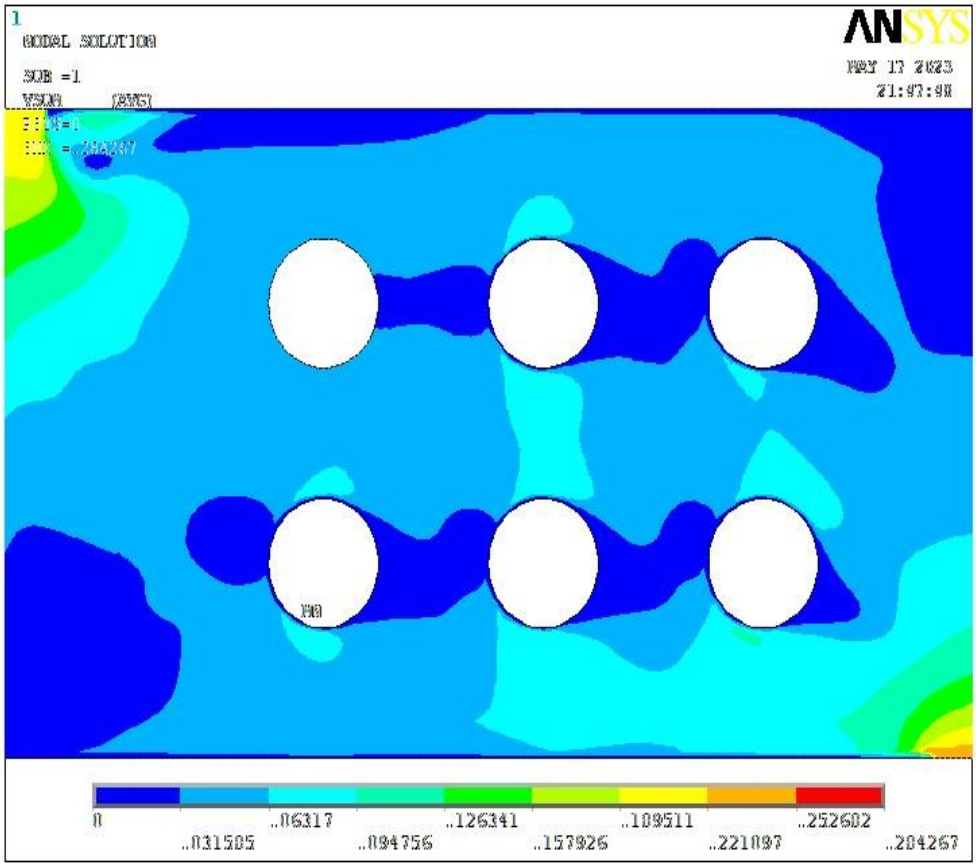
Géométrie avec encrassement.



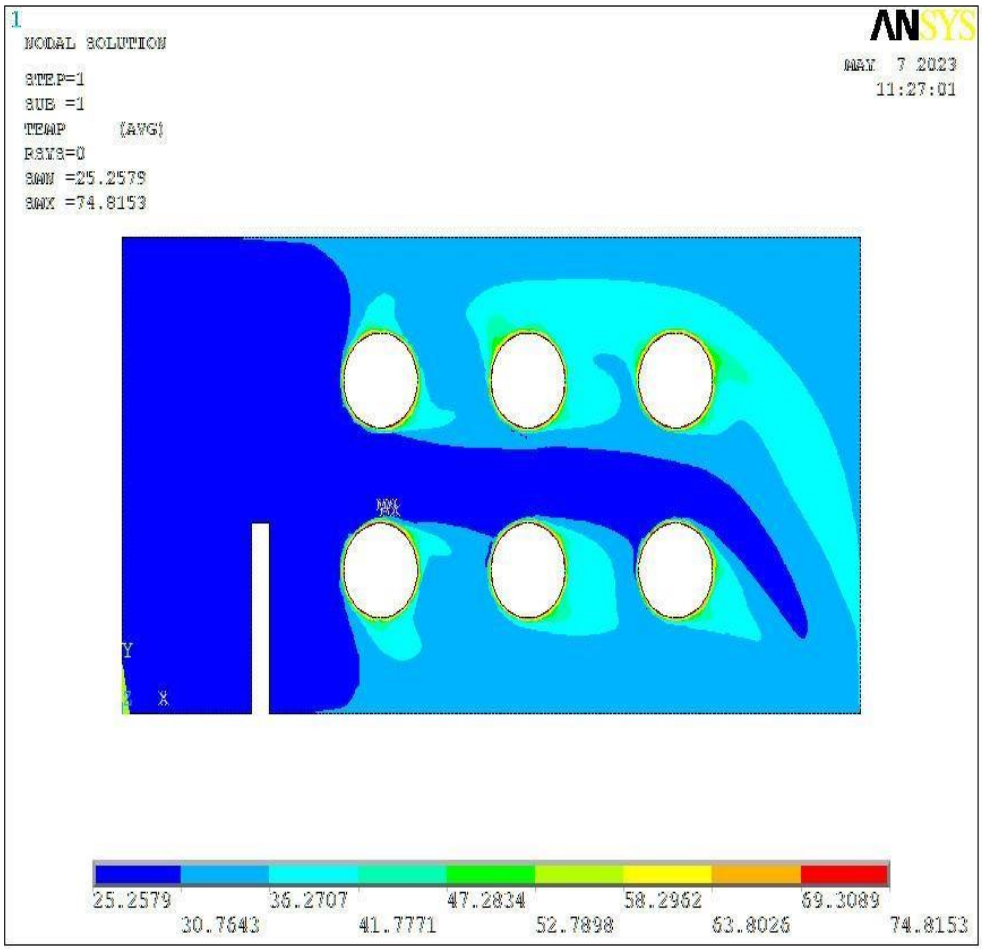
Température avec encrassement



Pression avec encrassement

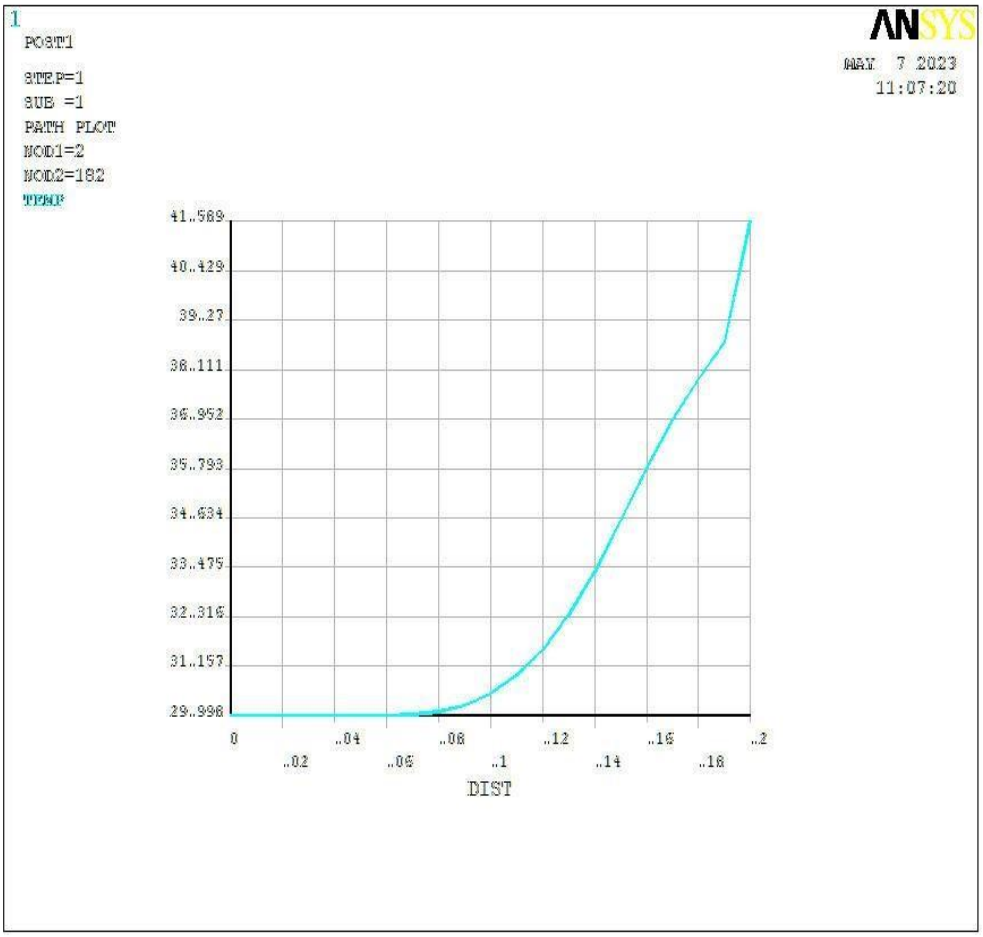


Géométrie avec un déflecteur

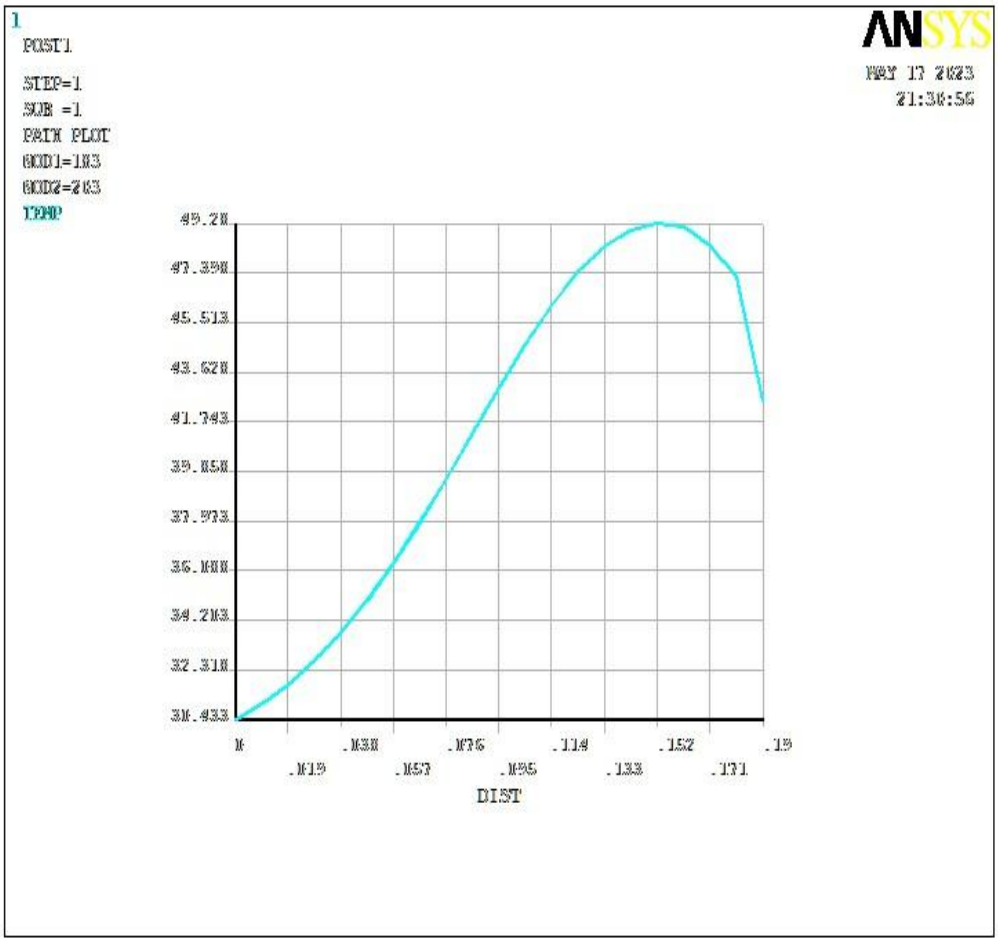


Evolution de la température dans un échangeur tube à calandre.

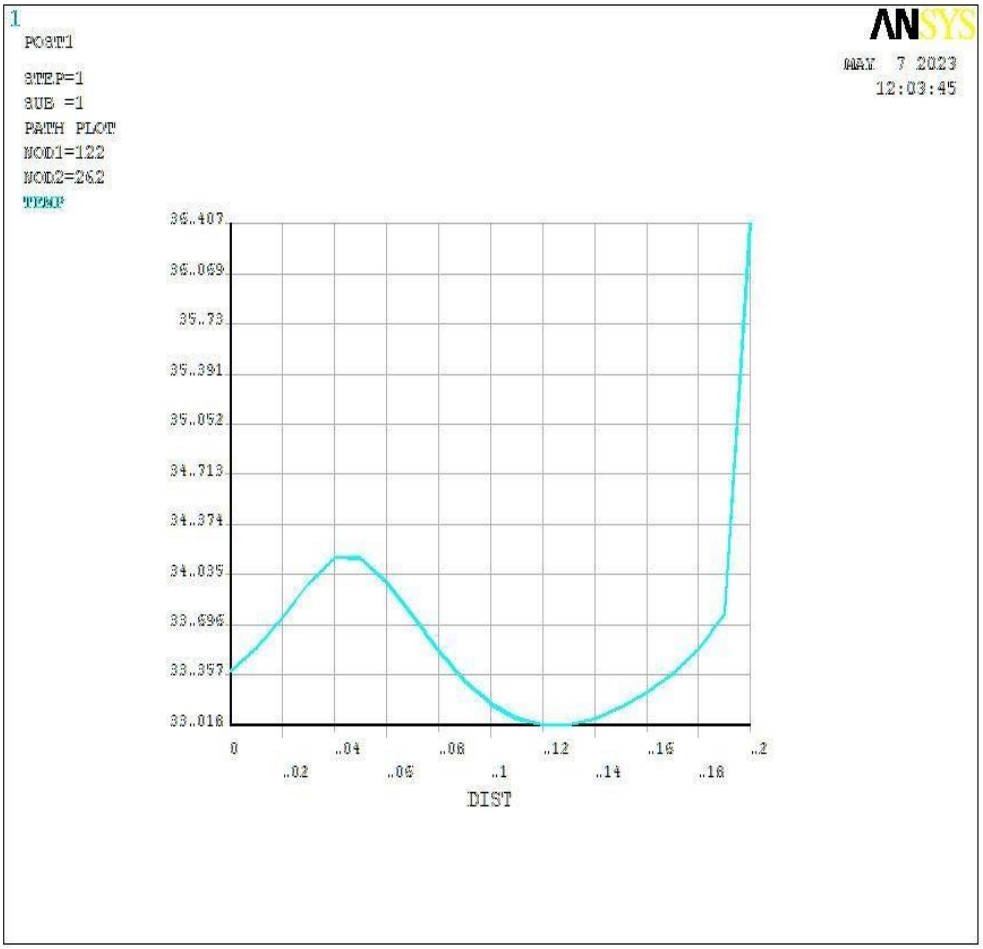
Evolution de la température dans un échangeur tube à calandre sans encrassement pour le pétrole brut.



Evolution de la température dans un échangeur tube à calandre avec encrassement pour le pétrole brut.

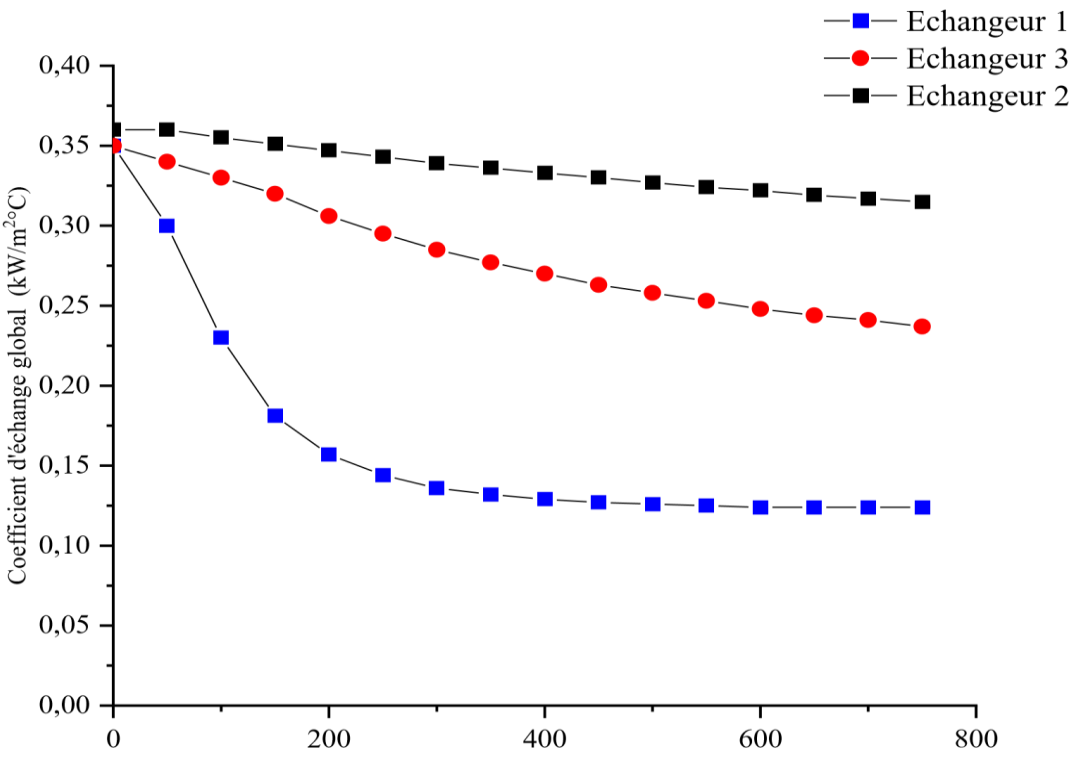


Evolution de la vitesse dans un échangeur tube à calandre (Y) en fonction de distance (X) avec encrassement pour le pétrole brut.



Evolution de la résistance thermique d'encrassement.

L'évolution du coefficient d'échange global de la batterie de la raffinerie (Y) en fonction du temps (X)



Variation de coefficient d'échange global (W/m2°c) en fonction du temps (Jours) dans une batterie

Evolution de l’encrassement en fonction des diamètres des tubes.

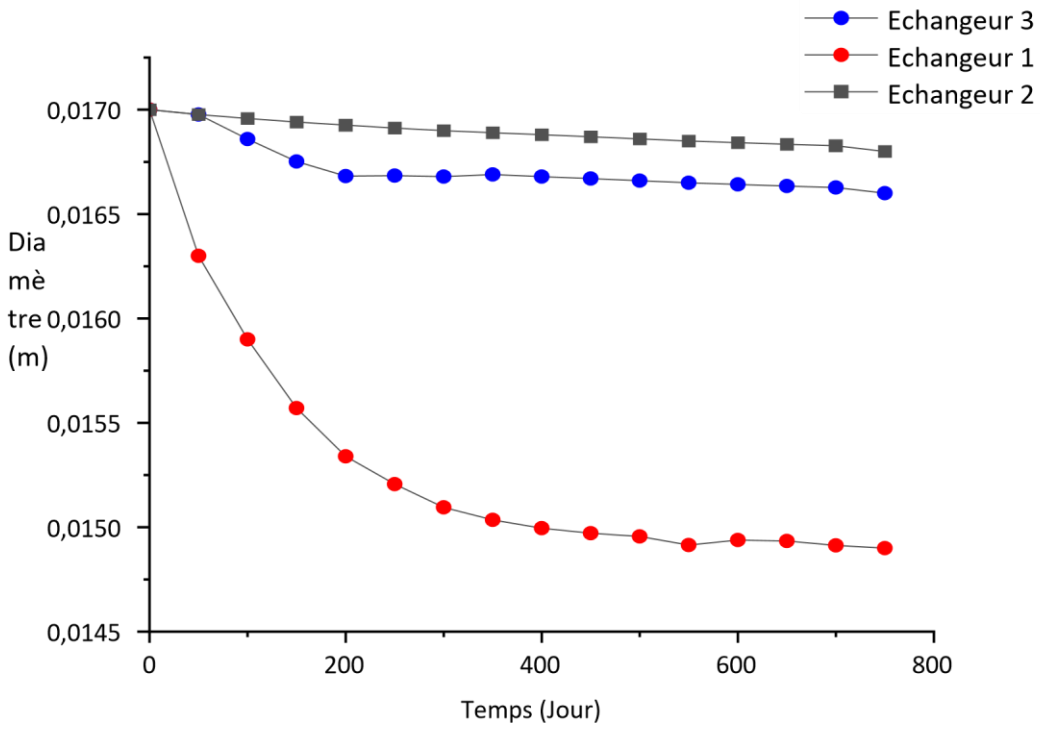


***Tableau I** : Caractéristiques géométriques des échangeurs de chaleur*

Désignation	Valeur	Unité
Longueur effective	2	m
Diamètre extérieur des tubes	0.1	m
Diamètre de la calandre	1	m
BWG	14	-
Distance de pas	0.2	m
Espacement des chicanes	0.4	m
Nombre de passe coté tubes	6	-
Nombre total des tubes	1000	-

***Tableau II** : Paramètres de fonctionnement du préchauffeur*

Paramètre	Côté tube	Côté calandre	Unité
Débit	223,763	346,762	m^3 /h

Température d'entrée	30	70	° C
Température de sortie	100	58	° C
Coefficient de transfert de	329		W/m^2 °C
chaleur			

Tableau III- : *Propriétés physicochimiques du pétrole Brut Algérien*

Caractéristiques	Valeur
Densité	0.7966
Viscosité cinématique (cSt)	
20°C	2.83
37.8°C	2.02
Masse moléculaire (g/mol)	210
Fraction Asphaltène (mass%)	0.07
distillation ASTM	
point initial °C	32
5%vol	61
10	87
20	124
30	158
40	200
50	247
60	299
70	347
80	370
Point final °C	383