REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES



Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Master**

En chimie

Spécialité : Chimie Macromoléculaire

Par :

Etudiant 1 : Khoulla Nadjet
Etudiant 2 : Labgaa Ahmed

Thème :

Contribution à l'étude numérique de la résistance thermique d'encrassement d'un réseau d'échangeurs de chaleur lors d'une phase de traitement thermique d'un pétrole brut

Le jury composé de :

Pr. Nedjioui M.	Grade : Professeur	FT/UYF	Président
Mr. Abiza A.	Grade : MAA	FS/UYF	Examinateur
Dr. Mahdi Y.	Grade : MCA	FS/UYF	Encadreur

Année universitaire : 2020/2021

الملخص :

يمكن للترسبات المبادلات الحرارية أن تخلق مشاكل فنية واقتصادية لطالما شغلت المصنعين في مختلف القطاعات. يتعلق هذا العمل بالمحاكاة العددية للمقاومة الحرارية للقاذورات التي تم تطويرها أثناء المعالجة الحرارية للنفط الخام في مصفاة مكونة من عدة بطاريات للمبادلات. تم تقديم نموذج رياضي ثم تمت محاكاته بواسطة Ansys Fluent. تظهر نتائج النموذج المصادق عليه بشكل عام أن درجة الحرارة تزداد في مبادلات الملف. تعتمد زيادتها على وجود أو عدم وجود تلوث عازل. هذا يترجم إلى انخفاض في معامل التبادل الكلي. يتبع تطور المقاومة الحرارية للقاذورات شكل نوع Kern-Seaton.

الكلمات المفتاحية: زيت خام ، أنبوب مبادلات حرارية ، تلوث ، مقاومة حرارية للقاذورات ، نموذج ، أنسيس .

Résumé :

L'encrassement des échangeurs de chaleur peut créer des problèmes techniques et économiques qui préoccupent depuis longtemps les industriels de différents secteurs. 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 composé 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, échangeurs de chaleur tubulaires, encrassement, résistance thermique d'encrassement, modèle, Ansys.

Abstract :

The fouling of heat exchangers can create technical and economic problems which have long concerned manufacturers in various sectors. This work concerns the numerical simulation of the thermal resistance to fouling developed during the thermal treatment of crude oil in a refinery composed of several batteries of exchangers. A mathematical model is presented and then simulated by Ansys Fluent. The results of the validated model show overall that the temperature increases in the coil exchangers. Its increase depends on the presence or absence of insulating fouling. This translates into a decrease in the overall coefficient of exchange. The evolution of thermal resistance to fouling follows a Kern-Seaton type shape.

Keywords: crude oil, tube heat exchangers, fouling, fouling thermal resistance, model, Ansys.

REMERCIEMENT

Grace à Dieu tout puissant qui nos doté de capacités physiques et morales, nous somme enfin arrivés au bout de cette thèse

الحمد والشكر لله العلي العظيم

*Nous tenons à remercier **Mr. Youcef MAHDI** d'avoir accepté de nous encadrer sur le thème, de nous avoir conseillé judicieusement, orienté, encouragé et de nous apporter une attention tout au long de ce travail.*

*Nous exprimons aussi nos remerciements à **Mr. Mounir ZIRARI** pour leurs aides de la formation de Logiciel Ansys et pour leur encouragement.*

Nous remercions aussi les membres de jurys Nous remercions

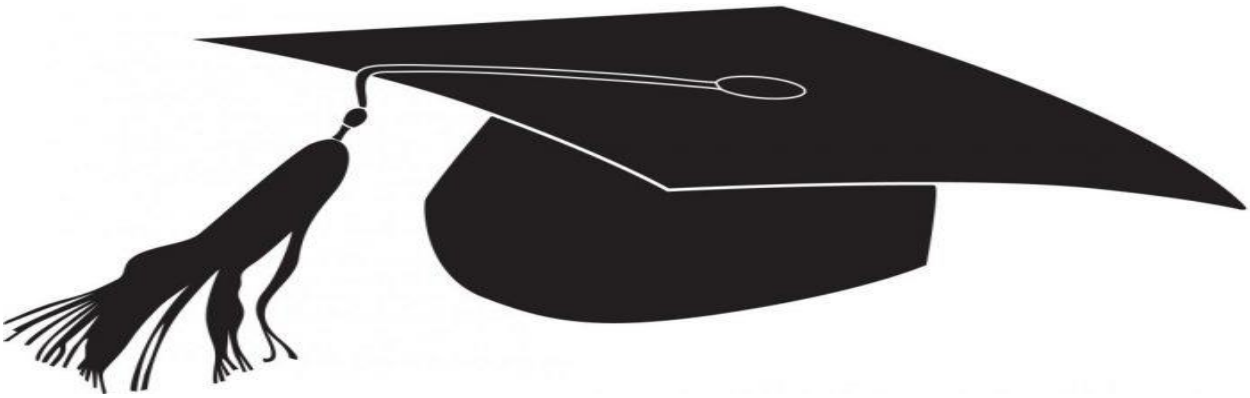
*aussi les membres de jurys : **La** **Président du jury.***

M.Nedjioui Mohamed, *L'Examinateur Mr. Abiza Amirouch*

et Nous remercions également tous les enseignants du département Science de la matière.

En fin, nous adressons nos remerciements à nos familles et nos amies qui fait tout pour nous mettre dans des bonnes dispositions afin que nous puissions accomplir ce travail.

DÉDICACES



Je tiens à remercier tous ceux qui ont été à mes côtés tout au long de mon parcours universitaire

Dédicaces à mes parents que Dieu les protège pour moi. A mes chers frères A moi et toute ma famille et je rends à ma chère mère

Pour tous ceux qui portent le nom :

LABGAA et BINZAHIA

A tous mes amis que je connais ou que j'ai connus au cours des deux dernières années. Tous ceux qui travaillent pour le bien de l'humanité

Je dédie ce travail

« Ahmed

DÉDICACES



Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant pour son aide et de nous

avoir donné la patience et le courage pour réaliser ce travail

A ma mère

Mon esprit mon influence vers le succès

Que dieu vous réserve bonne santé et longue vie

A mon frère

A mes sœurs

Et toute sa famille

A mes amis

A tous ceux qui me sont chères

je dédie ce travail

« Nadjat

Sommaire

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Introduction générale 01

Chapitre 1 : Pétrole brut et encrassement

I. Pétrole brut ……...**04**

I.1. Introduction……...……...**04**

I.2. Historique…….**04**

I.3 Origine du pétrole……..……...**05**

I.4 Composition chimique du pétrole brut…….....**0**7

I.5 Les différentes utilisations du pétrole……...…….**08**

I.6 Classification du pétrole brut…….**09**

I.7 Classification du pétrole brut……...……..**10**

I.8. Découpage du pétrole brut : Le Raffinage ……**11**

I.9 Caractéristiques des hydrocarbures pétroliers……...…**12**

I.9.1 Composition chimique…….…**12**

I.9.2 Composition physique……..…**14**

I.10 Inconvénients des produits pétroliers……....….**16**

I.10.1 La pollution atmosphérique……...….**16**

I.10.2 La marée noire……..…..…**17**

I.10.3 Le réchauffement climatique……..**17**

II. L'encrassement……...**17**

II.1 Introduction…….....**1**7

II.2 Phénomène d'encrassement…….……**18**

II.3 Notions sur l'encrassement des échangeurs

de chaleur…….....**18**

II.3.1 La corrosion……...….18
II.3.2 L'encrassement biologique…….**19**
II.3.3 L'encrassement par réaction chimique……....**19**
II.3.4 L'Entartrage……**19**
II.3.5 L'encrassement particulière……....**19**
II.4 L'encrassement par le pétrole brut Algérien…….……**20**

Chapitre 2 : Les échangeurs de chaleur

I. Notions générales sur les échangeurs de chaleur……**24**
I.1 Définition……..…….**24**
I.2. Le principe de fonctionnement…….……**24**
I.3 Modes de transferts thermiques…….…**25**
I.3.1. La conduction……..…**26**
I.3.2. La convection……..…**26**
I.3.3. Le rayonnement……...……**26**
II. Modes d'écoulement des deux fluides……..……**26**
II.1. Ecoulement Co-courants (Ecoulement des deux……
Fluides parallèles et sens)……...……...**27**
II.2. Ecoulement contre courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires) ……**27**
II.3.Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage……..……**28**
III. Classement technologique……..….**29**
III.1. Echangeurs tubulaires……..……....**29**
III.1.1. Echangeur monotube……...….**30**
III. 1.2. Echangeur coaxial……...….**30**
III.1.3. Echangeur multitubulaire……..……..…..**30**

III. 2. Echangeur à plaques…….……**31**

III.2.1. Echangeurs à surface primaire……..….**32**

III.2.2. Echangeurs à plaques et joints……..…....**33**

III.2.3. Echangeurs à plaques soudées ou brasées……..…..**34**

III.2.4. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques…….**34**

III.2.4.1. Avantage…….**34**

III.2.4.2. Inconvénients……..**34**

IV. Méthodes de dimensionnement…….….**35**

IV.1. Coefficient d'échange global et partiel……..….**35**

IV.2. Critères de performance d'un échangeur……..**38**

IV.3. Echangeurs de chaleur et déflecteurs……**38**

IV.3.1. Echangeurs de chaleur…….……**38**

IV. 3.2. Déflecteurs ou plaque de protection du faisceau…**39**

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de l'encrassement

I. Présentation de la raffinerie……**41**

II. Encrassement par le pétrole Algérien……...**42**

II.1. Introduction…….....**42**

II.2. Modèle mathématique de l'encrassement par le pétrole Algérien…….…….....**43**

II.3. Modèle de la résistance thermique d'encrassement et coefficient global de transfert de chaleur ……. 46

III.Validation du modèle de l'auto-oxydation des hydrocarbures…….**50**

IV. Organigramme……**51**

V. Etude numérique……..**52**

VI. Ansys……..**55**

VI.1 Introduction……....**55**

VI.2 Présentation de Ansys…….**55**

VI.3 Ansys CFD……..……**55**

VI.4 Ansys CFX……..**56**

Chapitre 4 : Résultats et discussions

I. Introduction……...……**60**

II. Evolution de la température dans un échangeur tubulaire……...……**61**

III.Evolution de la température en fonction du temps : Exemple échangeur HE-01…… **62**

IV. Evolution de la résistance thermique d'encrassement…….....**63**

IV.1 Calcul du paramètre Beta du modèle de Kern Seaton….....**63**

IV.2. Echangeur HE-01……..**65**

IV.3. Echangeur HE-02……..**66**

IV.4. Etude comparative entre les échangeurs de la batterie……. **68**

V. Evolution du coefficient d'échange global dans une batterie……..**69**

VI. Validation du modèle mathématique…….....**70**

V. Conclusion…….....**70**

Conclusion générale …….. 72

Références bibliographique

Annexes

Chapitre I: *Pétrole brut et encrassement*

Tableau I.1. : Composition élémentaire des hydrocarbures pétroliers ……..… 13

Tableau I.2. : Propriétés des principaux hydrocarbures pétroliers ……..…..... 15

Tableau I.3. : Caractéristiques du pétrole brut Algérien, Raffinerie d'Alger … 21

Tableau I.4. : Analyse chimique du dépôt de l'encrassement par le pétrole brut Algérien……..……..……..……..……..……..……..…….. 22

Tableau I.5. : Analyse physique du dépôt de l'encrassement par le pétrole brut Algérien……. 23

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

Tableau III.1. Etapes des réactions chimiques de l'auto-oxydation des hydrocarbures…… 44

Tableau III.2. Valeurs des paramètres relatives au modèle de la déposition des oxydes de fer…….. 45

Tableau III.3. Valeurs des paramètres relatives au modèle de la cristallisation du $CaSO_4$ …… 46

Tableau III.4. Conditions aux limites……... 52

Tableau III.5. Propriétés du mélange…… 53

Tableau III.6. Conditions de simulation……... 54

Liste de figure

Chapitre I : *Pétrole brut et encrassement*

Figure I.1 : Réserves prouvées de pétrole dans le monde en 2005…….. 06
Figure I.2. : Structure moléculaire de base des principaux hydrocarbures pétroliers ……13
Figure I.3. Structure moléculaire du décane (a), du 2,4-diméthylhexane (b), du cyclohexane (c) et de l'éthylène (d)…….. 14
Figure I.4. Fractionnement du brut……... 16
Figure I.5. : Un diagramme simplifié du circuit de préchauffage (Raffinerie d'Alger)…… 21

Chapitre II : *Les échangeurs de chaleur*

Figure II.1. : Représentation simplifie d'un échangeur de chaleur …… 24
Figure II.2. : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur …… 25
Figure II.3. : Les trois modes de transfert thermique…….. 25
Figure II.4. : Echangeur de chaleur à Co-courant…… 27
Figure II.5. : Echangeur à tube à contre-courant …… 28
Figure II.6. : Echangeur compact à courant croisé ……. 29
Figure II.7. : Echangeurs tubulaires……. 31
Figure II.8. : Echangeurs à plaques…….. 32
Figure II.9. : Les différentes géométries de plaques…… 33
Figure II.10. : Echangeur à plaques et joints……... 33
Figure II.11. : Echangeur brassés…… 34
Figure II.12. : Échangeur de chaleur à faisceau tubulaire ……39
Figure II.13. : Échangeur avec déflecteurs …….. 40

Liste de figure

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

Figure III.1. : Diagramme simplifié du train de préchauffage de la raffinerie….. 42

Figure III.2. : Diagramme du mécanisme en chaine de l'auto-oxydation …….43

Figure III.3. : Validation du modèle de la formation et la déposition des gommes insolubles…… 50

Figure III.4. : Organigramme……. 51

Figure III.5. : Les principaux modules des deux logiciels Ansys ICEM & CFX…… 56

Figure III.5. : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI)…… 57

Chapitre IV: *Résultats et discussions*

Figure IV.1. Evolution de la température dans un échangeur tubulaire en fonction de l'épaisseur de l'échangeur sans encrassement ……..... 61

Figure IV.2. Evolution de la température dans un échangeur tubulaire en fonction de l'épaisseur de l'échangeur avec encrassement …….. 62

Figure IV.3. Evolution de la température en fonction du temps : Exemple échangeur HE-01 …… 63

Figure IV.4. Calcul du paramètre beta du modèle de Kern Seaton …… 64

Figure IV.5. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-01 de la première batterie de la raffinerie ……. 65

Figure IV.6. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-02 de la première batterie de la raffinerie ……66

Figure IV.7. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-03 de la première batterie de la raffinerie ……... 67

Liste de figure

Figure IV.8. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-04 de la première batterie de la raffinerie ……67

Figure IV.9. Evolution comparative de la résistance thermique d'encrassement dans les échangeurs de la première batterie de la raffinerie …… 68

Figure IV.10. Evolution du coefficient d'échange global dans une batterie ……. 69

Figure IV.11. Validation du modèle mathématique…… 70

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité
β	Constante du temps	Unité/jour
C	Concentration	mol/l
Cp_c	Capacité Calorifique	J/kg-K
D	Diamètre	m
ρ	Densité	Kg/L
E_a	Energie d'activation	J/mol
e	Epaisseur de tubes	m
H	Facteur temps	Jour
K	Conductivité thermique	$W/m^2.\ K$
K	Constante de dépôt	m/s
K_d	Température	K
k_0	Facteur la formation du dépôt	$m^4/kg\ s$
L	Longueur d'un tube	m
M	Masse moléculaire	Kg/kmol
m	Débit massique	Kg/s
Q_d	Débit massique du dépôt	J/Kg
Q	La quantité de chaleur transférée	J

Nomenclature

Q_{ph},	Puissance thermique d'un échangeur	W
Q_d^{Tot}	La vitesse massique globale de la déposition	j m^4/kg s
$R_{f(t)}$	Résistance thermique d'encrassement	W/m^2.^{0}C
S	Surfaces d'échanges	m^2
Ti	Température à l'entrée	K
T_{op}	Température de sortie du système de chauffage	K
$T_{co(t)}^{EC-n}$	Température de sortie froide	K
t_c	Temps de résidence moyen	s
t_∞	Temps à la résistance asymptotique	s
$U_{f(t)}$	Coefficient d'échange global	W/m^2.k
μ	Viscosité	kg/m-s
V_i	Vitesse à l'entrée	m/s

LISTE D'ABREVIATIONS

OPEP	l'organisation des pays exportateurs de pétrole
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturer Association
CFD	Computational Fluid Dynamic
GRD	Generalized Reduced Gradient

Nomenclature

INDICES

INDICES	Exposants
c	Chaud
f	Froid
p	Paroi
S	Surface

Introduction Générale

Un des problèmes majeurs auxquels sont confrontées les industries chimiques, pétrolières, alimentaires et même pharmaceutiques est l'accumulation, sur les surfaces d'échange de chaleur, de substances organiques ou de matières dissoutes ou présentes en suspension dans le fluide d'alimentation. Ce phénomène, appelé encrassement, nuit au bon fonctionnement des équipements industriels et, en particulier, les échangeurs de chaleur. Il constitue, de ce fait, un problème majeur dans la conception et l'opération de ces équipements et cela, depuis le début du siècle.

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 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.

Malgré les grands progrès techniques dans le design des échangeurs de chaleur et les différentes méthodes chimiques et mécaniques développées pour réduire l'impact préjudiciable de la formation de dépôts sur les surfaces de transfert thermique, la plupart des industries souffrent toujours des problèmes de l'encrassement de leurs échangeurs de chaleur, en particulier l'industrie pétrolière. Le pétrole prédomine aujourd'hui dans la consommation globale de l'énergie de la majorité des pays du monde. En Algérie, le pétrole représente de loin la source de revenus la plus importante pour l'économie du pays. L'industrie du pétrole en Algérie a débuté avec l'apparition des premières raffineries dans le pays, celle d'Alger dans le nord et de Hassi Messaoud dans le grand sud. La demande du

marché en produits pétroliers finis et semi-finis a poussé les responsables à concevoir deux autres raffineries à l'est et à l'ouest du pays qui participent, actuellement, à l'approvisionnement du marché intérieur et extérieur en ces produits. En dépit du développement constant qu'elles connaissent, ces raffineries sont confrontées à un problème à la fois sérieux et complexe. En effet, l'encrassement des échangeurs de chaleur utilisés dans ces raffineries constitue un obstacle à leur progrès.

L'exemple de ce mémoire est le phénomène de l'encrassement des tubes d'échangeurs tubulaires du circuit préchauffe d'une raffinerie. 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 renferme 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 simulation de l'encrassement d'une batterie d'échangeurs de chaleur tubulaires d'une raffinerie de pétrole brut. Au début du chapitre, une présentation de la raffinerie étudiée est faite. Ensuite, un modèle de l'encrassement par le pétrole brut est présenté. Suivi par la validation du modèle proposé. Un organigramme de calcul de la résistance thermique d'encrassement est présenté également. 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 température 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 et des perspectives futures.

Chapitre I :

Pétrole brut et encrassement

I. Pétrole brut

I.1. Introduction

Le pétrole peut être extrait en milieu terrestre ou marin, avant d'être livrés aux consommateurs. Ces corps qui le composent subissent plusieurs étapes de transformation.

Ils sont d'abord extrait des profondeurs de la terre, transportes jusqu'aux usines de traitement ou l'on les débarrasse des corps étrangers, c'est après ces opérations que ces produits peuvent être utilisés par les consommateurs, plus bas, nos recherches vous donnerons d'abord la définition de pétrole puis l'origine, ensuite la prospection et la production. Nous terminerons ce travail avec une conclusion.

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.

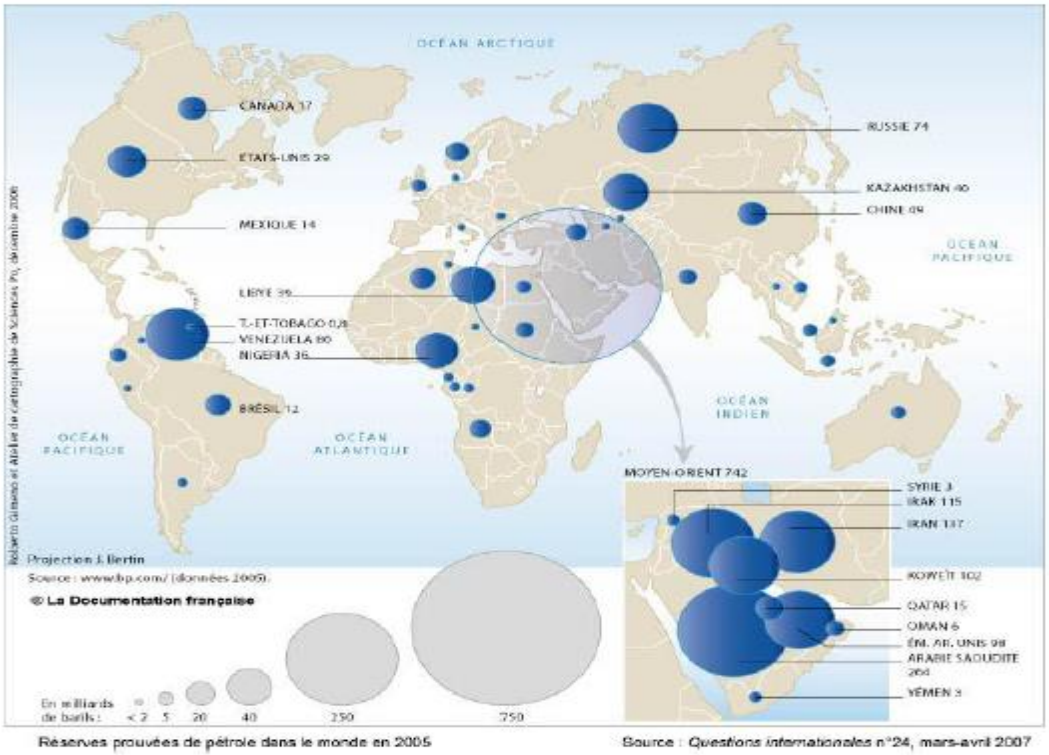
Réserves d'huile

Les réserves de pétrole de l'Algérie s'élèvent à environ 12 milliards de barils, mais le pays n'a pas été en mesure d'augmenter ses réserves ; En raison des nombreux problèmes du secteur, et en raison de l'absence d'un climat d'investissement propice à l'entrée de compagnies pétrolières internationales fortement.

I.3. Origine du pétrole [1] :

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. 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. La transformation à partir de dépôt marins est dû 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. La figure I.1 illustre les réserves prouvées de pétrole dans le monde en 2005. Les réserves les plus importantes se situent dans la péninsule arabique avec 743 milliards de barils (31,0% de la production totale). Le Venezuela et la Russie possèdent également de grosses réserves avec 80 milliards de barils chacun.



La Figure I.1 : Réserves prouvées de pétrole dans le monde en 2005.

I.4. Composition chimique du pétrole brut [1] :

Les composés principaux du pétrole sont les hydrocarbures, molécules plus ou moins lourdes composées d'atomes d'hydrogène et de carbone (on retrouve l'origine organique du pétrole). Les hydrocarbures sont dits saturés, lorsque la proportion d'hydrogène est suffisamment élevée pour que des liaisons simples soient possibles entre chaque atome de carbone. Les hydrocarbures non saturés possèdent des liaisons multiples entre les atomes de carbone. Ces composés hydrocarbonés sont classés en plusieurs familles selon leurs propriétés. Le plus simple des hydrocarbures est le méthane CH_4, le seul à n'avoir qu'un seul atome de carbone.

Les grandes familles sont :

- les alcanes,
- les alcènes (ou oléfines),
- les aromatiques,
- les alcynes.

La famille des alcanes est une famille d'hydrocarbures saturés. Les alcanes non cycliques possèdent une formule brute de la forme C_nH_{2n+2}, où n est un entier naturel non nul. Les plus couramment rencontrés sont le méthane CH_4, le propane C_3H_8 et le butane C_4H_{10}. Dans cette famille, les sous familles sont les alcanes linéaires qui ne contiennent qu'une seule chaîne de carbone, les alcanes ramifiés où des atomes de carbone viennent s'ajouter à une chaîne principale, les alcanes dits cycliques qui forment un cycle fermé de carbones et enfin les paraffines qui sont des alcanes linéaires possédant plus de 8 carbones (liquides de n = 8 à 19 et cires solides de n = 20 à 40).

À l'inverse, les alcènes, les alcynes, et les composés aromatiques sont des hydrocarbures insaturés. Les alcènes possèdent une double liaison covalente entre deux atomes de carbone et une formule brute de la forme C_nH_{2n} pour les chaînes carbonées linéaires. L'alcène le plus simple est l'éthylène ou éthène C_2H_2. Le terme « oléfine » est également employé pour qualifier ces molécules. Ils peuvent également être cycliques, linéaires ou ramifiés. Les alcynes sont des hydrocarbures possédant une instauration due à leur triple liaison carbone-carbone.

Quatre atomes d'hydrogène manquent aux alcynes comparés à leur alcane homologue et possèdent la formule brute C_nH_{n-2} comme formule brute. Ils sont présents, en faible quantité, dans les pétroles et les gaz naturels. Enfin, le pétrole contient de nombreuses molécules aromatiques. Ces molécules tirent leur nom du fait qu'elles composent généralement les arômes. Ce sont des composés chimiques qui contiennent un système cyclique respectant la règle d'aromaticité de Hückel [2], c'est à dire qu'ils possèdent (4n+2) électrons délocalisables. En plus de ces composés carbonés, le pétrole contient de nombreux autres éléments chimiques tels que les métaux (aluminium, fer, vanadium...), des produits soufrés ou acides.

I.5. Les différentes utilisations du pétrole

On emploie le pétrole comme matière première dans l'industriel chimique et dans la production de carburants. Le pétrole et ses dérivés sont utilisés dans la production de médicaments, des produits agrochimiques et alimentaires, de matières plastiques, de matériaux de construction, de peintures et fibres synthétiques, de détergents et de caoutchouc, ainsi que dans la production éclectique.

Les Canadiens consomment beaucoup de produits à base de pétrole. En 2018, ils ont utilisé 110 milliards de litres de produits pétroliers raffinés. Le pétrole occupe une part importante de la vie quotidienne au Canada et dans le monde, que ce soit pour

le chauffage ou pour la production des plastiques utilisés dans les vêtements, l'électronique et bien plus. Le pétrole prend une place importante dans la vie quotidienne au Canada et dans le monde. Le Canada consomme 1,5 million de barils de pétrole par jour, soit 2,5 % de la consommation mondiale. Cette puissante source d'énergie nous transporte, chauffe nos maisons, crée des emplois, et sert à fabriquer de nombreux produits de consommation courante.

I.6. Classification du pétrole brut

U gisement de pétrole contient un mélange d'hydrocarbures qui le caractérise selon l'histoire géologique de la zone où il s'est développé.

La provenance géographique est donc un des critères de classification du pétrole (Golfe Persique, mer du Nord, Venezuela, Nigéria, etc.).

Toutefois, pour établir des comparaisons entre différents sites, d'autres critères existent. Les plus importants sont les mesures de la viscosité et de la teneur en soufre du pétrole brut.

Selon la viscosité, quatre types de gisements sont définis (léger, moyen, lourd ou extra-lourd et bitume), plus le pétrole brut est visqueux, plus il est lourd.

Selon la viscosité, quatre types de gisements sont définis (léger, moyen, lourd ou extra-lourd et bitume), plus le pétrole brut est visqueux, plus il est « lourd » :

- les gisements de pétrole léger : l'aspect du pétrole brut se rapproche de celui du gazole. Les gisements sahariens présentent cette caractéristique.
- les gisements de pétrole moyen : la viscosité du pétrole brut est intermédiaire entre le pétrole léger et le pétrole lourd.

Il s'agit par exemple des gisements du Moyen Orient; les gisements de pétrole lourd ou extra-lourd : le pétrole brut ne coule pratiquement pas à température ambiante.

Les gisements d'Amérique du sud en sont un exemple ; les gisements de bitume : le pétrole brut est très visqueux voire solide à température ambiante.
Les principales réserves de ce type se trouvent au Canada. Cette propriété est importante pour déterminer la rentabilité de l'exploitation. En effet, un pétrole peu visqueux ou léger est plus facile à extraire et à traiter qu'un pétrole lourd.

La teneur en soufre distingue le pétrole brut soit en deux (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.

I.7. Classification du pétrole brut

Le pétrole brut est un fluide constitué principalement d'hydrocarbures ; il contient également des composés organiques soufrés, oxygénés et azotés. On le rencontre dans les bassins sédimentaires, où il occupe les vides de roches poreuses appelées réservoirs. Les gisements de pétrole correspondent à une accumulation dans une zone où le réservoir présente des caractéristiques favorables et constitue un piège : la fuite du pétrole – moins dense que l'eau – est rendue impossible vers le haut par la présence d'une couverture imperméable (argiles, sel) et latéralement par une géométrie favorable (dôme anticlinal, biseau de sables dans des argiles).
Le pétrole a pour origine la substance des êtres, animaux ou végétaux, vivant à la surface du globe et particulièrement en milieu aquatique. La matière organique ainsi produite se dépose au fond des mers et des lacs et est incorporée aux sédiments. À mesure que ceux-ci sont enfouis, les constituants organiques se transforment, principalement sous l'action de la température, en hydrocarbures dont une partie vient progressivement se concentrer dans les pièges des réservoirs poreux.

Si la composition élémentaire globale des pétroles est relativement fixe, la structure chimique de leurs constituants varie plus largement, ce qui entraîne une grande diversité des propriétés physiques (densité, viscosité) ainsi que des teneurs très variables dans les différents types de produits obtenus par raffinage. En particulier, la présence de soufre dans certains pétroles pose des problèmes de corrosion et de pollution atmosphérique, tant au stade du raffinage qu'à celui de l'utilisation industrielle ou domestique de leurs dérivés.

I.8. Découpage du pétrole brut : Le Raffinage

Mélange de milliers d'hydrocarbures, de résidus solides et d'eau, le pétrole brut doit être traité par plusieurs procédés pour en extraire le maximum de produits utiles. Le raffinage consiste à extraire l'eau et les solides du pétrole brut, ainsi qu'à séparer et traiter les hydrocarbures.

Le raffinage du pétrole brut est une étape incontournable avant de pouvoir l'utiliser. Il permet de transformer ce dernier pour mettre à la disposition des consommateurs et des industriels une palette de produits pétroliers.

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 chaleur dérivés 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.9. Caractéristiques des hydrocarbures pétroliers [3] :

I.9.1. Composition chimique

Les hydrocarbures pétroliers contiennent principalement des molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène. Il s'agit d'alcanes non cycliques (ou paraffines), des cycloalcalnes (ou naphtènes), d'alcènes (ou oléfines) et d'hydrocarbures aromatiques (Figure I.2). D'autres constituants mineurs sont également présents dans les hydrocarbures pétroliers, comme des métaux et des composés polaires qui contiennent de l'azote, du soufre ou de l'oxygène. Les molécules polaires de faible masse moléculaire sont appelées des résines, les plus lourdes étant regroupées sous l'appellation d'asphaltènes. La composition élémentaire des hydrocarbures pétroliers est présentée dans le Tableau I.1.

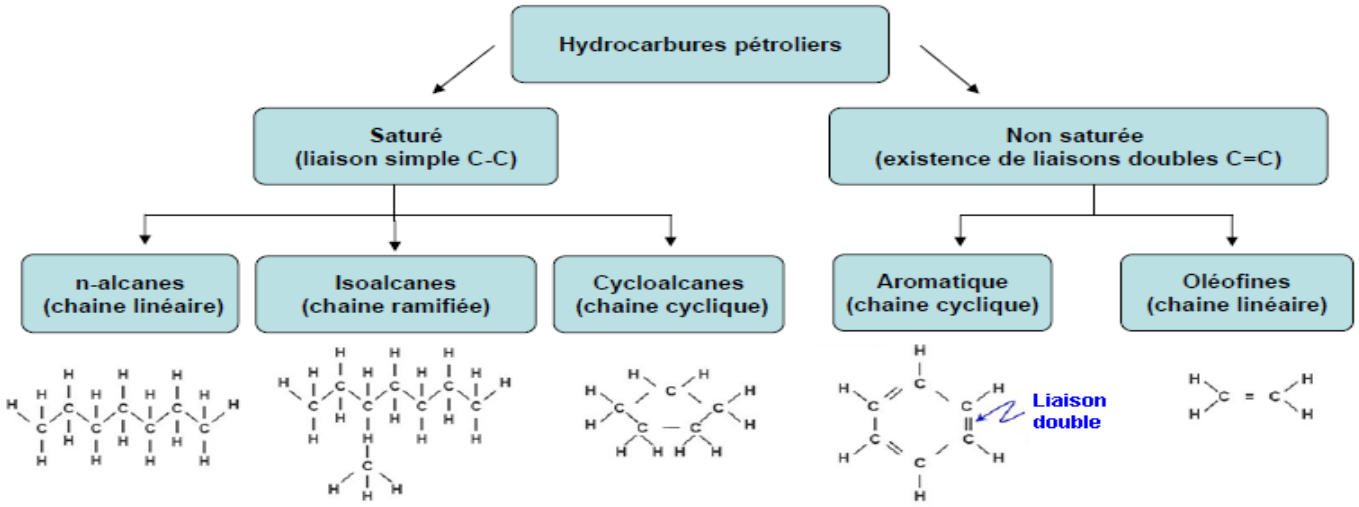


Figure I.2. : Structure moléculaire de base des principaux hydrocarbures pétroliers [4].

Tableau I.1. : Composition élémentaire des hydrocarbures pétroliers [4].

Éléments	**Pourcentage**
Carbone	83 à 87 %
Hydrogène	10 à 14 %
Azote	0,1 à 2 %
Oxygène	0,05 à 6,0 %
Soufre	0,05 à 6,0 %
Métaux	< 0,1 %

Les alcanes sont des hydrocarbures saturés qui sont répartis en deux groupes : les alcanes non cycliques, qui correspondent aux alcanes linéaires ou ramifiés, et les alcanes cycliques ou cycloalcalnes, également connus sous le nom de naphtènes (Figure I.2). Les alcènes sont des hydrocarbures insaturés caractérisés par la présence d'au moins une double liaison covalente entre deux atomes de carbone (Figure I.2). Les alcènes non cycliques n'ayant qu'une double liaison possèdent une formule brute de la forme C_nH_{2n}, où « n » est un entier naturel supérieur ou égal à 2. L'alcène le plus simple est l'éthylène. Les alcanes et les alcènes non cycliques constituent les hydrocarbures non aromatiques, qui sont également désignés sous le terme hydrocarbures aliphatiques.

La figure I.3 présente des exemples de la structure moléculaire des alcanes non cycliques (le décane, un alcane linéaire, et le 2,4-diméthylhexane, un alcane ramifié), d'un cycloalcane (le cyclodhéxane) et de l'alcène le plus simple, l'éthylène.

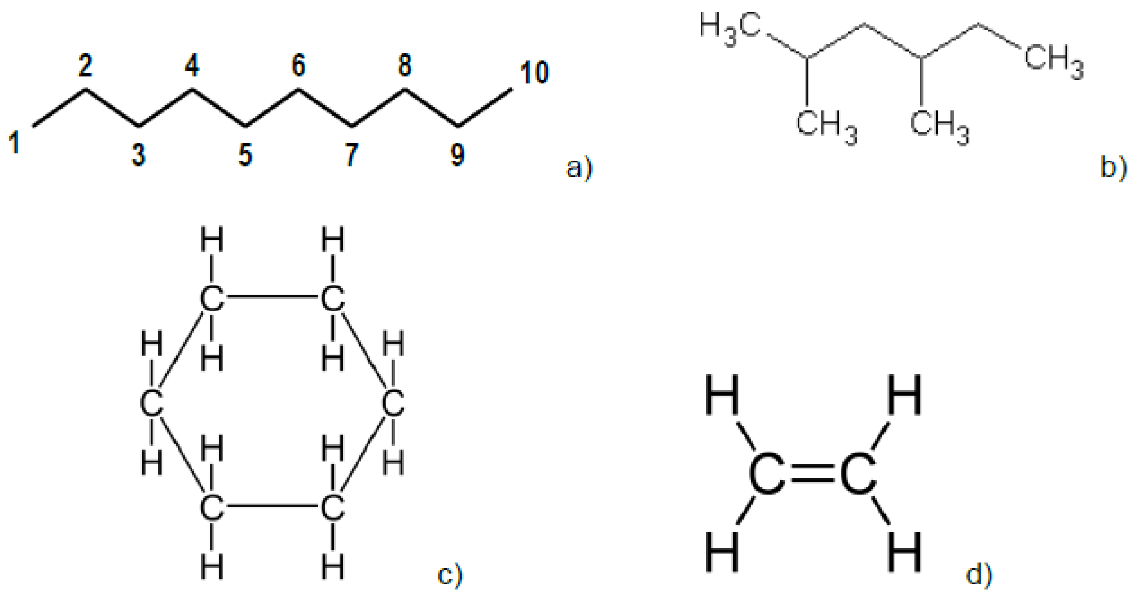


Figure I.3. Structure moléculaire du décane (a), du 2,4-diméthylhexane (b), du cyclohexane (c) et de l'éthylène (d).

I.9.2. Composition physique

Plusieurs propriétés physiques permettent de caractériser et de distinguer les hydrocarbures pétroliers en plus de prédire leur comportement dans l'environnement. Le Tableau I.2 présente les valeurs des propriétés physiques les plus couramment utilisées pour caractériser les hydrocarbures pétroliers. Ces propriétés sont décrites de façon sommaire dans les sections suivantes.

Le fractionnement du pétrole est représenté sur la figure I.4. sur cette figure, on peut voir les étapes pour passer du brut aux différents produits finis.

Le Tableau I.2. : Propriétés des principaux hydrocarbures pétroliers [6].

Propriété	Unité	Essence	Diesel	Pétrole brut		Mazout intermédiaire	Mazout lourd n°6
				Léger	Lourd		
Viscosité	mPa.s * (15 °C)	0,5	2,0	5 à 50	50 à 50 000	1 000 à 15 000	10 000 à 50 000
Point d'écoulement	°C	-	-35 à -10	-40 à 30	-40 à 30	-10 à 10	5 à 20
Densité	g/ml (15 °C)	0,72	0,84	0,78 à 0,88	0,88 à 1,00	0,94 à 0,99	0,96 à 1,04
Densité API	degré API	65	35	30 à 50	10 à 30	10 à 20	5 à 15
Solubilité dans l'eau	mg/l	200	40	10 à 50	5 à 30	10 à 30	1 à 5
Point d'éclair	°C	-35	45	-30 à 30	-30 à 60	80 à 100	> 100
Tension interfaciale	mN/m † (15 °C)	27	27	10 à 30	15 à 30	25 à 30	25 à 35

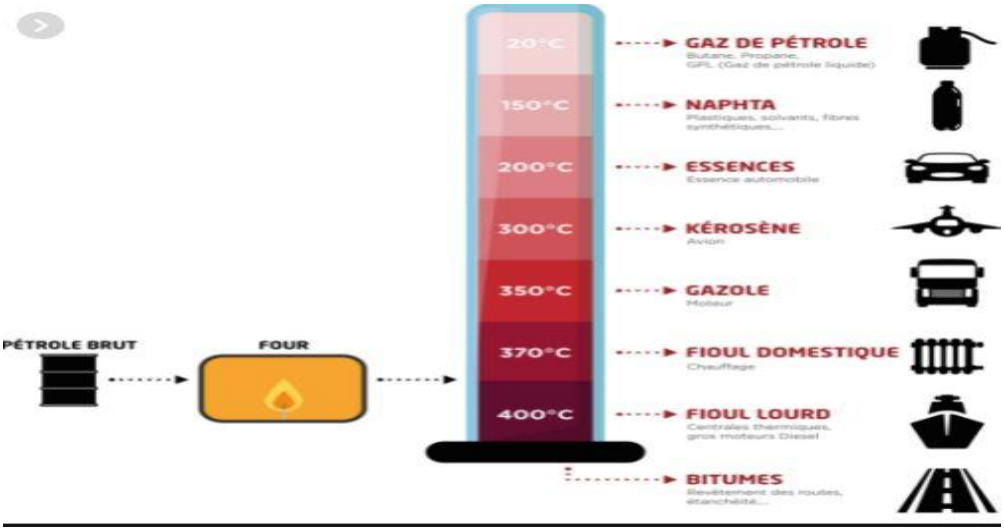


Figure I.4. Fractionnement du brut.

I.10. 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.10.1. 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 a la formation des pluies acides.

I.10.2. 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.10.3. 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. L'encrassement

II.1. Introduction

Les échangeurs thermiques sont présents dans un grand nombre de procédés industriels, ils permettent d'optimiser les dépenses énergétiques de l'ensemble d'un processus, Le transfert de chaleur se fait généralement par l'intermédiaire d'une surface d'échange. L'encrassement est le résultat de l'accumulation d'un dépôt sur la surface d'échange thermique. Ce dépôt produit une résistance thermique supplémentaire sur la surface d'échange. Il peut y avoir différentes conséquences telles que l'augmentation du coût due à une augmentation de la surface d'échange à installer, la perte d'énergie due à la diminution du transfert de chaleur et à l'augmentation de la perte de pression, l'augmentation des coûts de maintenance et de réparation. L'encrassement sur la surface des échangeurs de chaleur est un problème très étudié depuis quelques années. De nombreuses études théoriques et

expérimentales ont été faites par différents auteurs pour comprendre les mécanismes de dépôt sur une paroi de géométrie simple ou complexe.

II.2. Phénomène d'encrassement [2] :

L'encrassement est un phénomène qui se produit avec ou sans gradient de température dans un grand nombre de processus naturels, domestiques et industriels. Quelques exemples sont l'obstruction des vaisseaux sanguins par le cholestérol, la catalyse de l'hydrogène, les fluides dans les conduites des échangeurs de chaleur.

II.3. Notions sur l'encrassement des échangeurs de chaleur

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être définie comme accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte un grand nombre d'opération industrielle. Selon la classification établie en 1978 par Epstein, [8] il existe cinq grands types d'encrassements différents :

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

II.3.1. La corrosion [2] :

L'encrassement par corrosion implique une réaction chimique ou électrochimique entre la surface d'échange et l'écoulement fluide pour former des produits de corrosion qui, à leur tour, modifient les caractéristiques thermiques de surface et viennent s'encrasser**.**

II.3.2. L'encrassement biologique [9] :

L'encrassement biologique résulte de la fixation et de la croissance de micro-organismes et de microorganismes sur la surface d'échange thermique formant un biofilm souvent inégal, filamenteux, et déformable, mais difficile à enlever.

II.3.3. L'encrassement par réaction chimique [10] :

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. Ce type d'encrassement est souvent lié aux réactions de polymérisation produisant la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation de lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques.

II.3.4. L'entartrage [11] :

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

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

II.3.5. L'encrassement particulière [11] :

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation, sur les surfaces d'échange, de particules transportées par l'écoulement de fluides industriels tels que : l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion.

L'eau des tours de refroidissement.

Les écoulements gazeux chargés de particules tels les résidus solides de combustion, ou les poussières résultant de l'incinération de déchets ménagers.

II.4. L'encrassement par le pétrole brut Algérien

Le pétrole brut traité dans la raffinerie d'Alger et prévenant des champs de Hassi Messaoud est connu d'être léger, doux et à basse teneur en asphaltènes, Tableau I.3.

Tab1eau I.3. : Caractéristiques du pétrole brut Algérien, Raffinerie d'Alger [1].

Characteristics	Cold fluid Crude oil
Density	0,7966
Kinematic viscosity	
20.0 °C/68 °C	2,83
37.8 °C/100 °C	2,02
Sulphur content (mass%)	0,0634
Characterization factor, Kuop	12,20
Molecular weight (g/mol)	189
Asphaltene content (mass%)	0,07

Différents auteurs [12-13] ont trouvé que le dépôt de l'encrassement pris à partir du préchauffeur de la raffinerie d'Alger (figure I.5), est composé majoritairement par les insolubles. Tableau I.4.

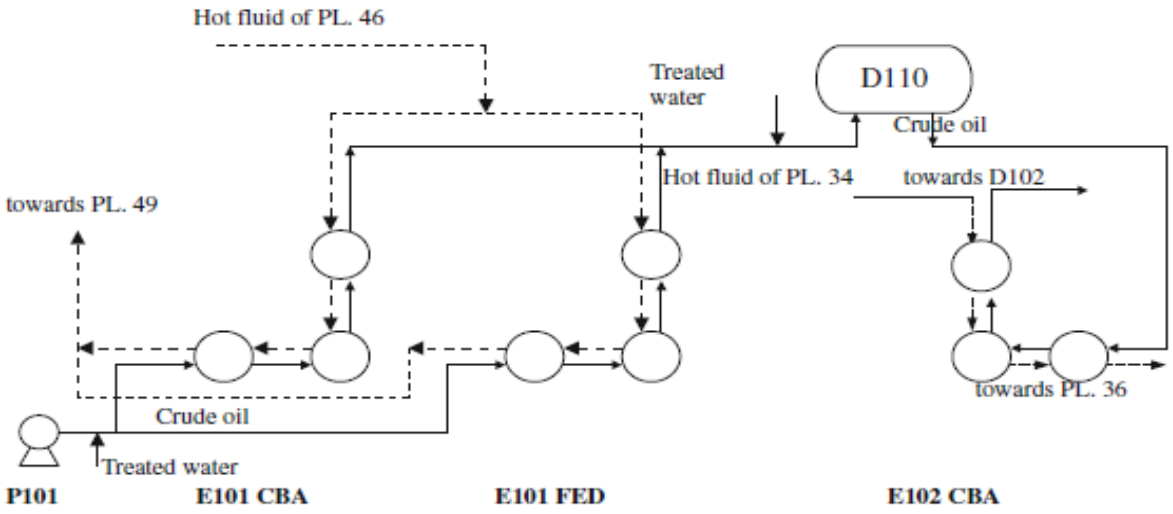


Figure I.5. : Un diagramme simplifié du circuit de préchauffage (Raffinerie d'Alger).

Tableau I.4. : Analyse chimique du dépôt de l'encrassement par le pétrole brut Algérien.

Composants	Teneur (%)
Insolubles	52,44
SO_4^{2-}	18,46
Cl^-	14,20
CO_3^{2-}	00,72
Fe^{2+}	10,04
Hydrocarbures	04,07
Silice	00,07
S^{2-}	00,00
Total	**100,00**

D'après Oufer et al. [12], l'origine de ces insolubles peut revenir au mauvais conditionnement dans les bacs de stockage. Mais, pour les sels, ils étaient soit présents dans le brut ou dans l'eau de nettoyage utilisée.

Harche et al. [13] ont analysé le dépôt et ils ont trouvé que l'oxygène et le carbone sont les constituants majoritaires (Tableau I.5.).

Tableau I.5. : Analyse physique du dépôt de l'encrassement par le pétrole brut Algérien.

Element	Wt%	At%
C	28.04	38.33
O	45.55	46.74
Si	24.42	14.28
S	00.20	00.10
Cl	00.00	00.00
Ca	00.21	00.09
Fe	01.59	00.47

D'après l'analyse chimique Tableau I.4., la fraction des hydrocarbures dans le dépôt est relativement faible par contre l'analyse physique Tableau I.5. montre un pourcentage massique considérable du carbone. Cette observation donne un indice sur la nature des insolubles qui doivent contenir le carbone du dépôt.

Omettant le coke qui nécessite des températures relativement élevé, ces insolubles peuvent être soit des asphaltènes formés par précipitation ou des gommes formés par auto-oxydation des hydrocarbures à la présence de l'oxygène.

Lambourn et Durrieu [14], ont suivi la dépendance de la solubilité des Asphaltènes en fonction de la température pour trois types de bruts. Pour le pétrole Algérien, ils montrent que la solubilité des Asphalténes reste inchangeable. A cet égard, Lambourn et Durrieu 1988 ont fixé une limite de concentration de 1.3% pour que les Asphalténes du pétrole brut subissent une précipitation.

Chapitre II :

Les échangeurs de chaleur

I. Notions générales sur les échangeurs de chaleur

I.1 Définition

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échangeur la chaleur entre deux fluides ou plus. Dans un échangeur thermique, le fluide chaud et le fluide froid sont séparés par une paroi bien adaptée et par principe la transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid [1].

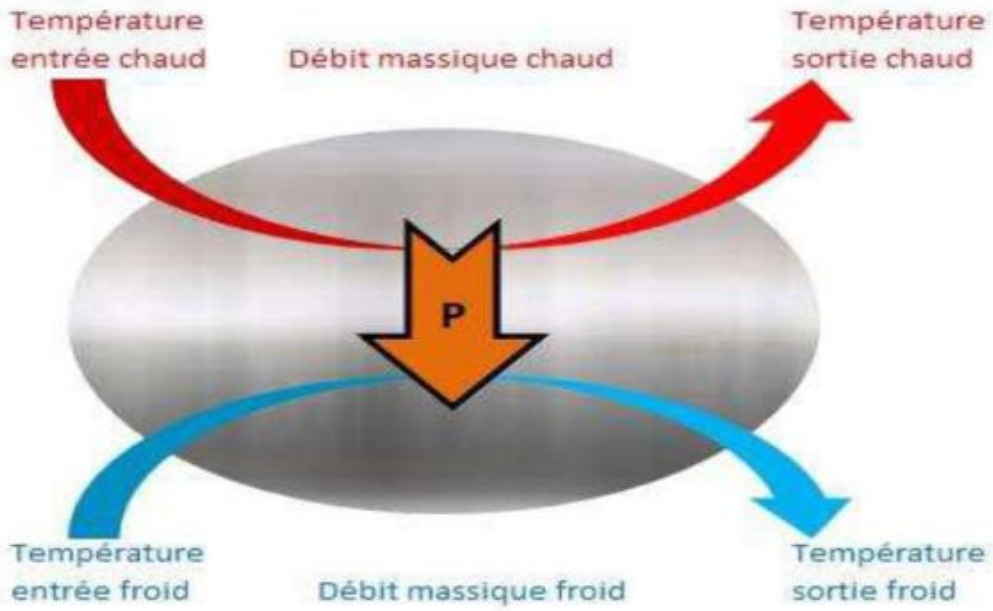


Figure II.1. : Représentation simplifie d'un échangeur de chaleur [1].

I.2 Le principe de fonctionnement

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. La plupart du temps, on utilise cette

méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou chauffer directement [2].

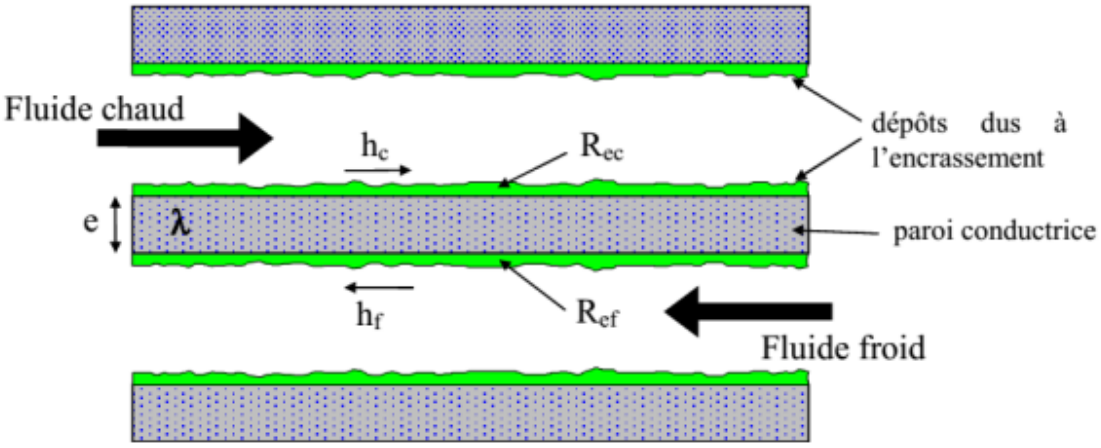


Figure II.2. : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur [3].

I.3 Modes de transferts thermiques

Il existe trois modes essentielles de transferts de chaleur : la conduction, la convection, le rayonnement.

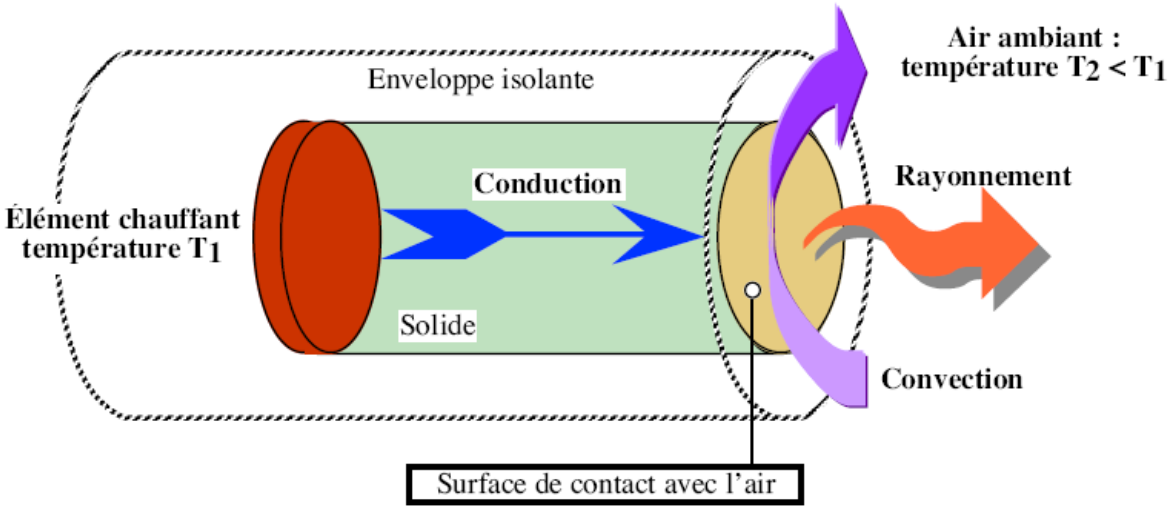


Figure II.3. : Les trois modes de transfert thermique.

I.3.1. La conduction

La conduction c'est la transmission de la chaleur au sein de la masse d'un corps solide, des points les plus chands vers les points les moins chauds, par suite du contact des particules entre elles et sans de placement apparent de matière.

I.3.2. La convection

La convection s'effectue par un déplacement de matière dans le milieu. C'est le transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz adjacent. C'est le mode le plus important pour les échangeurs de chaleur mais aussi le plus difficile à estimer, il dépend du type de fluide, des vitesses et du type de l'échangeur.

I.3.3. Le rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps a haut température a un autre plus froid, les deux corps ne se touchent pas, mais ils séparés par un milieu transparent tel l'air, ou le vide.

II. Modes d'écoulement des deux fluides

On peut distinguer trois modes d'écoulement différents :

II.1. Ecoulement Co-courants (Ecoulement des deux fluides parallèles et sens)

Il s'agit d'échangeurs dit à co-courants ou la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du 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 [4].

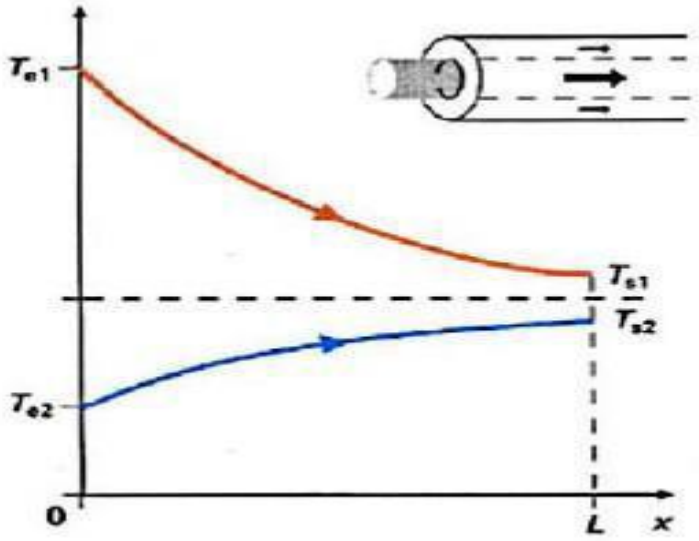


Figure II.4. : Echangeur de chaleur à Co-courant [5].

II. 2. Ecoulement contre courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires)

Il s'agit d'échangeur en contre-courant sous la température du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique. L'avantage de l'échangeur à contre-courant sur l'échangeur à co-courant est de nécessiter, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles.

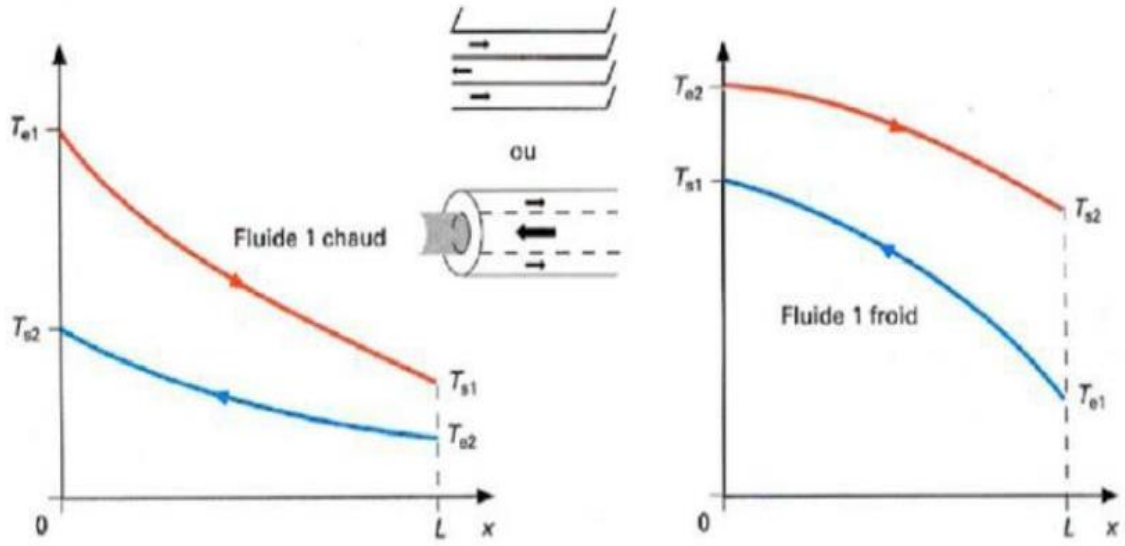


Figure II.5. : Echangeur à tube à contre-courant [5].

II.3. Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage [6] :

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre, Le fluide non brassé est canalisé : c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèle distincts et de faible section. L'autre fluide circule librement entre les veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide. Sans cela, les températures varient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine.

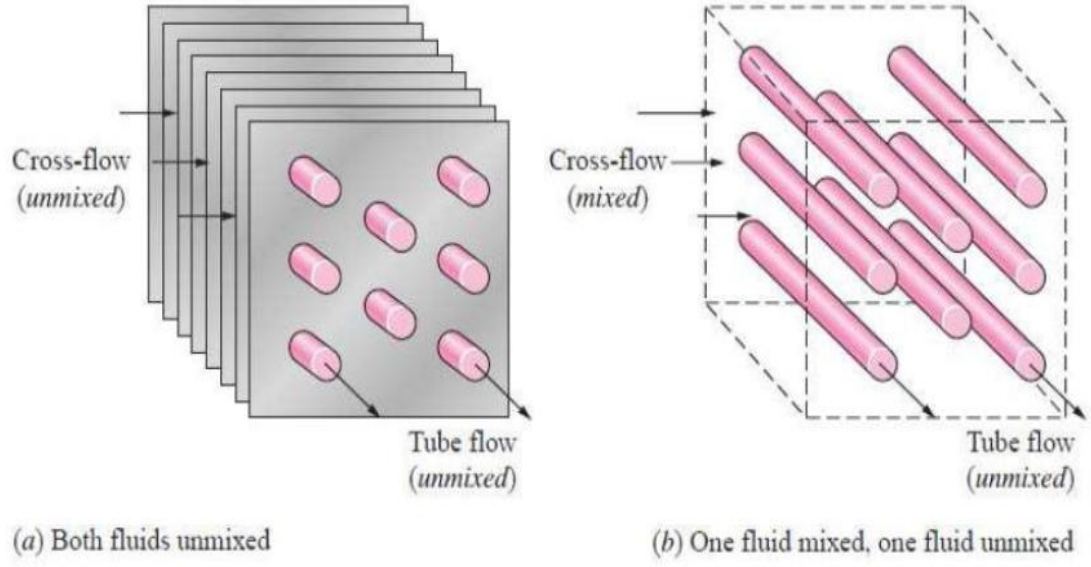


Figure II.6. : Echangeur compact à courant croisé [7].

III. Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants [8] :

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

III.1. Echangeurs tubulaires

Les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

III.1.1. Echangeur monotube

Dans cet échangeur de chaleur le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin (figure II.7.a).

III.1.2. Echangeur coaxial

Dans cet échangeur de chaleur, les doubles tubes sont le plus souvent centrés, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur (figure II.7.b).

III.1.3. Echangeur multitubulaire

Existant sous quatre formes :

- Échangeur à tubes séparés (figure II.7. c) : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

- Échangeur à tubes rapproches (figure II.7. d) : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.

- Échangeur à tubes ailettes (figure II.7. e) : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

- Échangeur à tubes et calandre (figure II.7. f) : c'est l'échangeur actuellement le plus répandu.

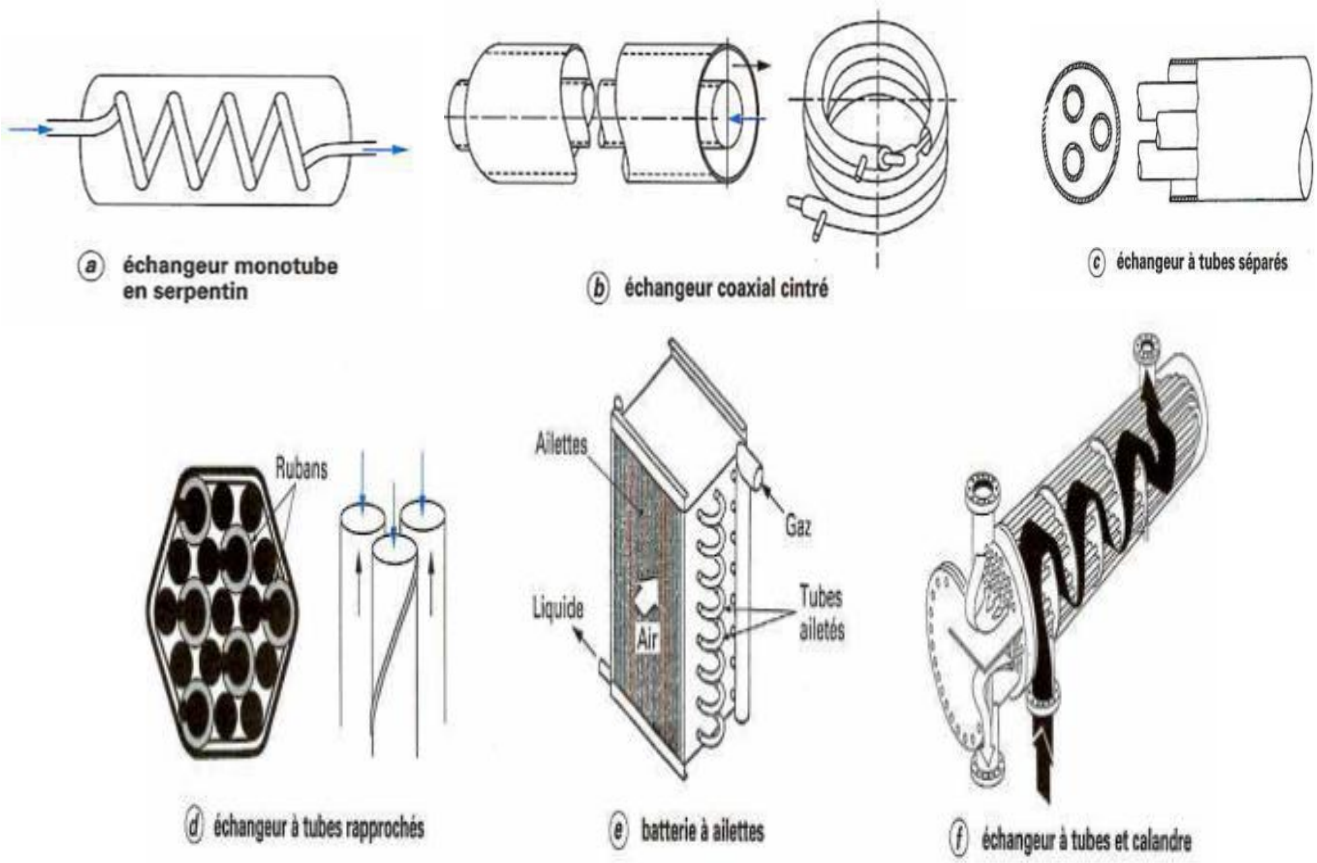


Figure II.7. : Echangeurs tubulaires.

III.2. Echangeur à plaques [9]

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. Les plaques sont assemblées de façon à ce que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter plaques successifs. Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques. L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lorsque des puissances importantes doivent être échangées. Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire ou l'industrie nucléaire.

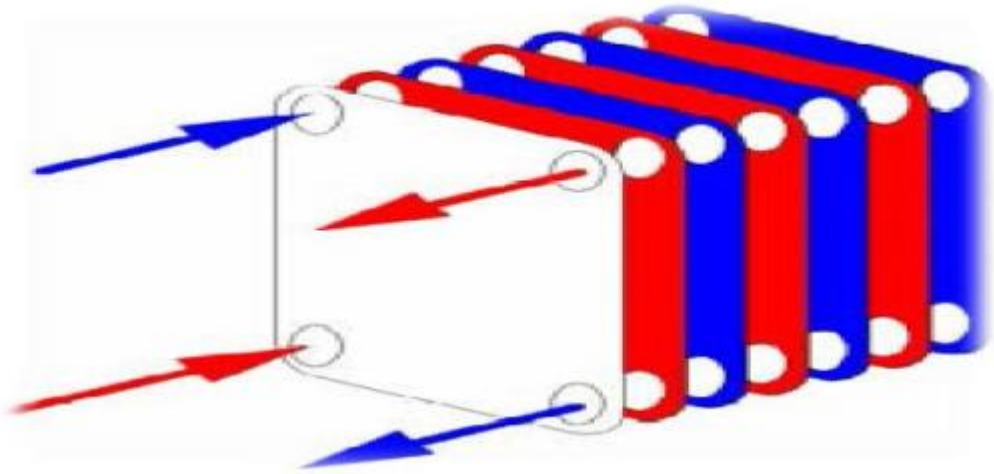


Figure II.8. : Echangeurs à plaques.

III.2.1. Echangeurs à surface primaire

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

Les différentes géométries de plaques les plus couramment rencontrées sont présentées sur la figure suivante.

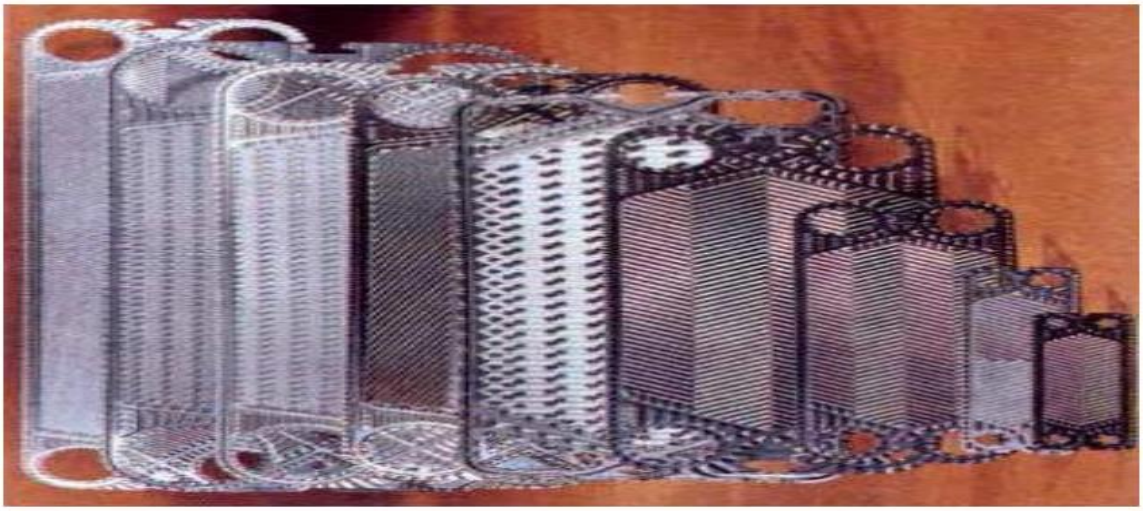


Figure II.9. : Les différentes géométries de plaques.

III.2.2. Echangeurs à plaques et joints

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

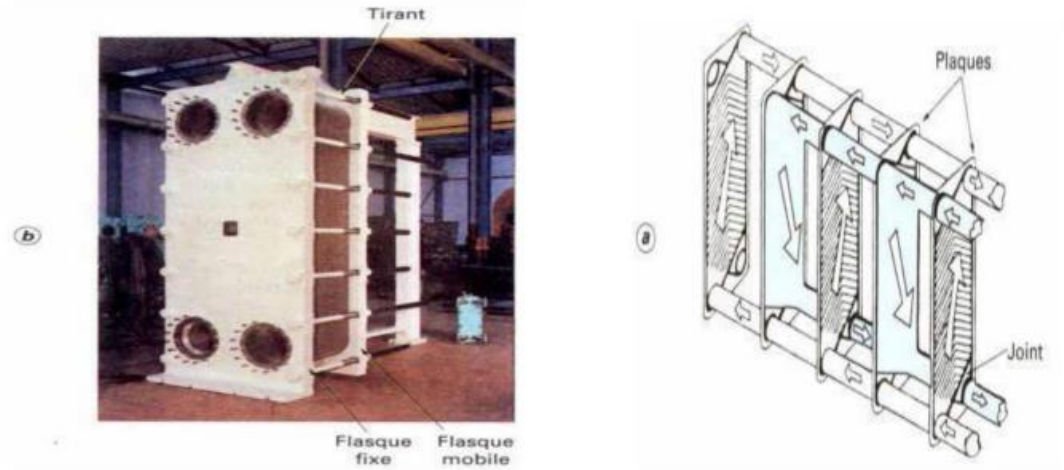


Figure II.10. : Echangeur à plaques et joints.

III.2.3. Echangeurs à plaques soudées ou brasées

Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agroalimentaire, etc.

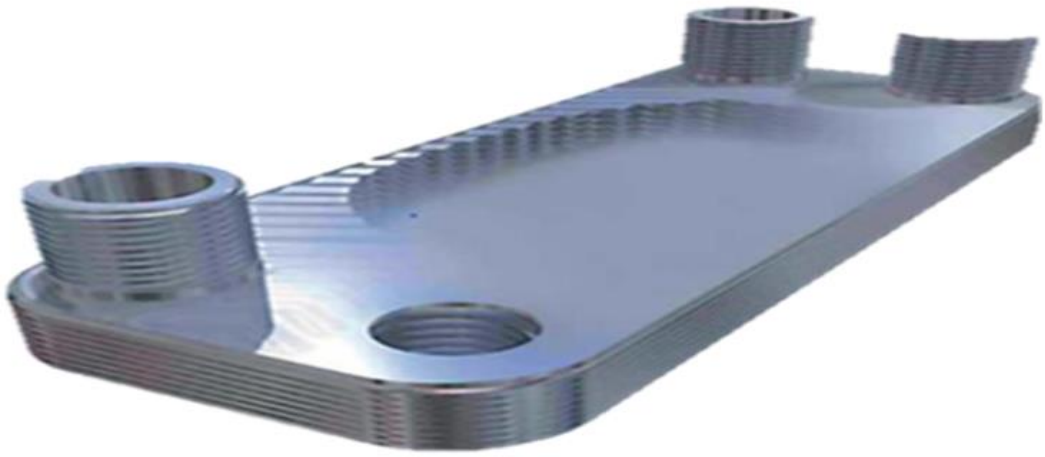


Figure II.11. : Echangeur brassés.

I.2.4. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques

III.2.4.1. Avantages

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

III.2.4.2. Inconvénients

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

IV. Méthodes de dimensionnement [10] :

Au côté de l'équation de bilan d'énergie, la résolution des problèmes d'échange thermique nécessite l'écriture d'une seconde équation, de nature tout à fait différente de la première, qui pour rappel est une équation thermodynamique et traduit le principe de conservation de l'énergie.

Cette seconde équation est l'équation de transfert de chaleur qui traduit la relation entre le flux de chaleur échangé et la différence de températures disponibles entre les deux fluides qui circulent dans l'échangeur thermique.

Le dimensionnement d'un échangeur consiste à calculer la surface d'échange nécessaire pour obtenir les performances désirées (puissance, température).

Il faudra par la suite déterminer les pertes de charge (pertes de pression) que va engendrer la circulation des fluides (par la friction contre les parois du fait de la viscosité) afin de vérifier la concordance avec le cahier des charges qui impose souvent une limite haute en terme de valeur d'une perte de charge.

Cette valeur haute correspondant, la plupart du temps, à une capacité de pompage existante et donc à ne pas dépasser (pour la détermination des pertes de charge par le calcul du facteur de friction, le lecteur pourra se reporter aux ouvrages).

Pour connaitre la surface d'échange de l'échangeur, il faut dans un premier temps connaitre les grandeurs de dimensionnement telles que la puissance, les températures, les débits (voir plus haut de détermination de ces grandeurs par les bilans thermiques).

Ensuite, il faut calculer, quelle que soit la méthode de dimensionnement utilisée, les coefficients d'échanges thermiques partiels et le coefficient d'échange thermique global.

IV. 1. Coefficient d'échange global et partiel [11] :

Pour expliquer clairement la notion de coefficient d'échange, on considère une paroi métallique au travers de laquelle la chaleur est transférée par conduction, cette paroi étant en contact avec un fluide chaud et sur son autre face avec un

fluide froid : cette situation se traduit par un transfert de chaleur entre les deux fluides.

On peut exprimer par l'équation qui suit la relation entre le flux de chaleur transféré Q, l'écart de température ΔT des deux fluides (le chaud (indice c) et le froid (indice f)) et l'aire S de la paroi d'échange :

$$Q = U \times S\left(T_c - T_f\right) \text{ avec } U = \frac{1}{R_{global}}$$

R est la résistance.

En général, l'encrassement des échangeurs de chaleur est défini comme le dépôt de matériaux ou de substances non désirées sur les surfaces d'échanges. Ce dépôt peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, de produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments.

C'est un processus qui est dynamique et qui se déroule de façon continue ou ponctuelle, généralement jusqu'à atteindre un état d'équilibre (valeur asymptotique) ou jusqu'à ce qu'il soit nécessaire de nettoyer l'échangeur – la période d'encrassement pouvant varier de quelques heures à plusieurs mois, voire plusieurs années.

Ces résistances thermiques d'encrassement sont en général données par les standards TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association) qui font office de référence (sauf retour d'expérience propre à l'exploitant).

Leur prise en compte dans le calcul du coefficient d'échange global permet de simuler le fonctionnement de l'échangeur en conditions dégradées (avec une résistance d'encrassement suite à un nombre d'heures de fonctionnement) et permet de faire un surdimensionnement "justifié" due à une potentielle future baisse de performance.

En effet, l'ajout d'une ou plusieurs résistances d'encrassement a pour effet néfaste de dégrader la valeur du coefficient thermique global, induisant une hausse de la surface d'échange nécessaire et donc un surplus en cout matière et conception.

La résistance globale (et en conséquence U) se déduit de la règle d'additivité des résistances partielles :

$$R_{global} = \frac{1}{U \times S} = \sum R_i$$

On notera que le coefficient d'échange global doit être défini par rapport à une surface d'échange de référence. Dans le cas, d'une paroi plane, cette surface de référence est évidente puisqu'unique : c'est la surface de la paroi. Dans le cas d'une paroi tubulaire (cylindrique), deux surfaces d'échange de référence peuvent être retenues : la paroi interne ou externe.

On peut alors choisir indistinctement l'une ou l'autre la condition de maintenir ce choix tout au long du calcul.

Ainsi, le coefficient d'échange global U (défini par rapport à la surface d'échange interne –notée avec un indice int – pour les échangeurs tubulaires) est déterminé par la relation suivante dans laquelle interviennent la résistance de paroi, les résistances convectives et les résistances d'encrassement :

$$R_{global} = R_{convention\ n_{ext}} + R_{encrassement\ t_{ext}} + R_{conduction} + R_{encrassement\ t_{int}} + R_{convention\ n_{int}} + ...$$

Cette expression prend différentes formes suivant le type d'échangeur considéré (en négligeant les résistances d'encrassement) :

- Pour un échangeur à plaques (d'épaisseur e) :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + \dots$$

IV.2. Critères de performance d'un échangeur [12] :

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 faible 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 au volume de l'échangeur. Propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa capacité (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.

IV.3. Echangeurs de chaleur et déflecteurs

IV.3.1. Echangeurs de chaleur [13] :

Les échangeurs de chaleur en version transparente et très résistante à la corrosion sont très importants dans l'assemblage d'installations dans le domaine de la chimie et de la pharmacie. Dans presque tous les processus avec des fluides liquides, il faut apporter ou retirer de la chaleur.

Pour cela, Normag [13] propose à l'utilisateur une large gamme d'échangeurs de chaleur pour les différentes applications. Pour résoudre de façon optimale le problème respectif. Les échangeurs de chaleur à serpentin, à faisceau tubulaire et les évaporateurs à couche mince représentés sur les figures jointes sont des exemples de la multitude d'appareils proposés.



Figure II.12. : Échangeur de chaleur à faisceau tubulaire

IV. 3.2. Déflecteurs ou plaque de protection du faisceau [14] :

Pour éviter ou du moins minimiser l'érosion de tube de faisceau, des déflecteurs de protection peuvent être installés faces aux tubulures d'entrée du fluide côte calandre, l'obligation de leur mise en place est définie dans les standards(TEMA) en fonction de la nature, de l'état du fluide et du produit ρu^2 (ρ: masse volumique , u : vitesse du fluide) ces déflecteurs, d'une épaisseur de l'ordre de 1/2in sont circulaires , carrés ou rectangulaires , soudés sur des tirants ou entretoise.

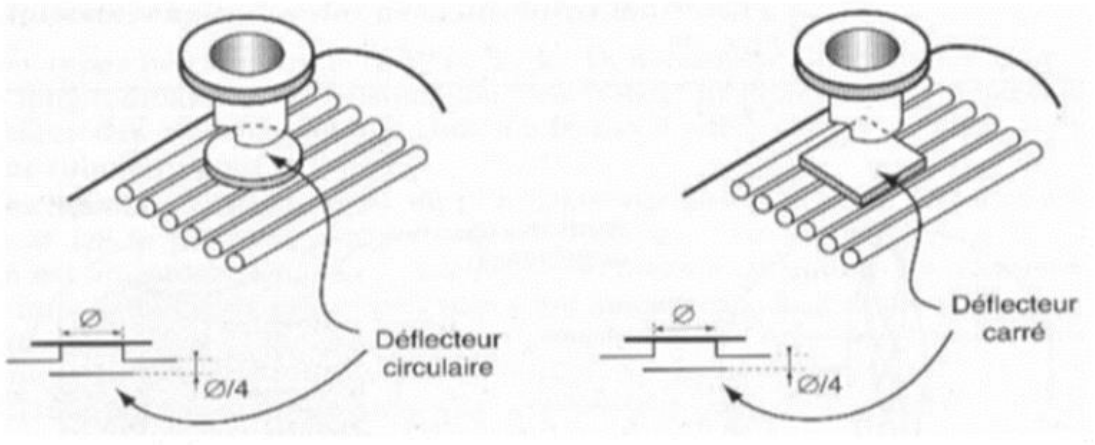


Figure II.13. : Échangeur avec déflecteurs.

Chapitre III : Modélisation et simulation de l'encrassement

I. 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 [1].

Un schéma simplifié de la 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 (HE-05) 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 :

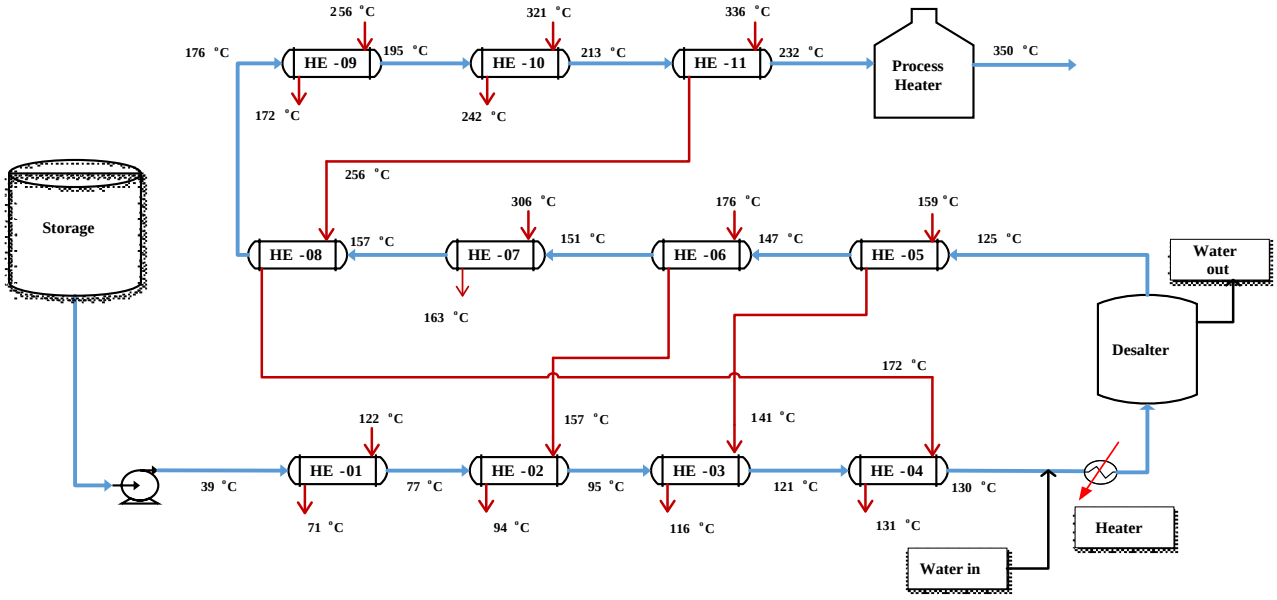


Figure III.1. : Diagramme simplifié du train de préchauffage de la raffinerie.

II. Encrassement par le pétrole brut

II.1. Introduction

Le transport et le traitement du pétrole brut sont sujets de l'encrassement. En effet, dans les raffineries, le problème de l'encrassement est présent et reste assez mal connu il s'agit de l'accumulation, sur les surfaces d'échange de chaleur, de substances organiques ou de matières dissoutes ou présentes en suspension. Il constitue, de ce fait, un problème majeur dans la conception et l'opération des équipements industriels et en particulier, les échangeurs de chaleur. L'effet néfaste de l'encrassement apparait 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. En dépit du développement constant qu'elles connaissent, ces raffineries sont confrontées à un problème à la fois sérieux et complexe. En effet, l'encrassement des échangeurs de chaleur utilisés dans ces raffineries constitue un obstacle à leur progrès.

II.2. Modèle mathématique de l'encrassement par le pétrole brut

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. [2] exprime la masse du dépôt encrassant. Ce modèle très complexe est de cinétiques chimies pseudo-détaillées est présenté sur la Figure III.2. :

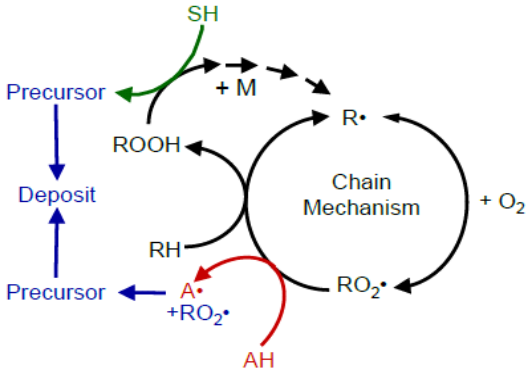


Figure III.2. : Diagramme du mécanisme en chaine de l'auto-oxydation [2].

Le modèle est amélioré par West et al. 2011 [3] 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 [4], la formation du dépôt est exprimée mathématiquement par l'équation suivante :

$$Q_d = K_d \times C_b \qquad (1)$$

Avec :

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

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

$$K_a = K_a^0 \exp\left(E_a / RT_s\right) \quad (3)$$

Les valeurs de E_a et de K_a^0 employées sont celles proposées par Turner [5] dans le Tableau III.2.

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

Paramètres	$\mathbf{K_a^0}$ **(m/s)**	$\mathbf{E_a/R\ (K^{-1})}$
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 [6] selon l'équation :

$$m_p^{'} = k_r \left(C_{si} - C_s^*\right)^n \quad (4)$$

Avec :

$$k_r = k_0 \exp\left(E / RT_s\right) \quad (7)$$

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 $CaSO_4$ [7].

Tableau III.3. Valeurs des paramètres relatives au modèle de la cristallisation du $CaSO_4$ [7].

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 :

$$Q_d^{Tot} = \sum_{i=1}^{3} Q_i \quad (7)$$

II.3. Modèle de la résistance thermique d'encrassement et coefficient global de transfert de chaleur

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 que la première batterie par manque de temps et d'outils de calcul.

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 massiques sont identiques pour tous les échangeurs de chaque batterie. D'autre part, la résistance thermique asymptotique et β 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 [9-10].

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 [11-12]. Il est [13] est proposé pour déterminer l'état d'encrassement de l'échange comme suit :

$$R_{f(t)} = R_{\infty t}\left(1 - \exp^{-\beta \times t}\right) \tag{8}$$

Le coefficient d'échange globale est donné par :

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

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

$$U_{f(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f\infty}\left(1 - \exp^{-\beta t}\right)} \tag{10}$$

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

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

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

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

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

$$LMTD = \frac{\left(T_{ho} - T_{ci} \right) - \left(T_{hi} - T_{co} \right)}{\ln\left(\frac{T_{ho} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{co}} \right)} \quad (14)$$

La résolution de ces équations donne $T_{h,o}$ and $T_{c,o}$ [11]:

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

$$T_{ho} = \left[\frac{\exp\left(-\frac{U_{f(t)} A}{m_h c_{ph}} F \left(\frac{m_h c_{ph}}{m_c c_{pc}} - 1 \right) \right) - 1}{\exp\left(-\frac{U_{f(t)} A}{m_h c_{ph}} F \left(\frac{m_h c_{ph}}{m_c c_{pc}} - 1 \right) - \frac{m_h c_{ph}}{m_c c_{pc}} \right)} \right] T_{ci} + \left[\frac{\frac{m_h c_{ph}}{m_c c_{pc}} - 1}{\exp\left(-\frac{U_{f(t)} A}{m_h c_{ph}} F \left(\frac{m_h c_{ph}}{m_c c_{pc}} - 1 \right) - \frac{m_h c_{ph}}{m_c c_{pc}} \right)} \right] T_{hi} \quad (16)$$

k_1 et k_2 sont données par [11] :

$$k_1 = \frac{m_h c_{ph}}{m_c c_{pc}} \quad (17)$$

$$k_{2(t)} = \frac{U_{f(t)} A}{m_h c_{ph}} \quad (18)$$

$$T_{co} = \left[\frac{(1-k_1)\exp\left(-k_2F(k_1-1)\right)}{\exp\left(-k_2F(k_1-1)-k_1\right)}\right]T_{ci} + \left[\frac{k_1\exp\left(-k_2F(k_1-1)\right)}{\exp\left(-k_2F(k_1-1)-k_1\right)}\right]T_{hi} \quad (19)$$

$$T_{ho} = \left[\frac{\exp\left(-k_2F(k_1-1)\right)-1}{\exp\left(-k_2F(k_1-1)-k_1\right)}\right]T_{ci} + \left[\frac{(k_1-1)}{\exp\left(-k_2F(k_1-1)-k_1\right)}\right]T_{hi} \quad (20)$$

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 :

$$Q_{ph} = \int_0^t m_c \times Cp_c\left(T_{op} - T_{co(t)}^{EC-n}\right)dt \quad (21)$$

Avec :

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

$T_{co(t)}^{EC-n}$: 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 [14] :

$$Q_{ph} = \sum_{t=0}^{H} m_c \times Cp_c\left(T_{op} - T_{co(t)}^{EC-n}\right)\Delta t \quad (15)$$

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 β sont considérées comme identiques pour tous les échangeurs d'une seule batterie.

Egalement, 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 [11] :

$$\beta = \frac{1}{t_c} = \frac{1}{(0.63 \times t_\infty)} \qquad (16)$$

Avec :

t_c : est le temps de résidence moyen

t_∞ : temps nécessaire pour arriver à la résistance asymptotique

III. Validation du modèle de l'auto-oxydation des hydrocarbures

Le modèle de l'auto-oxydation des hydrocarbures est validé avec les résultats de Watkinson [8] pour l'encrassement d'un brut Canadian présenté sur la Figure suivante :

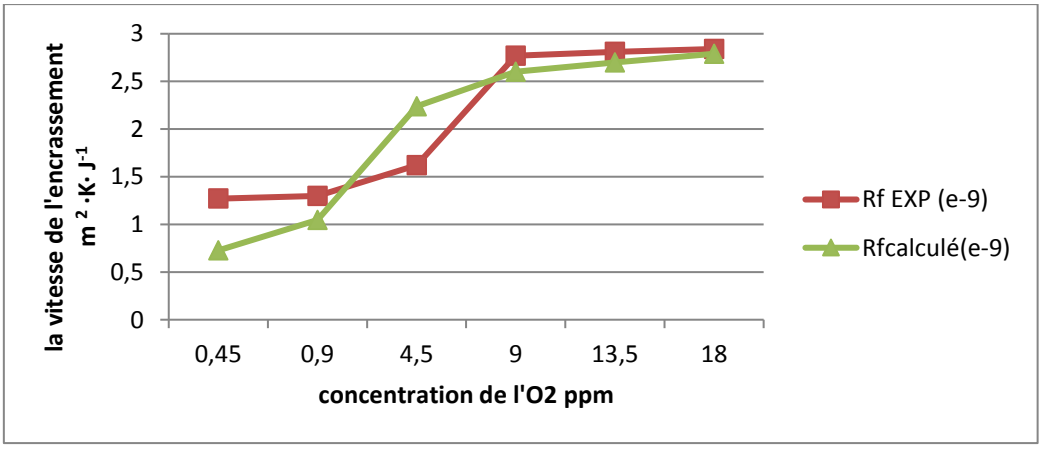


Figure III.3. : Validation du modèle de la formation et la déposition des gommes insolubles.

Pour les concentrations supérieures à 9 ppm les valeurs de R_f calculées coïncides avec les valeurs expérimentales. Il est à noter que l'écart remarqué pour les faibles concentrations de l'oxygène peut avoir origine aux d'autres type d'encrassement qui devient prédominant et ils ne sont pas inclue dans le modèles de calcule.

IV. Organigramme

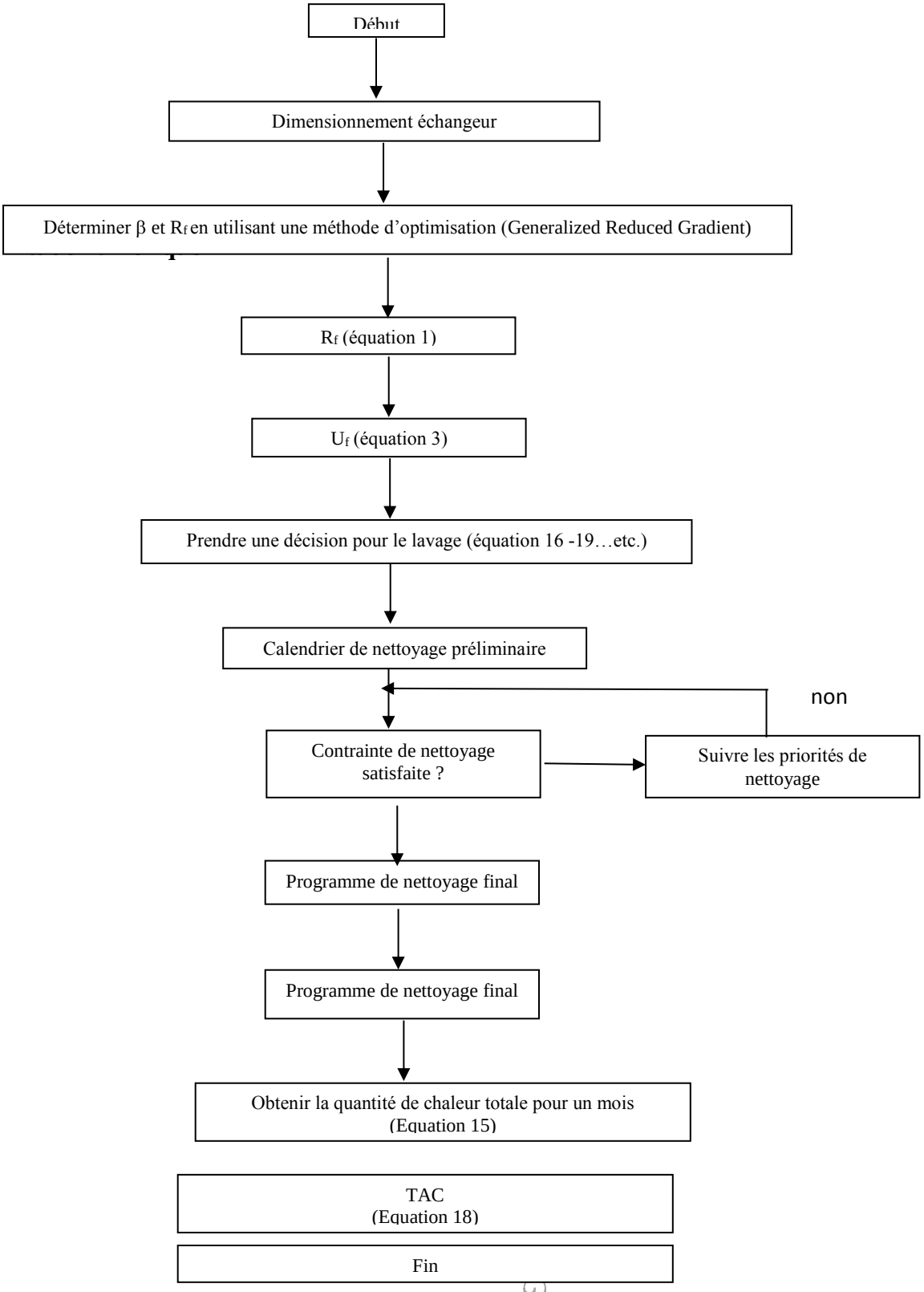


Figure III.4. : Organigramme.

V. 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	Velocity inlet
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. [15].

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	$5\ 10^4$ 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.

VI. Programme Ansys

VI.1. Introduction

Depuis quelques années, l'accroissement de la puissance des ordinateurs et le développement des méthodes numérique ont permis des conduire des calculs tridimensionnels de l'écoulement dans plusieurs configurations, tout en tenant compte de l'effet de la viscosité et de la turbulence. Ce progrès a fait de la modélisation numérique de l'écoulement ou CFD (Computational Fluid Dynamic) un outil de plus en plus important pour le développement et l'optimisation du dimensionnement de différents procédés industriels.

Dans ce document on présentera deux outils de simulation numérique qui peuvent être utilisé indépendamment l'un de l'autre. Le premier est le logiciel Ansys ICEM CFD qui est utilisé pour le dessin de la géométrie et la génération du maillage. Le deuxième est le code Ansys CFX qui permet la simulation numérique de l'écoulement ; l'utilisation du pré-processing, la résolution et la poste-prossecing [16].

VI.2. Définition d'Ansys

Ansys est un code éléments finis d'usage général dédié à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physique en général et de mécanique en particulier. Ces problèmes portent notamment : analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire), transfert de chaleur, dynamique des fluides, acoustique, électromagnétique [17].

VI.3. Ansys CFD

La CFD "Computational Fluide Dynamics" (ou Dynamique des Fluides Numérique), est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert

thermique. Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides, résolues par des méthodes numériques [18].

VI.4. Ansys CFX

CFX est un logiciel général de simulation numérique d'écoulements en mécanique des fluides et transfert thermique. Ce logiciel permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul. Il est divisé en 4 modules : ICEM, CFX-pre, CFX-solver et CFX-post. Chaque module a une utilisation bien spécifique [19].

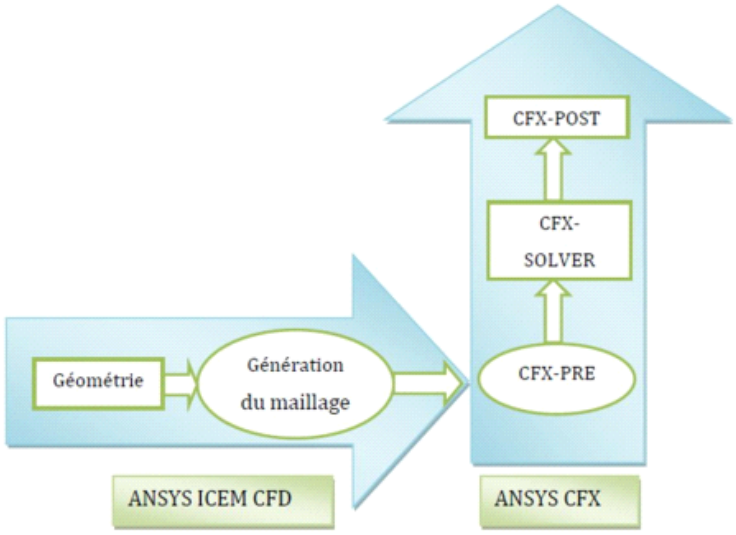


Figure III.5. : Les principaux modules des deux logiciels Ansys ICEM & CFX.

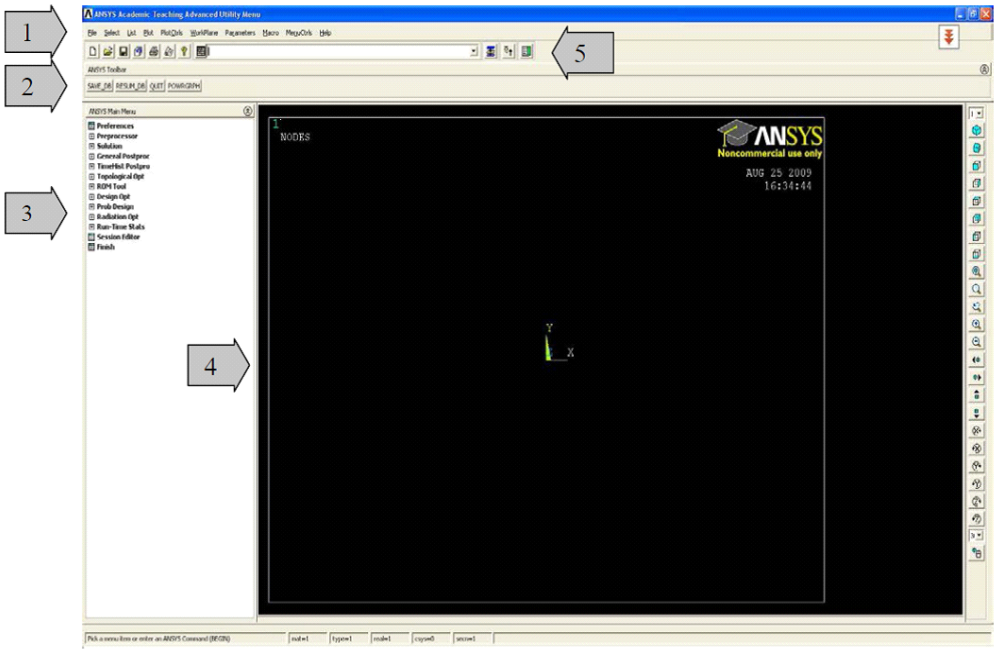


Figure III.5. : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI).

- **Menu de service** : Ici vous pouvez accéder et ajuster les propriétés de votre session, tels que fichiers, liste et graphique de contrôle.
- **Barre d'outils** : Boutons pour les commandes couramment utilisées.
- **Menu principal** : Ici vous pouvez trouver les processeurs utilisés lors de l'analyse de votre problème.
- **Fenêtre graphique** : Dans la fenêtre graphique votre modèle s'affiche, éléments, la géométrie, la visualisation des résultats et ainsi de suite
- **Fenêtre de saisie** : Vous pouvez taper des commandes dans la fenêtre de saisie.

De façon générale, une résolution par éléments finis comporte trois étapes

Pré- processor :

La phase de préprocesseur est celle ou sont spécifiées les données. L'utilisateur peut choisir le système de coordonnées et le type d'éléments, définir des constantes et des propriétés de matériaux, créer des modèles solides et les mailler, ainsi que définir des équations de couplage et contraintes, l'utilisateur peut aussi exécuter un programme qui lui indiquera la taille des fichiers générés, la mémoire nécessaire, le temps d'exécution et le wavefront nécessaire. Le maillage peut être de 3 types :

- maillage conforme (seulement des briques)
- maillage libre (tétraédrique)
- maillage adaptatif (itératif)

- **Solveur**

Le type d'analyse sélectionné détermine les équations qui seront utilisées par le solveur .les catégories disponibles incluent :

- Structure, thermique, champ EM, champ électrique, électrostatique, fluides, acoustique.
- Champ couplés : ceci signifie qu'il est possible de résoudre simultanément plusieurs aspects (par exemple, la thermomécanique, l'hydromécanique, thermo-fluidique, etc).

- **Post-processor :**

C'est la phase ou l'utilisateur peut manipuler les résultats de la phase précédente et les visualiser interactivement ou faire des sauvegardes pour impression et/ou vidéo.

Les points forts des outils ANSYS :

Une interface WORKBENCH intuitive et très facile à prendre en main.

- L'associativité avec tous les outils CAO 3D disponibles sur le marché.
- La possibilité de communiquer avec tous les logiciels CAO du marché : en format natif avec Catia V4 et V5, Solid Edge, NX-Unigraphics, Pro/Engineer, SolidWorks, Autodesk Inventer et Mechanical Desktop, et par l'intermédiaire de passerelles Acis et Parasolid intégrées avec tous les autres produits.

- Des notes de calcules automatiques.

- Des meilleurs robustes.

- Des outils de convergence automatique.

- Une gestion automatique des assemblages et des contacts.

- La possibilité d'avance progressivement dans la complexité des phénomènes traités.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

I. Introduction

La présente contribution porte sur l'analyse numérique de l'encrassement dans un ensemble d'échangeurs de chaleur tubulaire qui composent une batterie d'une raffinerie de pétrole brut.

La géométrie considérée est celle d'un échangeur tubulaire, entièrement 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 principalement sous l'effet de la température de nature isolante thermiquement, est formé sur les surfaces d'échanges du canal. C'est le phénomène d'encrassement.

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 supposées 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 principal du modèle est de montrer que la résistance thermique d'encrassement peut suivre le modèle générale de base de Kern et Seaton.

Dans cette étude, pour des considérations pratiques et par manque de temps surtout, nous allons considérer uniquement la première batterie d'échangeurs de chaleur tubulaires de la raffinerie considérée. Elle est composée des échangeurs HE-01, HE-02, HE-03 et HE-04 et qui a été présentée dans le chapitre précédent. Il est à noter que la raffinerie est composée de trois batteries avec un total de onze échangeurs tubulaires.

II. Evolution de la température dans un échangeur tubulaire

L'évolution de la température sans encrassement est présentée sur la figure IV.1 et ce pour différentes positions en fonction de l'épaisseur du tube. La température est constante pour une section donnée et augmente près des parois en raison des échanges thermiques avec le fluide chaud généralement le brut traité sortant par soucis d'économie d'énergie.

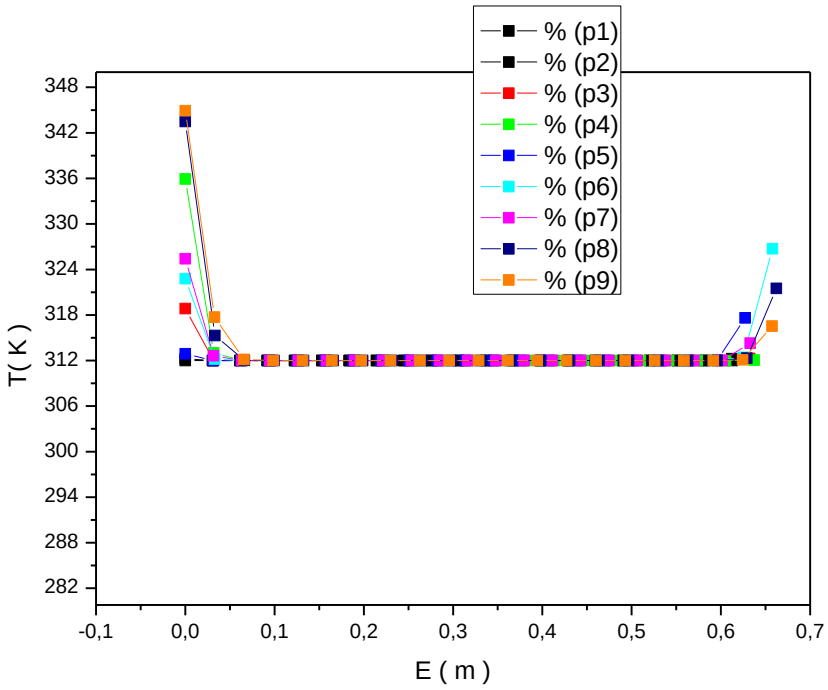


Figure IV.1. Evolution de la température dans un échangeur tubulaire en fonction de l'épaisseur de l'échangeur sans encrassement

L'évolution de la température avec encrassement est présentée sur la figure IV.2 et ce pour différentes positions en fonction de l'épaisseur du tube. Une même allure est observée. La température est constante pour une section donnée et augmente près des parois en raison des échanges thermiques mais les valeurs sont moindres en raison de la présente de dépôt de nature isolante.

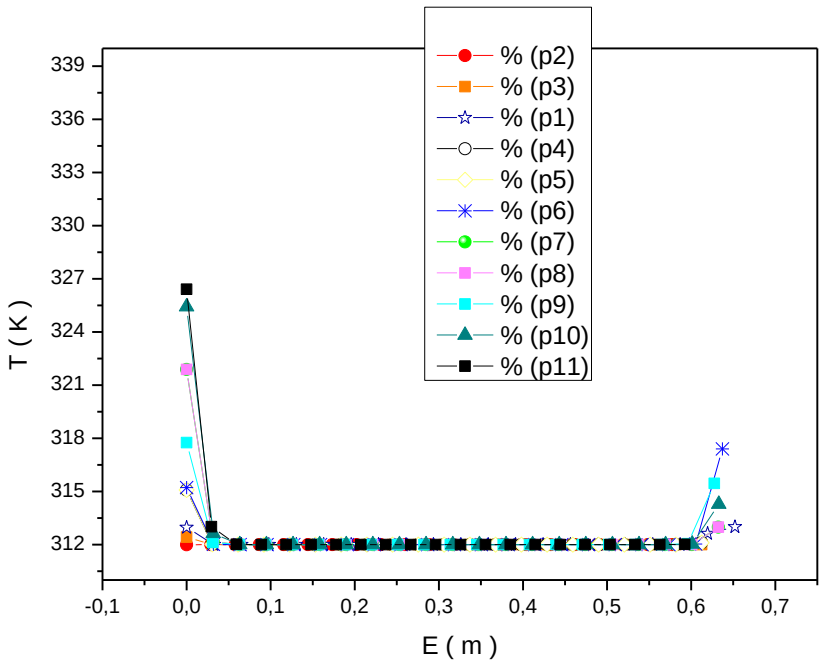


Figure IV.2. Evolution de la température dans un échangeur tubulaire en fonction de l'épaisseur de l'échangeur avec encrassement

III. Evolution de la température en fonction du temps : Exemple échangeur HE-01

L'évolution de la température en fonction de temps est représentée sur la figure IV.3 et ce pour l'échangeur HE-01 de la batterie considérée pris comme exemple. Sans intervention du processus de lavage des surfaces encrassées, on observe une diminution de la température sur les parois en raison de la formation de l'encrassement de nature isolante mais elle est fréquentielle avec le cas de présence d'intervention du lavage. Ce dernier est déclenché à chaque fois qu'une chute ($U=0.9U_O$) du coefficient d'échange global est observé. Le but et de reprendre la qualité de l'échange thermique optimale sans encrassement.

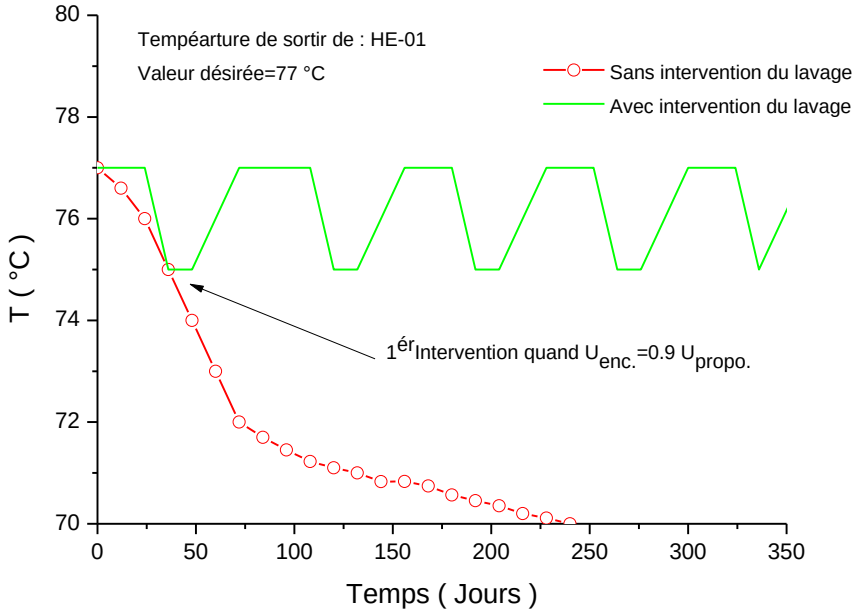


Figure IV.3. Evolution de la température en fonction du temps : Exemple échangeur HE-01

IV. Evolution de la résistance thermique d'encrassement

IV. 1. Calcul du paramètre Beta du modèle de Kern Seaton

L'évolution de la résistance thermique de l'encrassement dans un échangeur de chaleur tubulaire est donnée dans la figure IV.4 en fonction du coefficient Beta du modèle de Kern et Seaton. Le calcul de ce paramètre se fait par la méthode GRD (Generalized Reduced Gradient). C'est une méthode utilisée pour résoudre les systèmes non linéaire en se basant sur la racine moyenne quadratique minimale. Cette méthode itérative est intégrée dans le programme principal en fonction de la résistance thermique d'encrassement.

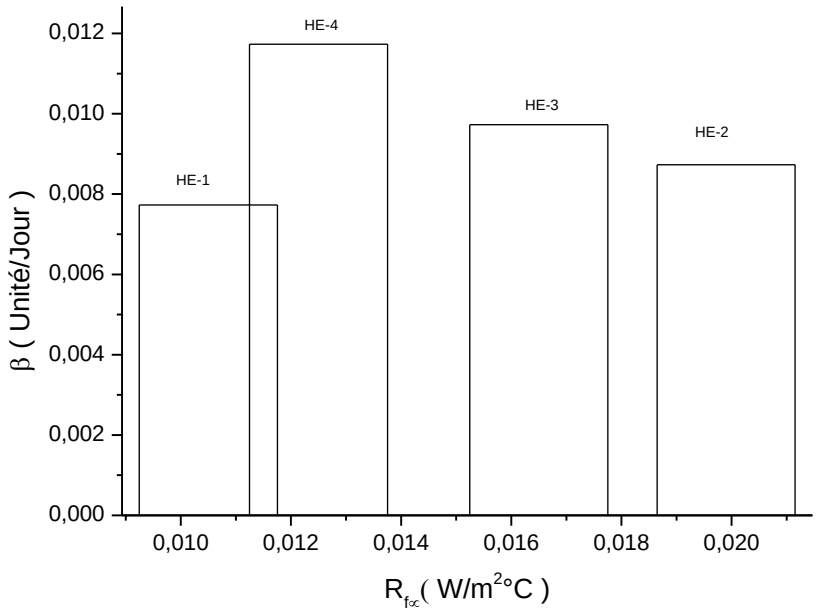


Figure IV.4. Calcul du paramètre beta du modèle de Kern Seaton

Selon le graphique, il semble que la valeur du coefficient bêta augmente avec la température. Cette dernière augmente d'un échangeur à un autre d'une même batterie en raison de l'échange thermique. Par contre, il reste difficile d'expliquer la variation du coefficient bêta avec la résistance thermique d'encrassement en raison probablement de la complexité et l'interdépendance des phénomènes ayant lieu, en particulier l'intervention du processus de lavage au cours du chauffage.
La valeur du coefficient bêta est faible dans le premier échangeur, elle est de 7,8 (unité/jour) et augmente progressivement dans le deuxième échangeur et atteint une valeur de 8,9 (unité/jour). Elle augmente encore dans le troisième et atteint une valeur de 9,7 (unité/jour). Elle est maximale pour le quatrième échangeur 11,7 (unité/jour).

IV.2. Echangeur HE-01

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement pour l'échangeur HE-01 est présentée sur la figure IV.5 en fonction du temps. Une augmentation progressive de la résistance thermique d'encrassement est observée en fonction du temps pour atteindre ensuite une valeur asymptotique. La couche isolante, responsable de la création d'une résistance thermique supplémentaire, se forme progressivement avec l'augmentation de la température au fur et à mesure que le fluide avance dans l'échangeur. La forme observée est conforme au modèle asymptotique de base de Kern et Seaton selon l'équation :

$$R_{f(t)} = R_{\infty t}\left(1 - \exp^{-\beta \times t}\right)$$

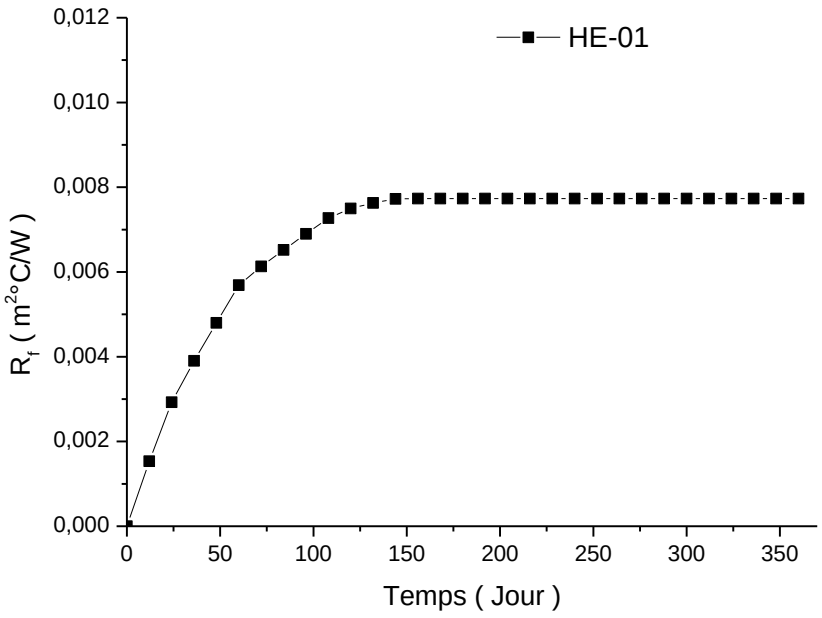


Figure IV.5. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-01 de la première batterie de la raffinerie

IV.3. Echangeur HE-02

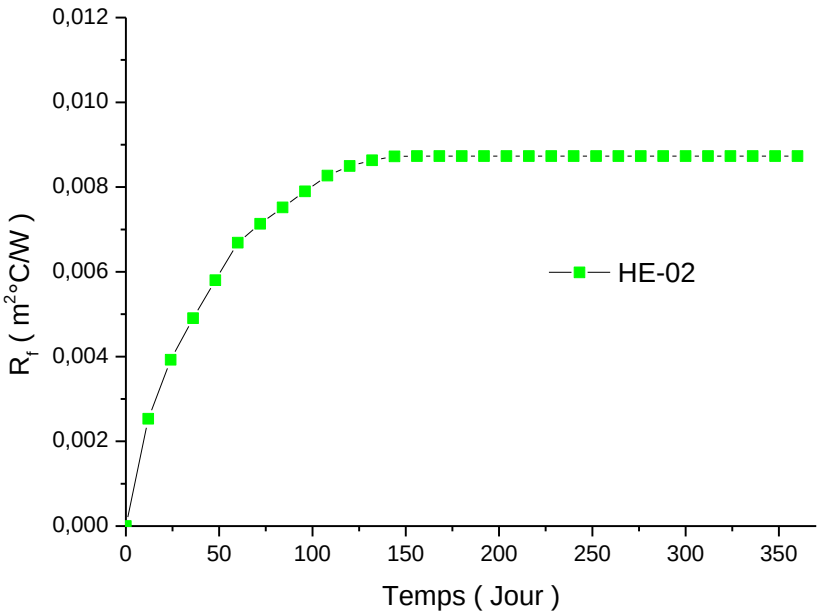


Figure IV.6. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-02 de la première batterie de la raffinerie

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement pour l'échangeur HE-02 est présentée sur la figure IV.6 en fonction du temps. La même allure que celle observée pour l'échangeur HE-01 est observée. La même explication est ainsi avancée. On remarque, en plus, que la valeur asymptotique pour cet échangeur (HE-02) est légèrement plus grande que celle observée pour le premier échangeur (HE-01). Ceci est dû à des valeurs de températures plus élevées qui donnent des résistances thermiques plus importantes.

Les mêmes observations sont constatées pour les échangeurs suivants HE-03 et HE-04 de la même batterie. Les évolutions des résistances thermiques d'encrassement pour les échangeurs HE-03 et HE-04 sont présentées sur les figures IV.7 et figure IV.8 en fonction du temps.

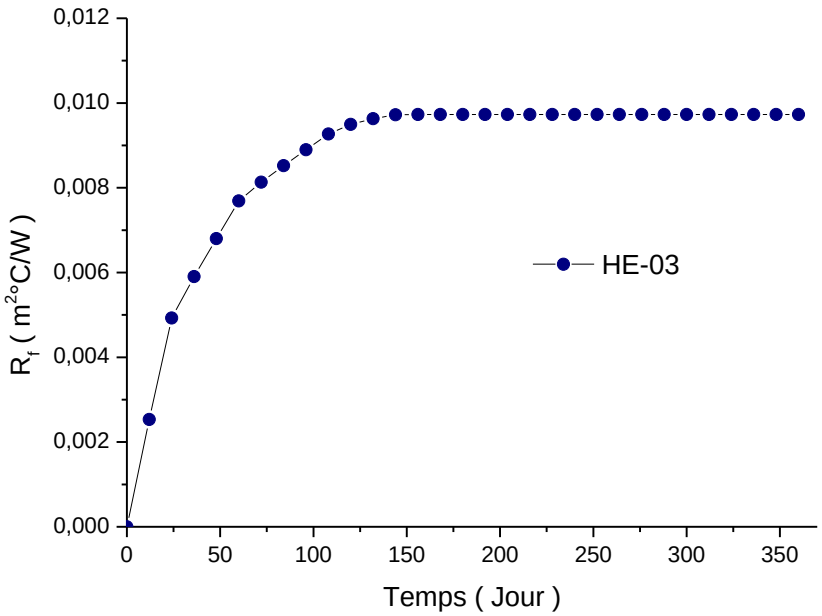


Figure IV.7. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-03 de la première batterie de la raffinerie

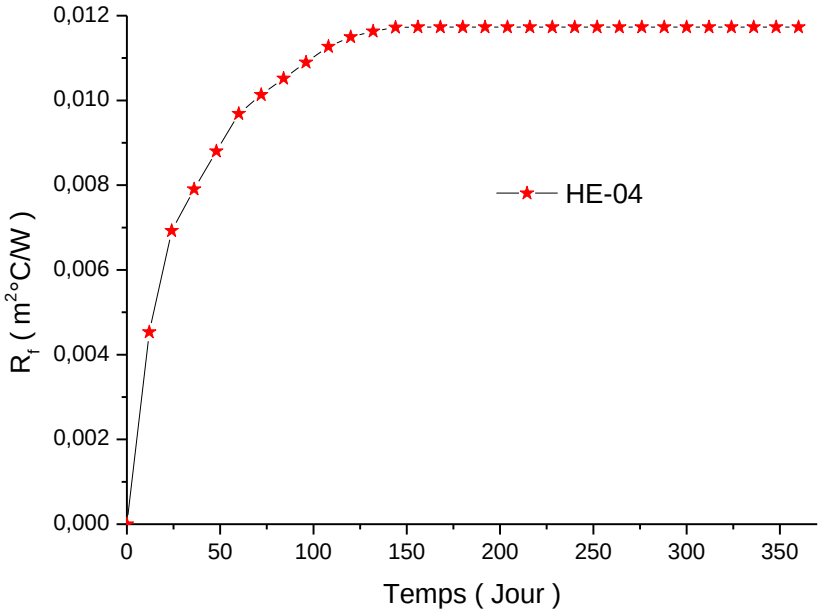


Figure IV.8. Evolution de la résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-04 de la première batterie de la raffinerie

IV.4. Etude comparative entre les échangeurs de la batterie

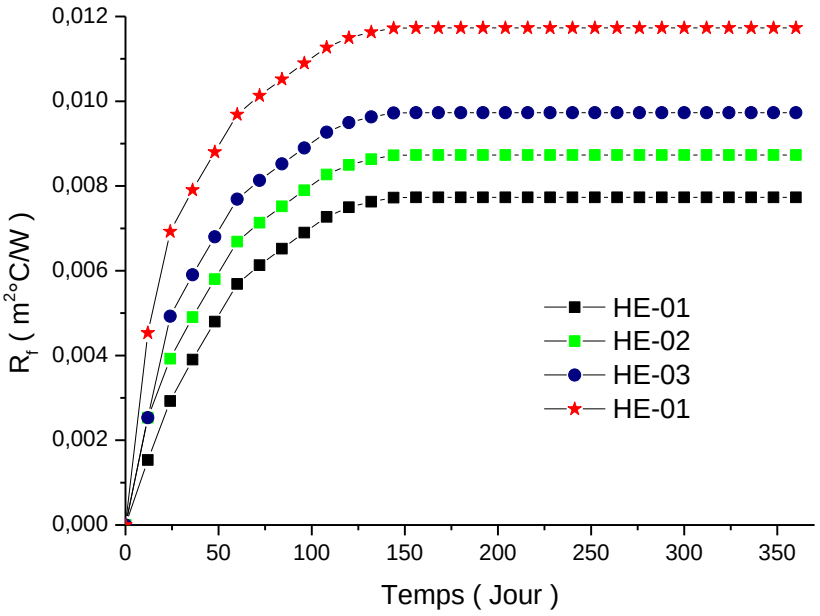


Figure IV.9. Evolution comparative de la résistance thermique d'encrassement dans les échangeurs de la première batterie de la raffinerie

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement pour les échangeurs tubulaires de la première batterie de la raffinerie est présentée sur la figure IV.9 en fonction du temps. Une augmentation progressive de la résistance thermique d'encrassement est observée en fonction du temps pour atteindre ensuite une valeur asymptotique pour l'ensemble des échangeurs de la batterie. Il semble selon le graphique que la résistance thermique d'encrassement augmente avec la température. Cette dernière augmente au fur et à mesure que le brut avance dans la batterie d'un échangeur à un autre (HE-01→HE-04) en raison des échanges thermiques avec le brut traité sortant de la raffinerie. La couche isolante, responsable de la création d'une résistance thermique supplémentaire, se forme

progressivement avec l'augmentation de la température au fur et à mesure que le fluide avance dans l'échangeur.

V. Evolution du coefficient d'échange global dans une batterie

L'évolution du coefficient d'échange global de la batterie de la raffinerie est présentée sur la figure IV.10 en fonction du temps. La figure montre une diminution du coefficient d'échange global en fonction du temps et ce en raison de la formation d'une couche encrassente de nature isolante qui empêche les échanges thermiques d'où la nécessite de déclencher le processus de lavage des échangeurs pour reconstituer la surface d'échange propre.

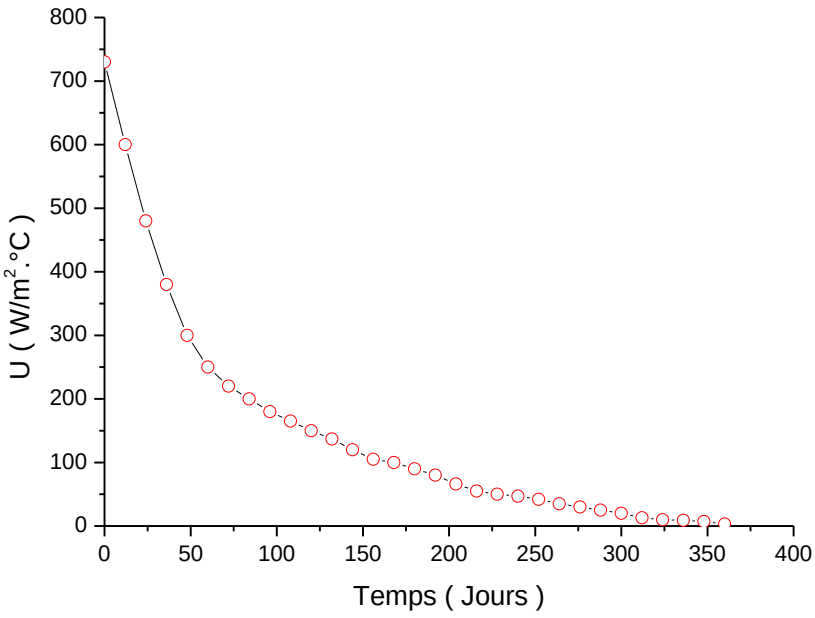


Figure IV.10. Evolution du coefficient d'échange global dans une batterie

IV. Validation du modèle mathématique

La validation du modèle mathématique proposé est présentée sur la figure IV.11. Il semble que le modèle mathématique suit rigoureusement les valeurs expérimentales proposées. Ceci indique que la fiabilité du modèle mathématique est acceptable dans le domaine de l'expérience considérée.

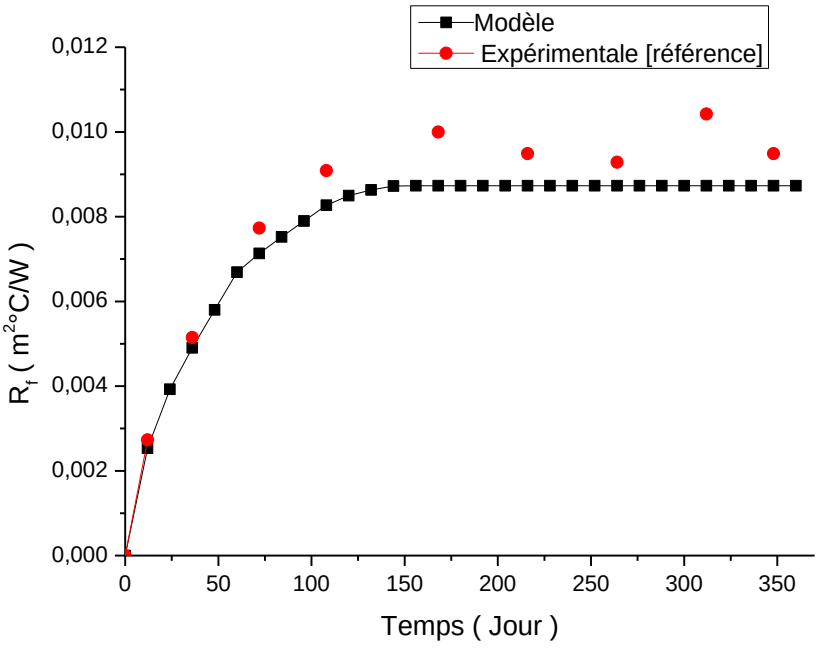


Figure IV.11. Validation du modèle mathématique

V. Conclusion

Un modèle mathématique qui propose le calcul de la résistance thermique d'encrassement a été simulé numériquement avec Ansys Fluent. Le modèle physique concerne le traitement thermique d'un pétrole brut traité dans une raffinerie composé principalement par des batteries d'échangeurs de chaleur tubulaires. Nous avons considérés que le premier groupe d'échangeurs de chaleur à tubes constitué des échangeurs HE-01, HE-02, HE-03 et HE-04 qui composent la première batterie.

A travers ce qui précède, les résultats ont concerné :

- l'évolution de la température en fonction du temps ;
- le développement de la résistance à l'encrassement au cours du temps de divers échangeurs ;
- le calcul du paramètre bêta du modèle de Kern Seton ;
- le coefficient d'échange total dans la batterie et la validation du modèle mathématique.

Les résultats montrent : l'augmentation de la température en raison des échanges thermiques. Elle est moins significative en présence des dépôts en raison de leur nature isolante. Ceci se traduit également par une chute du coefficient d'échange global. Le modèle, validé par des résultats expérimentaux, montre que la résistance thermique d'encrassement suit une loi conforme au modèle basique de Kern et Seaton.

Conclusion Générale

La surveillance des échangeurs de chaleur permet de bien connaître l'évolution de l'encrassement dans un procédé. Le but de cette contribution était d'étudier, le phénomène de l'encrassement formé dans les échangeurs de chaleur au cours du traitement d'un pétrole brut dans une raffinerie, par le suivi de la résistance thermique due à cet encrassement de nature isolante.

Elle a été réalisée par l'emploi d'une simulation numérique d'un modèle mathématique représentant le processus physique qui se développe lors du traitement du brut. Le modèle fournit par la suite, principalement, un calcul numérique de la résistance thermique à l'encrassement à l'aide d'Ansys Fluent. Le modèle physique concerne le traitement thermique du pétrole brut procédé dans une raffinerie constitué principalement de batteries d'échangeurs de chaleur tubulaires. Nous avons considéré uniquement le premier groupe d'échangeurs thermiques tubulaires composé des échangeurs HE-01, HE-02, HE-03 et HE-04 qui constituent la première batterie par manque de temps.

Les résultats ont montré globalement : la température a augmenté dans la batterie en raison de l'échange de chaleur entre les deux fluides qui circulent dans les échangeurs. La qualité de l'échange dépend de la présence ou non de l'encrassement en raison de son caractère isolant. Cela se traduit également par une diminution du coefficient d'échange total dans la batterie en fonction du temps de traitement. Le modèle, qui a été validé par des résultats expérimentaux dans les mêmes conditions de fonctionnement, montre que la résistance thermique à l'encrassement suit une loi cohérente avec le modèle de base de Kern et Seaton. Ce modèle dépend, entre autre, du coefficient Bêta qui a été déterminé par une méthode intégré dans le programme principal. Il semble que sa valeur augmente avec l'augmentation de la température. D'autre part, la variation du coefficient bêta avec la résistance thermique à l'encrassement est encore difficile à expliquer peut-être en raison de la complexité et de l'interdépendance des phénomènes qui se produisent dans le procédé, en particulier l'interférence du processus de lavage. Enfin, globalement la résistance

thermique d'encrassement augmente d'une manière exponentielle en fonction du temps d'un échangeur à un autre de la première batterie avec des taux variables.

Références bibliographiques

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

[2] : Thomas Pedot ; Modélisation du couplage thermique entre la combustion et l'encrassement des tubes d'un four de raffinerie ; Thèse de doctorat de l'université de Toulouse ; 2012.

[3]: Glen N.F., Flynn S.F., Grillot G.M., Mercier P.; Measurement and modelling of fouling on finned tubes. Fouling mechanisms: theoretical and pratical aspects; Eurotherm Seminiar 23; Grenoble France; pp 181-188; 1992.

[4] : Colombano et collab. ; Le polymorphisme mononucléotoide ; The Journal of Infectious Diseases ; Volume 198, numéro 9, 1er novembre ; pp 1415 ; 2008.

[5]: Speight J.G.; The Chemistry and Technology of Petroleum. 5th Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.; 2014.

[6]: Fingas M.; modelling oil and petroleum evaporation ; Journal of petroleum science ; pp 104; 2013.

[7] : Thomas Pedot ; Modélisation du couplage thermique entre la combustion et l'encrassement des tubes d'un four de raffinerie ; Thèse de doctorat de l'université de Toulouse ; 2012.

[8]: A. Epstein; Thinking about Heat Transfer Fouling: A 5×5 Matrix; Department of chemical engineering; University of British Columbia; p 43-56; 1983.

[9] : A. Niaei, J. Towfighi, SM. Sadrameli and R. Karimzadeh ; The combined simulation of heat transfert and pyrolysis reactions in industriel cracking furnaces; Applied Engineering; pp 14-15 ; 2004.

[10] : M. Bennajah et N. Chaouni ; Echangeur de chaleur Technologie ; calcul et design ; pp 43-45 ; Mai 2014.

[11] : N. Fadel ; Etude de l'influence de la température du fluide sur la performance d'un échangeur de chaleur de la raffinerie d'Alger, Ingénieur d'état en génie chimique ; Université Houari Boumediene Alger Algérie ; 2010.

[12]: L. Oufer, A. Mouheb, F. Boukhelfa ; Fouling of a shell and tube preheat in refinery plant ; International congress of chemistry and production ; Parha ; Czech Rep ; ; 2000.

[13]: HARCHE R, A. Mouheb, Absi R.; The fouling in the tubular exchanger of Algiers Refinery ; Heat and masse trasfer ; pp 144-150; 2014.

[14] : Gerald A. ; Lambourn M., Derrieu M. ; encrassement dans les tains de préchauffage de pétrole brut ; DOI : 10.1615/ICHMT.1988.20thAHT.280 ; 1988.

[15]: Z. A. Cengel, K. J.; Mc Grew Hill Bell & A.C. Mueller ; Wolverine Engineering Transfert ; Wolverine Tube ; 2002.

[16] : Slimane T ; La remise en services de l'échangeur E1505 comme palliatif à l'arrêt de la colonne de stabilisation DA4501 ; projet de formation d'induction ; p 52, 2014-2015.

[17]: Incropera F.P. ; De Witt D.P. ; Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley & Sons, 1990.

[18]: Sacadura J, F., Initiation Aux Transfert Thermiques ; Edition Lavoisier ; Et Ozisik M. N. ; Heat Conduction ; Editions John Wilyand Sons, New-York ; 1993.

[19] : Yunus A.; çengel ; Heat Transfer ; Chapitre 13 ; Deuxième édition, 2002.

[20] : Taourit F. ; Etude du comportement thermique de deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes) ; 2013.

[21]: Cengel, Y. E A.; Heat and mass transfer: apractical approach, 3e édition, Mc Graw-Hill, 2006.

[22]: Sacadura J. F. ; Initiation Aux transferts thermiques, Edition Lavoisier, Et Ozisik M.N.; Heat Conduction, Editions John Wilyand Sons ; NewYork ; 1993.

[23] : Yves J. ; Généralité sur les transferts de chaleur, 2003.

[24] : Marvillet C. , Manificat A. , Berradan N. , Weber C. ; E. Book Tome 1; 2014.

[25] : Bontemps A., Guarrigue A., Goubier C., Huetz J., Marviller C., Mercier P., Vvidil R., Demasles P., Mercier P., Tochon B. ; Guide de l'encrassement des échangeurs de chaleur ; Editions Greth-ISBN : 2-9502555-5-8 ; 2007.

[26] : Shah R. K. ; Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley & Sons ; 2003.

[27]: http://www.normag-glas.de/fr/katalog_neu/prozess/FR-6-WARMEUBERTRAGER_PF-System_140930.pdf, 2020.

[28] : Sall S. ; Introduction général échangeur de chaleur, Mémoire de fin d'étude ; Université Tlemcen ; pp.1-2. 2014.

[29] : Watkinson A.P ; Deposition from Crude Oils in Heat Exchanger ; 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 laoud Berkaoui ; mémoire de magister en génie de procédés ; option Technologie des hydrocarbures ; Université M'Hamed Bougara Boumerdes ; 2013.

[31] : Zabarnik et al. ; Sustainable Aviation Fuel Review of Technical Pathways ; renewal energy ; 2007.

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

[33] : T.R. Bott, L.F. Melo ; Fouling of heat exchangers ; Exp. Therm. Fluid Sci. ; 14 ; pp 315–321 ; 1995.

[34] : Turner C.W. Fouling of nuclear steam generators: fundamental studies, operating experience and remedial measures using ; chemical additives. AECL Nuclear Rev 2:61–88. ; 2013.

[35] : Nancollas et Liu ; Une étude cinétique et orphologique de la croissance ensemencée du sulfate de calcium dihydraté en présence d'additifs ; Journal of Colloid and Interface Science ; 1975

[36] : Encrassement par cristallisation au sel mélangé ; A Helalizadeh, H Müller-Steinhagen... - ... et Traitement: Processus ..., 2000 - Elsevier

[37]: Watkinson A.P. ; Deposition from crude oils in heat exchanger ; Heat Transfer Eng 28:177–184 ; 2007.

[38]: Ebert W., Panchal C.B. ; Analysis of Exxon Crude Oil-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., Pugh S.J. ; Evaluation of Laboratory Crude Oil Threshold Fouling Data for Application to Refinery Pre-heat Trains ; Appl. Therm. Eng. ; **22**(7): 777–788 2002.

[40]: Sanaye S., Niroomand B. ; Simulation of Heat Exchanger Network (HEN) and Planning The Optimum Cleaning Schedule ; Energy Convers ; Manage. ; 48 (5) : 1450–1461.

[41]: Biyanto T.R., Khairansyah M.D., Bayuaji R., Firmanto H., Haksoro T. ; Imperialist Competitive Algorithm (ICA) for Heat Exchanger Network (HEN) Cleaning Schedule Optimization ; Procedia Computer Science. ; 72: 5–12 2015.

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

[43]: Hughes-Hallett D. ; Calculus Single Variable ; 7th ed. New York: John Wiley & Sons. Inc ; 2017.

[44] : MY Mahmoud, G Bassou, A Taalbi, ZM Chekroun ; Filtres de chute de canal optique basés sur des résonateurs à anneau de cristal photonique - Communications optiques ; 2012.

[45] : Chick Touhami A ; calcul des déformation Elastohydrodynamique dans un papier ; Université yahia fares Médéa ; 2012.

[46]: Chan Y.L, Tien ; A numerical study of two-dimensional laminar natural Convection in shallow open cavities ; International Journal of Heat and Mass Transfer ; 28 ; pp 603-612 :1985.

[47] : Tabet S. ; Etude numérique de la convection naturelle dans un enceinte fermée partiellement chauffée ; thèse Dr ; thermique et mécanique des machines industrielles ; Université d'Oran – Algérie ; 2017.

[48] : Guit M. ; Loues B. ; Simulation Numérique de l'impact des gouttelettes de métal creuses sur une surface incliné ; Master en génie mécanique ; Université Dr, Yahia Farés Médéa ; 2103.

[49]: I. Kerraoui, A. Mouheb, Y. Mahdi ; Numerical modeling of thermal fouling in the preheat train of Algiers Refinery ; ISIEAM'2018 ; 23-24 Octobre 2018 ; Université 20 Août 1955-Skikda.

Annexes

Démentions de l'échangeur tubulaire simulé au programme ANSYS à laprésence d'un d'une raffinerie de pétrole brut.

e = Epaisseur de la tubes e = 0.019 m

d = diamètre tube =diamètre entre les deux tube Dent = 0.75 m

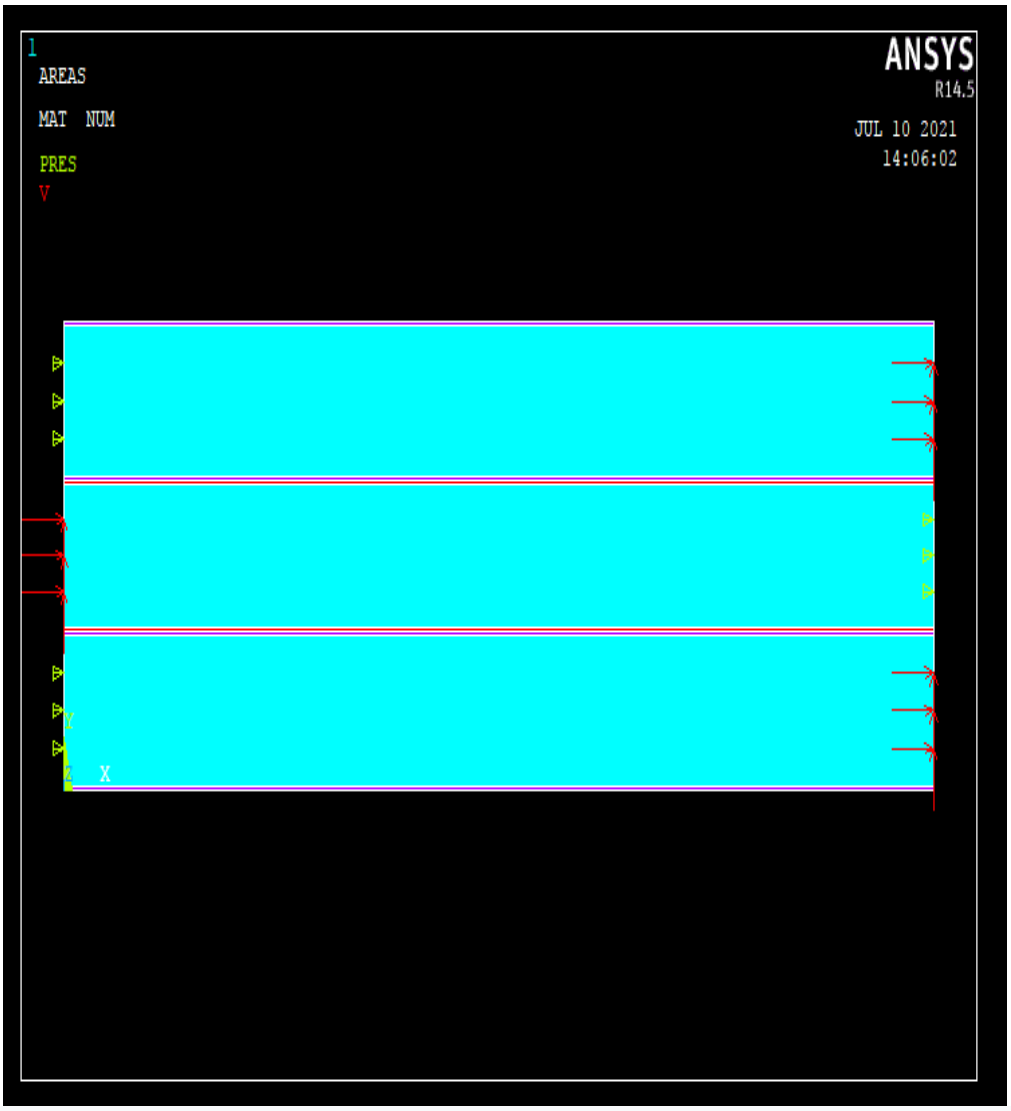
y = 1.25 m

		Paramètre du pétrole brut	**Paramètre du l'eau**	**Paramètre d' Asphaltène**
Chaleur spécifique CP		3000	1600	1600
Masse volumique		966	983.84	1200
Viscosité		0.002	0.2	/
Conductivité		0.63	0.68	310
Conditionau limite	**Vitesse**	0.55	-0.55	/
	Température	77.5	122	/
	Pression	0	0	/

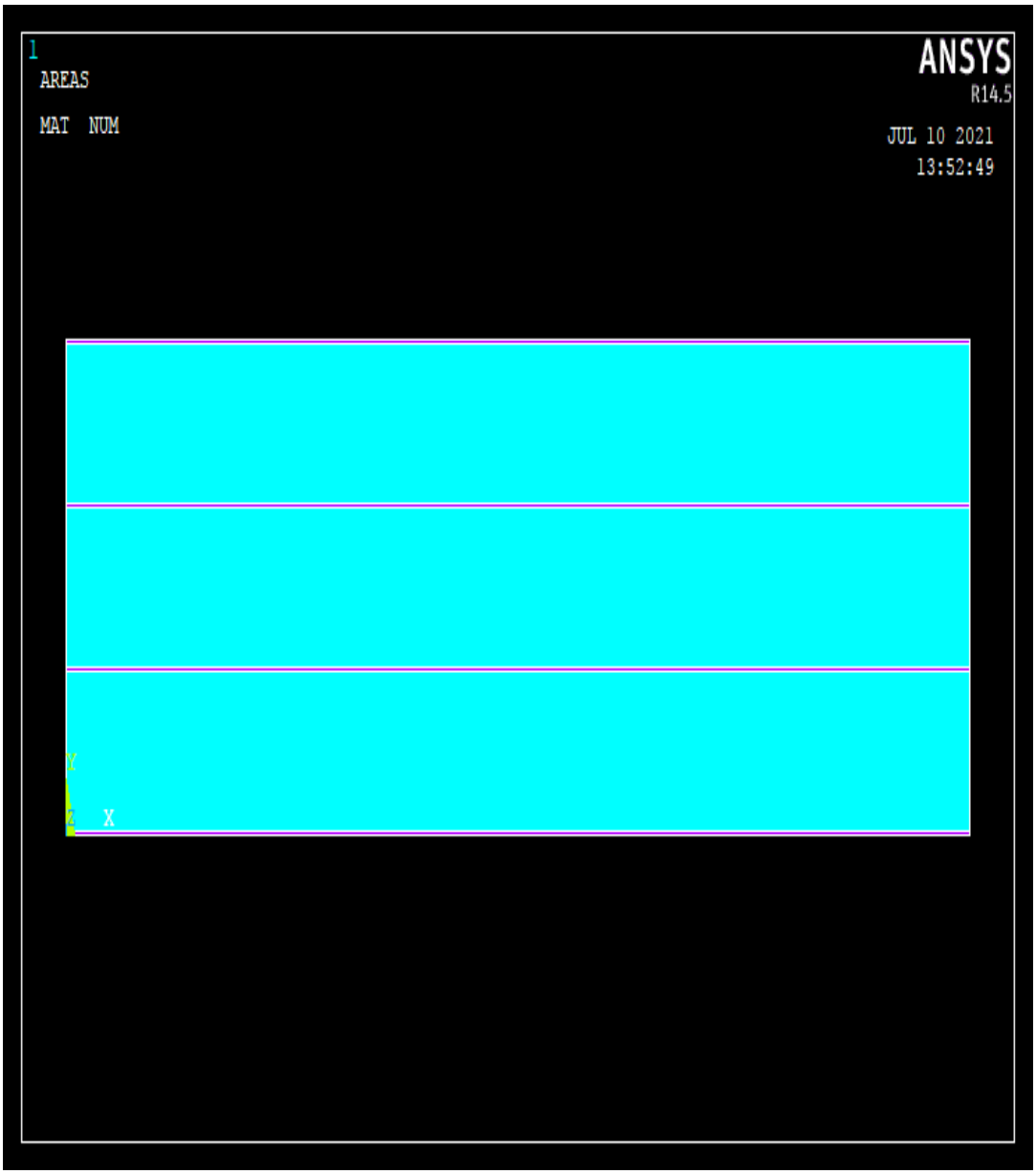
Les propriétés du pétrole brut Algérien et des espèces du modèle sont présentées dans le Tableau

	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

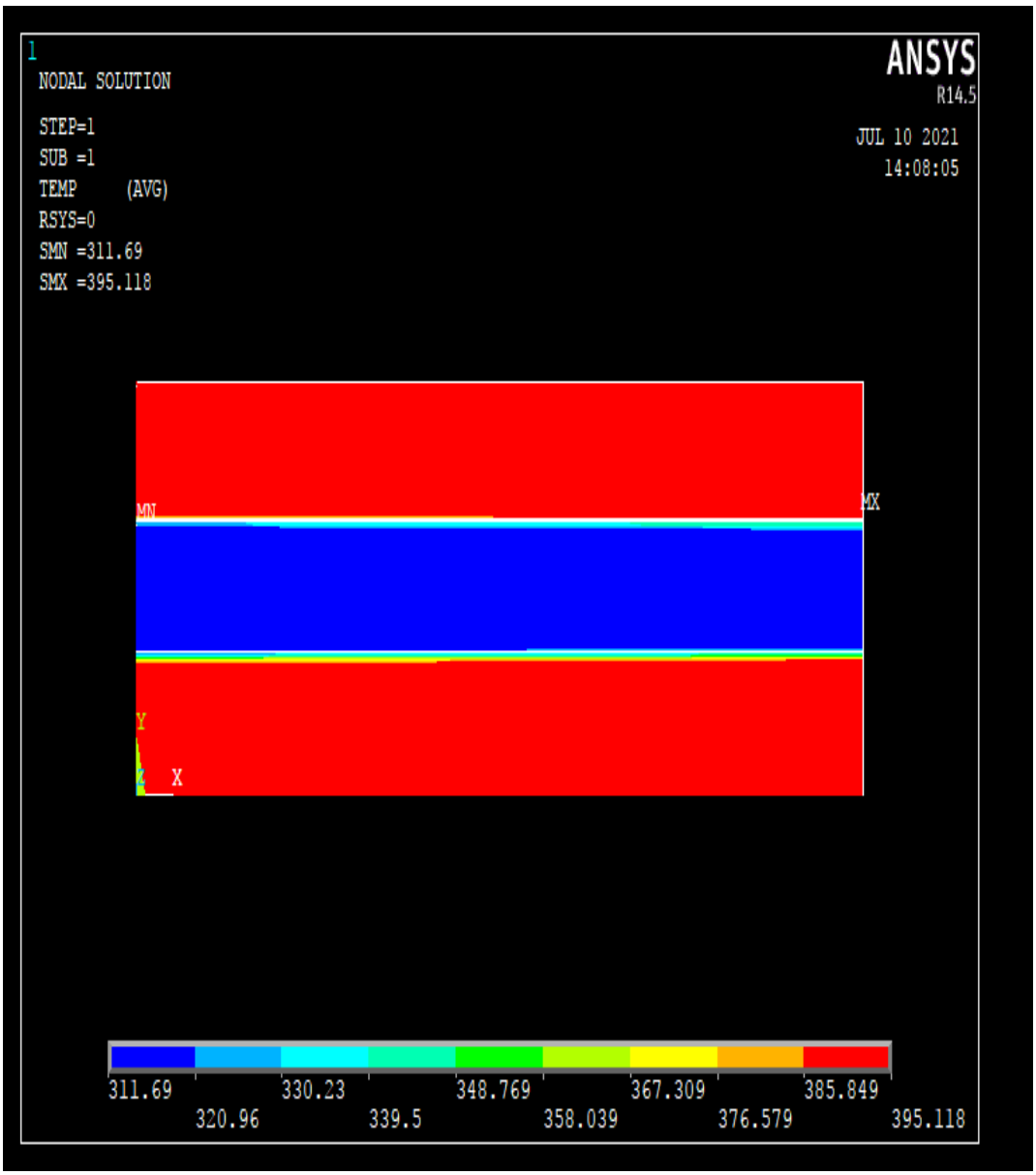
Géométrie d'encrassement.



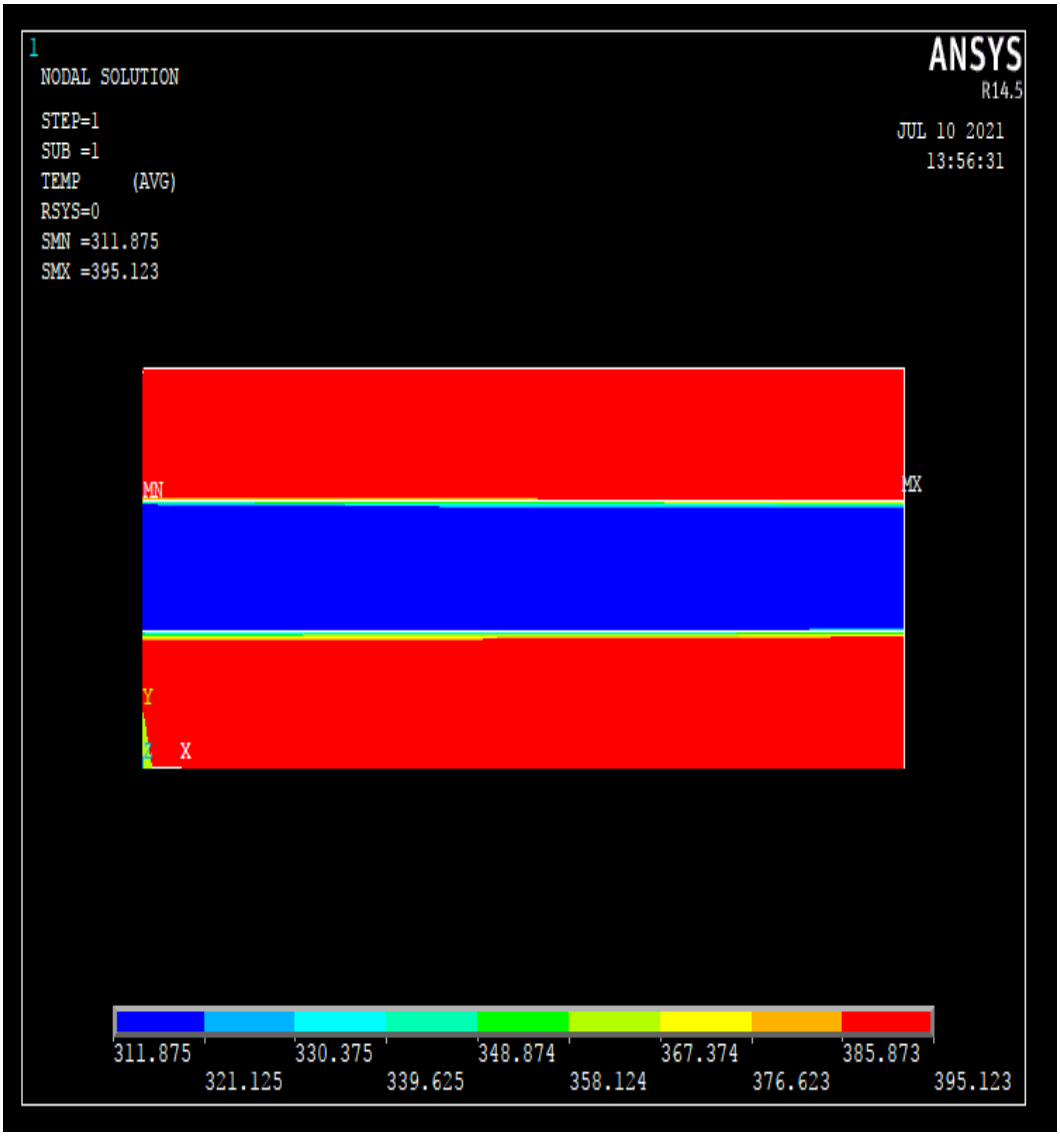
Géométrie sans d’encrassement .



température avec encrassement .

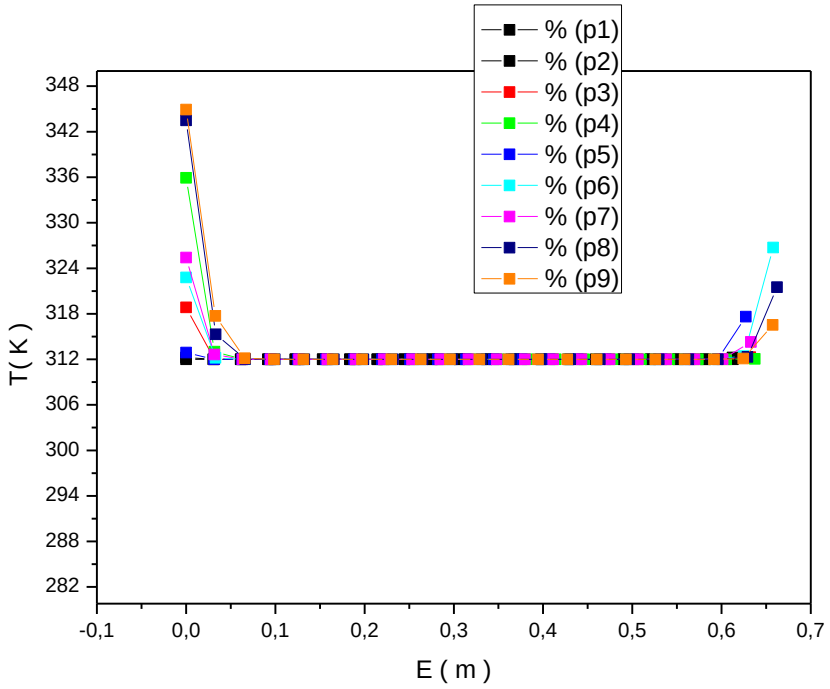


température sans encrassement .



Evolution de la température dans un échangeur tubulaire .

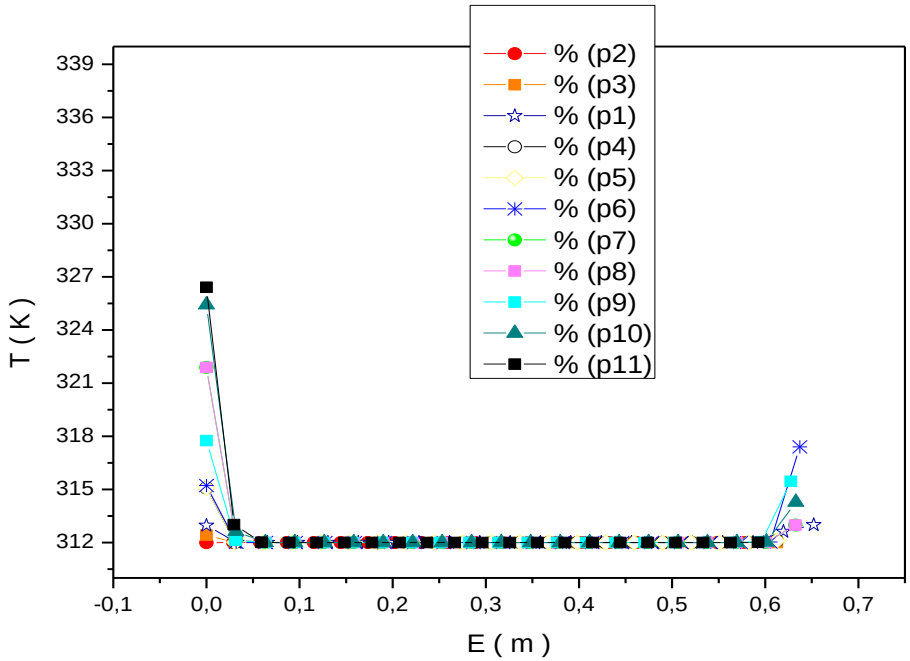
Evolution de la température dans un échangeur tubulaire (Y) en fonction de l'épaisseur de l'échangeur sans encrassement (X) pour le pétrole brut .



Variation de température de (K) en fonction de l'épaisseur de l'échangeur sans encrassement (m) en différentes positionsY(K).

Evolution de la température dans un échangeur tubulaire (Y) en fonction de

l'épaisseur de l'échangeur avec encrassement (X) pour le pétrole brut .

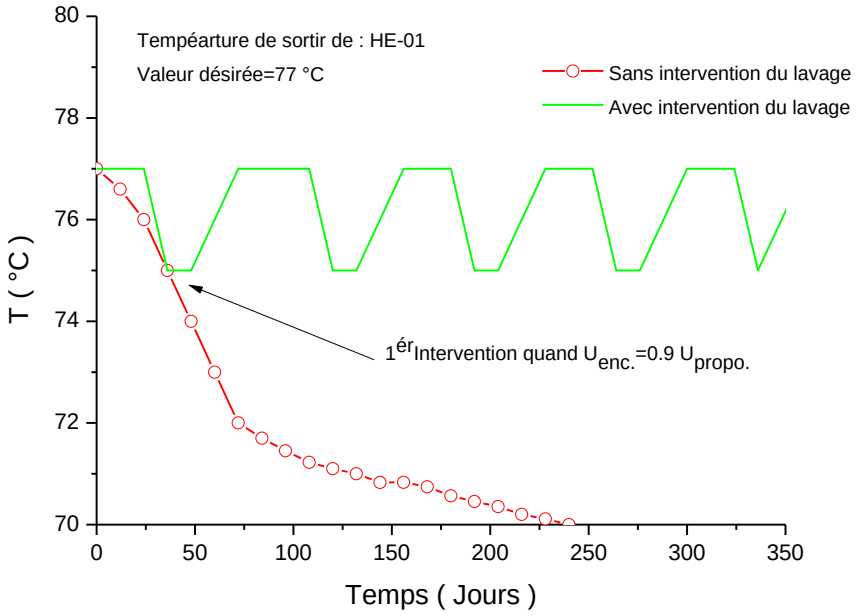


Variation de température de (K) en fonction de l'épaisseur de l'échangeur sans encrassement (m) en différentes positionsY(K).

Evolution de la température en fonction du temps : Exemple échangeur HE01

L'évolution de la température de la batterie considérée pris comme exemple (Y) en fonction du temps (X) .

($U=0.9U_O$)



-Ce dernier est déclenché à chaque fois qu'une chute ($U=0.9U_O$) du coefficient d'échange global est observé

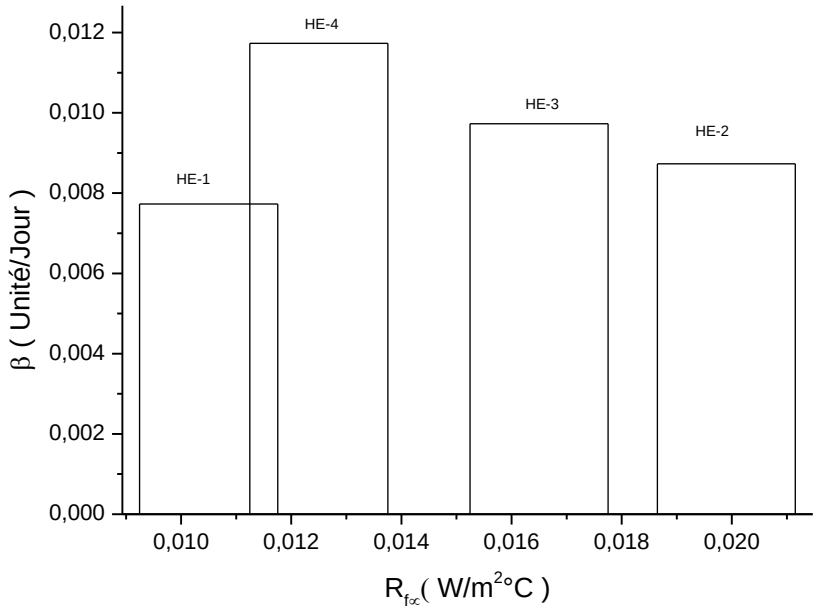
Variation de température de (C°) en fonction du temps (JOURS) en différentes positions

Y(C°) .

Evolution de la résistance thermique d'encrassement

- Calcul du paramètre Beta du modèle de Kern Seaton

-L'évolution de la résistance thermique de l'encrassement dans un échangeur de chaleur tubulaire (X) en fonction du coefficient Beta du modèle de Kern et Seaton (Y) .

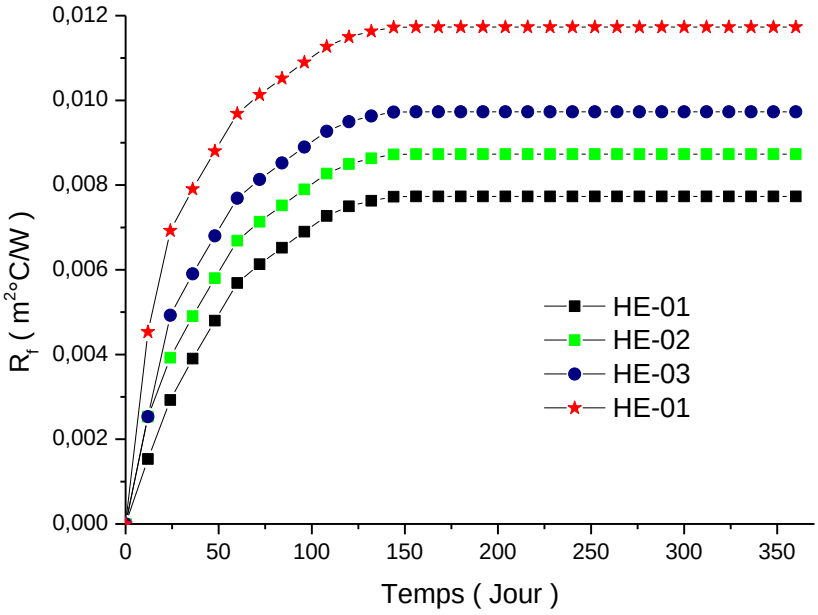


Variation de résistance thermique de (W/m^2 ^{0}C) en fonction du coefficient Beta du modèle de Kern et Seaton (Unite / JOURS) en en quatr échangeur .

Etude comparative entre les échangeurs de la batterie

-L'évolution de la résistance thermique d'encrassement pour l'échangeurs (Y) en fonction du temps (X)

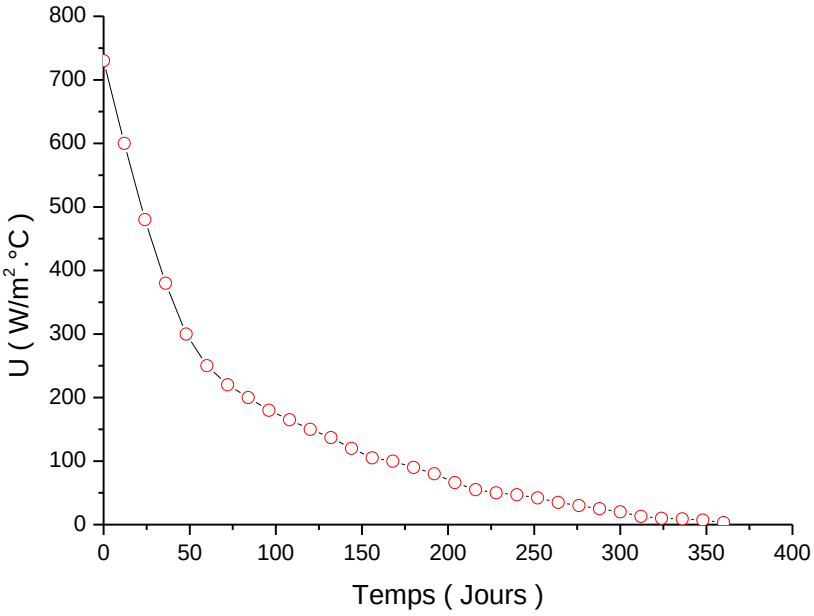
La forme observée est conforme au modèle asymptotique de base de Kern et Seaton selon l'équation : $R_{f(t)} = R_{\infty t}\left(1 - \exp^{-\beta \times t}\right)$



Variation de résistance thermique de ($m^2.^0C/W$) en fonction du temps. (JOURS) en quatr échangeur .

Evolution du coefficient d'échange global dans une batterie

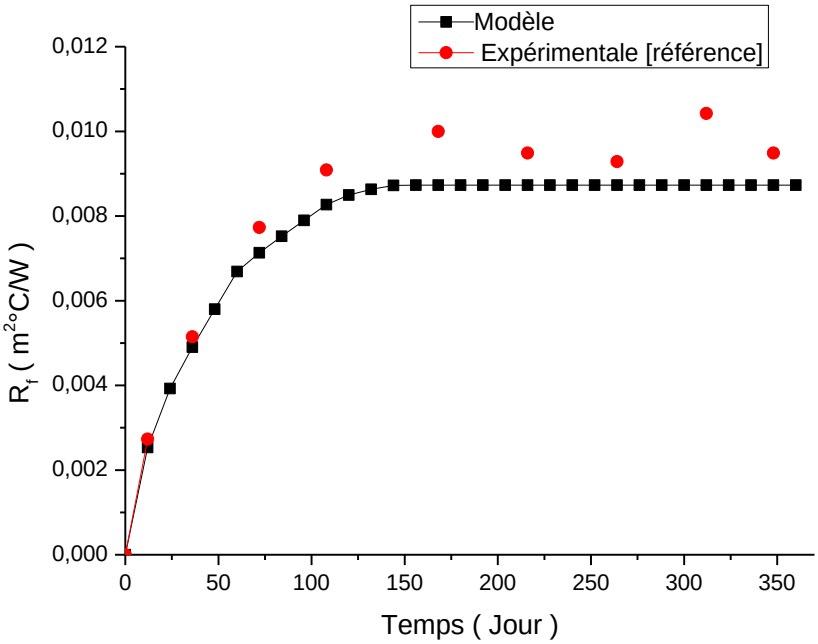
L'évolution du coefficient d'échange global de la batterie de la raffinerie (Y) en fonction du temps (X)



Variation de coefficient d'échange global ($W/m^2.{}^0C$) en fonction du temps (JOURS) dans une batterie **.**

Validation du modèle mathématique

La validation du modèle mathématique proposé est semble que le modèle mathématique suit rigoureusement les valeurs expérimentales proposées (Y) en fonction du temps (X)



Variation de modèle mathématique et les valeurs expérimentales ($m^2.^0C/W$) en fonction du temps (**JOUR**) dans une batterie .