REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département Génie des Procédés et de l'Environnement

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie Chimique

Réalisé par

Chikh Touhami Anfel

Haouari Selma

Evaluation des paramètres thermocinétique d'un processus d'encrassement dû au traitement thermique d'un pétrole brut dans une batterie d'échangeurs de chaleur

Le jury composé de :

M. R. Alouaoui	MCA, FT / UYF	Président
Mme. Y. Zouambia	MCA, FT / UYF	Examinatrice
M. Y. Mahdi	Professeur, FT/UYF	Directeur de Thèse

Année universitaire : 2023 /2024

الملخص
تشكل مشكلة ترسب مواد في مبادلات الحرارة تحديًا كبيرًا في صناعة معالجة النفط الخام، حيث تقلل بشكل كبير من أداء المنشآت وتؤدي إلى خسائر اقتصادية هامة. تتميز هذه الظاهرة بتراكم الرواسب على الأسطح الداخلية للمبادلات، مما يقلل من قدرتها على نقل الحرارة. تشمل العواقب الضارة للترسب انخفاض في الأداء الثرموهيدروليكي، وتدهور في جودة المنتج النهائي، وزيادة في تكاليف التشغيل. لحسن الحظ، توجد طرق وقائية للحد من الترسب وآثاره الضارة. معرفة الوقت المثالي للتدخل أمر حاسم لإدارة فعالة للترسب. تعتمد هذه الدراسة على المحاكاة العددية لتحليل المقاومة الحرارية للترسب في معالجة النفط الخام. يتم تطوير نموذج رياضي مفصل ومحاكاته باستخدام برنامج ANSYS FLUENT. تكشف النتائج المحاكاة المصدقة على مستويين عن زيادة في مقاومة الحرارة للترسب في مبادلات الحرارة للبطارية الثالثة المعتبرة في هذا العمل للوحدة التي تتبع النوع النظريKERN-SEATON ، وانخفاض في معامل النقل الشامل، وزيادة في سرعة التدفق، وانخفاض في قطر مقطع مرور السائل. كما تظهر النتائج خسائر في الضغط تتطلب ضخًا إضافيًا. تظهر دراسة مقارنة أن النتائج المحصلة للبطارية الثالثة تكشف بشكل عام أن الترسب أقل أهمية في هذه البطارية الأخيرة مقارنة بالبطارية السابقة المعتبرة في عمل سابق.
الكلمات المفتاحية: الخام الجزائري؛ المعالجة الحرارية؛ الترسب؛ المحاكاة

Résumé
L'encrassement des échangeurs de chaleur constitue un défi majeur dans l'industrie du traitement du pétrole brut, réduisant considérablement les performances des installations et engendrant des pertes économiques importantes. Ce phénomène se caractérise par l'accumulation de dépôts sur les surfaces internes des échangeurs, diminuant ainsi leur capacité à transférer la chaleur. Les conséquences néfastes de l'encrassement incluent une diminution des performances thermo-hydrauliques, une dégradation de la qualité du produit final et une augmentation des coûts d'exploitation. Heureusement, des méthodes préventives existent pour limiter l'encrassement et ses effets néfastes. La connaissance du moment optimal d'intervention est cruciale pour une gestion efficace de l'encrassement.
Cette étude s'appuie sur la simulation numérique pour analyser la résistance thermique à l'encrassement dans le traitement du pétrole brut. Un modèle mathématique détaillé est développé et simulé à l'aide du logiciel Ansys Fluent. Les résultats de la simulation validés à deux niveaux révèlent une augmentation de la résistance thermique d'encrassement dans les échangeurs de chaleur de la troisième batterie considéré dans ce travail de l'unité qui suit le type théorique Kern-Seaton, une diminution du coefficient d'échange global, une augmentation de la vitesse d'écoulement et une diminution du diamètre de section de passage du fluide. Ils montrent également des pertes de pression qui nécessitent un pompage supplémentaire. Une étude comparative montre que les résultats obtenus pour la troisième batterie révèlent globalement que l'encrassement est moins important dans cette dernière batterie par rapport à la batterie précédente considérée dans un travail antérieur.
Mots clés : Brut Algérien ; Traitement thermique ; Encrassement ; Simulation

Abstract
In the processing of crude oil, fouling in heat exchangers is a serious problem that significantly decreases plant efficiency and results in large financial losses. The formation of deposits on the inside surfaces of the exchangers, which reduces their capacity for heat transfer, is the characteristic that characterizes this phenomenon. Degradation of the end product quality, an increase in operating expenses, and a reduction in thermo-hydraulic performance are some of the negative effects of fouling. Thankfully, there are ways to minimize fouling and its negative consequences. Effective fouling management requires knowing the right moment to intervene. In order to examine the thermal resistance to fouling in the processing of crude oil, this study uses numerical simulation. Ansys Fluent software is used to construct and simulate a comprehensive mathematical model. The simulation results, which are validated at two levels, show that the third battery's heat exchangers, which are based on the theoretical Kern-Seaton model and are under consideration in this work of the unit, have a higher thermal resistance to fouling, a lower overall exchange coefficient, a higher flow velocity, and a lower fluid passage cross-sectional diameter. They also demonstrate pressure losses that call for more pumping. According to a comparison analysis, the third battery's results generally show that fouling is less important in this last battery than it was in the preceding battery that was the subject of an earlier investigation.
Keywords: Algerian crude oil; Heat treatment; Fouling; Simulation

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers **ALLAH**, le tout-puissant, pour la persévérance et la force qu'Il nous a octroyées, nous permettant d'accomplir ce travail jusqu'à son terme.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre respect à **Mr. Youcef MAHDI**, Professeur Docteur à l'Université de Médéa, pour son encadrement bienveillant. Nous lui sommes reconnaissants pour son accueil chaleureux, son soutien constant, sa gentillesse et sa disponibilité tout au long de ce projet, ainsi que pour ses conseils avisés et constructifs.

Nous tenons également à remercier chaleureusement **Mr. Mounir ZIRARI**, Professeur Docteur à l'Université de Médéa, pour son assistance précieuse dans la formation sur le logiciel **Ansys** et pour ses encouragements motivants.

Nos remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont bien voulu juger cette modeste contribution.

Enfin, il nous est impossible de conclure ce mémoire sans témoigner notre gratitude envers l'ensemble des enseignants et enseignantes du département de génie des procédés de l'Université de Médéa. Leur dévouement et leur soutien ont été indispensables tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail A celui qui ma inspire le courage, l'espoir, qui ma protège et qui m'a permis d'atteindre mes objectifs mon très cher père. A celle qui a veillée sur mes dès notre naissance, qui dormit tard et se réveillent tôt avec moi afin de ma encourager et ne pas baisser les bras ma très chère mère. Je les remercie énormément d'avoir était toujours là pour ma soutenir, poussé à donner le meilleur en moi. Que dieu nous les gardent.

A mon frères et mes sœurs : Hadjer , Asmaa , Ahlem , Mohamed taha.

A mes petits neveux : Haithem , Abelhai , Maria , Iyade .

A mes meilleures amies.

A mes tantes et mes oncles A tous mes amies/amis qui étaient la a ma coté tout au long de mon parcours.

Et bien sur mon binôme SELMA

Dédicace

Je remercie tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné le courage et la patience pour accomplir ce travail

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont tout donné, leur amour et leurs sacrifices éternels, avec tout mon amour, ma tendresse et mon estime, je n'arriverai jamais à leurs rendre ce qu'ils ont fait pour moi. Que Dieu vous protège.

À mes chères sœurs : Sara et Maria

À mon cher frère : Mohammed

À ma binôme ma chère : Anfel

A tout les membres de ma famille

Et tous ceux qui m'ont encouragé durant ma vie estudiantine.

Table des matières

Résumés

Remerciements et Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

Introduction générale…… …… 02

Chapitre 1 Généralités sur le pétrole …… 05

I. Introduction…… 06

II. Définition du pétrole brut……06

III. Origine du Pétrole Brut……06

III.1. Origine minérale (inorganique)…… 06

III.2. Origine organique…… 07

IV. Composition des pétroles bruts……..…… 08

V. Classification du pétrole brut……..…… 12

V.1. Classification par Densité à 15°C…… 12

V.2. Classé par coefficient caractéristique KUOP…… …… 13

V.3. Classification par principales propriétés chimiques…… 13

V.4. Selon la valeur API°…… 13

V.5. Selon la teneur en soufre…….....14

VI. Les propriétés physiques du pétrole……. 14

VI.1. La densité……...14

VI. 2. La viscosité…… 14

VI. 3. La solubilité……...15

VII. Les propriétés chimiques…….15

VIII. Le raffinage du Pétrole Brut……..……16

IX. La distillation…… 18

IX.1. La distillation atmosphérique…… 18

IX.2. La distillation sous vide……19

X. Utilisation et importance de pétrole brut…….19

Chapitre 2 Généralités sur les transferts thermiques ……..…… 21

I. Introduction……..... 22

II. Les modes de transfert thermique…… 22

II.1. Transfert de chaleur par conduction……..23

II.2. Transfert de chaleur par rayonnement…… 24

II.3. Transfert thermique par convection…….....26

II.3.1. La convection libre ou naturelle…… 27

II.3.2. La convection forcée…….....28

III. Régime d'écoulement…….……28

III.1. Régime laminaire…….28

III.2. Régime turbulent…… 29

IV. Généralité sur Les échangeurs de chaleur…… 29

IV.1. Introduction…… 29

IV.2. Définition d'un échangeur thermique…… 31

IV.3. Les différentes fonctions de l'échangeur de chaleur…… 31

IV.3.1. La réfrigération……...32

IV.3.2. Le réchauffage…… 32

IV. 3.3. La condensation…… 32

IV.3.4. La vaporisation…… 32

IV.3.5. Le récupérateur de la chaleur…… 33

IV.3.6. L'Humidificateur ou le condenseur partiel…… 33

IV.4. Classement suivant les types d'échange…… 33

VI.4.1. Classement suivant le mode de

transfert de chaleur…… 33

IV.4.2. Classement suivant le procédé de transfert

de chaleur……..... 33

IV.4.3. Classement suivant la nature du matériau

de la paroi d'échange…….34

IV.4.4. Classement selon le type d'échange de fluides…. 34

IV.4.5. Classement selon le type d'écoulement……..35

IV.4.6. Classement selon le type de technologies…….. 38

V.5. Description de l'échangeur tubulaire…… 45

IV. 5.1. La calandre……. 45

IV.5.2. Plaque tubulaire…….. 46

IV.5.3. Faisceau tubulaire……... 47

IV.5.4. Chicane……..... 47

Chapitre 3 Encrassement des échangeurs de chaleur……. 49

I. Introduction…… 50

II. Définition de l'encrassement…… 50

III. Classification de l'encrassement……. 51

III.1. Encrassement particulaire……52

III.2. Encrassement par corrosion…… 52

III.3. L'entartrage…… 53

III.4. Encrassement biologique…… 54

III.5. Encrassement par réaction chimique…….. 55

III.6. Encrassement par solidification…….. 57

IV. Processus d'encrassement…… 57

IV.1. Initiation…… 57

IV.2. Transfert …… 58

IV.3. Fixation……58

IV.4. Élimination…… 58

IV.5. Vieillissement …… 59

V. Classification du dépôt suivant sa nature…… 59

V.1. Dépôts durs…….. 59

V.2. Dépôts poreux……. 60

V.3. Dépôts mous…… 60

V.4. Etude du dépôt…… 61

VI. Paramètres influençant l'encrassement……61

VII. Conclusion…….. 62

Chapitre 4 Modélisation et simulation de l'encrassement…… 63

I. Introduction…….. 64

II. Programme Ansys…… 64

II.1. Introduction…… 64

II.2. Organisation du code CFD…….. 64

II.2.1. Le Préprocesseurs CFD…… 66

II.2.2. Le Solveur…… 67

II-2.3. Le Post – processeur……..... 67

II.3. Les codes de CFD…… 68

II.3.1. Le code Ansys CFX…… 68

II.3.2. Le code Ansys Fluent…… 68

II.4. La méthode numérique…….. 69

II.5. Maillage……..... 69

II.5.1. Maillage structuré……..... 69

II.5.2. Maillage non structuré……..70

II.5.3. Maillage hybride……. 71

III. Présentation de la raffinerie……. 71

III.1. Introduction……. 71

III.2. Présentation de la raffinerie étudiée…….. 71

IV. Mécanisme de l'encrassement par le pétrole…… 72

V. Etude numérique…….. 76

VI. Modélisation d'un échangeur tubulaire…….78

VI.1. Bilan thermique……..78

VI.2. Evaluation du coefficient d'échange global……. 79

VI.3. La résistance d'encrassement prédite par le modèle de Kern & Seaton…….. 80

VI.4. La méthode de différence de température logarithmique moyenne « DTLM »…… …… 81

VII. Méthode de calcul……..... 82

VII.1. Hypothèses des calculs……. 82

VII.2. Équations gouvernantes de l'écoulement……. 83

VII3. Équations de conservation des espèces chimiques……. 84

VII.4. Modélisation de la turbulence……..... 85

Chapitre 5 Résultats et discussions……..... 87

I. Introduction…….. 88

II. Résultats et discussions…… 89

II.1. Validation du modèle…….89

II.2. La résistance thermique d'encrassement…… 91

II.3. Le coefficient d'échange global……91

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

dans les tubes des échangeurs…….. 93

II.5. Effet de l'encrassement sur le diamètre intérieur

des tubes des échangeurs……. 94

II.6. La perte de pression dans les échangeurs……. 94

II.7. La pression de pompage dans les échangeurs…….. 96

II-8. Etude comparative entre deux batteries……97

II.8.1. Introduction……..97

II.8.2. Résistance thermique d'encrassement…….97

II.8.3. Coefficient d'échange global…….. 98

II.8.4. La perte de pression…… 99

II.8.5. Conclusion……. 100

Conclusion générale…….....…….102

Références bibliographiques

Annexes

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur le pétrole

Tableau .I.1Composition élémentaire du pétrole brut 12

Chapitre II : Généralités sur les transferts thermiques

Tableau .II.1 Exemples de conductivité 23

Chapitre IV : Modélisation et simulation de l'encrassement

Tableau .IV.1. Etape de la formation de l'encrassement……..... 74

Tableau.IV.2.Valeurs des paramètres relatives au modèle de la déposition des oxydes de fer. 75

Tableau.IV.3. Valeurs des paramètres relatives au modèle de la cristallisation du CaSO4..... 76

Tableau .IV.4. Conditions aux limites..... 77

Tableau .IV.5. Propriétés du mélange. 77

Tableau .IV.6. Conditions de simulation 78

Tableau .IV.7 Principe de méthode DTLM. 81

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur le pétrole

Figure I.1 : Exemples d'hydrocarbures paraffiniques…….09

Figure1.2 : Exemples d'hydrocarbures naphténiques…….09

Figure1.3 : Exemples d'hydrocarbures aromatiques……...10

Figure1.4 : Schéma de principe du raffinage……..….17

Figure1.5 : Schéma simple d'une raffinerie ……....18

Chapitre II : Généralités sur les transferts thermiques

Figure II.1 : La conduction ……...……..23

Figure II.2 : Plage des longueurs d'ondes électromagnétiques……...25

Figure II.3 : L'énergie thermique du soleil ……...…….25

Figure II.4 : Transfert thermique par convection ……...….27

Figure II.5 : Convection naturelle d'une plaque chaude……..27

Figure II.6 : Convection forcée d'une plaque chaude ……....28

Figure II.7 : Représentation l'écoulement d'un Régime laminaire ……..……..29

Figure II.8 : Représentation l'écoulement d'un Régime turbulent …….....29

Figure II.9 : La condensation …….….32

Figure II.10 : La vaporisation ……...……..33

Figure II.11 : Distribution des températures dans un échangeur tubulaire co-courant ……...……35

Figure II.12 : Distribution des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre courants ……..……..36

Figure II.13 : Exemples d'échangeurs à courants croisés ……..37

Figure II.14 : Echangeur à plaques ……..…39

Figure II.15 : Echangeur à ailettes ……..40

Figure II.16 : Echangeur monotube en serpentin ……..…….41

Figure II.17 : Echangeur à tube coaxiaux …….……..41

Figure II.18 : Échangeur à tube séparé ……...41

Figure II.19 : Échangeur à tubes rapprochés ……..……42

Figure II.20 : Échangeur à plaque tubulaire fixe ……...….42

Figure II.21 : Échangeur à tube en U …….43

Figure II.22 : Échangeur type Kettle……...…44

Figure II.23 : Échangeur à tête flottante…….…….45

Figure II.24 : Calandre d'un échangeur tubulaire …….….46

Figure II.25 : Plaque tubulaire d'un échangeur thermique à tube et calandre….47

Figure II.26 : Chicane d'un échangeur tubulaire ……..……..48

Chapitre III : Encrassement des échangeurs de chaleur

Figure III.1 : L'encrassement dans un échangeur tubulaire ……..…….51

Figure III.2 : Encrassement par corrosion ……..……53

Figure III.3 : Encrassement chimique d'un échangeur de chaleur à plaques…..54

Figure III.4 : Encrassement biologique d'un échangeur de chaleur à plaques…55

Figure III.5 : Mécanisme multi pas général pour l'encrassement par réaction chimique ……....56

Figure III.6 : Processus d'encrassement ……..……59

Chapitre IV : Modélisation et simulation de l'encrassement

Figure IV.1 : Maillage structural ……70

Figure IV.2 : Maillage non structuré …….……70

Figure IV.3 : Diagramme simplifié du train de préchauffage de la raffinerie….72

Figure IV.4 : Diagramme du mécanisme en chaine de l'auto-oxydation……73

Figure IV.5 : Résistance d'encrassement thermique……...80

Figure IV.6 : Distribution de température dans un échangeur contre –courant..81

Figure IV.7 : Distribution de température dans un échangeur Co-courant…….82

Chapitre V : Résultats et discussions

Figure V.1.a. Validation du modèle par rapport au modèle de Kern et Seaton...90

Figure V.1.b. Validation du modèle par rapport aux données expérimentaux de Harch ……..90

Figure V.2. Evolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction du temps pour les trois échangeurs…….……..92

Figure V.3. Evolution du coefficient d'échange thermique global…….92

FigureV.4. Evolution de l'encrassement en fonction de la vitesse dans les tubes……...…..93

Figure V.5. Evolution de l'encrassement en fonction des diamètres des tubes..95

Figure V.6. Evolution de de la perte de pression en fonction du temps dans les échangeurs……...95

Figure V.7. Evolution de la pression de pompage en fonction du temps dans les échangeurs……...……96

FigureV.8. Evolution de de résistance thermique d'encrassement dans l'échangeur HE-09 des batteries 2 et 3……98

Figure V.9. Evolution du coefficient d'échange global dans l'échangeur HE-09 des batteries 2 et 3……...……99
Figure V.10. Evolution de la perte de pression dans l'échangeur HE-09 des batteries 2 et 3……100

Liste des symboles

Symbole	Désignation de la grandeur	Unité
L	Longueur d'un tube	[m]
D	Diamètre	[m]
e	Epaisseur	[m]
M	Masse moléculaire	[g/mol]
m	Débit massique	[Kg/s]
C	Concentration	[mol/l]
Cp	Chaleur massique	[J kg^{-1} K^{-1}]
Cpc	Capacité calorifique	[J/ K]
P	Pression	[Pa]
Vi	Vitesse à l'entrée	[m/s]
S	Surface d'échange thermique à la distance axiale x	[m^2]
T_i	Température à l'entrée	[K]
T_{op}	Température de sortie du système de chauffage	[K]
t_∞	Temps à la résistance asymptotique	[s]
t_c	Temps de résidence moyen	[s]
T_f	Température du film	[K]
T_s	Température de surface	[K]
Q_d	Débit massique du dépôt	[Kg/s]
Q	La quantité de chaleur transférée	[J]
Q_{ph}	Puissance thermique d'un échangeur	[W]
$R_{f(t)}$	Résistance thermique d'encrassement	[m².ºC/W]
U(t)	Coefficient d'échange global	[W/m².ºC]
E_a	Énergie d'activation	[J kg^{-1}mol^{-1}]
K	Coefficient de transfert de chaleur global propre	[W m $^{-2}$ K^{-1}]

K_a	Coefficient d'attachement	[m s^{-1}]
K_d	Coefficient déposition	[m s^{-1}]
β	Constante du temps	[unité /jour]
γ	Viscosité cinématique	[pa.s]
ρ	La masse volumique	[kg /m^3]
μ	Viscosité dynamique	[kg m^{-1} s^{-1}]
λ	Conductivité thermique	[w/m.K]
σ	Nombre du Prandtl turbulent	
Δ**P**	Perte de charge	[bar]

Liste d'abréviations

API	American petroleum institute
OPEP	l'organisation des pays exportateurs de pétrole
CFD	Computational Fluid Dynamic
ASTM	American society for testing and materials

Indice

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

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le pétrole est la première matière de l'industrie dans le monde. C'est le plus gros commerce de la planète en valeur et de loin. Le brut Algérien a été vendu 93.06 dollars le baril (159 litres) le 18 Avril 2024. Notre pays est le 17^{ième} producteur de pétrole selon les dernières statistiques. Il est donc primordial d'apporter beaucoup d'attention et de recherche à ce secteur. Notre pays compte cinq raffineries de traitement à ce jour.

La commercialisation du pétrole à l'état brut doit subir un premier traitement préliminaire afin de répondre aux normes internationales. Ce traitement peut comprendre plusieurs procédés à mettre en œuvre pour la mise aux spécifications commerciales. Les procédés les plus connus sont : la séparation, le dessalage, le dégazage, la désulfuration …etc. Malheureusement, dans les raffineries ses traitements en particulier les traitements thermiques sont sujets de problèmes récurrents et très contraignants : l'encrassement des surfaces chaudes surtout dans les échangeurs de chaleur. Ce phénomène se caractérise par la formation de dépôts de nature isolante thermiquement sur les surfaces d'échange, ce qui diminue l'efficacité du transfert de chaleur et peut entraîner des problèmes techniques et économiques importants donc des couts supplémentaires. L'évaluation des paramètres thermocinétiques du processus d'encrassement est essentielle pour comprendre le mécanisme de formation des dépôts et pour prédire leur évolution dans le temps. Ces paramètres, tels que la résistance thermique d'encrassement, l'énergie d'activation, le facteur pré-exponentiel et la constante

de vitesse, permettent de caractériser la cinétique du processus d'encrassement et d'identifier les facteurs qui l'influencent.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les paramètres thermocinétiques tels que la résistance thermique d'encrassement d'un processus d'encrassement dû au traitement thermique d'un pétrole brut dans une raffinerie composé essentiellement de trois batteries d'échangeurs. Les deux premières batteries ont été considérées dans des travaux précédents. La troisième la dernière sera abordée dans ce travail. Le pétrole brut aborde les trois batteries successivement lors de son traitement dans la raffinerie.

Le manuscrit du mémoire est subdivisé en plusieurs chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du pétrole : son origine, sa composition et les différentes classifications connues à ce jour. Nous présentons également dans ce chapitre ses propriétés et certains traitements qu'il subit avant toute utilisation.

Dans le deuxième chapitre, nous définissons en premier les différents modes de transfert thermique et les régiments d'écoulements. Ensuite, nous consacrons une grande partie de ce chapitre aux échangeurs de chaleurs sujets de notre phénomène : l'encrassement.

Vu son importance capitale dans ce travail, le troisième chapitre, est totalement consacré à la présentation de l'encrassement des équipements thermiques en particulier les échangeurs de chaleur. Il comprend les différents types d'encrassement, les mécanismes 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.

Le quatrième chapitre concerne la modélisation et la simulation de l’encrassement d’une batterie d’échangeurs de chaleur tubulaire d’une raffinerie de pétrole brut. Un modèle de l’encrassement par le pétrole brut est présenté. Le modèle permettra de calcul principalement la résistance thermique d’encrassement. L’outillage numérique employé pour la résolution du modèle mathématique est également présenté (Ansys) dans le même chapitre.

Le dernier chapitre du mémoire se concentre sur la présentation des résultats. Nous développerons principalement la résistance thermique d’encrassement en fonction des dimensions de l’échangeur et en fonction du temps. Nous présentons une étude comparative avec les paramètres de la batterie précédente.

Nous terminons par une conclusion qui présentera les principaux résultats et des recommandations futures.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LE PÉTROLE

I. Introduction

Le pétrole brut joue un rôle crucial dans notre société contemporaine en tant que principale source d'énergie, aux côtés du gaz naturel. Il représente 60 % de la consommation mondiale d'énergie, et ses composants hydrocarbonés sont utilisés dans la fabrication d'une variété croissante de produits tels que des lubrifiants, des revêtements bitumineux, ainsi que des produits chimiques diversifiés tels que des fibres synthétiques, des plastiques, des solvants et des produits d'entretien [1].

II. Définition du pétrole brut

Le terme "pétrole" dérive du mot latin "Petroleum" et englobe les définitions suivantes : il s'agit d'une huile minérale naturelle inflammable, de couleur très sombre, possédant une odeur caractéristique plus ou moins prononcée et une densité allant de 0,8 à 0,95. Le pétrole est constitué d'hydrocarbures, des composés qui contiennent différents nombres d'atomes de carbone et d'hydrogène, ce qui entraîne une variation de taille et de structure moléculaire et détermine leurs états physiques, à savoir solide, liquide et gazeux. En conséquence, le pétrole est un mélange de ces divers types d'hydrocarbures, présentant une qualité très variable en fonction des principaux produits qui le composent [02].

III. Origine du Pétrole Brut [3]

L'origine du pétrole est définie par deux hypothèses :

III.1. Origine minérale (inorganique)

Cette hypothèse stipule que le pétrole résulte de la décomposition des carburants métallique sous l'action de l'eau.

III.2. Origine organique

Le pétrole est issu de la décomposition des animaux et végétaux marins au cours des cycles de sa formation. Il passe par trois étapes essentielles, à savoir :

- Étape biologique.
- Étape chimique.
- Étape physique.

-Etape biologique

L'étape biologique est caractérisée par la formation du kérogène qui est constituée de déchets d'animaux et végétaux surtout dans les zones alluvionnaires (produit par les dépôts laissé par un cours d'eau quand sa vitesse, réduite, n'en permet plus le transport).

- Etape chimique

L'étape chimique est appelée aussi la genèse, est caractérisée par l'accumulation du kérogène pendant des milliers d'années dans les fleuves se trouvant en dessous des débits alluvionnaires, sous l'effet de la température et de la pression qui augment au fur et à mesure que le kérogène s'enfonce dans le sol. Le pétrole ainsi formé, se situe dans des roches appelées « roche mères ».

- Etape physique

L'étape physique est caractérisée par la migration du pétrole et de l'eau salée contenus dans la roche mère, jusqu'à la surface. On ne pourra récupérer le pétrole que s'il est piégé dans une roche imperméable.

IV. Composition des pétroles bruts [04]

Le pétrole, aussi appelé hydrocarbures, selon cette nomenclature, se distingue par deux mots : L'hydrogène et le carbone, qui sont des composants importants de tout pétrole brut ; leur contenu est (83 % à 87 %) en carbone et (11 % à 14 %) en l'hydrogène. Les autres éléments qui le composent sont plus ou moins nocifs pour le corps humain sont : l'oxygène, le soufre et l'azote sous forme composée (total jusqu'à 6 à 7%). Lors de l'analyse de la teneur en cendres d'huile, d'autres substances sont-elles présentes.

Des composés tels que Cl, I, P, Si, Na, Fe, etc…ont également été détectés.

Les trois grandes familles d'hydrocarbures sont :

- ✓ Hydrocarbures aliphatiques.
- ✓ Hydrocarbures cycliques.
- ✓ Hydrocarbures mixtes.

❖ Familles chimiques d'hydrocarbures

Compte tenu de la tétravalence de l'atome de carbone et de la monovalence de l'atome d'hydrogène, les déférentes possibilités de combinaison de ces atomes peuvent se classer selon deux règles générales : addition des atomes carbones en chaines ou en cycles, avec saturation ou non entre les atomes du carbone [05].

❖ Hydrocarbures aliphatiques saturés ou paraffinés

Ils sont constitués d'atomes de carbone portant chacun de zéro à trois atomes d'hydrogène, leur formule générale est C_nH_{2n+2}. Ils peuvent être structurés en chaines droite. Ce sont les paraffines normales, de formule développé $CH_3(CH_2)$

n-CH_3. Où en chaine ramifiées qui présente un groupe méthyle sur un atome de carbone de la chaine principale, appelés iso paraffines [06].

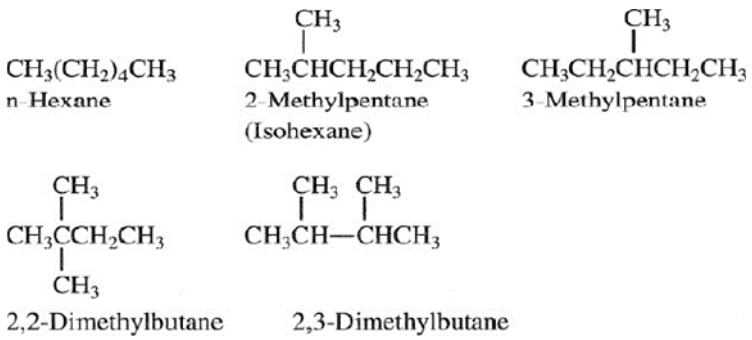


Figure I.1. Exemples d'hydrocarbures paraffiniques.

❖ **Hydrocarbures cycliques saturés ou naphtènes**

Appelés aussi cyclanes, ce sont des hydrocarbures saturés comportant un ou plusieurs cycles de formule générale : $C_n H_{2n}$. Les naphtènes ont des températures d'ébullition et des masses volumiques supérieures à celles des alcanes a même nombre d'atome de carbone [06, 07].

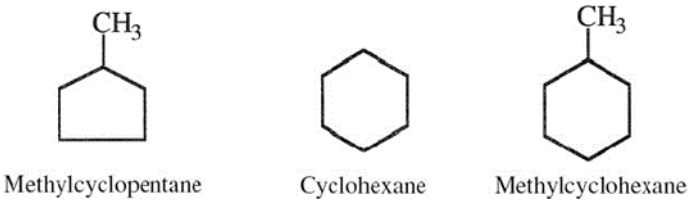


Figure I.2. Exemples d'hydrocarbures naphténiques.

❖ **Hydrocarbures aromatiques**

Ce sont des composés contenant au moins un noyau benzénique dans la molécule.

Les hydrocarbures aromatiques sont classés en deux types :

✓ Les hydrocarbures purs, qui ne comportent que des cycles aromatiques avec ou sans chaînes latérales.

✓ Les hydrocarbures naphtèno-aromatique, qui comportent en plus, des cycles naphténiques. Leur formule générale est :$C_{2n}H_{2n-6}$ [08].

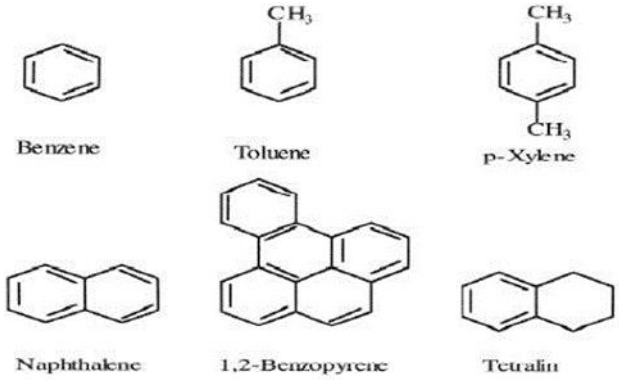


Figure I.3. Exemples d'hydrocarbures aromatiques.

❖ **Composés autres que les hydrocarbures**

Dans cette catégorie entrent les molécules contenant d'autres atomes que le carbone et l'hydrogène. On y distingue les composés organiques et les organo-métalliques.

❖ **Composés organiques hétéro atomique**

• Composées soufrés

Le soufre est le composé hétéro atomique le plus répandu dans le pétrole brut. Il peut se concentrer dans les fractions légères ou lourdes, sous forme inorganique : S élémentaire, hydrogène sulfuré(H_2S), ou engagé dans des molécules organiques, on trouve les mercaptans (R-SH), les sulfures (R_1-S-R_2), les disulfures (R_1-S-S-R_2), et certains sulfures cycliques [06].

• Composés oxygénés

Les bruts contiennent généralement moins d'oxygène que de soufre bien que peu abondant, l'oxygène peut jouer un rôle non négligeable ; en particulier, il est responsable de l'acidité des pétroles, il se trouve dans les pétroles bruts sous forme d'acide carboxylique (R COOH), de phénol (Ar-OH) et de cétone (R-CO-R') [06].

• Composées azoté

Dans les pétroles bruts, l'azote se retrouve préférentiellement dans les fractions de point d'ébullition supérieur à 250°C et est particulièrement concentré dans les résines et les asphaltènes. On trouve l'azote sous forme d'amides, amines, carbazoles et de pyridines [06].

❖ **Composés organométalliques**

Dans les fractions les plus lourdes telles que les résines et les asphaltènes se trouvent des atomes métalliques comme le nickel et le vanadium que l'on trouve sous forme de porphyrine. On trouve aussi des traces de fer, zinc, chrome, cuivre, manganèse et cobalt. Leur concentration varie de 1 ppm à 1000 ppm [06].

❖ **Composés chimiquement mal définis**

• Asphaltènes

Ce sont des composés non volatils, solides, de couleur noirâtre, brillants et de masse moléculaire peuvent varier de 1000 à 100000g/mol. Ils sont présents dans les pétroles bruts sous forme de suspension [08].

• Les résines

Les résines sont généralement des molécules à caractère aromatique très marqué, et renfermant des hétéro éléments (N, O, S et parfois le Ni et V), leur masse moléculaire peut varier de 500 à 1000 g/mol [08].

Tableau I.1. Composition élémentaire du pétrole brut [09].

Eléments	Pourcentage
Carbone	85–90
Hydrogène	10–14
Sulfure	0,2–3
Azote	<0,1–2
Oxygène	1–1,5
Métaux	<1

V. Classification du pétrole brut

V.1. Classification par Densité à 15°C

- ✓ Fioul léger d < 0,825,
- ✓ Fioul Moyen 0,825 < d< 0,875,
- ✓ Pétrole lourd 0,875 < d< 1,000 et super lourd > 1 000.

V.2. Classé par coefficient caractéristique KUOP

Le coefficient caractéristique KUOP a été introduit par des chercheurs de la société "Universal Oil Products". Hydrocarbure KUOP pour la recherche pure est de 13 pour les paraffines et de 12 pour les hydrocarbures avec poids. Les chaînes et les anneaux sont relativement égaux, 11 pour les cycloalcanes purs et 10 pour les cycloalcanes Parfum pur.

V.3. Classification par principales propriétés chimiques

Il s'agit de la classification la plus importante. Le pétrole brut est constitué de grandes familles d'hydrocarbures. Les types d'huiles comprennent : famille des paraffines, famille naphténique, famille aromatique [04].

V.4. Selon la valeur API°

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 : API > 31.1 ; l'aspect du pétrole brut se rapproche de celui du gazole, les gisements sahariens présentent cette caractéristique.

✓ Les gisements de pétrole moyen : 22.3 < API < 31.1 ; 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 : 10 <API<22.3 ; le pétrole brut ne coule pratiquement pas à température ambiante. Les gisements d'Amérique du sud à titre d'exemple.

✓ Les gisements de bitume : API< 10 le pétrole brut est très visqueux voire solide à température ambiante. Les principales réserves de ce type se trouvent au Canada [10].

V.5. Selon la teneur en soufre

Le pétrole est qualifié de doux (Soft) si sa teneur est inférieure à 0.5 % en poids. Au-delà de cette valeur on dit qu'il est qualifié de sulfure mais dans les raffineries on utilise des pétroles avec une faible teneur en soufre sinon, on est obligé de faire appel à des processus supplémentaires lors du raffinage [11].

IV. Les propriétés physiques du pétrole

IV.1. La densité

La densité d'un pétrole dépend de celle de ses constituants et détermine la flottabilité. Presque tous les hydrocarbures liquides sont plus légers que l'eau. Le "degré API" (American Petroleum Institute) est l'unité de mesure, utilisée dans le système anglo-saxon, pour mesurer la densité d'un liquide, en particulier d'un brut pétrolier, on parle généralement de brut lourd pour moins de 20°API, moyen dans les 20 à 30°API et léger au-delà, mais ces bornes varient selon les pays [12].

VI.2. La viscosité

La viscosité mesure la résistance à l'écoulement d'un liquide [13], et donc son taux de dispersion dans l'environnement marin. Son unité de mesure est le centistoke (*Cst*). Elle diminue lorsque la température augmente [13] et elle s'accroit par évaporation des composés volatils, par l'oxydation photochimique

et surtout par formation d'émulsions inverses qui modifient le comportement initial du produit [12].

VI.3. La solubilité

Elle donne une idée de la capacité d'une molécule organique à se dissoudre dans l'eau. Elle est de l'ordre de : µg/l (solubilité faible) ; mg/l (solubilité moyenne) ; g/l (solubilité importante). En général, les HAP ont une faible solubilité, comprise entre 30 mg/l pour les composés légers et 10 – 4 mg/l pour les plus lourd [12, 14].

VII. Les propriétés chimiques

La biodégradabilité des pétroles bruts est très fortement dépendante de leur composition. A une température déterminée, un pétrole léger est plus susceptible d'être biodégradé qu'un pétrole lourd, et plus le pétrole est raffiné plus il est dégradé rapidement [15]. Le pétrole brut est avant tout un liquide naturel, collant et inflammable. Les pétroles bruts varient considérablement en composition chimique. Il est généralement brun foncé ou noir (bien qu'il puisse être de couleur jaune ou verte). D'un point de vue technique, les pétroles bruts sont généralement classés selon leurs sources, la gravité de l'American Petroleum Institute (API) et la quantité de soufre (S). Le pétrole brut est considéré comme « léger » lorsque sa densité est faible et « lourde » lorsqu'il est dense. Les pétroles bruts à relativement faible teneur en soufre sont appelés bruts « doux », tandis que ceux contenant des quantités importantes de soufre sont appelés bruts « acides ». Le pétrole brut est un mélange de diverses substances organiques, principalement des hydrocarbures, des composés organiques [16].

VIII. Le raffinage du Pétrole Brut

Le raffinage du pétrole est un procédé industriel qui permet de transformer le pétrole brut en différents produits finis tels que le GPL, l'essence, le kérosène et le gasoil. Les composants du pétrole doivent être séparés afin d'obtenir les produits finaux exploitables directement.

On en distingue en général deux grands types :

- ✓ Les produits énergétiques, tels que l'essence, kérosène ;
- ✓ Les produits non-énergétiques, tels que les lubrifiants, le bitume utilisés en pétrochimie.

Le raffinage ne se limite plus aujourd'hui à la séparation des différents hydrocarbures. Des procédés chimiques complexes comme la conversion, l'amélioration et le mélange sont également mis en œuvre afin d'optimiser les produits finaux pour obtenir des produits commercialisables et de bonne qualité répondant aux normes environnementales. Pour la conversion est la seconde étape du raffinage a pour objectif de transformer les molécules lourdes en produits plus légers. Différentes méthodes sont utilisées, notamment le craquage catalytique et l'hydrocraquage ; le premier permet de décomposer les molécules lourdes sous l'effet d'un catalyseur et sous très haute température (500° environ). Le second permet de produire du gas-oil sans soufre grâce à l'ajout d'hydrogène. L'amélioration cette troisième étape du raffinage du pétrole sert à éliminer les impuretés, les composants acides, corrosifs ou néfastes pour l'environnement qui sont présents dans le pétrole raffiné. On obtient ainsi un produit de meilleure

qualité et respectant les normes en vigueur. Ainsi, l'amélioration permet par exemple de réduire la teneur en soufre du fioul grâce à l'hydro-désulfuration. Un lavage à la soude est également effectué pour le kérosène et les GPL, afin de débarrasser ces produits des mercaptans. Lors du mélanger différents additifs sont ajoutés aux produits dans le but de garantir le purs spécificités techniques, réglementaire et environnementales. Cette étape vise également à optimiser les propriétés des produits finis, comme la résistance au froid pour la création d'un fioul domestique de qualité supérieure par exemple [17].

Le schéma de la figure I.4 présente les étapes principales du raffinage.

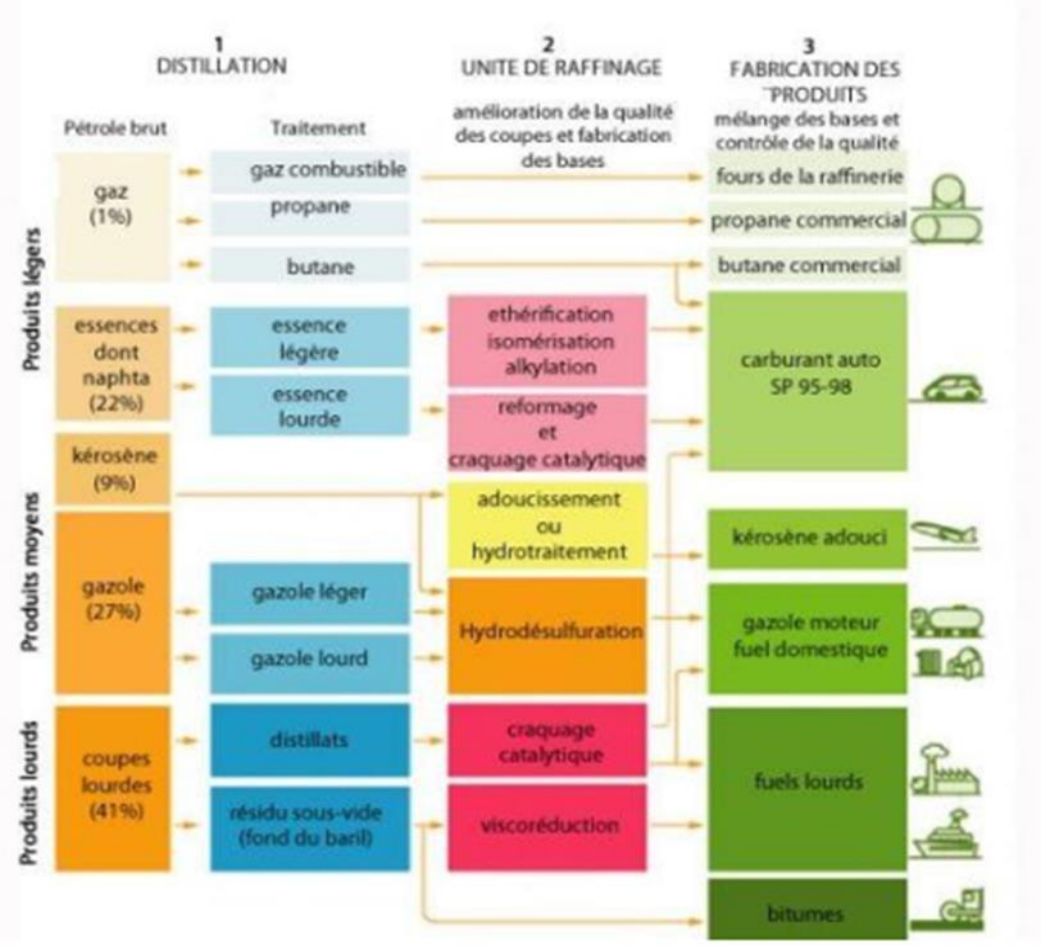


Figure I.4. Schéma de principe du raffinage.

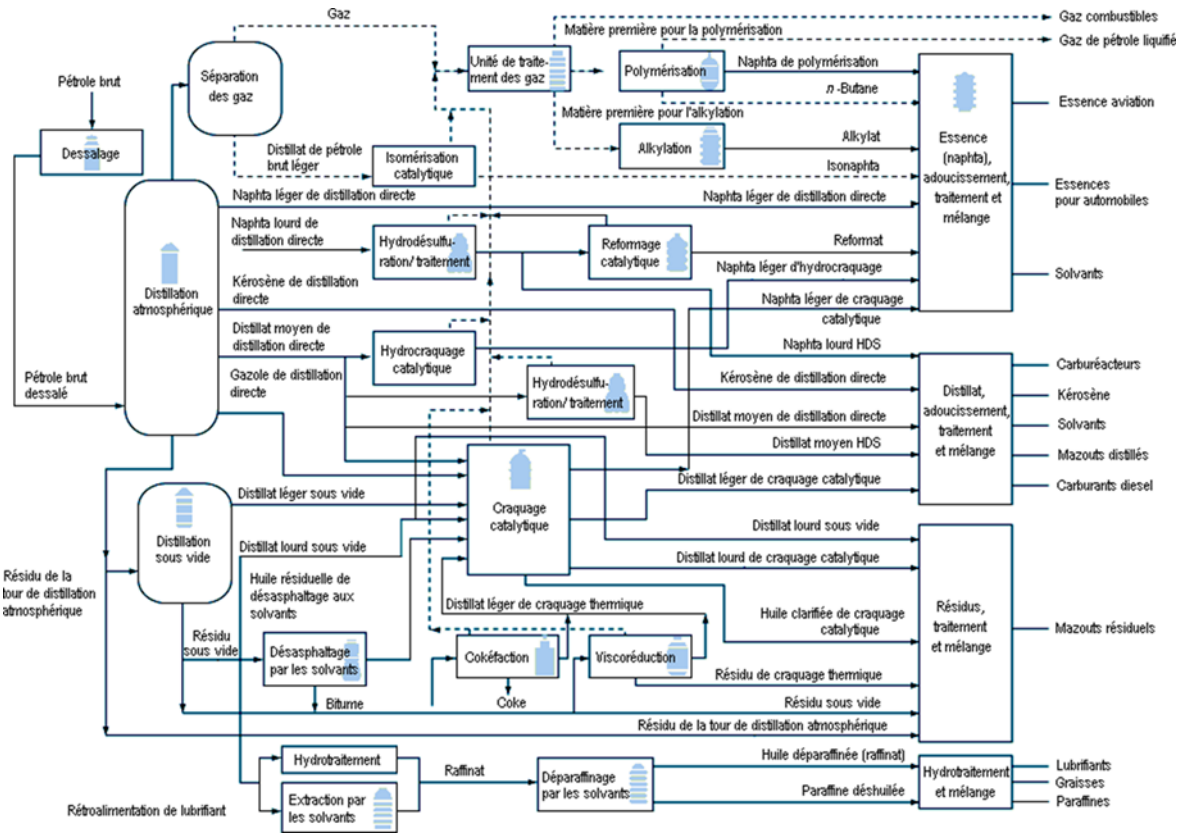


Figure I.5. Schéma simple d'une raffinerie [18].

IX. La distillation

La distillation du pétrole brut est réalisée en deux étapes complémentaires. Une première distillation dite atmosphérique permet de séparer les gaz, les essences et le naphta (coupes légères), le kérosène et le gazole (coupes moyennes) et les coupes lourdes. Les résidus des coupes lourdes subissent ensuite une distillation dite sous vide afin de séparer certains produits moyens [18].

IX.1. La distillation atmosphérique

L'opération consiste à séparer les différents composants d'un mélange liquide en fonction de leur température d'évaporation. Le pétrole brut est injecté dans une grande tour de distillation, haute de 60 mètres et large de 8 mètres environ, où il est chauffé à environ 400°C. Les différents hydrocarbures contenus dans le pétrole

brut sont vaporisés : d'abords les légers, puis les moyens, et enfin une partie des lourds. La température décroît au fur et à mesure que l'on monte dans la tour, permettant à chaque type d'hydrocarbure de se stabiliser sur son plateau d'équilibre afin d'être récupéré. Les plus légers sont récupérés tout en haut, et les plus lourds restent au fond de la tour [18].

IX.2. La distillation sous vide

L'opération consiste à séparer sur le même principe que la distillation atmosphérique les produits lourds des résidus de produits moyens en les soumettant à une deuxième phase de distillation dite « sous vide ». La colonne plus petite est fermée puis dépressurisée, ce qui fait diminuer la pression. Les produits, alors plus volatils, ont une température d'ébullition plus faible permettant ainsi aux produits lourds d'être plus facilement récupérable. En haut de la colonne on récupère du gazole et à sa base du fioul lourd. Les résidus de cette distillation sous vide sont récupérés en vue de produire des lubrifiants [18].

X. Utilisation et importance de pétrole brut

Le pétrole est employé comme matière première dans l'industrie chimique et dans la fabrication des carburants. Le pétrole et ses dérivés sont utilisés dans la production de médicaments, de produits agrochimiques et alimentaires, de matières plastiques, de matériaux de construction, de peintures et de fibres synthétiques, de détergents et de caoutchouc, ainsi que dans la protection électrique.

Enfin, la civilisation industrielle moderne dépend du pétrole et de ses dérivés ; la structure physique et le mode de vie des communautés urbaines entourant les grandes villes sont le résultat d'un approvisionnement en pétrole à grande échelle et peu coûteux, c'est la première source d'énergie mondiale ; il fournit près de la moitié de la commande totale d'énergie primaire [19].

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES

I. Introduction

La thermodynamique est une science de la physique qui permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou la thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Donc, dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur le phénomène de transfert thermique tel qu'un certain nombre de définitions et théories liées à ce phénomène.

II. Les modes de transfert thermique [20]

Le transfert thermique se fait :

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

Dans la pratique, il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode ; le plus souvent, deux sinon trois modes existent en même temps.

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

II.1. Transfert de chaleur par conduction

La conduction est le mécanisme de transfert de chaleur dans lequel l'énergie thermique est transférée d'un point à un autre par l'interaction entre les atomes ou les molécules de la matière. La conduction se produit dans les solides, les liquides et les gaz (figure II.1).

Les atomes se transmettent la chaleur de proche en proche :

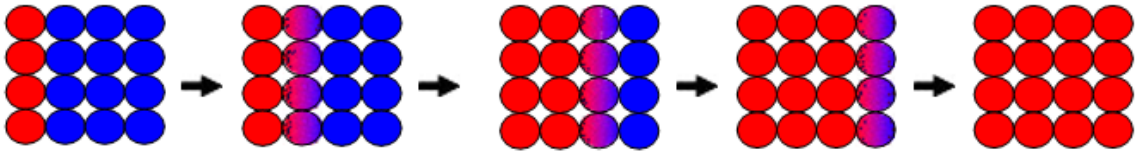


Figure II.1. La conduction.

Plus la surface d'échange est importante, plus le transfert de chaleur est important**.**

La conduction dépend principalement de la conductivité thermique du matériau.

Exemples des valeurs de conductivité thermique des matériaux **:**

Tableau II.1. Exemples de conductivité [21].

Matériaux	λ : Conductivité thermique($W/m^1 \cdot K^1$) (à 20 °C)
Aluminium (pureté de 99,9%)	237
Carbone	129
Platine	71,6
Acier doux	46

Acier inoxydable (18% Chrome, 8% Nickel)	26
Eau	0,6
Bois de pin (parallèle aux fibres)	0,36
Bois de pin (perpendiculaire aux fibres)	0,15
Air (100 kPa)	0,0262

Ce mécanisme de transfert est régi par une loi phénoménologique établie par Joseph Fourier en 1822, stipulant que la densité de flux échangée par conduction est proportionnelle au gradient de température.

Cette loi appelée loi de Fourier, elle s'écrit dans sa forme générale :

$$Q = -\lambda \nabla T \vec{A} \qquad \text{II.1}$$

Où $\vec{A}$ est le vecteur normal à l'aire. Le signe intervenant dans cette loi traduit le fait que le flux de chaleur circule des zones chaudes vers les zones froides (dans le sens opposé au gradient de température). Le coefficient de la proportionnalité λ est la conductivité thermique, elle s'exprime en (W/m K).

II.2. Transfert de chaleur par rayonnement

La radiation thermique est l'émission d'énergie thermique par un corps, sous forme d'ondes électromagnétiques, du fait de sa température. Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu (T=0K) émet de l'énergie thermique. Les ondes électromagnétiques voyageant dans le vide, aucun milieu n'est

nécessaire au transfert par radiation. La figure II.2. indique la plage, en longueur d'onde, de la radiation thermique comparée aux radiations émises par d'autres moyens (rayons X, rayons δ, rayons cosmiques, etc.).

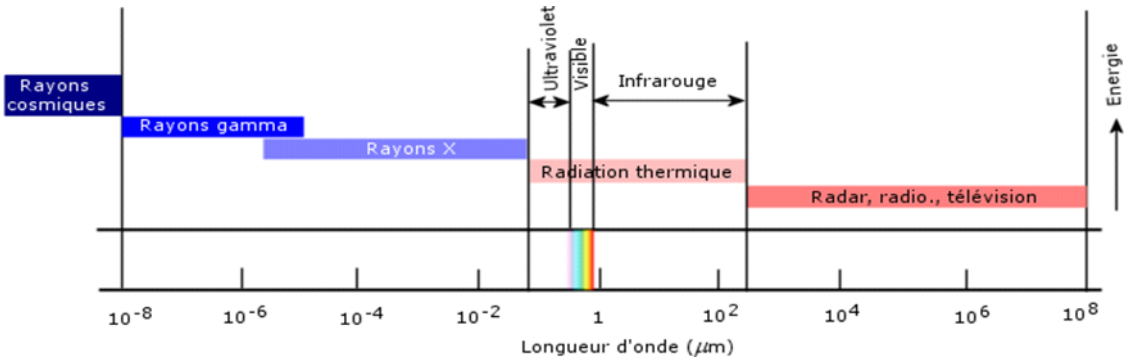


Figure II.2. Plage des longueurs d'ondes électromagnétiques.

L'énergie thermique du soleil atteint la terre par radiation. Les ondes électromagnétiques voyageant à la vitesse de la lumière, la radiation est le mécanisme d'échange de chaleur le plus rapide (figure II.3.) [22].

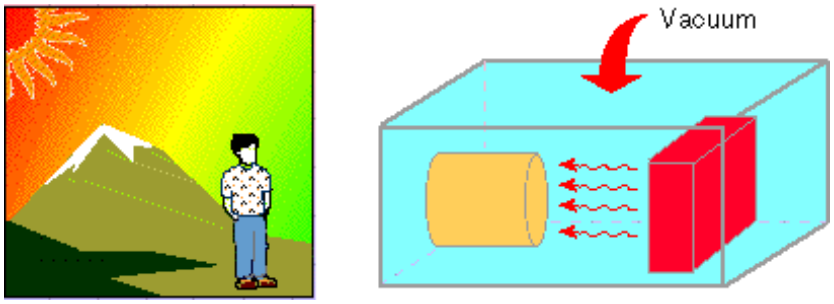


Figure II.3. L'énergie thermique du soleil.

Le flux de chaleur rayonné par un milieu de surface (S) et de température (T) s'exprime grâce à la loi de Joseph Stefan (1835-1893) et Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) [23] :

$$\Phi \text{ émis} = \varepsilon \sigma S T^4 \qquad \text{II.2}$$

Avec :

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, σ=4.92.10-8 kcal/h.m^2 .K.

Ɛ : Emissivité de la surface sans unité.

II.3. Transfert thermique par convection

C'est un transfert qui résulte d'un mouvement d'ensemble du matériau le supportant. La convection a donc lieu dans les fluides (gaz ou liquides). Elle caractérise l'échange de chaleur à la frontière entre un solide et un fluide et est donc très liée à l'écoulement fluide mais aussi aux géométries de frontière et aux états de surface solide. Il convient de distinguer la convection forcée dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieur (pompe, ventilateur…) de la convection naturelle dans laquelle le fluide prend, en son sein, l'énergie nécessaire au mouvement (variation de masse volumique associée à une variation de température par exemple).

De façon macroscopique elle est décrite par la loi de Newton (1701) qui lie le flux à un écart de température [24].

La puissance transférée par convection est donnée par la relation [25] :

$$\phi = h\, S(T_s - T_a) \qquad \text{II.3}$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m^2 °C).

T_s: Température de surface du solide (°C).

T_a : Température du fluide loin de la surface du solide (°C).

S : La surface de contact solide/fluide (m^2).

Les molécules chaudes se mélangent avec les molécules froides et leurs transmettent de la chaleur :

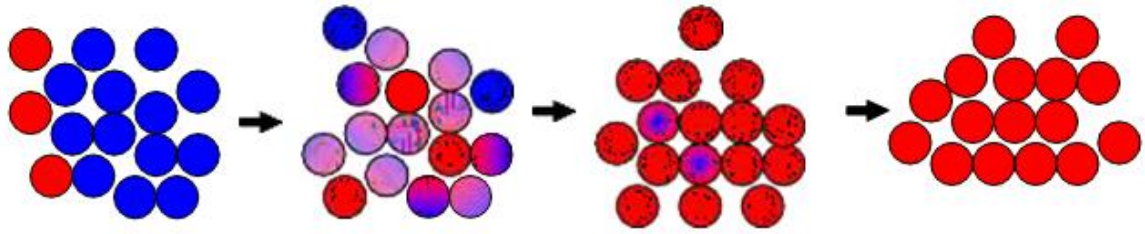


Figure II.4. Transfert thermique par convection.

En principe, il existe deux modes de transfert thermique par convection :

II.3.1. La convection libre ou naturelle

Le mouvement du fluide le long de la surface solide est dû aux poussées induites par les changements dans la densité du fluide résultant de la différence de température entre le solide et le fluide. Lorsqu'une plaque chaude est immergée dans un fluide froid, les particules de fluide en contact avec la plaque se réchauffent et leur densité diminue, ce qui provoque leur mouvement vers le haut (figure II.5).

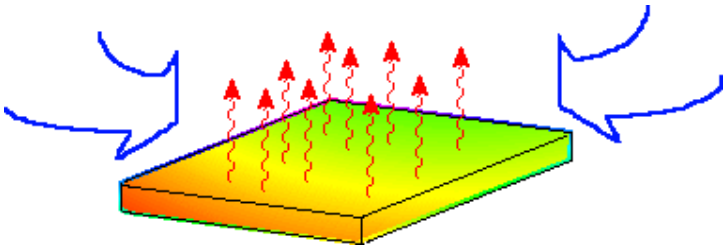


Figure II.5. Convection naturelle d'une plaque chaude.

II.3.2. La convection forcée

Un moyen extérieur, comme un ventilateur ou une pompe, est employé pour accélérer le mouvement du fluide au niveau de la surface du solide. Le mouvement rapide des particules du fluide sur la face du solide permet d'atteindre une valeur maximum du gradient de température, ce qui augmente le taux d'échange thermique. Dans la figure II.6, l'air est forcé au-dessus d'une plaque chaude [26].

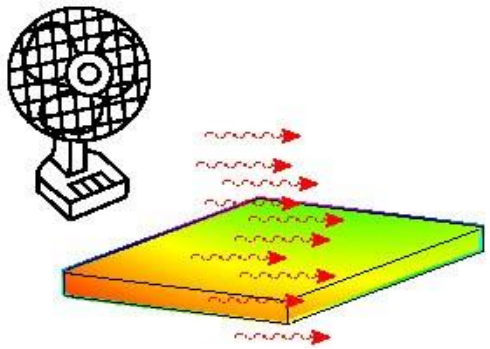


Figure II.6. Convection forcée d'une plaque chaude.

III. Régime d'écoulement

Compte-tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement.

Considérons à titre d'exemple l'écoulement d'un fluidedans une conduite [27]:

III.1. Régime laminaire

L'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes. Entre deux filets fluides adjacents les échanges de chaleur s'effectuent donc :

✓ Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.

✓ Par convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.

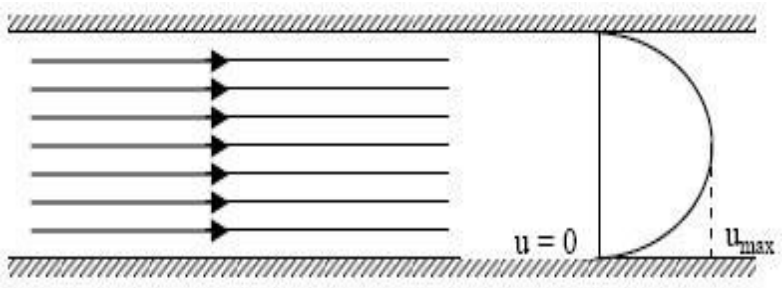


Figure II.7. Représentation l'écoulement d'un Régime laminaire.

III.2. Régime turbulent

L'écoulement n'est pas unidirectionnel. L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction est généralement négligeable par rapport à la convection.

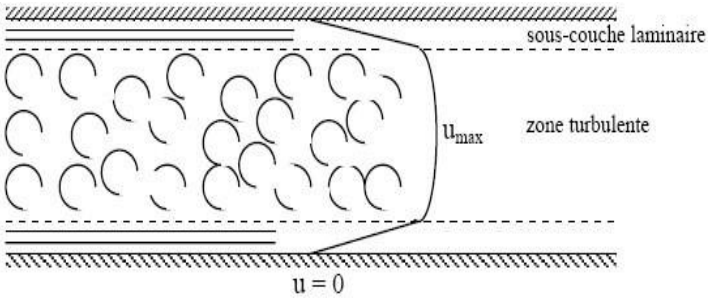


Figure II.8. Représentation l'écoulement d'un Régime turbulent.

IV. Généralité sur Les échangeurs de chaleur

IV.1. Introduction

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie

thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés [28].

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés selon plusieurs critères de classification. Citons les principaux ci-dessous :

- ✓ Le matériau de la paroi
- ✓ Type de contact
- ✓ La compacité de l'échangeur
- ✓ Dispositions de l'écoulement
- ✓ La construction.

De manière générale, les échangeurs de chaleur représentent trois catégories principales : continus, discontinus et par mélange [29,30].

Dans ce chapitre sont représentés les généralités sur les différents types d'échangeur, en donnant leurs propriétés, domaines d'utilisation, …etc.

IV.2. Définition d'un échangeur thermique

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, par exemple l'eau d'un circuit primaire de refroidissement de centrale nucléaire.

Chaque fois qu'on a besoin de réchauffer ou de refroidir un fluide à l'aide d'un autre fluide on utilise les échangeurs thermiques.

Ces dispositifs permettent le transfert de chaleur entre les deux fluides à des températures différentes. Ils doivent présenter une grande surface d'échange de chaleur pour une grande efficacité thermique.

Les matériaux composant l'échangeur thermique doivent être les plus conducteurs possibles afin de favoriser l'échange thermique.

IV.3. Les différentes fonctions de l'échangeur de chaleur

Les procédés des industries pétrolières, pétrochimiques ou chimiques demandent souvent que les fluides soient réchauffés ou refroidis avec ou sans changement de phase [31].

Les différentes fonctions suivantes sont responsables de ce changement :

IV.3.1. La Réfrigération

Ils refroidissent un liquide ou un gaz par circulation d'un fluide auxiliaire qui peut être un fluide de procédé ou de l'eau associé au fonctionnement de compresseur pour la réfrigération des gaz comprimés.

IV.3.2. Le Réchauffage

Leur rôle est de chauffer un fluide de procédé par de la vapeur d'eau ou un autre fluide chaud. Ces termes sont surtout employés dans le cas du réchauffage d'un produit stocké pour en assurer son pompage.

IV. 3.3. La condensation

Les condenseurs assurent la condensation totale ou partielle de vapeur par circulation d'eau ou de fluide de procédé suffisamment froid, les aérocondenseurs assurent simultanément la condensation de vapeur et le refroidissement des condensais, le plus souvent par circulation d'eau.

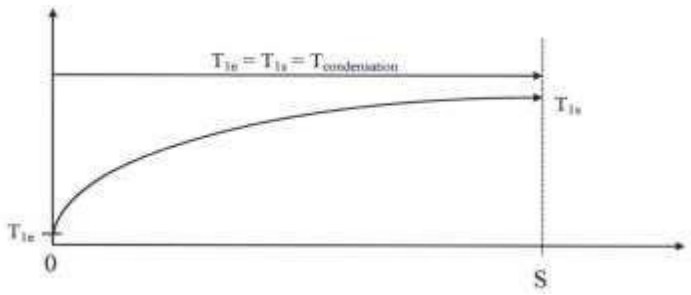


Figure II.9. La condensation.

IV.3.4. La vaporisation

Les évaporateurs assurent la vaporisation totale ou partielle d'un liquide du procédé, l'apport de chaleur étant assuré par de la vapeur d'eau ou un fluide chaud.

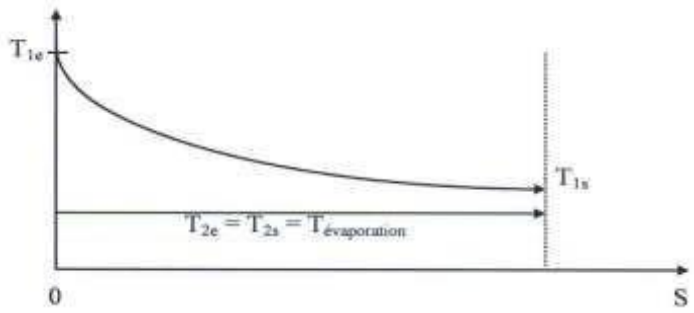


Figure II.10. La vaporisation.

IV.3.5. Le récupérateur de la chaleur

La fonction de cet échangeur est d'assurer le transfert d'une capacité thermique maximale pour une récupération maximale de la chaleur d'échappement selon des critères énergétiques et économiques.

IV.3.6. L'Humidificateur ou le condenseur partiel

Cet échangeur assure la condensation de la vapeur mélangée au gaz incondensable pour obtenir du gaz appauvri en vapeur en fin de fonctionnement

IV.4. Classement suivant les types d'échange

VI.4.1. Classement suivant le mode de transfert de chaleur

Il existe trois modes de transfert de chaleur conduction, convection et rayonnement. Pour les échangeurs à transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient [32].

IV.4.2. Classement suivant le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il y ait ou non stockage de chaleur, on définit le fonctionnement en récupérateur pour le transfert sans stockage ou le fonctionnement en régénérateur pour le transfert avec stockage [32].

IV.4.3. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange : [32]

Il existe deux types de paroi :

✓ Les échangeurs métalliques en : acier, cuivre, aluminium, superalliages, métaux ou alliages réfractaires.

✓ Les échangeurs non métalliques en : plastique, céramique, graphite et verre.

IV.4.4. Classement selon le type d'échange de fluides

Ce type de classement consiste le changement de phase des fluides « diphasiques ou monophasiques » qui est dut aux températures et les pressions élevées. On distingue deux types :

IV.4.4.1. Echangeur sans changement de phase

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase.

IV.4.4.2. Echangeur avec changement de phase

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

✓ L'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.

✓ Le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.

✓ Le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état.

IV.4.5. Classement selon le type d'écoulement « circulation » : [33]

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se rangèrent deux catégories On peut distinguer 3 modes d'écoulement différents:

IV.4.5.1. Ecoulement co-courants (Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens)

Il s'agit d'échangeurs dits à co- courants ou la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie 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.

La figure III.11 donne l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur tubulaire à co-courants très simple, la longueur de l'échangeur a été portée en abscisse, les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant entrée et s sortie, 1 désignant le fluide chaud et 2 le fluide froid.

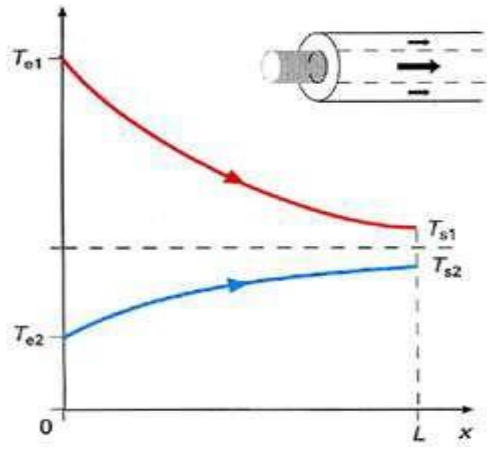


Figure II.11. Distribution des températures dans un échangeur tubulaire co-courant [33].

IV.4.5.2. Ecoulement contre courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires)

Il s'agit d'échangeurs à contre courants ou 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.

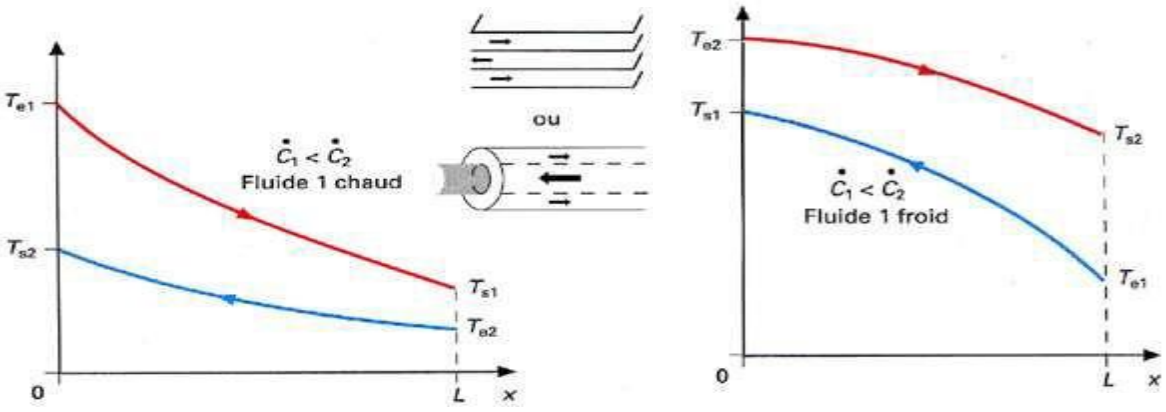


Figure II.12. Distribution des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre courants [33].

IV.4.5.3. Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Figure II.13.), 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.

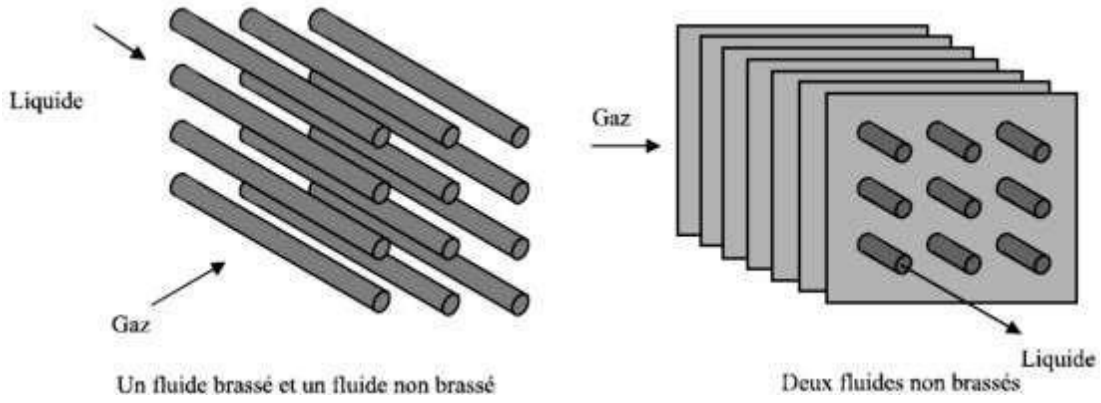


Figure II.13. Exemples d'échangeurs à courants croisés.

Les trois écoulements décrits, sont rarement utilisés dans toute leur simplicité.

En effet, un échangeur se réduit rarement à un tube unique ou deux plaques ; néanmoins, l'étude de ces cas élémentaires, dans le cadre d'une première approche, est nécessaire : l'échangeur industriel étant en général constitué par un grand nombre de tubes ou de plaques créant ainsi des problèmes supplémentaires.

Par ailleurs, la conception des échangeurs de chaleur introduit le choix entre deux géométries élémentaires principales :

✓ Les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.

✓ Les plaques, planes ou corrigées, choisies pour un fluide qui impose la même géométrie pour l'autre.

Souvent, le choix des combinaisons entre différents types d'échangeurs dans les installations industrielles résulte de contingences technologiques et économiques [34].

IV.4.6. Classement selon le type de technologies

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- ✓ A plaques.
- ✓ A ailettes.
- ✓ A Tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.

IV.4.6.1. Echangeur à plaques

Ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière. Un échangeur à plaques est constitué d'un ensemble de plaques métalliques embouties au travers des quelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides :

- ✓ Les plaques sont serrées entre un bâti fixe et un bâti mobile. Elles sont positionnées et guidées par 2 barres support inférieur et supérieur.
- ✓ Les bâtis maintiennent les plaques serrées au moyen de tirants. Les deux barres guides sont-elles mêmes supportées par un pied support.
- ✓ Un joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques.

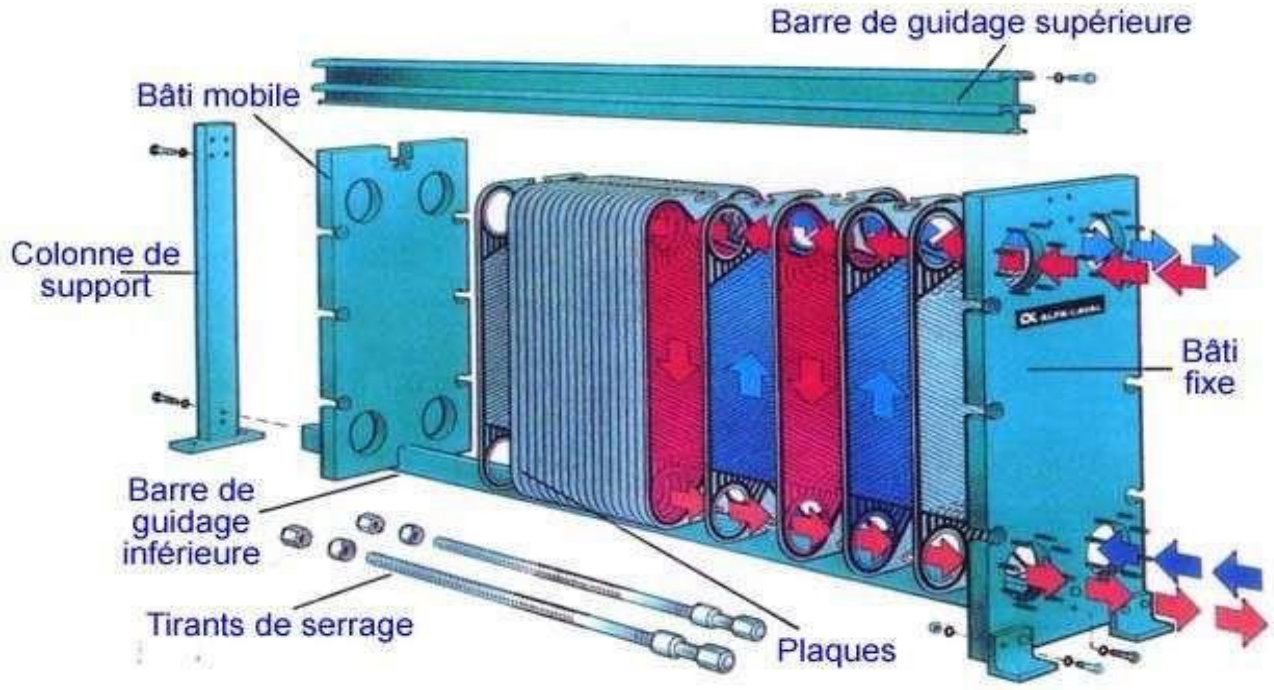


Figure II.14. Echangeur à plaques.

IV.4.6.2. Echangeur à ailettes

Les échangeurs à ailettes sont utilisés dans le cas d'un échangeur liquide-gaz, par exemple les radiateurs des voitures.

Ce type est caractérisé par :

✓ Faciles à nettoyer à l'aide d'un jet d'eau haute-pression sans déformer les ailettes.

✓ Transfert de chaleur uniforme et fiable.

✓ Aucune corrosion entre le tube et les ailettes.

✓ Les ailettes sont résistantes aux vibrations.

✓ Parfaitement adaptés aux applications industrielles.

✓ Plus complexes à dimensionner.

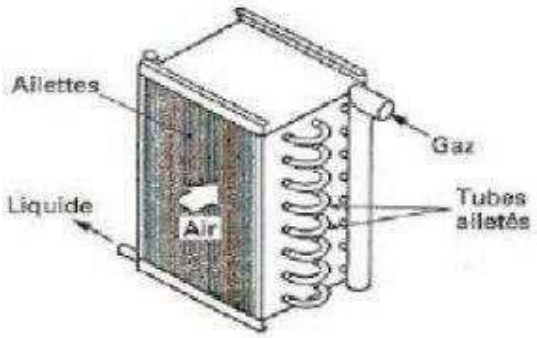


Figure II.15. Echangeur à ailettes.

Les ailettes sont des plaques minces ou des lames métalliques de différentes formes, construites d'un métal très bon conducteur « cuivre, aluminium… », Par exemple dans les batteries de tubes à ailettes, elles sont fixées sur des conduits circulaires ou rectangulaires. Elles permettent d'augmenter l'échange thermique entre un corps solide et le milieu environnant en faisant augmenter la surface d'échange. Dans la conception des échangeurs de chaleurs industriels à faisceaux de tubes à ailettes indépendantes, on distingue deux catégories essentielles d'ailettes : ailettes transversales et longitudinales. La forme des ailettes transversales, peut être carrée, rectangulaire, circulaire, elliptique, etc.

IV.4.6.3. Echangeur à tubes

C'est le type d'échangeurs le plus répandu. Ils représentent presque la moitié des échangeurs thermiques dans l'industrie. Il présente un certain nombre d'avantages :

- ✓ Facilités au niveau de la fabrication et de la maintenance.
- ✓ Utilisé à des pressions élevées et à de fortes températures.

On distingue trois catégories d'échangeurs à tube :

- **Echangeur monotube**

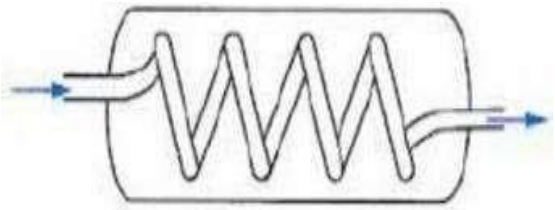


Figure II.16. Echangeur monotube en serpentin.

- **Echangeur à tube coaxiaux**

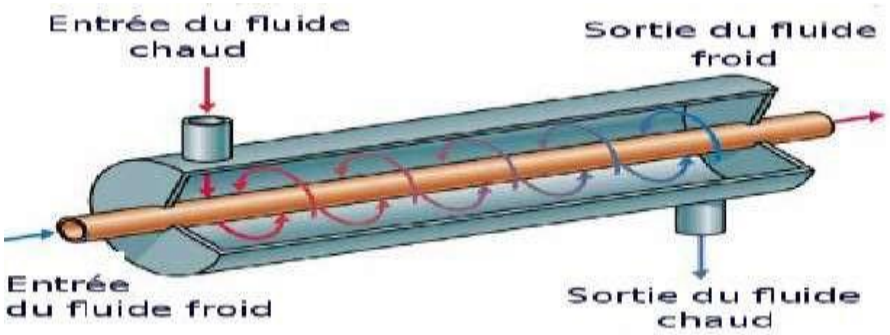


Figure II.17. Echangeur à tube coaxiaux.

- **Echangeur multitubulaire**

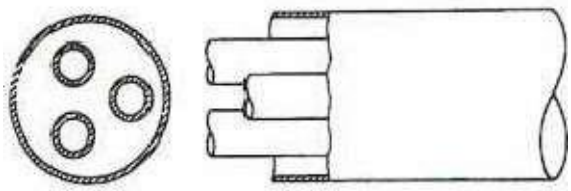


Figure II.18. Échangeur à tube séparé.

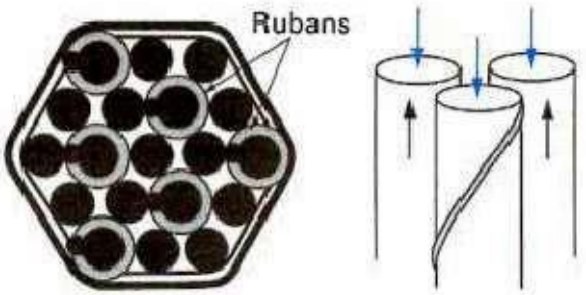


Figure II.19. Échangeur à tubes rapprochés.

IV.4.6.4. Echangeur à tube et calandre

A- Echangeur à plaques tubulaires fixes

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre.

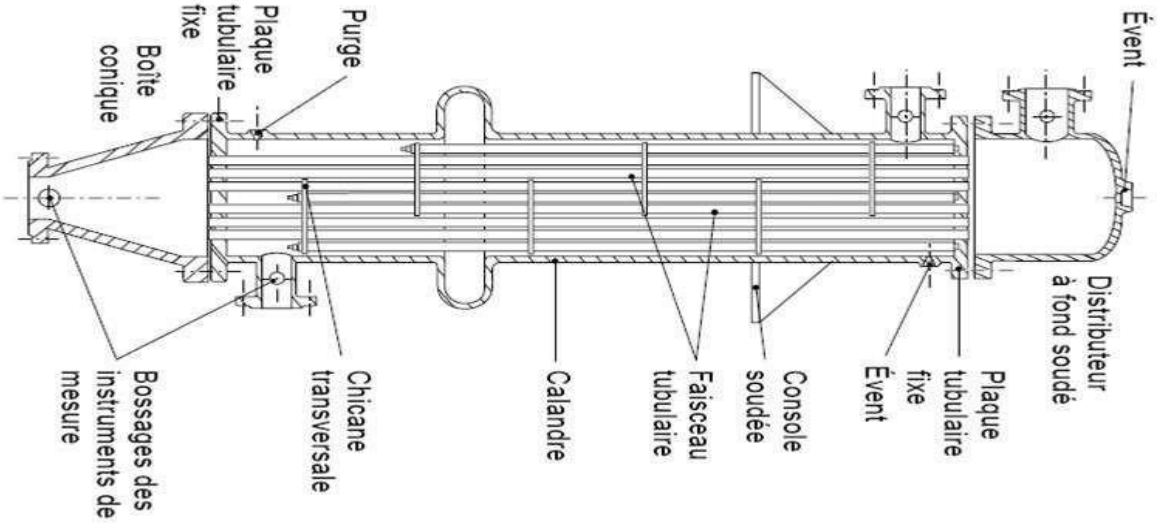


Figure II.20. Échangeur à plaque tubulaire fixe.

B- Echangeur à tubes en U

Le faisceau est constitué de tubes coudés en forme d'épingle, il n'est donc porté que par une seule plaque tubulaire. Ce système permet la libre dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable

autrement que par voie chimique.

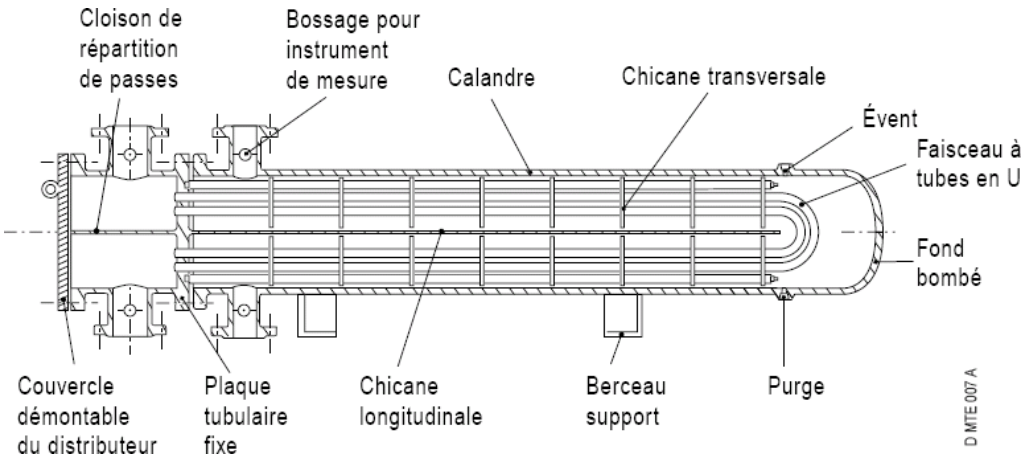


Figure II.21. Échangeur à tube en U.

C- Les échangeurs type KETTLE (AKT) : TOTAL

Cet appareil, est utilisé quand il s'agit de vaporiser partiellement ou totalement un liquide et, est conçu pour assurer la séparation des deux phases. Le liquide à vaporiser vient baigner le faisceau tubulaire à l'intérieur duquel circule le fluide chaud. Un déversoir maintient le niveau liquide juste au-dessus du faisceau, sauf dans le cas des générateurs de vapeur.

La calandre est d'un diamètre nettement supérieur à celui du faisceau, ce qui aménage une zone de désengagement de la vapeur et permet d'éviter les entraînements de liquide. La vapeur produite sort par la ou les tubulures situées sur la partie supérieure de la calandre.

Le liquide non vaporisé passe au-dessus du barrage et il est soutiré de l'appareil généralement sous contrôle de niveau (les prises de niveau apparaissent sur le schéma).

Ici, le faisceau (à deux passes) est du type en U mais on utilise également des fonds flottants.

Ce type d'appareil tolère des taux de vaporisation élevés. Mais le temps de séjour du liquide y est relativement grand, ce qui favorise l'encrassement [100].

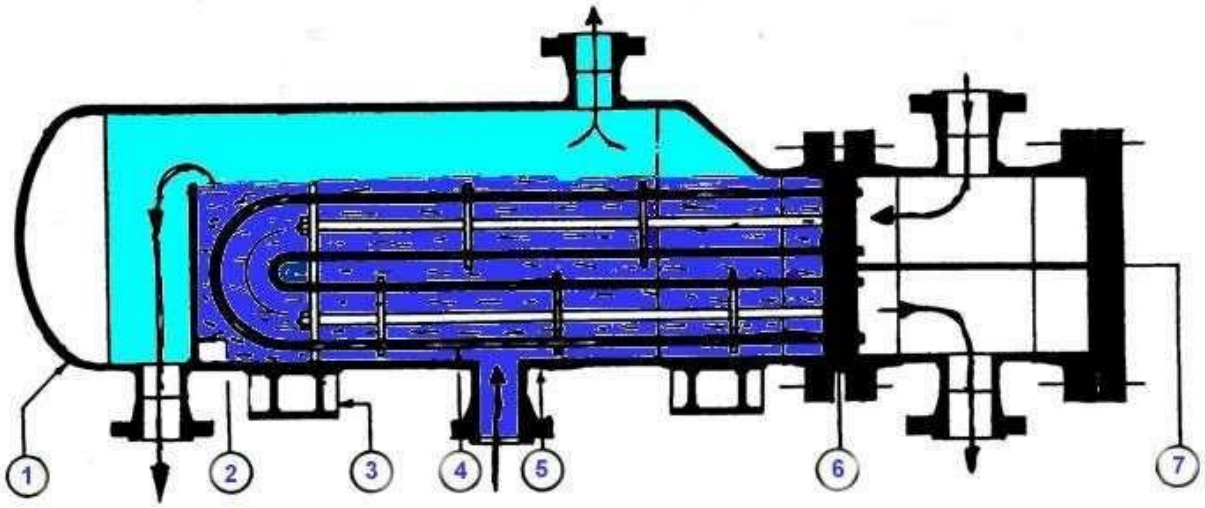


Figure II.22. Échangeur type Kettle.

(Les légendes sont données en Annexe 1).

D- Echangeur de chaleur à tête flottante :

L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La seconde plaque, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre.

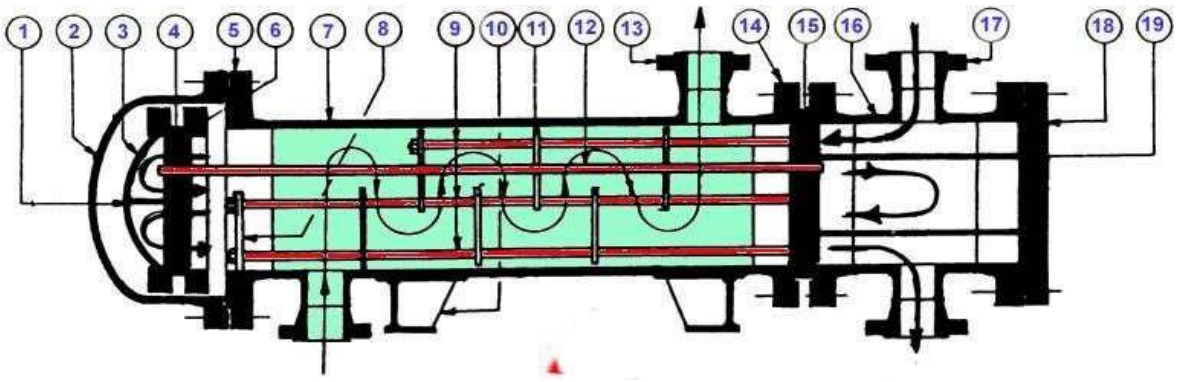


Figure II.23. Échangeur à tête flottante.

(Les légendes sont données en Annexe 2).

IV.5. Description de l'échangeur tubulaire

Cet appareil est constitué d'un faisceau de tubes monté sur deux plaques tubulaires et portant un certain nombre de chicane. A chaque extrémité sont fixées les boites de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau tubulaire.

La calandre est munie de tubulure d'entrée et de sortie pour le second fluide qui circule à l'extérieur des tubes suivant le chemin imposé par les chicanes.

Tous les éléments entrant dans la construction de cet échangeur, ont été publiése par la T.E.M.A « Standart of Tubular Exchanger Manufacturer Association », qui spécifie les caractéristiques mécanique et thermique correspondant aux diverses conditions de fonctionnement.

IV. 5.1. La calandre

C'est l'enveloppe métallique entourant le faisceau tubulaire. L'acier au carbone est le matériau le plus couramment utilisé couramment pour la construction des calandres. A chaque extrémité sont soudées les brides qui porteront le couvercle

et la boite de distribution. Ils peuvent être à boîte fixé, à boîte flottante, ou à tube en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur [35] Les tubulures d'entrée et de sortie sont soudées avec plaque de renforcement ou non, selon la pression de service. Enfin la calandre pourra être équipée d'anneaux pour le levage et portera la plaque d'identité de l'appareil.

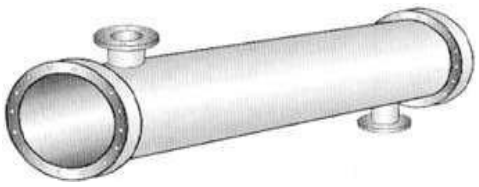


Figure II.24. Calandre d'un échangeur tubulaire.

IV.5.2. Plaque tubulaire

Ce sont des plaques percées supportant les tubes à leurs extrémités. Leur épaisseur (15 à 20 cm) est calculée en fonction de la différence de pression entre le fluide dans la calandre et le fluide dans les boîtes d'une part, des contraintes dues aux différences de dilatation entre les tubes et la calandre d'autre part.

Les plaques tubulaires peuvent être en acier ordinaire ou en acier spécial massif. Les tubes peuvent être fixés à la plaque tubulaire par dudgeonnage ou par soudure, quelquefois aussi par dudgeonnage allié à une soudure qui sert alors simplement à assurer l'étanchéité [35].

Les plaques tubulaires sont les parties délicates des échangeurs. Les interstices entre tubes et plaques sont des lieux privilégiés de corrosion (la concentration en produit agressif y est parfois très supérieure à celle mesurée dans les autres parties

de l’échangeur, car il y a stagnation du fluide). Par ailleurs, des dilatations différentielles excessives peuvent faire céder les dudgeonnages ou les soudures.

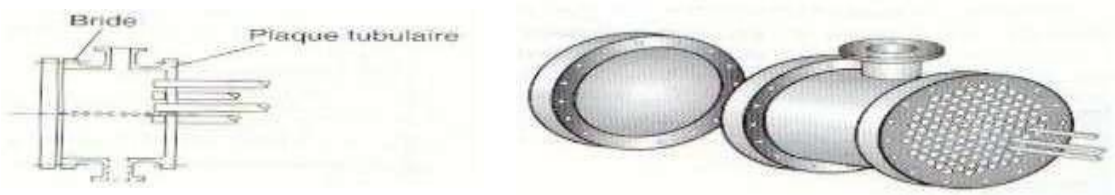


Figure II.25. Plaque tubulaire d’un échangeur thermique à tube et calandre.

IV.5.3. Faisceau tubulaire

Les faisceaux de tubes sont, en général, hydrostatiquement testés. Les tubes peuvent être soit des tubes en U, soit des tubes droits. Les tubes sont fixés à chacune de leur extrémité dans deux plaques tubulaires. La perforation des trous dans ces plaques est normalisée, elle s’effectue selon une disposition soit au pas carré ou carré inversé, soit au pas triangulaire ou triangulaire renversé. Le pas triangulaire permet de placer 10% de tube en plus que le pas carré [36].

IV.5.4. Chicane

Le faisceau de tubes porte également des chicanes transversales qui ont pour but de :

✓ Eviter qu'il ne suive un chemin préférentiel en plaçons des cloisonnements sur le trajet du fluide.

✓ Créer la turbulence en augmentant la vitesse du fluide, et améliorer ainsi le transfert de chaleur à l’extérieur du tube.

✓ Assurer la rigidité du faisceau, pour éviter des phénomènes de vibration.

Les chicanes transversales sont généralement constituées d'un disque ayant un diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre.

A sa partie basse la chicane renferme une lumière qui évite les stagnations du fluide.

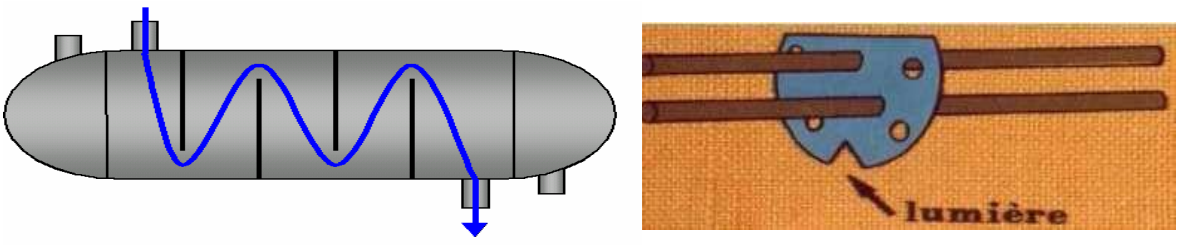


Figure II.26 Chicane d'un échangeur tubulaire.

CHAPITRE III

ENCRASSEMENT DES ÉCHANGEURS DE CHALEUR

I. Introduction

Les problèmes qui provoquent un dysfonctionnement d'échangeur de chaleur sont principalement : le phénomène d'encrassement, les vibrations et la tenue mécanique. L'encrassement est encore le phénomène le moins bien compris dans l'industrie. Il affecte le dimensionnement de l'échangeur et leur durée de vie, et produise une dépense d'énergie supplémentaire. Les vibrations doivent être prises en compte lors du dimensionnement des échangeurs tels que les échangeurs thermiques ou les pertes de charge. Les problèmes de tenue mécanique sont des problèmes liés à la résistance mécanique de l'échangeur (flexion, compression, etc.) [37].

II. Définition de l'encrassement

L'encrassement des équipements de transfert thermique, qui sous sa forme la plus générale peut être défini, comme l'accumulation des matériaux ou de substances indésirables sur les surfaces d'échange de chaleur [38] (Figure III.1.). Ces dépôts, qui évoluent dans le temps, peuvent être constitués de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments [39]. Un tel dépôt engendre une résistance thermique supplémentaire provoquant une augmentation des pertes de pression [40]. Au niveau énergétique, l'encrassement favorise la diminution des coefficients de transfert de chaleur et engendre une augmentation de la température du fluide chaud et donc des consommations énergétiques plus importantes. Il peut également influencer la qualité des produits ; l'accroissement

de la température du fluide chaud peut être particulièrement préjudiciable dans le cas où les produits sont thermosensibles. Pour cela, l'encrassement reste toujours un phénomène prépondérant dans la réduction des performances des équipements thermiques [41].



Figure III.1. L'encrassement dans un échangeur tubulaire.

III. Classification de l'encrassement

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse du dépôt, les conditions d'utilisation de l'échangeur, ou selon le mécanisme dominant même s'il ne contrôle pas la vitesse du dépôt [38]. Dans le milieu industriel, le processus d'encrassement est bien souvent mixte c'est-à-dire résultant de la combinaison d'au moins de deux types fondamentaux [39]. Dans ce qui suit, on adoptera cette dernière méthode de classification qui a été choisie par Epstein (1988), qui a identifié six types d'encrassements : encrassement particulaire, par corrosion, par entartrage, biologique, par réaction chimique et par solidification.

III.1. Encrassement particulaire

Il s’agit du dépôt puis de l’accumulation sur les surfaces d’échange des équipements thermiques de particules en suspension transportées par l’écoulement des fluides industriels (liquides ou gazeux), avec la condition que la taille de ces particules soit comprise entre 1µm et quelques dizaines de µm [39]. Kern et Seaton [42] étaient parmi les premiers chercheurs pour conduire une recherche systématique sur l’encrassement particulaire. Ils ont étudié plusieurs cas d’encrassement particulaire des échangeurs de chaleur, mais il y avait peu de concordance dans la prévision de l’encrassement particulaire. Apres Kern et Seaton, plusieurs chercheurs ont essayé de développer un modèle général pour le dépôt particulaire sur des surfaces d’échange de chaleur mais ils n’ont pu prévoir l’encrassement particulaire [42].

III.2. Encrassement par corrosion

L’encrassement par corrosion est le conséquent d’une réaction chimique ou électrochimique entre la surface d’échange de chaleur et le fluide qui la traversé, Les produits qui se produisent et s’accumulent sur la surface créent l’encrassement [43].

Il existe quatre types de corrosion :

✓ Corrosion uniforme caractérisée par des pertes d'épaisseur fréquentes mais dont la vitesse n'est pas nécessairement proportionnelle au temps.

✓ Corrosion par piqûres, lorsque l'attaque est limitée à des zones de très petite surface.

✓ Corrosion fissurante à l'échelle microscopique ou intergranulaire.

✓ Corrosion sélective dans laquelle un seul élément de l'alliage est sélectivement attaqué.



a. Corrosion fissurante b. Corrosion sélective c. corrosion uniforme

Figure III.2. Encrassement par corrosion.

III.3. L’entartrage

L'encrassement chimique, ou entartrage, se produit lorsque des changements chimiques dans le fluide provoquent le dépôt d'une couche d'encrassement sur la surface du tube ou plaque. Un exemple courant est l'entartrage d'une bouilloire ou d’une chaudière causée par les sels de dureté qui se déposent sur les éléments chauffants car la solubilité des sels diminue avec l'augmentation de la température. La probabilité d'entartrage augmente avec l'augmentation de la température, de la concentration et du pH. Ces effets peuvent être minimisés par un contrôle minutieux de la température de la paroi du tube en contact avec le fluide [44].

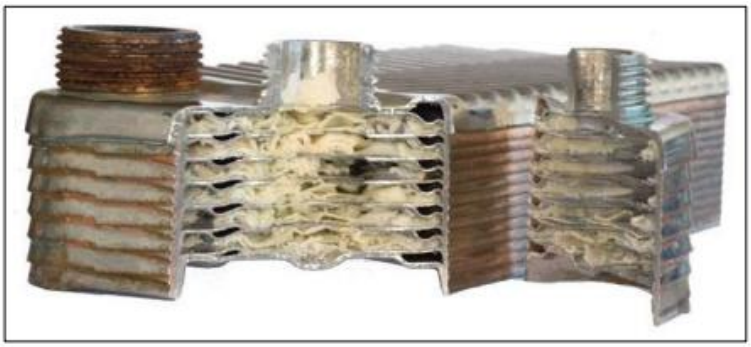


Figure III.3. Encrassement chimique d'un échangeur de chaleur à plaques.

III.4. Encrassement biologique

Il est dû au développement de micro-organismes qui créent un film au contact de la surface d'échange. Il peut même à l'échelle macroscopique, être caractérisé par le développement de coquillages [38]. Les actions de prévention consistent soit à détruire les micro-organismes, soit à empêcher leur développement. Les traitements correspondants utilisent les biocides il est essentiel de maintenir la concentration du produit pendant le temps de réaction. Le biocide le plus utilisé est le chlore qui est toxique pour la plupart des micro-organismes. L'encrassement biologique peut être causé par trois grands types de micro-organismes, à savoir les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif (hydrocarbures, ammoniaque, …etc.), les algues qui se développent en présence d'énergie solaire avec la photosynthèse. Par contre, les champignons se développent avec l'apport de nutriments mais surtout dû aux changements de conditions physiques ambiantes (pH, humidité, température). La différence entre bactéries, algues et champignons peut se faire sur les caractères morphologiques du noyau [39].



Figure III.4. Encrassement biologique d'un échangeur de chaleur à plaques.

III.5. Encrassement par réaction chimique

On rencontre cet encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange de chaleur et que les produits solides de la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation et il en résulte la formation d'un dépôt de substances de haut poids moléculaire [38]. Ce type d'encrassement est souvent rencontré dans l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques [38]. Il est influencé par les conditions opératoires suivantes : la température moyenne du fluide et la température de la surface, la pression et la vitesse du fluide ainsi que sa composition. L'encrassement par réaction chimique est généralement entraîné par le processus multi pas suivant [45] :

$$\text{Réactifs} \Rightarrow \underset{\text{(Soluble)}}{\text{précurseurs}} \Rightarrow \underset{\text{(Insoluble)}}{\text{foulant}}$$

Les diverses étapes possibles dans ce processus sont montrées dans la Figure (III.5.)

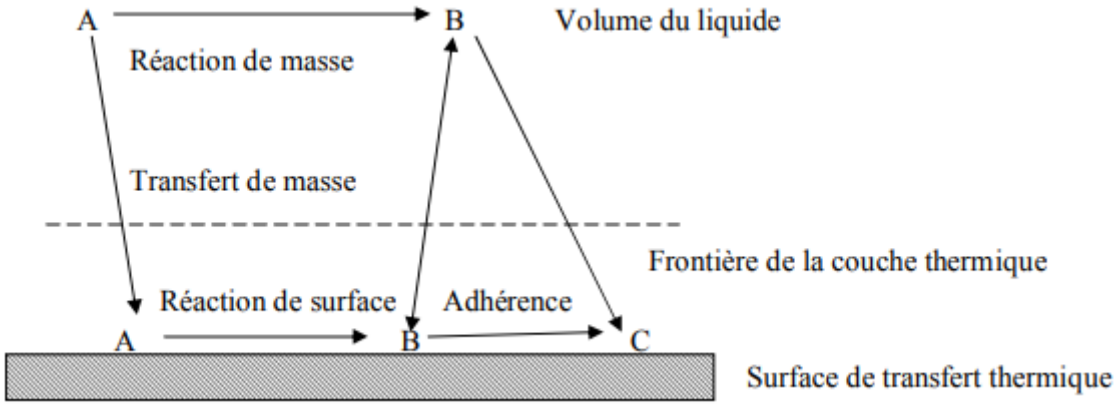


Figure III.5. Mécanisme multi pas général pour l'encrassement par réaction chimique [47].

Epstein [38] souligne les caractères généraux de la cinétique chimique de l'encrassement biologique par une réaction chimique comme étant une réaction de polymérisation par auto oxydation qui se propage comme une réaction en chaîne à radicaux libres où l'oxygène moléculaire joue un rôle prépondérant. Le principe du schéma réactionnel serait le suivant :

$$\begin{aligned}
&\text{Initiation :} && RH + Z^{\bullet} \rightarrow R^{\bullet} + HZ \\
&\text{Propagation :} && R^{\bullet} + O_2 \rightarrow ROO^{\bullet} \\
& && ROO^{\bullet} + RH \rightarrow ROOH + R^{\bullet} \\
&\text{Arrêt} && R^{\bullet} + R^{\bullet} \rightarrow RR \\
& && ROO^{\bullet} + R^{\bullet} \rightarrow ROOR
\end{aligned}$$

Où : RH est une molécule d'hydrocarbures et · Z un radical libre réactif provenant de traces même infimes d'ions métalliques et de composés soufrés ou azotés. Par ailleurs, Epstein considère qu'une réaction de déshydrogénation oxydante des hydrocarbures saturés en hydrocarbures non saturés et une polymérisation oxydante de ces derniers peut aussi contribuer à la formation de germes [38].

III.6. Encrassement par solidification

Il s’agit de la solidification d’un liquide pur au contact d’une surface d’échange sous refroidie (formation d’une couche de glace à l’intérieur des conduites) ou du dépôt d’un constituant à haut point de fusion d’un liquide au contact d’une surface de transfert de chaleur froide (dépôt d’hydrocarbures paraffiniques). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l’état liquide (formation du givre) [38].

IV. Processus d'encrassement

L'encrassement est un phénomène complexe dû à l'implication d'un grand nombre de variables. D'un point de vue fondamental, le mécanisme d'encrassement suit certaines étapes dans son développement sur une surface. Ces étapes sont les suivantes : Initiation, transport, fixation, élimination et vieillissement [43, 44].

IV.1. Initiation

La surface est conditionnée pendant la période d'initiation. La période d'initiation est influencée par la température de surface des matériaux, le matériau, la finition de surface, la rugosité et le revêtement de surface. Avec l'augmentation du degré de sursaturation par rapport à la température de la surface de transfert de chaleur ou l'augmentation de la température de la surface, la période d'induction diminue. Pendant la période d'induction, des noyaux de cristallisation du dépôt sont également formés pour la croissance biologique [43].

IV.2. Transfert

Dans cette partie, les substances d'encrassement du fluide de masse sont transportées vers la surface de transfert de chaleur. Cela dépend des propriétés physiques du système. Le transport s'effectue par un certain nombre de phénomènes, notamment la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse. La sédimentation est un phénomène de transport d'une matière particulaire dans un fluide en raison de la gravité sur une surface horizontale ou inclinée. Elle joue un rôle essentiel lorsque les particules sont lourdes et que la vitesse du fluide est faible [43].

IV.3. Fixation

À ce stade, les dépôts adhèrent à la surface et entre eux. Les ions salins qui s'approchent de la surface sont attirés par celle-ci en raison des forces électromagnétiques et adhèrent à la surface pour former une nucléation qui s'accroît progressivement avec le temps pour former une couche d'encrassement. Ainsi, les forces agissant sur les particules lorsqu'elles s'approchent de la surface sont impuissantes à déterminer l'attachement. Les propriétés des matériaux, telles que la taille, la densité et les conditions de surface, dominent le phénomène d'attachement [43].

IV.4. Élimination

Les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et l'encrassement déposé sont responsables de l'élimination. Les gradients de vitesse à la surface, la viscosité du fluide et la rugosité de la surface guident les forces de cisaillement.

L'élimination de la surface se fait par les mécanismes de dissolution, d'érosion et d'écaillage.

IV.5. Vieillissement

Le vieillissement commence dès le début du dépôt. Pendant le vieillissement, il peut y avoir transformation des cristaux pour améliorer ou diminuer la résistance du dépôt avec le temps. L'altération de la composition chimique du dépôt par une réaction chimique peut modifier la résistance mécanique. D'autre part, la couche de bio-encrassement peut devenir faible en raison de la corrosion à la surface par empoisonnement lent des micro-organismes [43].

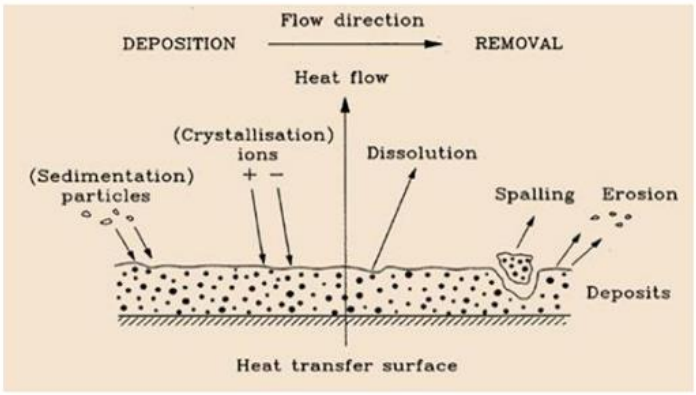


Figure III.6. Processus d'encrassement.

V. Classification du dépôt suivant sa nature [39, 46]

Nelson a classé les types du dépôt en trois catégories :

V.1. Dépôts durs

Les dépôts durs peuvent être constitués de tartre, de rouille ou de coke dur. La résistance offerte par les dépôts denses et durs est directement liée à la conductivité du matériau. Ces dépôts ne peuvent pas être nettoyés à la vapeur ou

par rinçage avec de l'eau chaude. Ils peuvent être enlevés en utilisant les produits chimiques ou en utilisant des méthodes mécaniques usuelles c'est-à-dire les outils de nettoyage ou les brosses.

V.2. Dépôts poreux

Ils sont souvent constitués des mêmes matières qui composent les dépôts durs. A titre d'exemple, on peut citer :

✓ Le coke ou le charbon qui peuvent être déposés à partir de fluide tels que les produits de fond du topping, l'asphalte ou le goudron des installations à vide ou des fonds de colonne de craquage ;

✓ La boue et la saleté qui peuvent être déposées à partir de l'eau ou du pétrole brut.

V.3. Dépôts mous

Les exemples de ce type de dépôt sont : la vase, la calamine, la poudre de coke, les feuilles et les fibres végétales. Quelques-uns de ces dépôts peuvent être efficacement enlevés avec des tiges ou des brosses et d'autres peuvent être efficacement enlevés par soufflage à la vapeur ou de l'air ou encore par rinçage avec de l'eau chaude.

Les dépôts durs et les dépôts poreux sont souvent très attachés à la surface de sorte qu'ils soient peu affectés par une vitesse élevée. Cependant, plusieurs dépôts mous peuvent être presque complètement enlevés en maintenant une vitesse au-dessus de 1,22 m/s et d'après ATKINS [39] chaque dépôt est formé de deux couches :

- ✓ Une couche molle en contact avec le fluide ;
- ✓ Une couche dure en contact avec la paroi d'échange thermique.

V.4. Etude du dépôt

Les dépôts de lait encrassant se composent d'une couche de minerais et de protéine. Les dépôts formés aux températures en dessous de 110°C contiennent des protéines approximativement 50 à 60 % et 30 à 35 % de minerais. Le film du dépôt réduit la section de passage du fluide entraînant une augmentation considérable de la résistance d'encrassement, donc une diminution des performances de l'échangeur de chaleur, car la couche du dépôt possède une conductivité thermique plus faible que celle du métal constituant cette surface [46]. La quantité de ce dépôt dépend du débit des protéines régissantes et des sels minéraux existant dans le mélange.

VI. Paramètres influençant l'encrassement

Il existe plusieurs paramètres influençant l'encrassement. Ces paramètres sont liés en général au fluide d'alimentation ou à la surface d'échange. Parmi ces paramètres, on peut citer :

- ✓ La vitesse d'écoulement du fluide d'alimentation ;
- ✓ La concentration de la matière encrassante ;
- ✓ La température de la surface d'échange de chaleur ;
- ✓ La température du fluide ;
- ✓ La nature de la surface d'échange ;
- ✓ La composition de la charge.

VII. Conclusion

L’encrassement est défini, comme étant l’accumulation des matériaux ou de substances indésirables sur les surfaces d’échange de chaleur. L’isolation et le dysfonctionnement jouent un rôle majeur dans la détermination de l'efficacité de l'échangeur de chaleur, en considérant que le dysfonctionnement diminue le coefficient global de l’échange ce qui conduit à des résultats indésirables d'autre part l'isolation améliore l'échangeur de chaleur en empêchant la perte de l’énergie

CHAPITRE IV

MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'ENCRASSEMENT

I. Introduction

De nos jours, la simulation numérique est devenue nécessaire dans la résolution des problèmes mathématiques insolubles analytiquement ou les problèmes non linéaires.

Dans notre cas, il s'agit d'un problème de mécanique de fluide avec un transfert de chaleur. Nous avons utilisé le logiciel de dynamique de fluide Ansys CFX dans une première partie pour poser notre problème, et dans une deuxième partie, nous avons utilisé le code Ansys Fluent pour résoudre le modèle.

Nous présentons dans ce chapitre, les équations modélisant le problème traité dans cette étude. Ces équations mettent en évidence le comportement des fluides chauds et froids dans l'échangeur de chaleur. Elles sont fondées selon les lois physiques, les hypothèses du modèle, les équations qui gouvernent l'écoulement et les conditions aux limites correspondantes sont développées en premier.

II. Programme Ansys

II.1. Introduction

Ansys est un logiciel de modélisation par éléments finis. Il permet de résoudre numériquement une grande variété de problèmes mécaniques, il peut effectuer une analyse structurelle (linéaire et non linéaire), une analyse thermique, des problèmes électromagnétiques, une analyse de fluide [48].

II.2. Organisation du code CFD (Computational fluide dynamics)

Le terme « CFD » est une abréviation de « computational fluide dynamics », qui définit une approche de mécanique de fluide numérique et présente des codes

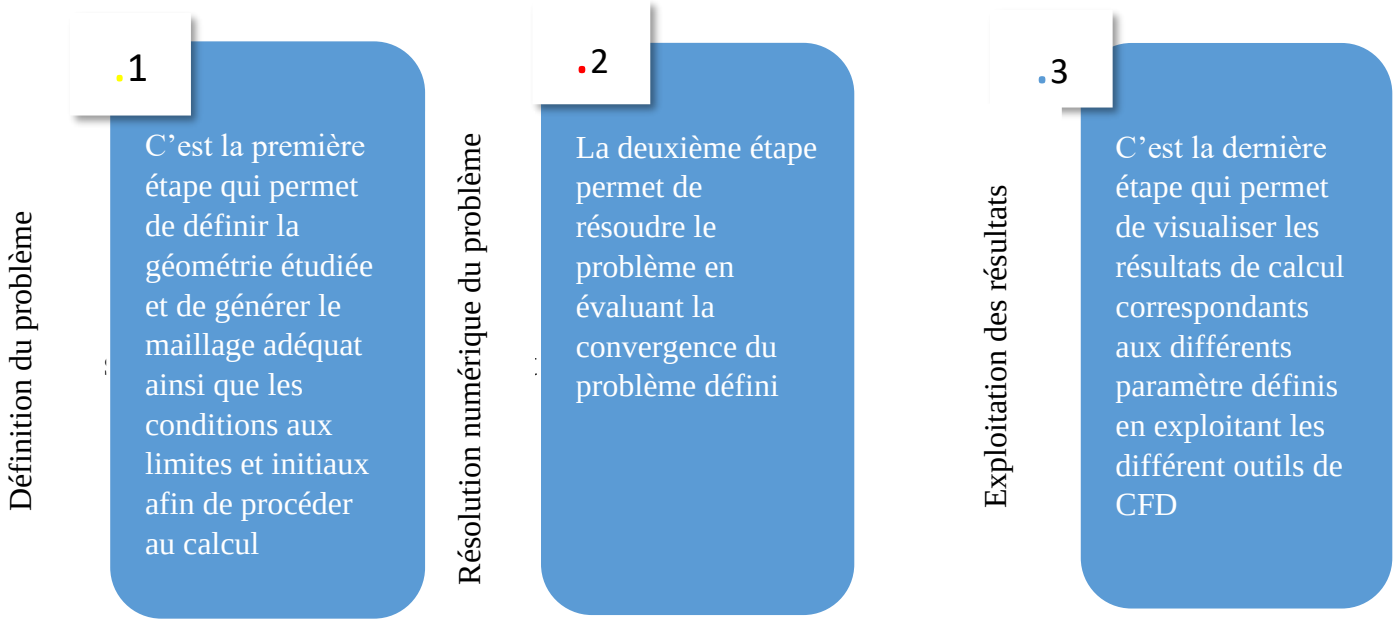
numériques permettant d'analyser les équations mathématiques pour un problème de mécanique de fluide et les résoudre dans un espace bien déterminer, défini par un maillage structuré ou non structuré.

Ce logiciel permet de suivre l'évolution des paramètres instantanés définissant notre problème tels que la vitesse, la pression et la température dans chaque point du maillage où se fait le calcul.

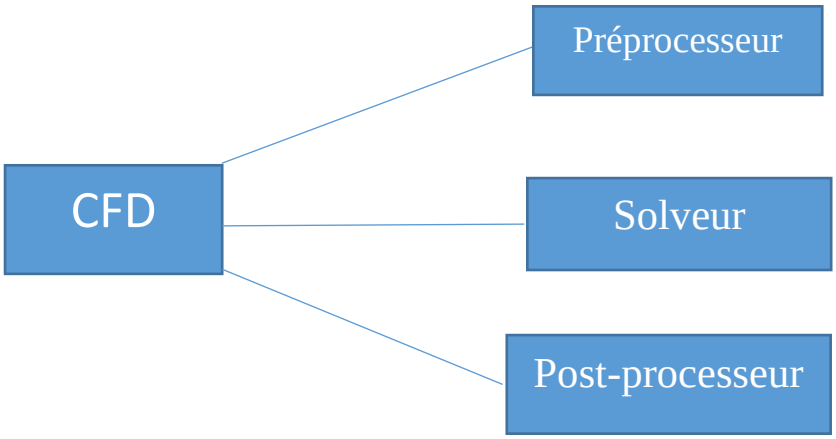
La qualité du maillage intervient dans la limitation des calculs et la précision du résultat qui sont présentés, autrement dit pour un bon maillage le temps de calcul est optimisé et le résultat est précis.

Le CFD présente aujourd'hui un logiciel de simulation numérique assez efficace pour la résolution des problèmes numériques pour plusieurs domaines, tels que la recherche scientifique et l'industrie.

En général, la résolution d'un problème de mécanique de fluide par ce logiciel passe pour les étapes décrites ci-dessous :



Le schéma suivant présente la structure de CFD :



II.2.1. Le Préprocesseurs CFD

Les étapes et généralement dans l'ordre suivant :

✓ Construire une géométrie : Selon que la géométrie du problème est un, deux ou en trois dimensions, la géométrie consiste à créer des lignes, des zones ou des volumes. Des nœuds et des éléments peuvent cependant être créés à partir de coordonnées seulement.

✓ Définir les matériaux : Un matériau est défini par ses constantes de matériau. Chaque l'élément doit être affecté à un matériau particulier.

✓ Générer un maillage d'élément : Le problème est discrétisé avec des points nodaux, les nœuds sont connectés pour former des éléments finis, qui forment ensemble le matériau le volume. En fonction du problème et des hypothèses retenues, le type d'élément doit être déterminé. Dans Ansys, le maillage des éléments peut être créé de plusieurs manières. Le moyen le plus habituel est qu'il soit créé automatiquement, mais plus ou moins contrôlé. Il appartient à

l'utilisateur de créer un maillage capable de générer des résultats avec un degré suffisant de précision.

II.2.2. Le Solveur

Le rôle principal du solveur consiste à exécuter le calcul pour un problème étudié. Les résultats sont générés par la méthode des volumes finis en se basant sur les équations de Navier Stockes dans chaque maille. Pour notre cas, on s'est basé également sur l'équation de la chaleur en adoptant le bilan énergétique pour étudier le transfert thermique dans notre système.

Le solveur adopte une solution approchée pour la résolution du problème vu la non linéarité de système d'équations, et pour aboutir au résultat final, le système doit converger, c'est - à - dire la différence entre deux itérations successives sera inférieure à un critère défini par l'utilisateur, si ceci est achevé, le calcul s'arrête automatiquement, sinon le calcul s'arrête lorsqu'il atteint le nombre d'itérations maximal désigné.

Une fois le calcul est terminé, le programme enregistre les informations nécessaires pour les transmettre au Post - processeur.

II-2.3. Le Post – processeur

Après avoir terminé le calcul, le CFD - Post permet d'analyser et de traiter les résultats observés. Cet outil nous permet également de visualiser les profils de vitesse, d'étudier la variation de pression ou de température selon le problème étudié, ainsi que les lignes de courant, les contours et les iso - surfaces pour chaque

variable, on peut aussi observer une animation pour mieux comprendre le phénomène décrit.

II.3. Les codes de CFD

II.3.1. Le code Ansys CFX

Ansys CFX est un code industriel de la CFD, ce code est l'un des plus utilisés actuellement pour la modélisation numérique des problèmes de mécanique de fluide, il permet de traiter ces problèmes en exploitant les différents schémas numériques présentés. Le traitement des problèmes numériques en CFX est effectué dans le but d'optimiser le résultat qu'on veut trouver, c'est - à - dire un résultat précis pour une durée de réalisation limitée. Il est aussi compatible avec les systèmes CAO (construction assistée par ordinateur).

II.3.2. Le code Ansys Fluent

Ce code est l'un des codes les plus performants comme Ansys CFX, et il offre toutes les capacités physiques qui permettent de résoudre n'importe quel problème de dynamique de fluide, les écoulements des fluides, les transferts thermiques et même les réactions chimiques. Il est utilisé pour des applications industrielles, comme la modélisation de l'action du vent sur un structure ou l'action de l'eau sur une hélice et même la simulation d'un transfert de chaleur pour un échangeur thermique, qui est le cas étudié ici. De même que Ansys CFX, il est aussi compatible avec les logiciels CAO ce qui justifie son efficacité et sa performance pour l'étude des projets de grande importance.

II.4. La méthode numérique

Plusieurs phénomènes de la mécanique du fluide peuvent être modélisés par des équations différentielles et non linéaires. Ces équations sont difficiles à résoudre donc on utilise la méthode numérique pour transformer une équation différentielle en une équation algébrique facile à résoudre (équation discrétisée).

Les méthodes de discrétisation les plus couramment utilisées sont :

- ✓ La méthode des différences finies.
- ✓ La méthode des éléments finis.
- ✓ La méthode des volumes finis.

II.5. Maillage

Le maillage est la première étape de la méthode des éléments finis. Cette étape consiste à discrétiser l'espace en un ensemble de petits volumes. 3 types de maillage existent :

II.5.1. Maillage structuré

Un maillage structure est un maillage régulier, c'est un maillage utilisant des éléments de type hexaédriques en volume, quadrilatère (carrée) en surface. Ce type de maillage est caractérisé par l'économie en nombre d'éléments, il présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent. Ce type de maillage est difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe. De plus, ce type de maillage pose des problèmes au niveau du raffinement, car le raffinement d'une zone du maillage pourrait influencer l'entièreté du maillage, ce qui peut induire à d'autres problématiques.

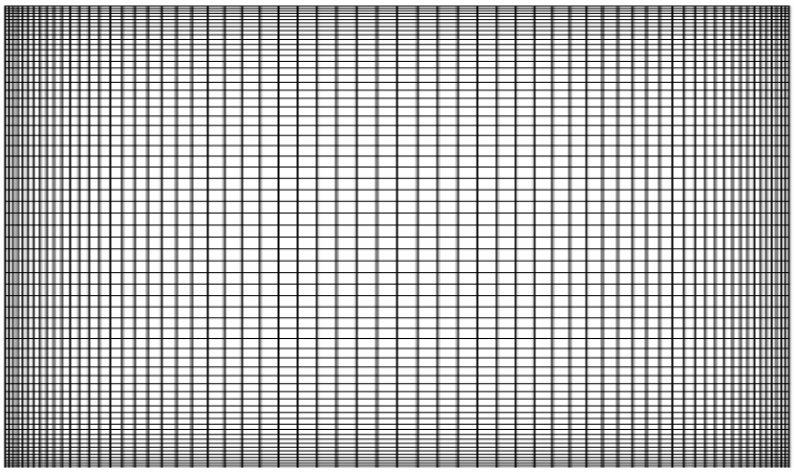


Figure IV.1. Maillage structural.

II.5.2. Maillage non structuré

C'est un maillage utilisant des éléments de type tétraèdres, prismes, d'hexaèdres et de pyramides en volume, type triangle ou encore quadrilatère en surface ... Ce maillage a l'avantage de créer des maillages triangulaires ou tétraédriques dans des géométries quelconques et complexes. Ce type de maillage pose des difficultés pour contrôler la densité des points dans une zone précise.

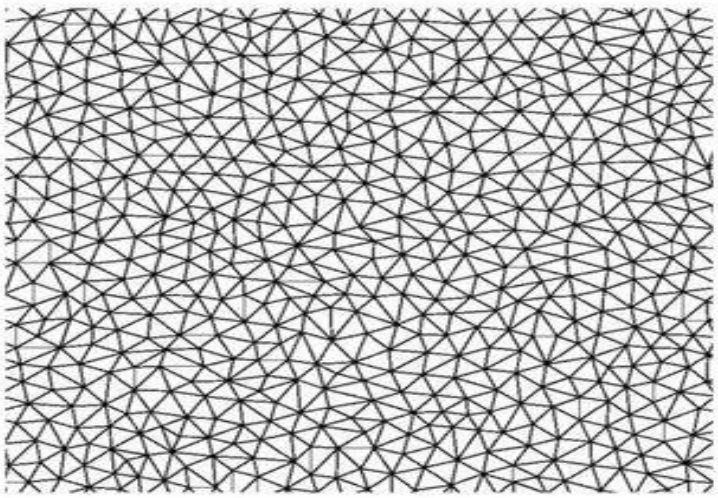


Figure IV.2. Maillage non structuré.

II.5.3. Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Il combine les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

III. Présentation de la raffinerie

III.1. Introduction

Une raffinerie est une installation industrielle ou artisanale destinée à transformer ou purifier divers produits. Selon le produit traité, les raffineries de pétrole en Algérie jouent un rôle très important dans la satisfaction des besoins du marché local en dérivés du pétrole, alors que le pays a réussi à arrêter les importations pour la troisième année consécutive (2024). Selon les données de l'OPEP, Sonatrach possède déjà cinq (05) raffineries nationales d'une capacité totale de raffinage de 30 MTA (Million tonne par année) : Skikda (16,5 MTA), Adrar (0.6 MTA), Alger 3,65 MTA) et Arzew (3,75 MTA).

III.2. Présentation de la raffinerie étudiée

Une raffinerie est exposée au problème d'encrassement qui est dû au bouchage de ses échangeurs de chaleur. La gravité de cet encrassement réside dans la diminution de la capacité de l'échangeur et d'énormes dépenses au cours de chaque nettoyage.

Un schéma simplifié d'un exemple de raffinerie considéré est présenté sur la Figure IV.3. 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 :

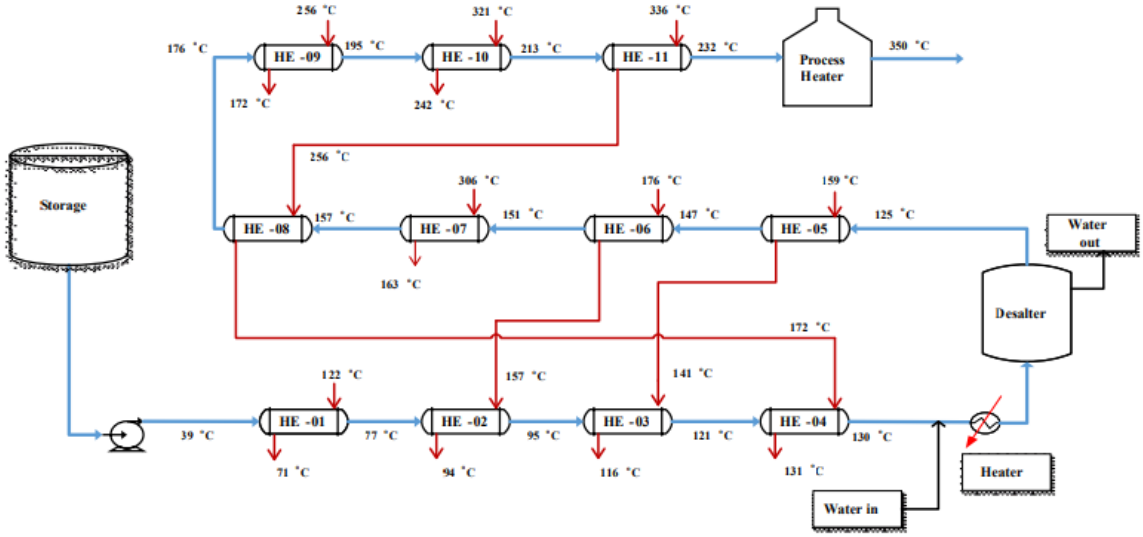


Figure IV.3. Diagramme simplifié du train de préchauffage de la raffinerie.

Dans cette étude, on s'intéresse à la troisième batterie composée des échangeurs 09 10 et 11. Les deux précédentes batteries ont été considérées dans des travaux antérieurs.

IV. Mécanisme de l'encrassement par le pétrole

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) :**

L'autoxydation des hydrocarbures possède un mécanisme chimique complexe avec un grand nombre de réactions radicalaires [49]. Néanmoins, dans la littérature il n'existe pas un mécanisme réactionnel détaillé décrivant l'autoxydation dans les pétroles bruts. D'autre part l'instabilité des fractions pétrolières vis-à-vis de la présence d'oxygène a été largement étudiée par plusieurs auteurs [50-53]. Particulièrement dans le domaine de l'aviation, plusieurs mécanismes sont proposés pour décrire la formation des gommes dans le jet fuel, à savoir le modèle simplifié à deux étapes de Taylor et al. [54] et le modèle global à sept étapes de Katta et al. [55]. Dans cette étude nous avons adapté un modèle cinétique pseudo-détaillé et plus représentant, développé par Zabarnik et al. [56]. Il s'agit d'un mécanisme d'auto-oxydation en chaine comme le montre la figure suivante :

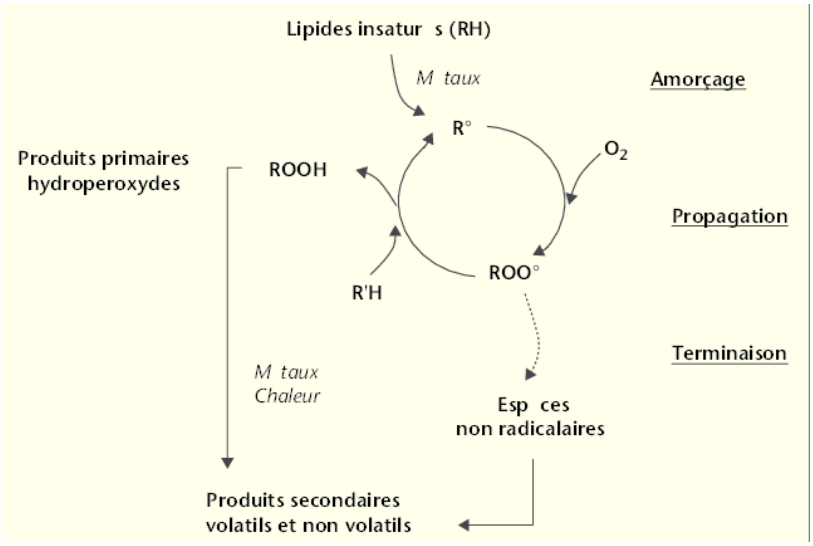


Figure IV.4. Diagramme du mécanisme en chaine de l'auto-oxydation.

Le modèle est amélioré par West et al. 2011 [57] pour contenir vingt-sept réactions avec les étapes de la déposition, Tableau IV.1.

Tableau IV.1. Etape de la formation de l'encrassement.

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

$$Q_d = K_d \times C_b \qquad \text{IV.1}$$

Avec :

$$\frac{1}{K_d} = \frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_a} \qquad \text{IV.2}$$

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

$$K_a = K_a^0 \exp\left(\frac{E_a}{RT_s}\right) \qquad \text{IV.3}$$

Les valeurs de E_a et de K_a^0 employées sont celles proposées par Turner [59] dans le Tableau IV-2.

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

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

✓ **Cristallisation des sels :**

Le modèle le plus utilisé dans la littérature pour décrire l'encrassement par la cristallisation du sulfate de calcium est celui proposé par Nancollas et Liu [60] :

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

Avec :

$$k_r = k_0 \exp\left(E / RT_s\right) \qquad \text{IV.5}$$

Le facteur k_0 et l'énergie d'activation E choisie pour le modèle de ce travail sont donnés dans le Tableau IV.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 $CaSO_4$ [61].

Tableau IV.3. Valeurs des paramètres relatives au modèle de la cristallisation du $CaSO_4$ [61].

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 :

$$Q_d^{Tot} = \sum_{i=1}^{3} Q_i \qquad \text{IV.6}$$

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. IV.4.

Tableau IV.4. Conditions aux limites.

Surface	Conditions aux limites
Entrée	Vitesse
Paroi	Paroi
Sortie	Pression

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 IV.5.

Tableau IV.5. Propriétés du mélange.

	Densité (kg/m^3)	Chaleur massique (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. [62]. Les conditions de simulation reproduisent les conditions opératoires du train de préchauffage du pétrole brut de la raffinerie, Tableau IV.6.

Tableau IV.6. Conditions de simulation.

Condition opératoire	Valeur
La vitesse à l'entrée	1-2.2 m/s
La température à l'entrée	300 K
La fraction massique des Asphaltènes	0.0007
La température à la sortie	370 K
Le flux thermique à la surface	510^4 W/m^2

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

VI. Modélisation d'un échangeur tubulaire

VI.1. Bilan thermique

Le dimensionnement des échangeurs repose principalement sur un calcul de bilan thermique mais également sur la prise en compte des pertes de charges [63, 64]. La puissance d'un échangeur thermique est le flux de chaleur perdu par le fluide chaud et le flux de chaleur gagné par le fluide froid pendant leur traversée de l'échangeur, s'écrit sous la forme suivante qui implique la notion de conservation de l'énergie :

$$P = m_c cp_c \left(T_{c1} - T_{c2}\right) = m_f cp_f \left(T_{f2} - T_{f1}\right) \qquad \text{IV.7}$$

Le débit thermique unitaire de chaque fluide est déterminé par l'équation suivante:

$$q_t = m \times cp \qquad \text{IV.8}$$

Pour le fluide chaud l'équation de débit unitaire s'écrit :

$$q_{tf} = m_f \times cp_f \qquad \text{IV.9}$$

VI.2. Evaluation du coefficient d'échange global : [64]

La connaissance du coefficient d'échange global est très importante dans les calculs des échangeurs de chaleur. Le flux de chaleur est défini par :

$$Q_o = U \times dS\left(T_c - T_f\right) \qquad \text{IV.10}$$

Le coefficient d'échange global de transfert de chaleur met en jeu trois résistances [64] :

La convection dans le fluide chaud est régie par un coefficient de convection h_c permettant de définir une résistance thermique convective appelée R_{th1} :

$$R_{th1} = \frac{1}{h_c} \qquad \text{IV.11}$$

La convection dans le fluide froid est régie par un coefficient de convection h_f permettant de définir une résistance thermique convective appelée R_{th2} :

$$R_{th2} = \frac{1}{h_f} \qquad \text{IV.12}$$

La conduction à travers la paroi solide d'épaisseur e et de conductivité thermique λ, permettant de définir une résistance thermique de conduction appelée R_{th3} :

$$R_{th3} = \frac{e}{\lambda} \qquad \text{IV.13}$$

L'équation de coefficient d'échange globale est définie par :

$$U = \frac{1}{\frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_c}} \qquad \text{IV.14}$$

La performance réelle de l'échangeur sera déduite dans les calculs de coefficients d'échange global :

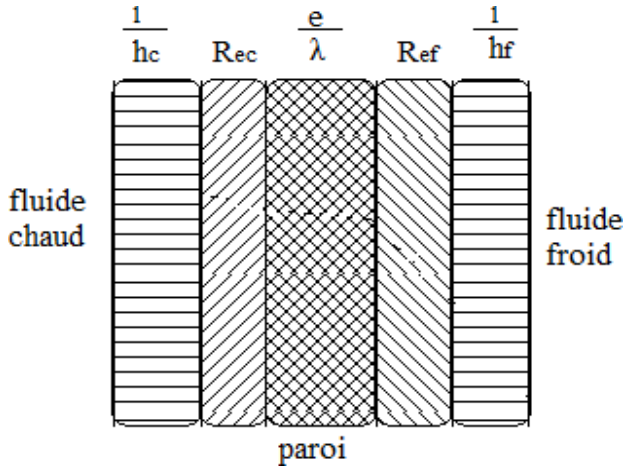


Figure IV.5. Résistance d'encrassement thermique.

R_{ec} dit la résistance d'encrassement coté fluide chaud et R_{ef} dit la résistance d'encrassement coté fluide froid. En ajoutant les résistances d'encrassement l'équation de coefficient d'échange thermique globale devient :

$$U = \frac{1}{\frac{e}{\lambda} + +R_{ec} + \frac{1}{h_f} + R_{ef} + \frac{1}{h_c}} \qquad \text{IV.15}$$

VI.3. La résistance d'encrassement prédite par le modèle de Kern & Seaton

Elle est donnée par la relation :

$$R_{d\ mod} = R_d\left[1 - \exp(-\beta t)\right] \qquad \text{IV.16}$$

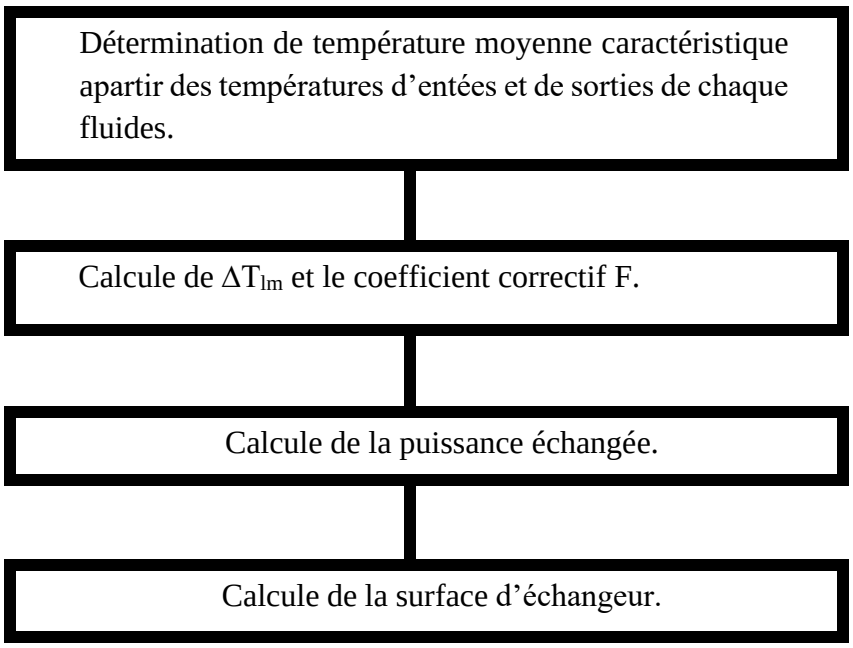
Avec :

R_d : Valeur asymptotique de la résistance d'encrassement lorsque $T \rightarrow \infty$.

β : Paramètre représentant l'inverse du temps de relaxation. Il dépend des propriétés du système.

VI.4. La méthode de différence de température de logarithmique moyenne « ΔTLM »

Tableau IV.7 : Principe de méthode DTLM. [65]



Soit :

$$\Delta Tlm = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \qquad \text{IV.17}$$

Pour un échangeur Contre-courant ΔTlm est sous la forme :

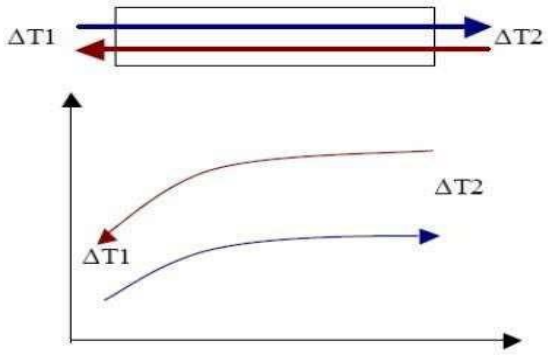


Figure IV.6. : Distribution de température dans un échangeur contre - courant.

$$\Delta Tlm = \frac{\left[\left(T_{c1} - T_{f2}\right) - \left(T_{c2} - T_{f1}\right)\right]}{\ln\left(\frac{\left(T_{c1} - T_{f2}\right)}{\left(T_{c2} - T_{1}\right)}\right)} \qquad \text{IV.18}$$

Pour un échangeur Co-courant ΔTlm est sous la forme :

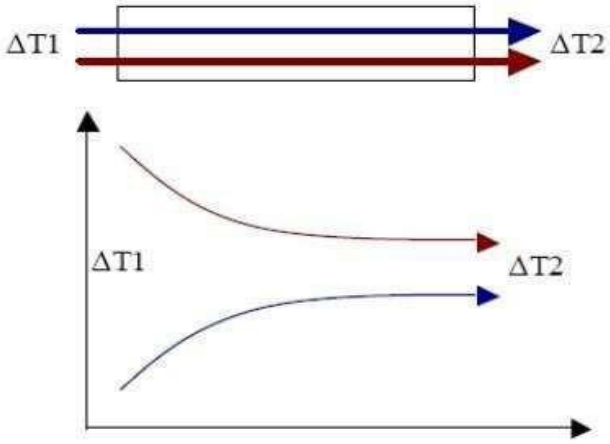


Figure IV.7. : Distribution de température dans un échangeur Co-courant.

$$\Delta Tlm = \frac{\left[\left(T_{c1} - T_{f1}\right) - \left(T_{c2} - T_{f2}\right)\right]}{\ln\left(\frac{\left(T_{c1} - T_{f1}\right)}{\left(T_{c2} - T_{f2}\right)}\right)} \qquad \text{IV.19}$$

VII. Méthode de calcul

VII.1. Hypothèses des calculs

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

- ✓ Le pétrole brut est considéré comme étant un fluide Newtonien ;
- ✓ L'écoulement du pétrole brut dans les tubes des échangeurs de chaleur se fait en régime turbulent ;
- ✓ Le fluide est incompressible et l'écoulement axisymétrique ;

✓ Le mélange pétrole brut-espèces d'encrassement est considéré comme monophasique. Cela revient d'une part à la faible concentration des espèces d'encrassement dans le pétrole (de l'ordre de ppm) et d'autre part aux faibles dimensions des particules.

La raffinerie proposée présentée précédemment est composé de plusieurs batterie d'échangeurs tubulaires (HE-1 à 4 ; HE-5 à 8 et HE-9 à 11). Nous considérons dans cette contribution la troisième batterie.

VII.2. Équations gouvernantes de l'écoulement

L'écoulement du fluide et les transferts de chaleur et de matière sont régis par les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et des espèces chimiques [66]. L'équation monodimensionnelle de continuité peut être écrite comme suit :

$$\frac{1}{\bar{r}}\frac{\partial(\bar{r}\rho v\bar{\bar{r}})}{\partial\bar{r}}+\frac{\partial(\rho\bar{v}x)}{\partial\bar{x}}=0 \qquad \text{IV.20}$$

Les équations de quantité de mouvement sont exprimées comme suit :

$$\overline{vr}\frac{\partial(\bar{v}\bar{r})}{\partial\bar{r}}+\bar{v}x\frac{\partial(\bar{\bar{v}}\bar{r})}{\partial\bar{x}}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial\bar{r}}+\frac{(\mu+\mu t)}{\rho}\left[-\frac{\bar{\bar{v}}\bar{r}}{\bar{r}^2}+\frac{1}{\bar{r}}\frac{\partial}{\partial\bar{r}}\left(\bar{r}\frac{\partial\bar{v}\bar{r}}{\partial\bar{r}}\right)+\frac{\partial^2\bar{v}\bar{x}}{\partial^2\bar{r}}\right] \qquad \text{IV.21}$$

L'équation générale de conservation de l'énergie peut être écrite comme suit :

$$\rho Cp(\bar{v}_r\frac{\partial T}{\partial\bar{r}}+\bar{\bar{v}}_x\frac{\partial T}{\partial\bar{x}})=-\frac{\partial p}{\partial\bar{x}}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\bar{r}}\left(\bar{r}keff\frac{\partial T}{\partial\bar{r}}\right)+\frac{\partial}{\partial\bar{x}}\left[keff\frac{\partial T}{\partial\bar{x}}\right] \qquad \text{IV.22}$$

Où $\bar{v}$, T représentent respectivement la vitesse et la température. Alors que la densité, Capacité thermique, la viscosité, la conductivité thermique et les variables de pression sont représentées respectivement par Cp, ρ, μ, $keff$ et p.

VII.3. Équations de conservation des espèces chimiques

Le mécanisme de l'encrassement proposé dans le chapitre précédent a été intégré dans le modèle globale de l'écoulement comme un ensemble de réactions et de déposition dans l'équation de transport des espèces. Des réactions de paroi ont également été appliquées afin d'exprimer les étapes de déposition des gommes insolubles (encrassement organique) d'une part et le processus d'attachement des oxydes de fer sur la surface des tubes (encrassement inorganique) d'autre part. Le logiciel Ansys Fluent prédit la fraction de masse locale de chaque espèce, Y_j , en résolvant une équation de convection-diffusion pour la $j^{éme}$ espèce [66].

Cette équation de conservation prend la forme générale suivante :

$$\frac{\partial(\bar{u}\rho Y_j)}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left(\rho D_j \frac{\partial Y_j}{\partial \bar{x}}\right) - r_j \qquad \text{IV.23}$$

Dj représente le coefficient de diffusion de masse et rj est la vitesse de réaction nette de l'espèce j, déterminée comme :

$$r_j = M_{w,j} \sum_{k=1}^{Nr} r_{j,e} \qquad \text{IV.24}$$

Mw, est le poids moléculaire de l'espèce j et rj, est la vitesse d'Arrhenius de l'espèce j dans la réaction e.

Notons que le flux massique des espèces déposées dû à la diffusion et à la convection est équilibré avec le taux de consommation et de production sur la surface, tel qu'exprimé par l'équation :

$$\overline{J_i}\,\bar{n} - Q_{di} Y_{i,wall} = R"_i \qquad \text{IV.25}$$

Où $\vec{n}$ est un vecteur unitaire normal à la surface, Jiest le flux de diffusion de l'espèce i, R_i " est le taux de production de l'espèce i dû à la réaction de surface. Y_i, et Q_{di} sont la fraction massique et la vitesse massique de déposition de l'espèce i à la surface de la paroi.

VII.4. Modélisation de la turbulence

La modélisation du phénomène du turbulence et très importante dans la CFD, en effet la caractérisation de l'écoulement turbulent est l'un des plus grands défis de la mécanique des fluides en raison de son instabilité et sa très grande diffusivité. Dans le modèle de turbulence k-ε, l'énergie de la turbulence est calculée à partir de l'énergie cinétique turbulente (k) et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente est calculé à partir de la dissipation turbulente (ε), obtenus à partir des équations de transport suivantes [66] :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \bar{u} k)}{\partial \bar{x}}=G_k-\rho\varepsilon+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial \bar{x}}\right] \qquad \text{IV.26}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \bar{u}\varepsilon)}{\partial \bar{x}}=C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-Y_\varepsilon+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial \bar{x}}\right] \qquad \text{IV. 27}$$

Dans ces équations, G_k représente la génération d'énergie cinétique de la turbulence due aux gradients de vitesse moyens. $C_{1\varepsilon}$ et $C_{2\varepsilon}$ sont des constantes. σ_k et σ_ω représentent les nombres turbulents de Prandtl. Ces paramètres sont plus détaillés dans [67].

Le modèle de turbulence k-ω prédit la turbulence avec l'énergie cinétique de turbulence (k) avec un taux de dissipation spécifique (ω) [66].

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

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \bar{u} k)}{\partial \bar{x}}=G_k-Y_k+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial \bar{x}}\right] \quad \text{IV.28}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \bar{u} \omega)}{\partial \bar{x}}=G_\omega-Y_\omega+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial \bar{x}}\right] \quad \text{IV.29}$$

Le modèle de turbulence le plus couramment considéré dans le domaine de l'encrassement du pétrole brut est le modèle de transport de contrainte de cisaillement (shear-stress transport SST) [68, 69]. Ce dernier combine le modèle de turbulence k-ω et le modèle de turbulence k-ε de telle sorte que k-ε est utilisé dans l'écoulement de cisaillement libre au sein du fluide. D'autre part, le k-ω est appliqué dans la région interne de la couche limite qui est la zone de formation du dépôt d'encrassement [66].

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I. Introduction

Les raffineries de pétrole brut utilisent sur des échangeurs de chaleur tubulaires pour assurer le transfert de chaleur. Cependant, ces échangeurs sont sujets à un phénomène redouté : l'encrassement. Ce phénomène, causé par la nature encrassante du pétrole brut, se traduit par la formation de dépôts de nature isolante thermiquement sur les surfaces d'échange des tubes des échangeurs, affectant négativement leurs performances et leurs efficacités.

L'encrassement dans les échangeurs de chaleur tubulaires n'est pas seulement un problème technique, il représente également un défi économique pour les raffineries. Les dépôts réduisent le coefficient d'échange thermique, diminuant ainsi la capacité de transfert de chaleur et augmentant la consommation d'énergie. De plus, l'encrassement peut entraîner des problèmes de corrosion, des pannes d'équipement et une production de qualité inférieure. Finalement, l’encrassement engendre des couts supplémentaires importants.

Cette présente étude s'intéresse à l'analyse de l'encrassement dans une batterie d'échangeurs de chaleur tubulaires d'une raffinerie de pétrole brut. En se concentrant principalement sur la troisième batterie composée des échangeurs HE-09, HE-10 et HE-11, l'étude vise à évaluer et comprendre les différents aspects de l'encrassement et son impact sur les performances des échangeurs.

Cette étude s'inscrit dans une démarche globale visant à mieux comprendre et à mieux gérer l'encrassement dans les échangeurs de chaleur tubulaires des

raffineries de pétrole brut. Les résultats contribueront à améliorer la performance, la fiabilité et la rentabilité de ces installations industrielles majeures.

II. Résultats et discussions

L'accent initial sera mis sur l'évaluation de la validité du modèle proposé basé sur le cadre théorique de Kern et Seaton, suivi d'un examen de son accord avec les données expérimentales. Par la suite, une analyse de l'impact de certains facteurs thermiques et hydrodynamiques sur l'encrassement sera réalisée.

II.1. Validation du modèle

La validation du modèle est représentée sur les figures V.1 a et b. La première figure présente la validation du modèle proposé par rapport au modèle théorique de Kern et Seaton, tandis que la deuxième présente la validation du modèle par rapport aux résultats expérimentaux de Harch [70], en utilisant les mêmes données et configuration géométrique.

Les résultats numériques montrent globalement un niveau de validation satisfaisant avec le modèle théorique de Kern et Seaton et les données semi-empiriques de Harch, avec des erreurs qui se situent largement dans des limites tolérables.

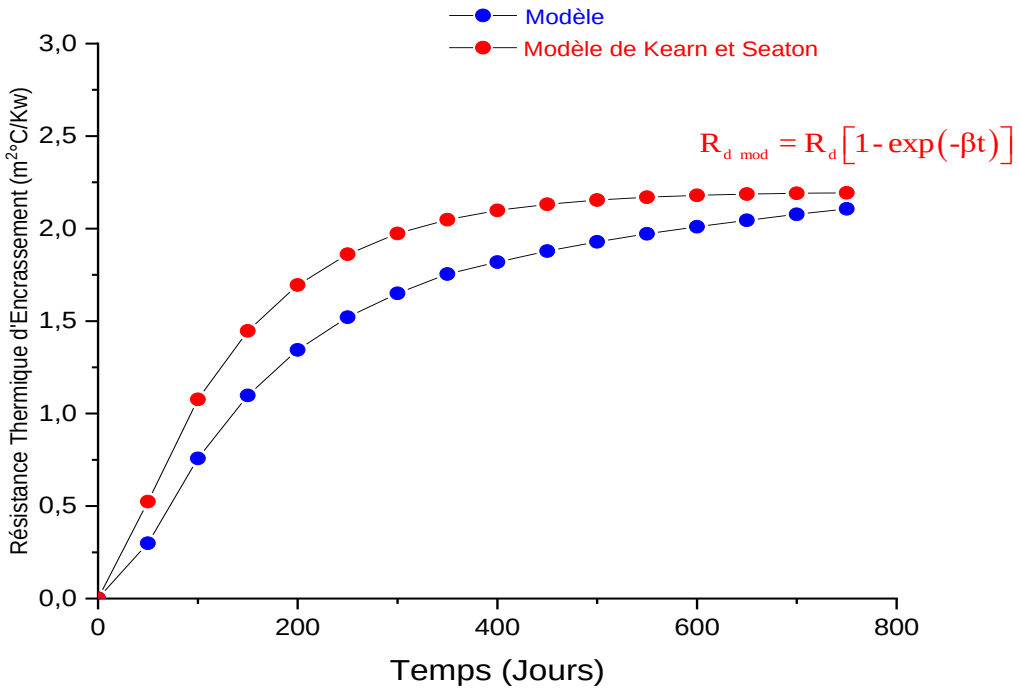


Figure V.1.a. Validation du modèle par rapport au modèle de Kern et Seaton.

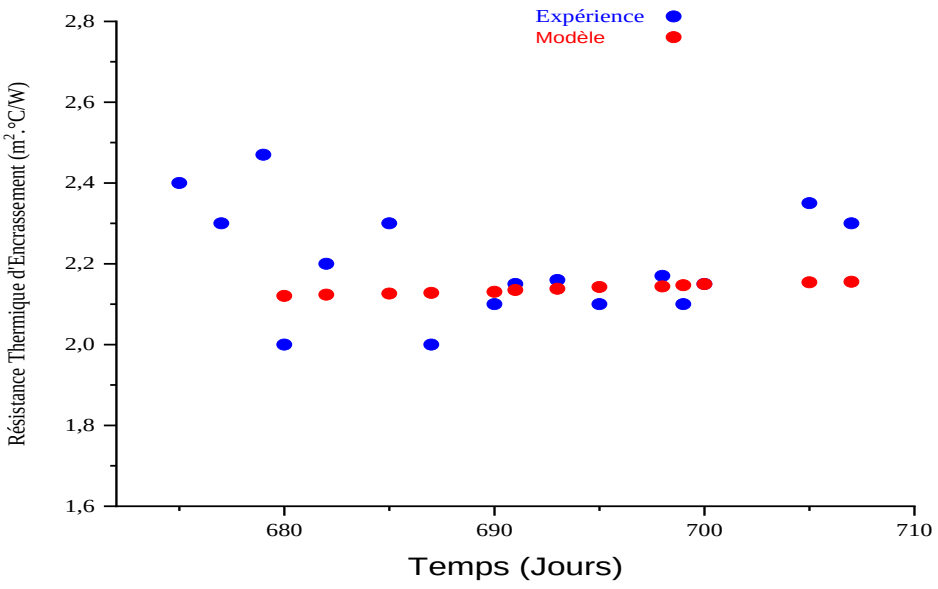


Figure V.1.b. Validation du modèle par rapport aux données expérimentaux de Harch [70].

II.2. La résistance thermique d’encrassement

Le modèle a été utilisé pour calculer la résistance thermique à l’encrassement sur une période d’environ 800 jours de fonctionnement de la batterie. Les résultats sont présentés dans la figure V.2. Sur la base du graphique, il est évident que la résistance à l'encrassement thermique augmente progressivement à mesure que la durée de fonctionnement augmente sur les trois échangeurs de la batterie. Notamment, le premier échangeur (HE-09) présente les valeurs les plus élevées, affichant un modèle asymptotique distinct des deux autres échangeurs. Ce phénomène peut être attribué à la nature complexe du mécanisme d’encrassement impliqué. De nombreux auteurs ont postulé que les échangeurs ayant une valeur d'encrassement élevée sont principalement affectés par l'encrassement organique qui dépend fortement de l’augmentation de la température.

II.3. Le coefficient d’échange global

La Figure V.3 présente l’effet de l’encrassement sur le coefficient global d’échange thermique. Au cours du temps, une diminution de ce coefficient est constatée, due à l’accroissement de la résistance thermique de nature isolante $\left(\lambda_{\text{dépôt pétrolier}} \approx 0.12\ \text{W/mK}\right)$ liée à l’encrassement, ce qui réduit directement l’efficacité thermique des échangeurs de la batterie considérée. La baisse la plus significative est observée pour le premier échangeur (HE-09), qui présente la plus grande résistance thermique, comme le montre la Figure V.2.

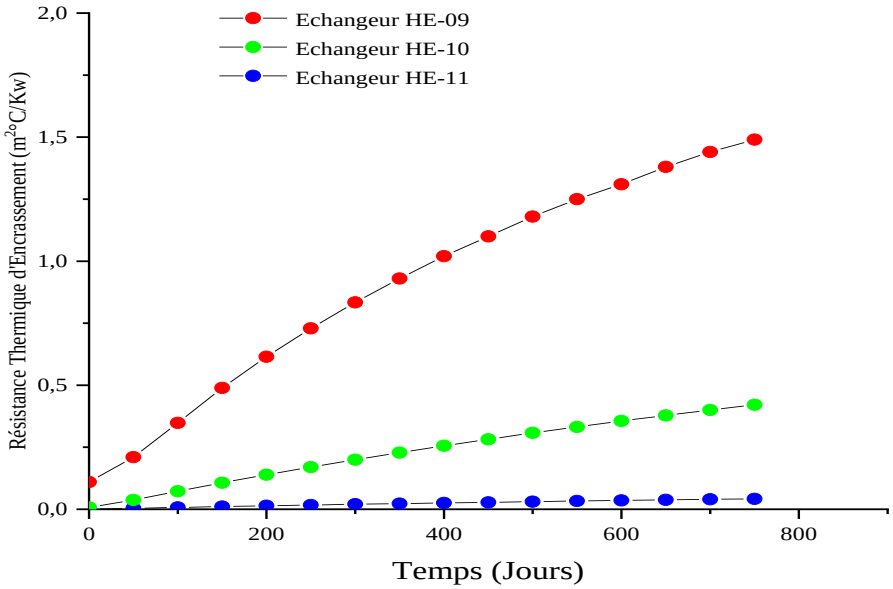


Figure V.2. Evolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction du temps pour les trois échangeurs.

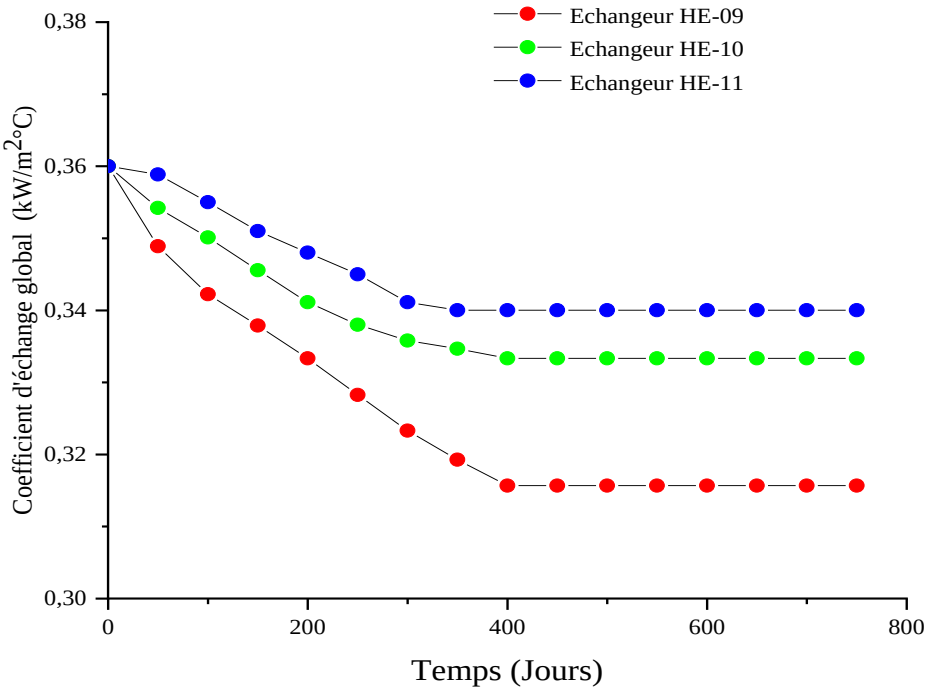


Figure V.3. Evolution du coefficient d'échange thermique global.

Il est généralement recommandé et expliqué dans la littérature spécialisée de procéder au nettoyage des équipements lorsque le coefficient chute de 40% par rapport à sa valeur initiale avec un échangeur propre.

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

Cette section considère l'effet de l'encrassement de la batterie d'échangeurs de chaleur sur le débit, comme le montre la Figure V.4. Le graphique indique que la vitesse dans le premier échangeur (HE-09) de batterie augmente puis se stabilise. Cette augmentation entraîne une contrainte de cisaillement superficielle plus élevée, augmentant ainsi l'élimination des dépôts d'encrassement.

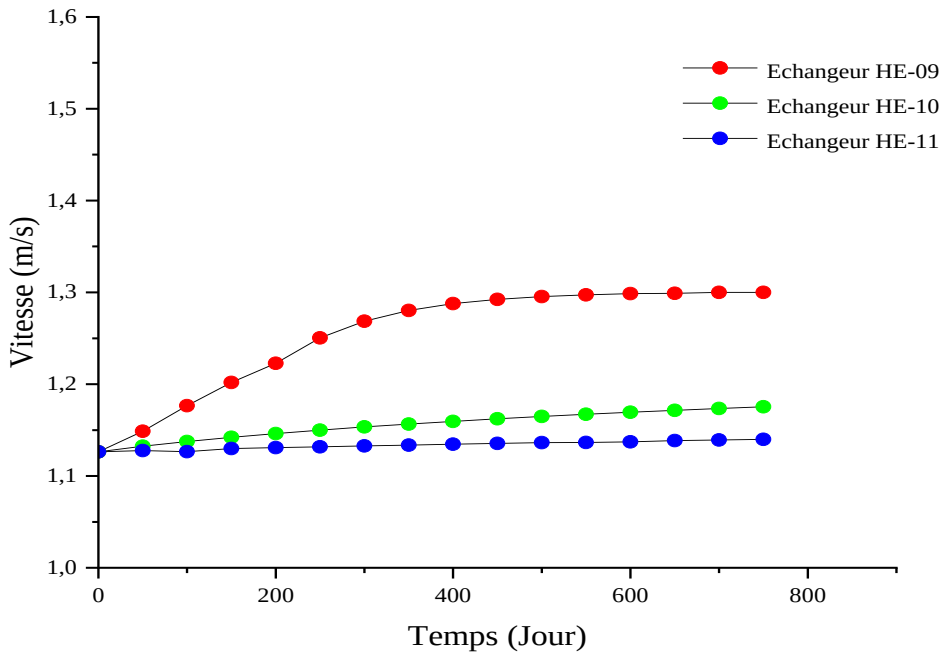


Figure V.4. Evolution de l'encrassement en fonction de la vitesse dans les tubes.

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

Dans cette section, nous examinons comment l'accumulation de résidus affecte le diamètre intérieur des tubes au sein d'un ensemble d'échangeurs de chaleur de la troisième batterie, illustré par la figure V.5. On observe une réduction notable du diamètre pour le premier échangeur (HE-09), suivie d'une stabilisation. Cet effet paraît minime pour le deuxième et troisième échangeur de la batterie (HE-10 et 11). Les dépôts organiques tendent à être plus conséquents que les dépôts inorganiques [71].

En ce qui concerne les performances hydrodynamiques, telles que le diamètre des tubes et la vitesse du fluide, elles sont de moindre importance pour le deuxième et troisième échangeur de la batterie par rapport aux performances thermiques.

II.6. La perte de pression dans les échangeurs

Dans cette partie, nous abordons la manière dont la perte de pression influence l'efficacité des échangeurs de chaleur et son interaction avec l'encrassement, illustrée par la figure V.6. L'analyse révèle une hausse progressive de la perte de pression dans le premier échangeur (HE-09) de la batterie. Il est crucial de définir un seuil de pression pour déclencher le nettoyage des dispositifs impactés. Cette perte de pression semble négligeable pour les autres échangeurs de la batterie (HE-10 et 11).

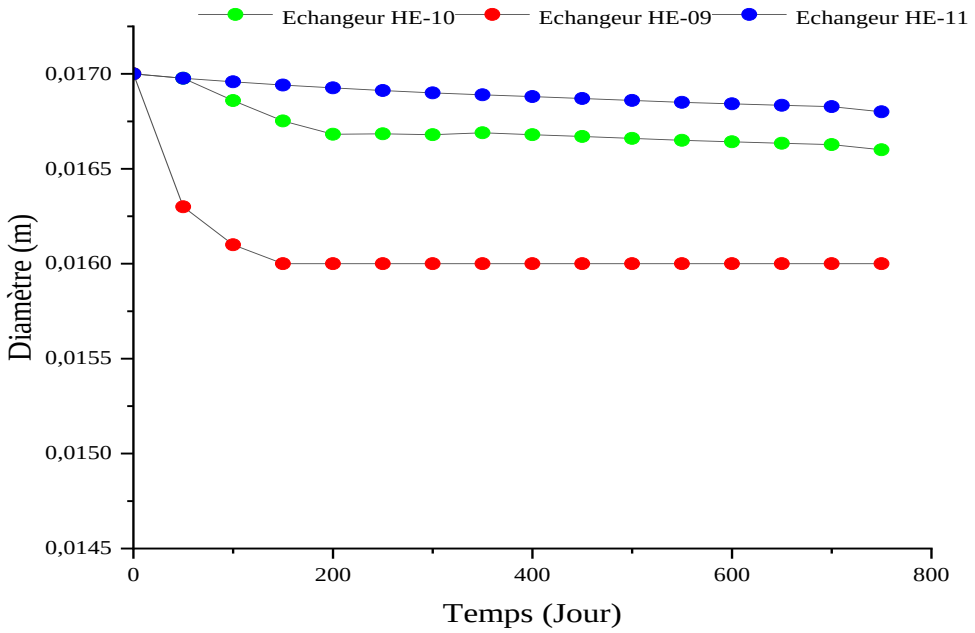


Figure V.5. Evolution de l'encrassement en fonction des diamètres des tubes.

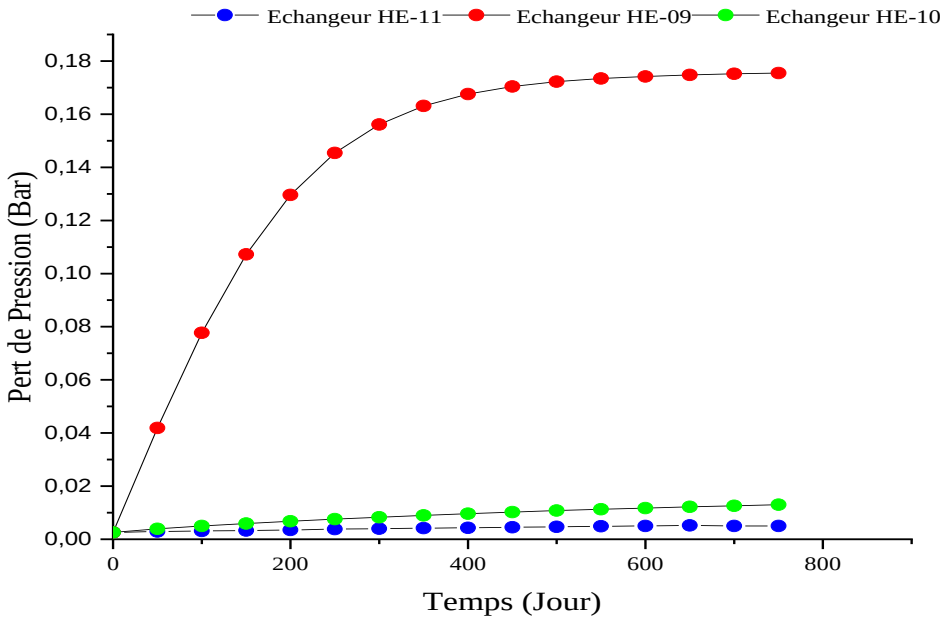


Figure V.6. Evolution de de la perte de pression en fonction du temps dans les échangeurs.

II.7. La pression de pompage dans les échangeurs

La discussion précédente sur la perte de pression indique qu'une compensation par un pompage additionnel est nécessaire, ce qui entraîne des coûts additionnels. La figure V.7 illustre la variation de cette puissance supplémentaire avec le temps pour le premier échangeur. Selon des analyses économiques issues de la littérature spécialisée, les coûts liés au pompage additionnel sont faibles comparés à ceux résultant de l'encrassement.

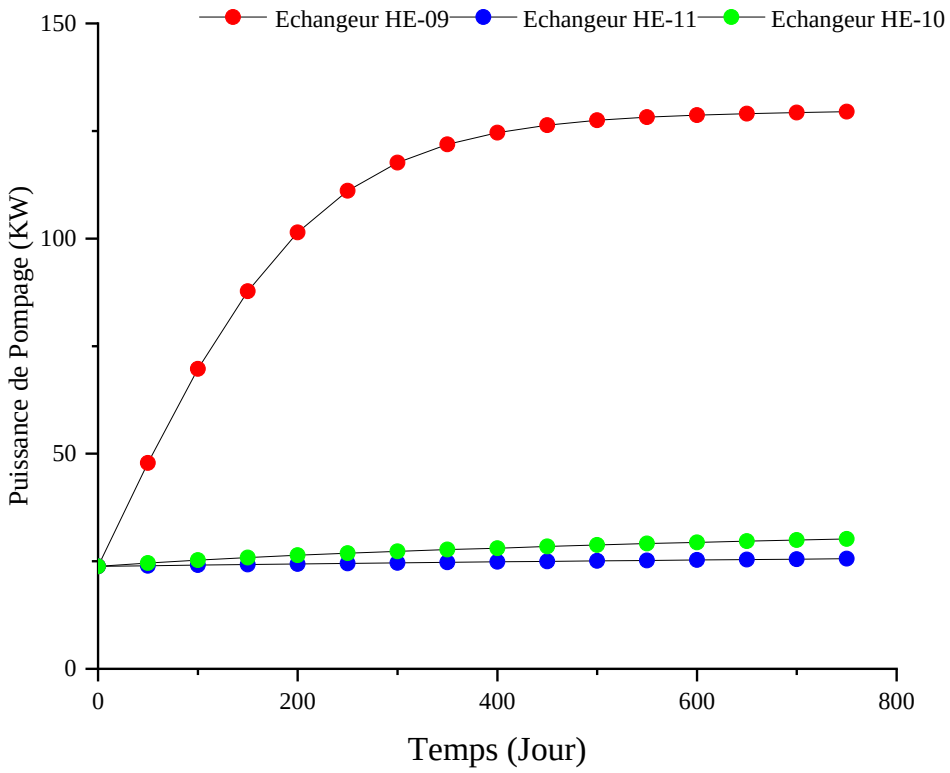


Figure V.7. Evolution de de la pression de pompage en fonction du temps dans les échangeurs.

II-8. Etude comparative entre deux batteries

II.8.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter une étude comparative entre les différents paramètres qui gèrent le fonctionnement des échangeurs de chaleurs des deux batteries 2 (échangeurs HE-5, HE-6, HE-07 et HE-8) et 3 (échangeurs HE-09, HE-10 et HE-11) de la figure IV.3 tels que la résistance thermique d'encrassement dans le but de mieux comprendre le phénomène d'encrassement lors du traitement thermique du brut. Dans cette optique, nous avons choisi les échangeurs principaux (HE-05 et HE-09) des deux batteries pour faire la comparaison. Ce choix est dicté par le fait que l'encrassement est prononcé dans ces deux échangeurs.

II.8.2. Résistance thermique d'encrassement

La comparaison entre l'évolution de la résistance thermique d'encrassement des échangeurs principaux des deux batteries 2 et 3 est présentée sur la figure V.8. Il parait clair à l'image de ce graphique que la résistance thermique d'encrassement est plus importante dans la batterie 2 et conforme à l'évolution théorique de Kearn et Seaton dans les deux cas. La littérature spécialisée indique que dans la gamme de température considérée, l'encrassement inorganique compose le dépôt qui est indépendant de la température. De ce fait, l'augmentation de la température dans la batterie 3 n'implique pas un encrassement important d'où une résistance plus faible par rapport à la batterie 2.

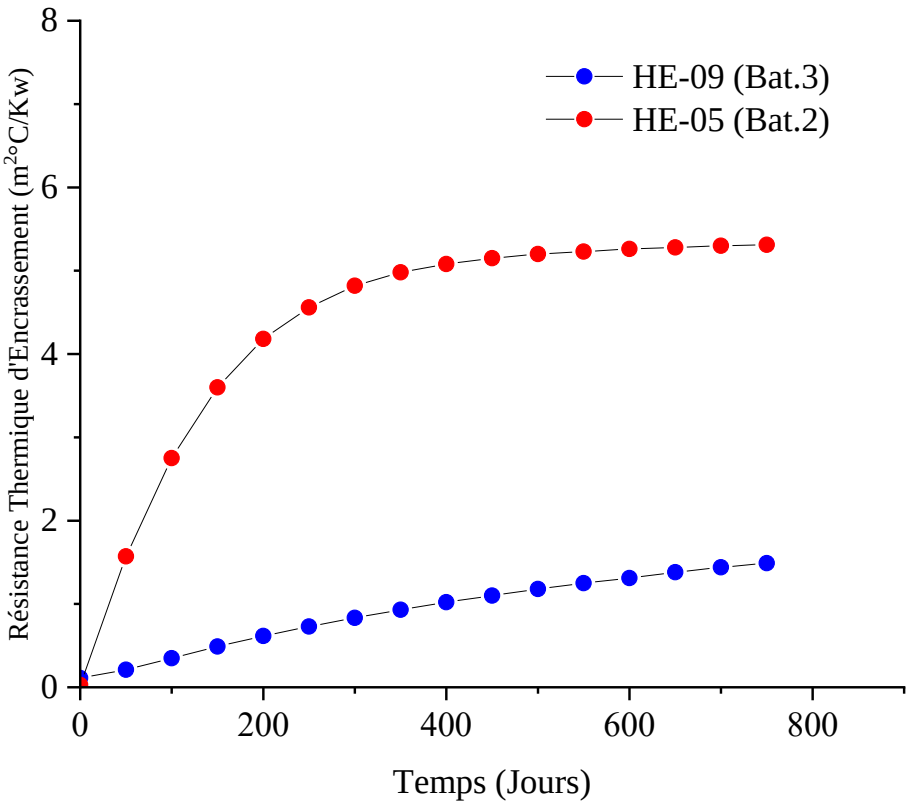


Figure V.8. Evolution de de résistance thermique d'encrassement dans les échangeurs HE-05 et HE-09.

II.8.3. Coefficient d'échange global

La comparaison entre l'évolution du coefficient d'échange global dans les échangeurs principaux des batteries 2 et 3 est présentée sur la figure V.9. Il parait évident que la chute du coefficient d'échange global est plus importante dans la batterie 2 que dans la batterie 3 en raison d'un encrassement de nature isolante plus important.

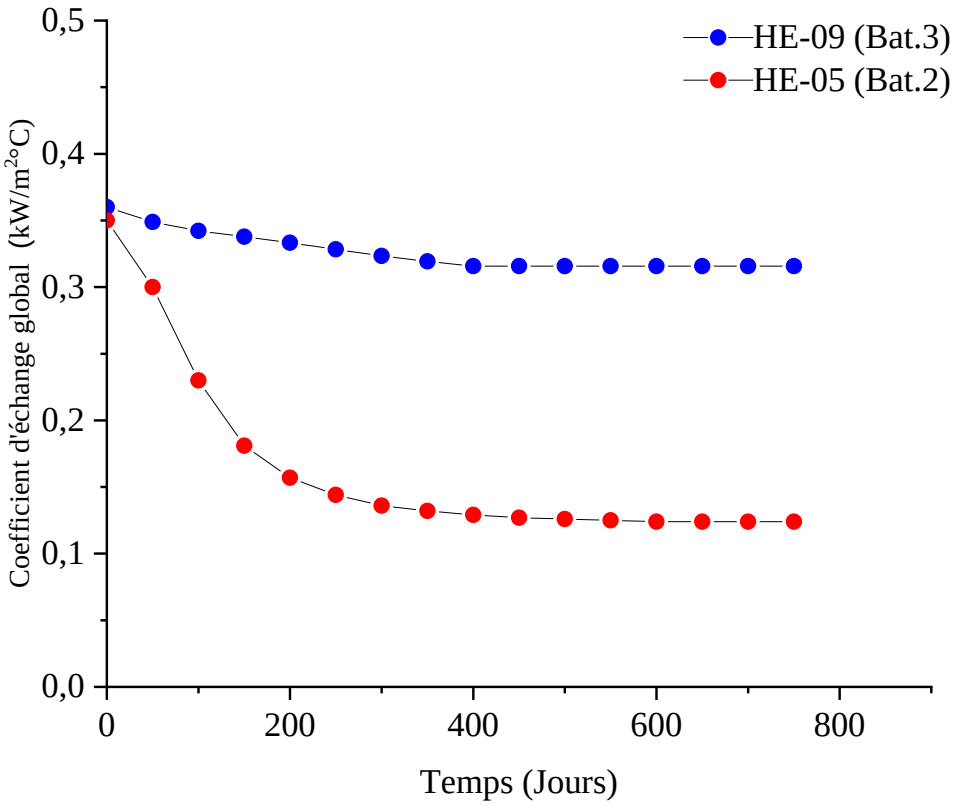


Figure V.9. Evolution du coefficient d'échange global dans les échangeurs HE-05 et HE-09.

II.8.4. La perte de pression

La comparaison entre l'évolution de la perte de pression dans les échangeurs principaux des batteries 2 et 3 est présentée sur la figure V.10. La figure montre que la perte de pression est plus importante dans la batterie 2 que dans la batterie 3 en raison d'un encrassement plus important.

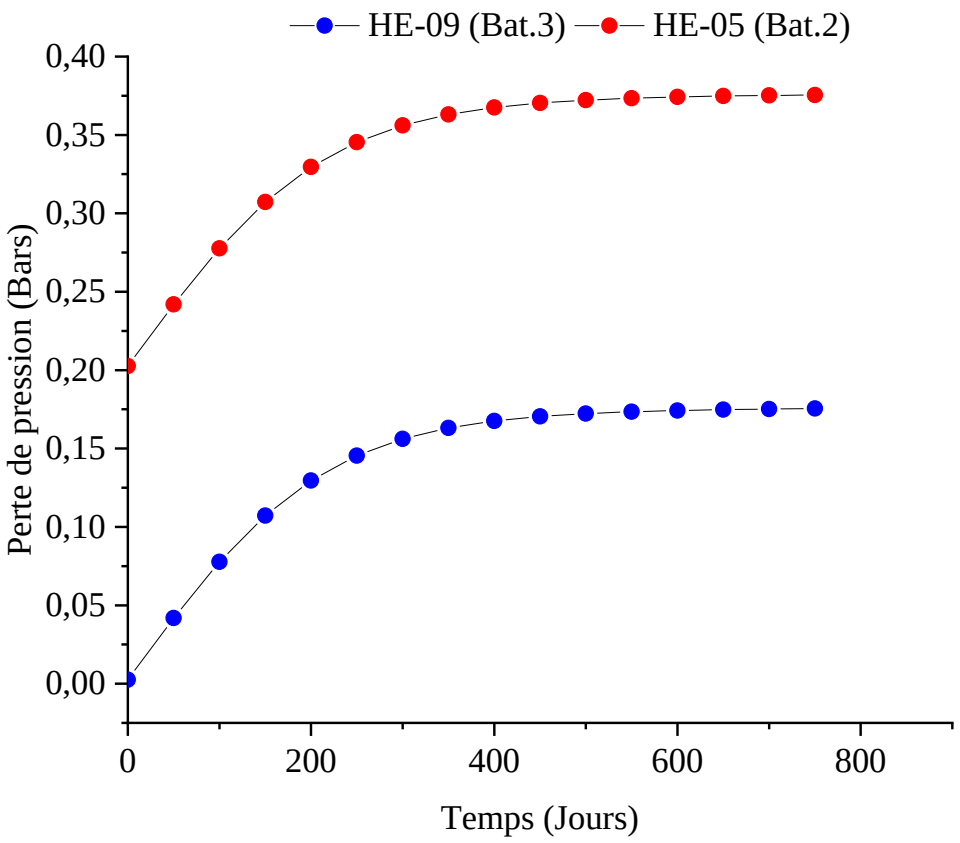


Figure V.10. Evolution de la perte de pression dans les échangeurs HE-05 et HE-09.

II.8.5. Conclusion

L'analyse des résultats montre que l'encrassement durant le traitement thermique du pétrole brut entraîne des perturbations thermo-hydrauliques significatifs qui impactent négativement le procédé de traitement. Ce phénomène se caractérise par une résistance thermique d'encrassement qui affecte défavorablement divers paramètres clés, tels que le coefficient d'échange global et la vitesse d'écoulement, induisant ainsi une dégradation notable des performances thermo-hydrauliques. Il

semble à l’image des différents résultats que l’impact de l’encrassement est plus important sur le plan thermique qu’hydrodynamique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette étude on s'est intéressés à la caractérisation du phénomène de l'encrassement observé durant le traitement thermique d'un pétrole brut dans le système de préchauffage d'une raffinerie conventionnelle. L'examen de la littérature nous a éclairés sur la complexité de ce phénomène, qui peut résulter de multiples mécanismes agissant de concert ou séquentiellement, impliquant des réactions organiques et inorganiques d'une grande complexité avec un nombre assez important.

Notre recherche s'est intéressée à un ensemble de trois échangeurs de chaleur tubulaires à faisceau qui composent une batterie de la raffinerie. Nous avons pu comprendre leur fonctionnement et leur importance cruciale au sein du dispositif de raffinage, ainsi que les divers composants qui les constituent. L'encrassement de notre échangeur représente un problème significatif ; s'il est ignoré, il peut engendrer des perturbations thermo-hydrauliques, des pertes d'énergie et des coûts de nettoyage conséquents. Cependant, s'il est géré opportunément, il peut être nettoyé à faible coût.

Notre travail a porté sur l'élaboration d'un modèle mathématique fondé sur une approche physique relative au traitement thermique du pétrole brut dans une raffinerie principalement composée d'échangeurs de chaleur tubulaires. Ce modèle a permis ensuite de réaliser principalement un calcul numérique de la résistance thermique due à l'encrassement, grâce à l'utilisation de l'outil numérique Ansys Fluent. En effet, une méthode classique fréquemment employée pour détecter l'encrassement consiste à mesurer la variation de l'efficacité de

l’échangeur via le coefficient de transfert thermique en raison de la nature isolante des dépôts.

Les résultats de nos calculs et vérifications thermiques ont révélé une augmentation progressive de la résistance à l’encrassement au fil du temps dans tous les échangeurs de l’ensemble en particulier dans le premier (HE-09), entraînant une baisse significative du coefficient de transfert et par conséquent, un dysfonctionnement de l’échangeur en particulier sur le plan thermique. Le modèle validé à deux niveaux indique que la résistance thermique à l’encrassement est conforme à la loi prédite par le modèle théorique de Kern et Seaton. Les résultats indiquent également une augmentation de la vitesse d’écoulement du brut dans les tubes de l’échangeur et une réduction du diamètre des tuyauteries suite à la formation d’encrassements. Ils montrent globalement que l’encrassement diminue dans la batterie considérée par rapport à la batterie précédente étudiée dans un travail antérieur malgré l’augmentation de la température car dans cette gamme de température l’encrassement est de nature inorganique processus indépendant de la température selon différents auteurs. Il semble à l’image des différents résultats également que l’impact de l’encrassement est plus important sur le plan thermique qu’hydrodynamique.

Pour prolonger cette recherche, il serait pertinent d’examiner les autres équipements de l’ensemble et d’étudier l’encrassement dans l’intégralité des échangeurs simultanément. Il serait aussi bénéfique d’optimiser certains aspects des simulations.

[01] X. Normand, A. Treil, Industrie du raffinage du pétrole (Tome 1), Edition Technip, Paris, 1985.

[02] Dictionnaire du pétrole, Paris France, Edition SCM 92081 collection ISBN 2-201, 133- 193,1988.

[03] X.Normand, A. Teil, L'industrie du raffinage du pétrole, leçons sommaires Tome (1),1985.

[04] J.F. Gravier, Propriétés des fluides de gisements, Tome 2), Edition Technip,1986.

[05] P. Wuithier, Le pétrole, raffinage et génie chimique, Tome 1, Edition Technip, 1972.

[06] J.P. Wauquier, Le pétrole brut, produits pétrolier, schéma de fabrication, Tome 1, Edition Technip, 1994.

[07] Y. Barbier, Dictionnaire du pétrole, Edition SCN, 1980.

[08] C. E. Chitour, Raffinage, les propriétés physiques des hydrocarbures et des fractions pétrolières, Tome 1, Edition Office des publications universitaires, 1999.

[09] K. Sayed, L. Baloo & N. K. Sharma, Bioremediation of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) by Bioaugmentation and Biostimulation in Water with Floating Oil Spill Containment Booms as Bioreactor Basin, International

Journal of Environnemental Reserchand PublicHealth,18 :2226, 2021.

[10] J. Kergueris et C. Saunier, Rapport d'information n°105 sur la perspective d'évolution du Prix des hydrocarbures en moyen et long terme, Edition Sénat, 2005.

[11] A. Foucault, J.F. Raoult, Dictionnaire de géologie, 4ième édition, Editions Masson, 1995.

[12] A. Hassaine, Biodégradation des Hydrocarbures (Pétrole brut et Kérosène) par la Microflore Microbienne des Eaux de la région de Skikda, 2016.

[13] M. Fingas, The basic of oil spill cleanup, Troisième Edition, Boca Raton. CRC Press, 266, 2013.

[14] J.P. Wauquier, Le raffinage du pétrole : Pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication, Publication de l'Institut Français du Pétrole, Edition OPHRYSS, 478, 1994.

[15] C. Sauret, Ecologie des communautés bactériennes marines soumises à une pollution pétrolière : influence des facteurs environnementaux, de la prédation et de la récurrence des pollutions, Ecole Doctorale Sciences de l'Environnement d'Ile de France (ED129), 2011.

[16] S.J. Varjani & V.N. Upasani, A new-look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. Int. Biodeterior, Biodegrad, 120 : 71–83, 2017.

[17] L'essentiel sur le raffinage, UFIP, 2013.

[18] R.S. Kraus.R.S , Le raffinage du pétrole, in : « Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, Volume 3 » Edition Française 3, Genève, 2002.

[19] Encyclopédie Microsoft, Pétrole, Microsoft corporation, 1998.

[20] S. Bensaada, M. T. Bouziane, échangeurs de chaleur, french Edition, 2010.

[21] Total Support de Formation, EXP-PR-EQ120-FR, Exploration & Production Les Équipements des Échangeurs, 2007.

[22] http:/fr.wikipedia.org/article: «Microprocesseur », 2022.

[23] M. Ordjane, cours : modes transfert thermique, 3éme année licence, Université Mohamed Boudiaf, Oran- Algérie, 2017.

[24] J.L. Battaglia, A. Kusiak et J.R. Puiggalli, Introduction aux transferts thermiques, cour et exercices corrigés 2éme édition licence, 2010.

[25] F. Khider, Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base, Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'silla- Algérie, 2015.

[26] http:/fr.wikipedia.org/article, Méthodes de refroidissement pour radiateur, 2022.

[27] F. P. Incropera , D. P. DeWitt, Introduction to Heat Transfert, 4th Edition New York: John Wiley & Sons, 2002.

[28] W. M. Kays , A. L. London, Compact Heat Exchangers, 3rd Edition New York: McGraw- Hill, 1984.

[29] S. Kakaç Heat Exchangers Selection rating and thermal design, Second Edition, 1998

[30] A. Benbrik, Cours Echangeur de chaleur, plateforme UMBB, 2017.

[31] J. Michael Moran, Introduction to thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer‖, John Willey & Sons Inc, 2003.

[32] Technique de l'ingénieur : échangeurs de chaleur, Description, 2012.

[33] R. A. Bowman, A. C. Mueller, and W. M. Nagle, Mean Temperature Difference in Design, Transactions of the ASME 62, 283, 1940.

[34] Donald Pitts, Theory and problems of heat transfert, Second Edition, Schaum's, McGraw-Hill,1998.

[35] L. Pezez, Développement étude de performances et intégration de sondes thermique pour la caractérisation de l'encrassement des échangeurs tubulaires à courants croises, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers, Centre de Bordeaux, 2003.

[36] P. Whithier, Le pétrole, Raffinage et Génie chimique, Publication de l'institut Français du Pétrole, Paris 2éme Edition, Technip, Tome 2, 1972.

[37] Dysfonctionnement des échangeurs (www.techniques-ingenieur.fr), 2022.

[38] G. Greth, Echangeur de chaleur, Description des échangeurs, Dimensionnement thermique, Problème de fonctionnement, Technique de l'ingénieur, 1992.

[39] C. Duffan, J. M. Grillot. J. M, Navarro, J. M, R. Vidiz, L'encrassement dans les échangeurs de chaleur, Description, Prévention Remèdes, Edition TEC et DOC, 1991.

[40] A. Malahimi, Feidt, Etude de l'encrassement d'échangeurs de chaleur, Mourells propositions sur les critères d'encrassement, Travaux Universitaire d'institut national polytechnique de Lorraine, France ; 1993.

[41] GROSSAIRE, CERIU, Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines ; 2006.

[42] R. Hashemi, R. L. Brown, Heat Exchanger Fouling Causes Problems in Gas and Liquid System, American Filtration Society Seminar, Chicago, May 1992.

[43] S. N. Kazi, Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces (www.intechopen.com), 2022.

[44] Understanding and preventing heat exchanger fouling (www.watertechonline.com), 2021.

[45] A.P. Wathinson, D.I. Wilson, Chemical Reaction Fouling: A Revium, Journal of Food Engineering, 14; 361-374, 1997.

[46] N. Labsi., Etude de l'encrassement des échangeurs de chaleur du circuit de préchauffe de la raffinerie d'Alger, Mémoire de Magister en énergétique des procédés Industrielle ; USTHB ; 2003.

[47] http://fr.wikipidia.org/wiki/molécules de la vie, protéine, 2021.

[48] http ://fullibarary.com/Mechanical/ANSYS/Learn-Ansys.html (2023).

[49] J. Yang, G. Maria, J. Serratos, D.S.F. Parole, E.A. Muller, O.K. Matar, Crude Oil Fouling: Fluid Dynamics, Reactions and Phase Change, Procedia IUTAM 15, 186-193, 2015.

[50] Y. Li, P. Watkinson, F. Fahiminia, M. James, Formation of Gum and Deposits in an Oxygenated Naphtha Stream. Volume RP5, in: Proceedings of 7th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleanin Challenges and Opportunities, Tomar, Portugal, https://dc.engconfintl.org/heatexchanger2007/12, 2007.

[51] L. Oufer, Fouling Characteristics of Organic Fluids, Ph.D. Thesis in Chemical. Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, 1990.

[52] S. Asomaning, A.P. Watkinson, Heat exchanger fouling by Olefin-Kerosene mixtures. Can. J. Chem. Eng. 70 (3), 444-451, 1990.

[53] D.I. Wilson, A.P. Watkinson, A study of autoxidation reaction fouling in heat exchangers. Can. J. Chem. Eng. 74 (2), 236-246, 1996.

[54] W.F. Taylor, T.J. Wallace, Kinetics of deposit formation from hydrocarbon fuels at high temperatures, General features of the process, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 6 (4), 258–262, 1967.

[55] V.R. Katta, E.G. Jones, W.M. Roquemore, Development of Global-Chemistry Model for Jet-Fuel Thermal Stability Based on Observations from Static and Flowing Experiments, 81st Symposium, Advisory Group for Aerospace Research & Development, (AGARD) Conf. Proc. 536, NATO, Fiuggi, Italy, 1993.

[56] N.J. Kuprowicz, S. Zabarnick, Z.J. West, S.E. Jamie, Use of Measured Species Class Concentrations with Chemical Kinetic Modelling for the

Prediction of Autoxidation and Deposition of Jet Fuels, Energy & Fuels. 21,530-544, 2007.

[57] D.I. Wilson, E.M. Ishiyama G.T. Polley, Twenty Years of Ebert and Panchal—What Next, Heat Transfer Engineering. 38 (7-8), 669-680, 2017.

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

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

[60] A. Nancollas et H. Liu, Une étude cinétique et orphologique de la croissance ensemencée du sulfate de calcium dihydraté en présence, Journal of Colloid and Interface Science, 1975.

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

[62] M.Y. Mahmoud, G. Bassou, A. Taalbi, Z.M. Chekroun, Filtres de chute de canal optique basés sur des résonateurs à anneau de cristal photonique - Communications optiques, 2012.

[63] J. M. Seynhaeve, Les bases du transfert de chaleur, 2013.

[64] Y. Jannot, Transfert thermique, Ecole des minces NANCY, 2012.

[65] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier et R. Vidil, ÉchangeurDimensionnement thermique, 1995.

[66] Ansys Fluent Theory Guide, Ansys, Inc., 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, 2013.

[67] D.C. Wilcox DC, Turbulence modelling for CFD, 3rd edition D.C.W. Industries, Inc., LA, 2006.

[68] M. Bayat J. Aminian, M. Bazmi, S. Shahhosseini, K. Sharifi, CFD modelling of fouling in crude oil pre-heaters, Energy Conversion and Management 64,344-350, 2012.

[69] R.M. Gounder, S. Emani, CFD Simulations of Crude Oil Fouling on Heat Transfer Surfaces, Computational Fluid Dynamics - Basic Instruments and Applications in Science, Adela Ionescu, IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.71886, 2017.

[70] R. Harche, Etude de l'encrassement des échangeurs de chaleur de la raffinerie d'Alger, Thèse de Doctorat, FGMGP, USTHB Alger, 2016.

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

Annexes

Annexe 1 : Légendes de la figure II.22

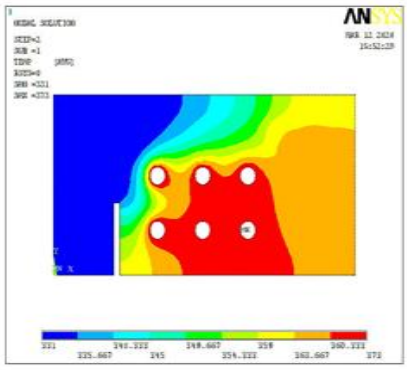
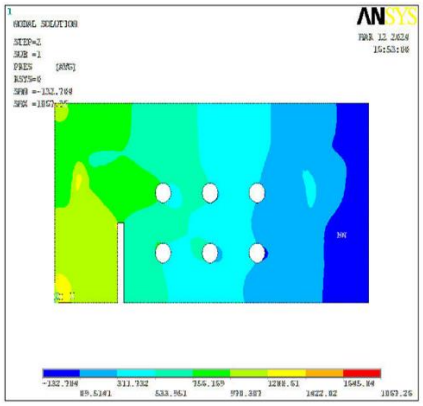
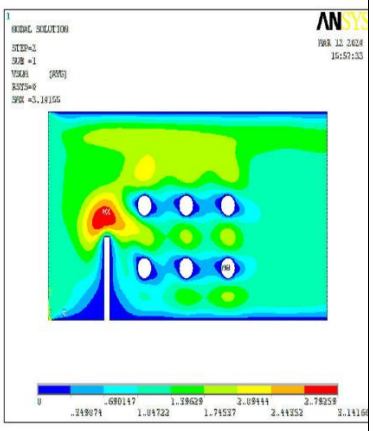
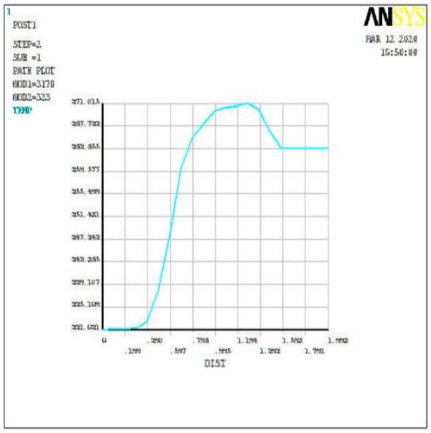
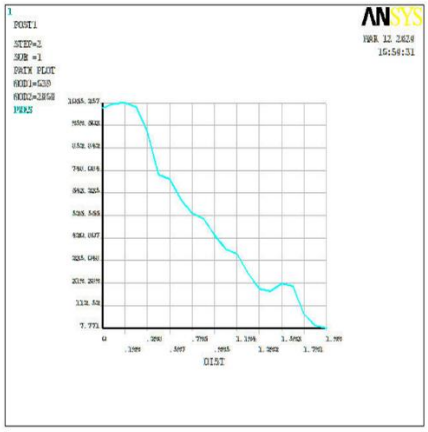
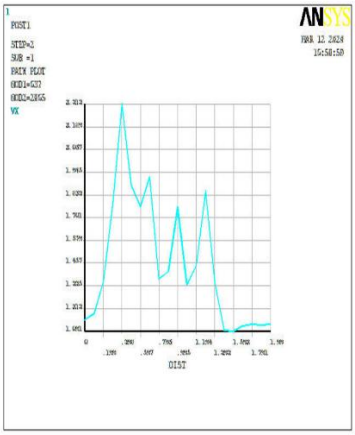
1. *fond calandre*
2. *déversoir*
3. *support de l'appareil*
4. *tube en U de faisceau*
5. *calandre*
6. *plaque fixe*
7. *plaque partage*

Annexe 2 : Légendes de la figure II.23

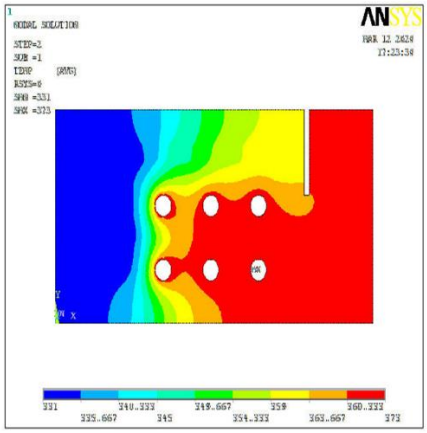
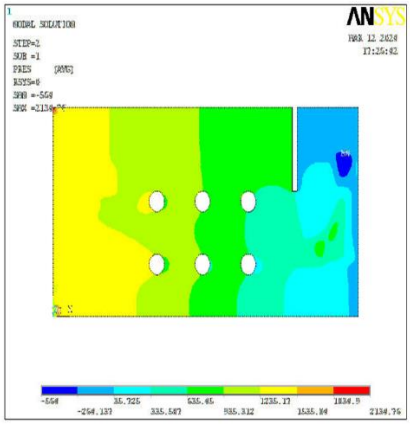
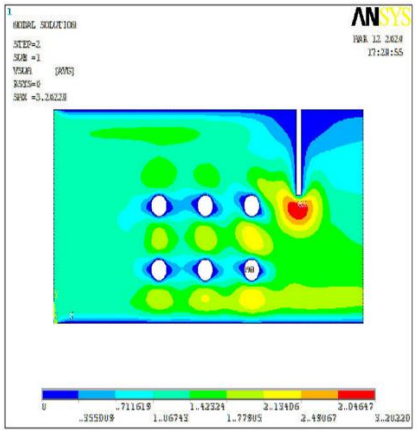
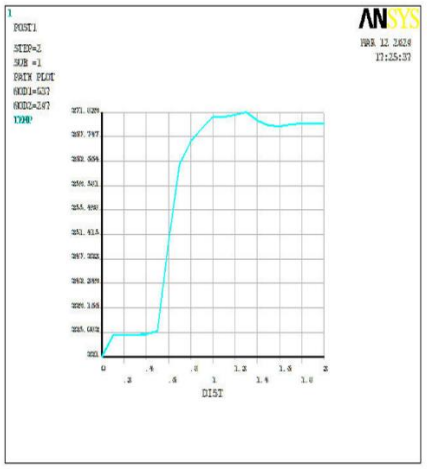
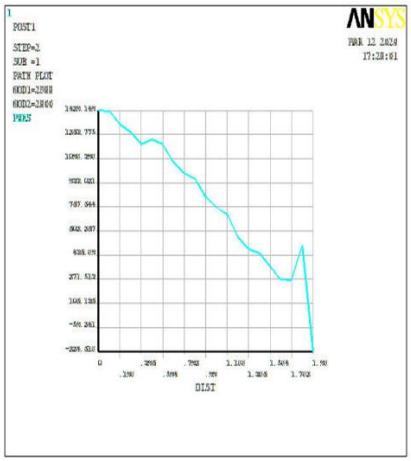
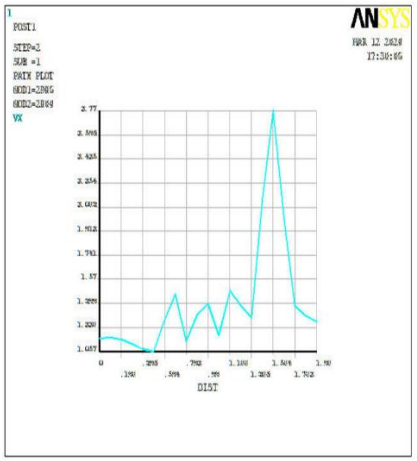
1. *1.cloison de couvercle de tête flottante*
2. *couvercle calandre*
3. *couvercle tête flottante*
4. *plaque flottante*
5. *bride calandre*
6. *contre bride de tête flottante*
7. *calandre*
8. *plaque support*
9. *entretoises et tirants*
10. *support de l'appareil*
11. *chicane*
12. *tube de faisceau*
13. *piquage sur calandre*
14. *bride calandre*
15. *plaque fixe*
16. *boite distribution*
17. *piquage sur boite distribution*
18. *couvercle de boite distribution*
19. *plaque partage sur boite*

Les géométries des échangeurs de chaleurs avec l'encrassement :

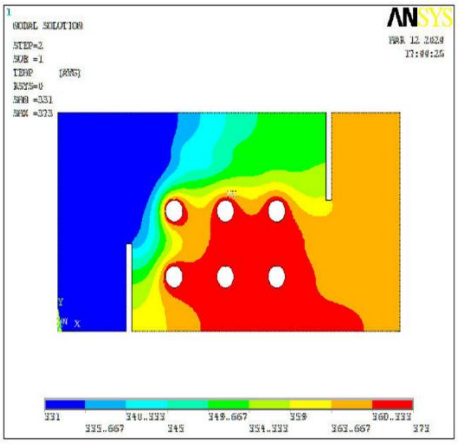
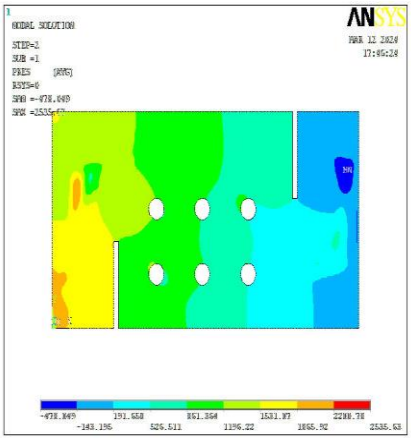
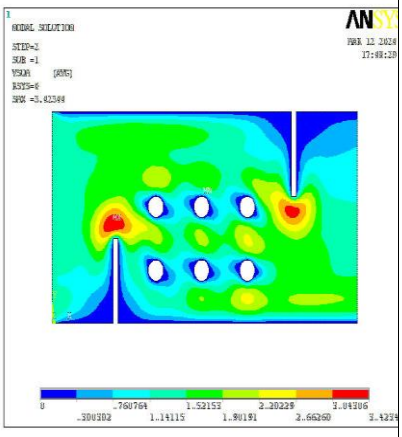
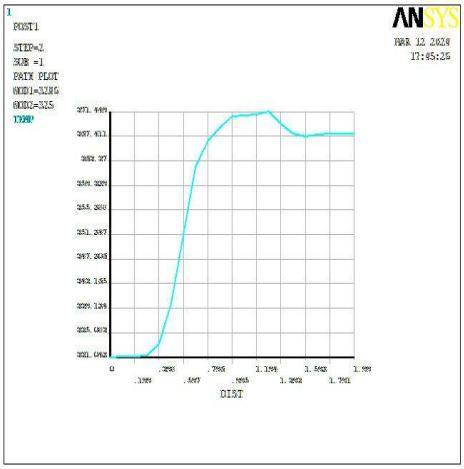
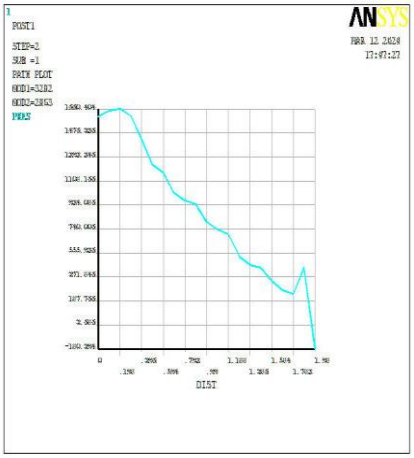
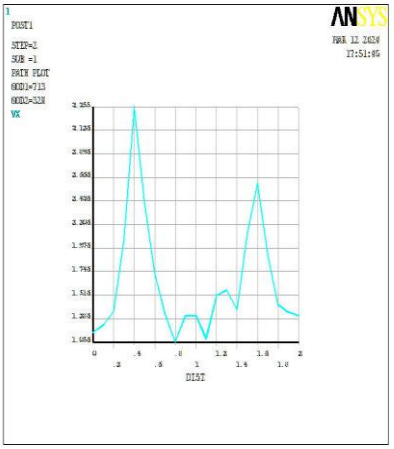
Echangeur avec chicane 01:

	Température	Pression	Vitesse
Modèle sur Ansys			
Graphes en fonction de la distance			

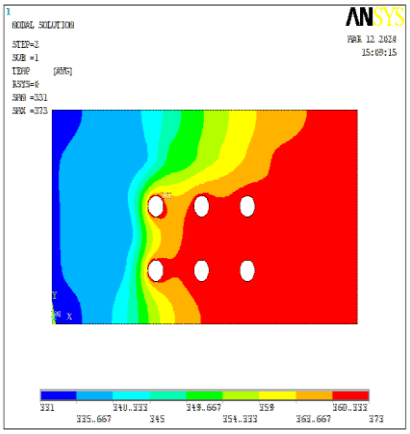
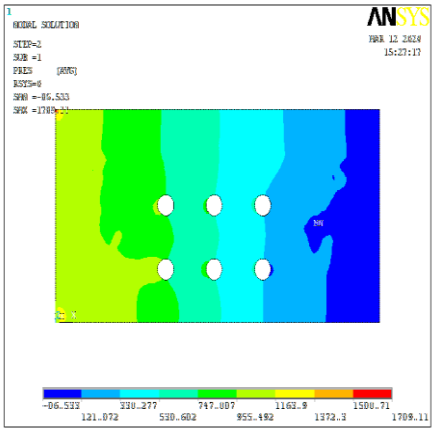
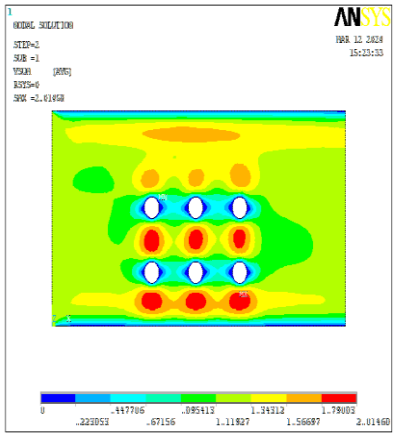
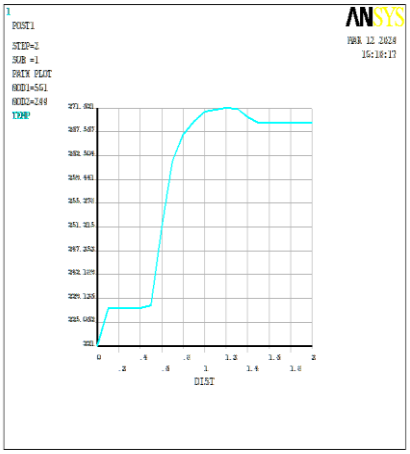
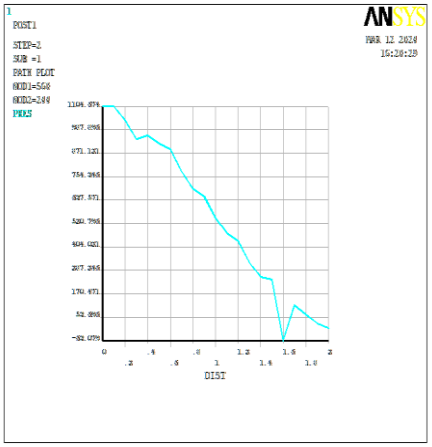
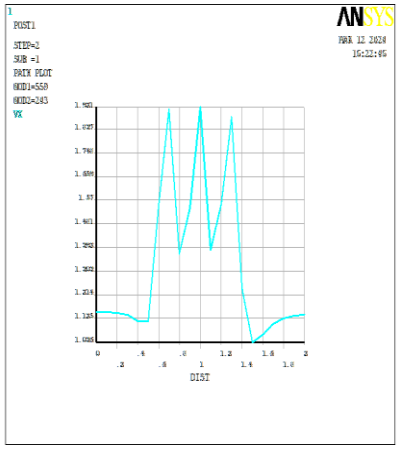
Echangeur avec chicane 02

	Température	pression	vitesse
Modèle sur Ansys			
Graphes en fonction de la distance			

Echangeur avec deux chicanes :

	Température	Pression	Vitesse
Modèle sur Ansys			
Graphes en fonction de la distance			

Echangeur sans chicane:

	Température	Pression	Vitesse
Modèle sur Ansys			
Graphes en fonction de la distance			

Echangeur avec des formes différentes de chicanes:

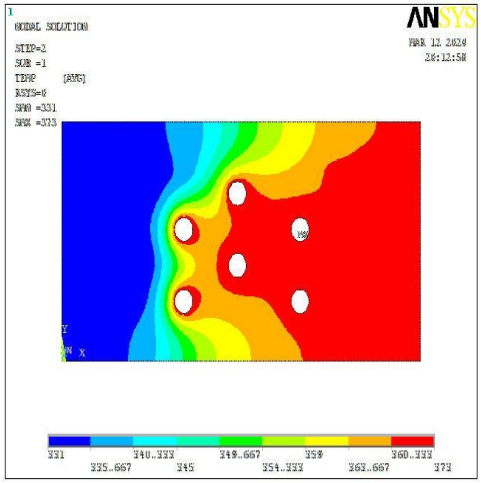
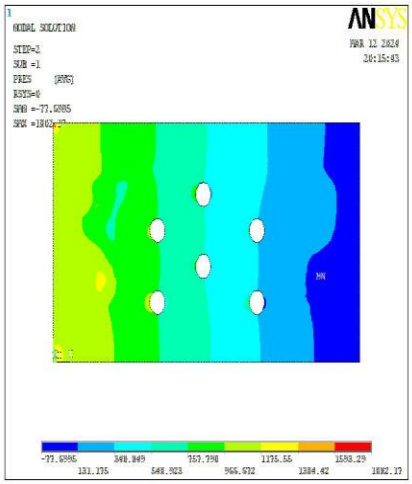
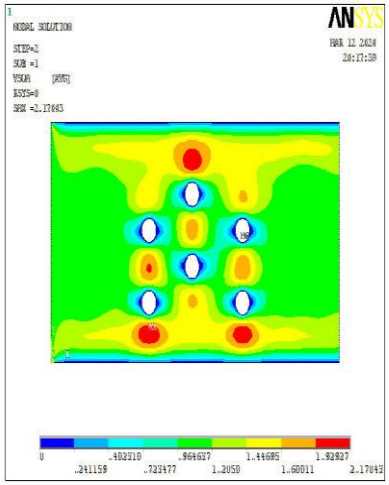
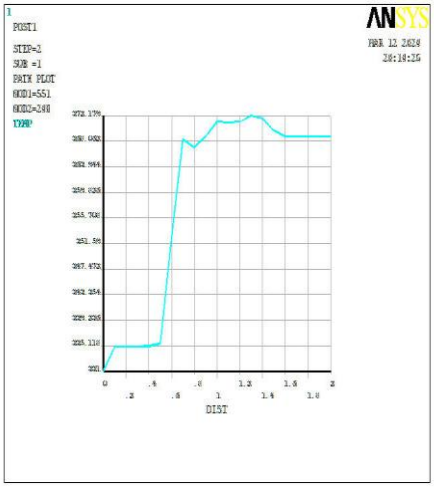
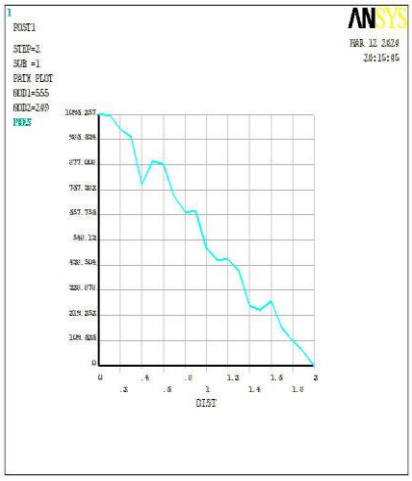
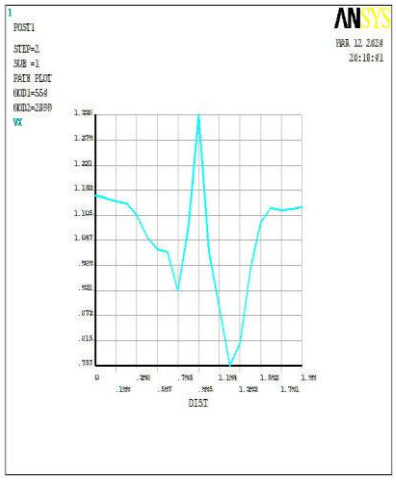
	Température	Pression	Vitesse
Modèle sur Ansys			
Graphes en fonction de la distance			

Tableau I : Caractéristiques géométriques des échangeurs de chaleur

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

Tableau II : Paramètres de fonctionnement du préchauffeur

Paramètre	Côté tube	Côté calandre	Unité
Débit	223,763	346,762	m3 /h
Température d'entrée	30	70	° C
Température de sortie	100	58	° C
Coefficient de transfert de chaleur	329		W/m²°C

Tableau III- : Propriétés physicochimiques du pétrole Brut Algérien

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