

# Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des hydrocarbures et les énergies renouvelables et science de la terre et de l'univers

Département De Forage Et Mécanique Des Chantiers Pétroliers



## Mémoire

### MASTER PROFESSIONNEL

Filière : Hydrocarbure

Spécialité : Mécanique Des chantiers pétrolier

Présenté par : - Alouane Dahmane

- Soufi Moussa

Thème :

**ETUDE DE PROBLÈME DE L'ENCRASSEMENT  
DANS UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR TYPE  
FAISCEAU-CALANDRE 12X20400**

Soutenu publiquement

Le :15/06/2019

Devant le jury :

M. ABDESSALAM Yassin

Président

UKMOuargla

Mme. CHOUICHA Samira

Encadreur

UKMOuargla

M. BOUCHMAA Kamel

Examineur

UKMOuargla

Année Universitaire : 2018/2019

## Résumé :

Les échangeurs thermiques sont considérés l'un des principaux équipements utilisés dans l'industrie pétrolière. L'encrassement fait partie des plus grands problèmes rencontrés de leurs fonctionnements, il entraîne une réduction de ses performances thermiques ce qui résulte des pertes économiques considérables pour l'industrie du pétrole.

Cependant il existe plusieurs méthodes préventives qui limitent ce phénomène mais qui nécessitent la connaissance du temps approprié d'intervention.

Ce travail présente les résultats de l'étude d'encrassement dans l'échangeur de chaleur 12X20400A, à partir des données pratique l'objectif du travail étant le calcul de la résistance d'encrassement et le suivie de sa variation en fonction du service de l'échangeur pour prévoir le bon moment d'intervention et d'entretien en modélisant les courbes des résistances d'encrassement par le logiciel curve expert 2.6 et nous suivons par la suite les méthodes d'analyse et nettoyage des dépôts d'encrassement cela nous a conduit d'étudier l'impact d'encrassement sur l'économie de vente des barils du pétrole produit dans l'unité OOS.

Les principaux résultats montrent que la modélisation de la résistance d'encrassement est représentée par une équation avec un coefficient de corrélation  $r = 0.9862$ , l'étude économique de l'encrassement est influencée par plusieurs paramètres d'où la récupération est estimée par 15 heures et 42 minutes lorsque le prix du baril égale à 50 dollars.

Mots clé : Echangeur thermique, Encrassement, Résistance d'encrassement, Dépôt, tube , calendre.

---

## ملخص:

تعتبر المبادلات الحرارية واحدة من المعدات الرئيسية الأكثر استخداما في صناعة النفط. الإلتساخ يحتل جزءا كبيرا من بين أكثر المشاكل التي تواجهها أثناء عملها، حيث يؤدي الى انخفاض في أدائها الحراري مما يؤدي الى خسائر اقتصادية كبيرة في صناعة النفط.

مع ذلك هناك العديد من الأساليب الوقائية التي تحد من هذه الظاهرة ولكنها تتطلب معرفة الوقت المناسب للتدخل.

يقوم هذا العمل بعرض دراسة للإلتساخ في المبادل الحراري 12X20400A انطلاقا من نتائج ميدانية، الهدف من هذا العمل هو حساب مقاومة الإلتساخ ومتابعة تغيراتها بدلالة عمل المبادل للتنبؤ باللحظة المناسبة للتدخل والصيانة من خلال نمذجة منحنيات مقاومة الإلتساخ بواسطة برنامج 2.6.3 curve expert، ومن ثم نتبع طرق تحليل وتنظيف رواسب الإلتساخ، مما أدى بنا الى دراسة تأثير الإلتساخ على اقتصاد بيع براميل النفط المنتجة في وحدة OOS لمركز GS1.

أظهرت النتائج الرئيسية أن نمذجة مقاومة الاتساخ تتمثل في المعادلة ذات معامل ارتباط يساوي 0.9862، تتأثر الدراسة الاقتصادية للاتساخ بعدة معايير حيث يتم تقديرها بـ 15 ساعة و42 دقيقة عندما يكون سعر البرميل 50 دولار.

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري، الاتساخ، مقاومة الاتساخ، راسب، أنبوب وغللاف.

---

## Summary:

Heat exchangers are considered one of the main equipment used in the oil industry. Fouling is one of the biggest problems encountered in their operations, leading to a reduction in its thermal performance, which results in considerable economic losses for the oil industry.

However, there are several preventive methods that limit this phenomenon but require the knowledge of the appropriate time of intervention.

This work presents the results of the fouling study in the heat exchanger 12X20400A, from the practical data the objective of the work is the calculation of the fouling resistance and the follow-up of its variation according to the service of the exchanger to predict the right moment of intervention and maintenance by modeling the curves of the fouling resistances by the software curve expert 2.6 and we follow the methods of analysis and cleaning of the deposits of fouling that we have led to study the impact of fouling on the economy of sale of barrels of oil produced in OOS unit.

The main results show that the modeling of the fouling resistance is represented by an equation with a correlation coefficient  $r = 0.9862$ , the economic study of the fouling is influenced by several parameters from which the recovery is estimated by 15 hours. and 42 minutes when the price per barrel equals \$ 50

Key words: Heat exchanger, Clogging, Fouling resistance, Deposit, tube, calender.

# Remerciement

---

*Tout d'abord, Nous Remercions le Dieu notre créateur de nos avoir donné les forces pour achève ce travail. Nous adressons le grande remerciement à notre Prof qui nous a guidé au cours du travail, aussi pour ses conseils et ses dirigés. Madame chouicha samira (encadreur).*

*Nous remercie le département des Hydrocarbures (Université Kasdi Marbah – Ouargla), l'administration, les étudiants, et surtout les profs.*

*Finalemment nos remerciements s'adressent aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail : monsieur Abd essalam Yacine (Président) et monsieur Bouchmaa Kamel (Examineur).*

# Dédicaces

*A mes chers parents **Soufi Ali** et **Aberkane Fatima**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A la plus cher et la plus belle chose que j'ai dans ma vie, A ma chère femme **Rania Djebara** qui est souvent à mes côtés dans les bons et les mauvais moments.*

*A mes chères sœurs **Moufida**, **Chahrazed**, **Sara**, et **Fouzia** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*

*A mes chers frères, **Salim**, **Mounir** et **Farouk** pour leur appui et leur encouragement,*

*A mon cousin **Yacine** et mes amis **Abd Errazak** et **Mounir**.*

*A toute la famille **Soufi** et **Aberkane** pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*A toutes mes amis et sur tous ceux qu'on étudier avec moi dans la même spécialité MCP.*

*A les Profs de notre département qui nous donne une meilleur formation au cours de nos études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,  
Merci d'être toujours là pour moi.*

***Soufi Moussa***

*A mes chers parents **Alouane Noureddine** et **Rahal Zohra**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes chères sœurs **Afaf**, et **Sara**, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*

*A mon chers frère, **Ahmed**, pour leur appui et leur encouragement,*

*A toute la famille **Alouane** et **Rahal** pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*A mes chers amis **Oussama** et **Abd Errahmane** qui sont toujours près de moi.*

*A Ma chère personne et la plus précieux chose que j'ai dans ma vie **Hanine** et qui est toujours près de moi.*

*Ceux avec qui j'ai passé des moments inoubliables, mes amis notamment à : **Oussama**, **Hanine**, **Abdou**, **Monsof**, **Akram**, **Mouaouia**.*

*A tous mes amis et sur tous ceux qu'on étudier avec moi dans la même spécialité MCP.*

*AUX Profs de notre département qui nous donne une meilleur formation au cours de nos études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,  
Merci d'être toujours là pour moi.*

***Alouane Dahmane***

# TABLES DE MATIERES

Page

INTRODUCTION GENERALE .....	01
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES ECHANGEURS THERMIQUE.</b>	
I.1. Définition d'un échangeur thermique .....	03
I.2. Les fonctions des échangeurs de chaleurs .....	03
I.2.1. ÉCHANGEUR .....	03
I.2.2. CONDENSEUR .....	03
I.2.3. REBOUILLEUR .....	03
I.2.4. RÉCHAUFFEUR .....	04
I.2.5. COOLER .....	04
I.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur .....	04
I.4. Critères de classification des échangeurs .....	04
I.4.1. Classification selon le mode de circulation .....	05
I.4.1.1 Circulation à contre-courant .....	05
I.4.1.2. Circulation à co-courant (courant-parallèle) .....	05
I.4.1.3. Circulation à courants croisés .....	05
I.4.1.4. Circulation à courants mixte .....	05
I.4.2. Classification suivant la nature du matériau de la paroi d'échange .....	06
I.4.3. Classification selon le type d'appareillage .....	09
I.4.3.1. Échangeur coaxial (double tubes) .....	06
I.4.3.2. Échangeur à plaques .....	06
I.4.3.3. Échangeur Tubulaire .....	07
I.5. Les échangeurs à faisceau de tube et calandre .....	08
I.6. Technologie de l'échangeur de chaleur 12X20400A champs GEA-GS1 .....	10
I.6.1. Les éléments constitutifs de l'échangeur à faisceau et calandre 12X20400A .....	10
I.6.2. Type de chambre de distribution .....	11
I.6.3. Type de la calandre .....	11
I.6.4. Le faisceau de tubes .....	12

I.6.5. Plaques tubulaires .....	12
---------------------------------	----

## **CHAPITRE II : GENERALITE SUR LE PROBLEME D'ENCRASSEMENT**

II.1. Définition de l'encrassement .....	14
II.2. Différents types d'encrassement (classification) .....	14
II.2.1. Encrassement particulaire .....	15
II.2.2. Entartrage .....	15
II.2.3. Encrassement dû à la corrosion .....	15
II.2.4. Encrassement biologique .....	16
II.2.5. Encrassement par réaction chimique .....	16
II.2.6. Encrassement par solidification .....	16
II.3. Nature du dépôt .....	17
II.3.1. Dépôt dur .....	17
II.3.2. Dépôt poreux .....	18
II.3.3. Dépôt mou .....	18
II.4. Les processus fondamentaux de l'encrassement (Mécanismes) .....	18
II.4.1. Initiation .....	18
II.4.2. Transport des particules dans le fluide jusqu'au voisinage de la paroi .....	18
II.4.3. Adhésion des particules .....	18
II.4.4. Réentraînement des particules déposées .....	18
II.4.5. Vieillessement du dépôt .....	18
II.5. Facteurs affectent de l'encrassement .....	19
II.5.1. Paramètres de fonctionnement .....	19
II.5. 1.1. Géométrie d'échangeur (Zones stagnantes) .....	19
II.5.1.2. Effet de la vitesse .....	19
II.5.1.3. Effet de la température de surface .....	19
II.5.2. Paramètres de l'échangeur de chaleur .....	20
II.5.2.1. Structure et état de surface (Rugosité) .....	20
II.5.2.2. Matériau de construction, corrosion .....	20

II.5.3. Propriétés des fluides .....	20
II.6. Prévention de l'encrassement dans les échangeurs .....	20
II.6.1. Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route .....	21
II.6.2. Pendant la phase de fonctionnement (en ligne) .....	22
II.6.3. Pendant les phases d'arrêts (hors ligne) .....	23
II.6.3.1. Nettoyage mécanique .....	23
II.6.3.2. Nettoyage chimique .....	24

### **CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE.**

III.1. Description de l'unité OOS .....	26
III.2. Position de problème .....	27
III.3. Dimensionnement de l'échangeur 12X40200A .....	27
III.3.1. Choix du type d'échangeur .....	27
III.3.1.1. la chambre de distribution .....	27
III.3.1.2. Le type de la calandre .....	27
III.3.1.3. Fond de la calandre .....	28
III.3.2. But de calcul .....	29
III.3.3. Hypothèses simplificatrices .....	29
III.3.4. Spécification des propriétés des fluides .....	30
III.3.5. Géométrie de l'échangeur thermique 12X20400A .....	30
III.3.5.1. Tubes .....	31
III.3.5.2. Chicanes .....	32
III.3.6. Estimation des Coefficients de transfert thermique par convection .....	33
III.3.6.1. Calcul du coefficient de transfert thermique coté tube $h_t$ .....	33
Régime d'écoulement .....	33
1.2. Calcul le nombre de « Prandtl » .....	34
Calcul du nombre de « Nusselt » .....	34
III.3.6.2. Calcul du coefficient de transfert thermique coté calandre $h_c$ .....	35
2.1. Régime d'écoulement .....	35

2.2. Calcul du nombre de Prandtl .....	36
2.3. Calcul du nombre du Nusselt .....	36
III.3.7. Calcul de coefficient global de transfert thermique $U_{cal}$ .....	36
III.4. Calcul de la résistance d'encrassement .....	37
III.4.1. Evaluation des performances thermiques de l'échangeur dans le temps .....	37
III.4.2. Modélisation des résistances d'encrassement .....	38
III.4.2.1 Le logiciel curve expert .....	38
III.4.3. Résultats de modélisation de la résistance d'encrassement par curve expert .....	39
III.4.3. Choix du modèle de la résistance d'encrassement .....	40
III.5. Analyse de dépôt .....	42
III.5.1. Analyse par diffractométrie des rayons X .....	42
III.5.2. Principe d'analyse .....	42
III.5.3. Solution proposé .....	43
III.6. Evaluation technico économique de l'échangeur thermique 12X40200A .....	44
III.6.1. Termes économiques .....	44
III.6.1.1. Investissement .....	44
III.6.1.2. Coûts .....	45
III.6.1.3. Délai de récupération .....	45
III.6.2. Calcul économique .....	45
III.6.2.1. Dépense .....	45
a) - Estimation du coût de l'échangeur de chaleur .....	45
b) - Coûts d'investissement .....	46
III.6.2.2. Calcul de la durée de récupération (délai de l'amortissement) .....	47
III.7.2.3. Suivre d'évolution de délais de récupération en fonction du revenu journalier .....	47
<b>CONCLUSION</b> .....	49

## **REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **ANNEX**

# Tables des Figures

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES ECHANGEURS THERMIQUE.

Figure I.1: Principe de fonctionnement d'un échangeur .....	04
Figure I.2 : Échange de chaleur entre deux fluides dans un échangeur.....	04
Figure I.3 : Circulation à contre-courant .....	05
Figure I.4 : Circulation à co-courant .....	05
Figure I.5 : Circulation à courant croisé .....	05
Figure I.6 : Schéma et photographie d'un échangeur à double tubes .....	06
Figure I.7 : Schéma et photographie d'un échangeur à plaques .....	07
Figure I.8 : Les différents types des échangeurs tubulaires.....	08
Figure I.9 : Schéma et photographie d'un échangeur à faisceau de tube et calandre .....	09
Figure I.10 : Pas des tubes .....	09
Figure I.11 : Composition de l'échangeur BEU .....	10
Figure I.12 : Echangeur de type BEU .....	10
Figure I.13 : Chambre de distribution de type B .....	11
Figure I.14 : Calandre de type E.....	11
Figure I.15 : faisceau de tube en U .....	12
Figure I.16 : la plaque tubulaire de l'échangeur 12X20400A .....	12
<b>CHAPITRE II : GENERALITE SUR LE PROBLEME D'ENCRASSEMENT</b>	
Figure II.1 : Représentation schématique de l'encrassement .....	19
FigureII.2 : Procédé de nettoyage en continu par boules .....	22
Figure II.3 : Nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique .....	23
Figure II.4 : Outil de nettoyage mécanique .....	24

## CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE.

Figure III.1 : L'unité d'optimisation de brut (OOS).....	26
FigureIII.2 : Schéma de l'échangeur de chaleur en fonctionnement.....	28
Figure III.3 : Diamètre de faisceau tubulaire $D_b$ .....	32
Figure III.4 : Distance $L_b$ entre deux chicanes .....	33
Figure III.5 : Variation de la résistance d'encrassement de l'échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire.....	39
Figure III.6 : Variation de la résistance d'encrassement de l'échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentiel.....	39
Figure III.7 : Variation de la résistance d'encrassement de l'échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique.....	40
Figure III.8 : Variation de la résistance d'encrassement de l'échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance piecewise linear.....	40
Figure III.9 : Diffractogramme de l'échantillon N°1 .....	42
Figure III.10 : Diffractogramme de l'échantillon N°2 .....	43
Figure III.11 : d'évolution de délais de récupération en fonction du revenu journalier de l'investissement. ....	48

# Table des Tableaux

## CHAPITRE II : GENERALITE SUR LE PROBLEME D'ENCRASSEMENT.

Tableau II.1 : Les types d'encrassement .....	17
TableauII.2 : Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur .....	21

## CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE.

Tableau III.1 : Propriétés physicochimiques des fluides.....	30
Tableau III.2 : Caractéristique de l'échangeur .....	30
Tableau III.3 : performances thermiques de l'échangeur dans le temps : tracer tableau ...	38
Tableau III.4 : Différents modèles de la résistance d'encrassement avec leurs coefficients de corrélation. ....	41
Tableau III.5 : Coûts d'installation de l'échangeur de chaleur. ....	46

## NOMENCLATURE

API	American Petroleum Institute.	
ASME	American Society of Mechanical Engineers	
BEU	Echangeur de chaleur (chambre 'Bonnet', calandre 1 passe, tube en U)	
BP	Basse Pression	
DRX	Défractométrie par des rayons X	
GS01	Centre El Gassi	
HEH	Haoud El Hamra	
OOS	Système d'optimisation d'huile (Oil Optimisation System)	
PDF-ICDD	Power diffraction file-International center for diffraction data	
TEG	Triéthylène Glycol	
A	Surface d'échange	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>t</sub>	section de passage coté tube	m <sup>2</sup>
A <sub>c</sub>	section de passage coté calandre	m <sup>2</sup>
Aire	aire d'écoulement	m <sup>2</sup>
C <sub>p</sub>	Chaleur massique moyenne de brut	[J/kg. °C]
C <sub>p</sub> '	Chaleur massique moyenne de mélange (TEG +eau)	[J/kg. °C]
d <sub>i</sub>	Diamètre intérieur des tubes	[m]
d <sub>0</sub>	Diamètre extérieur des tubes	[m]
D <sub>b</sub>	diamètre de faisceau tubulaire	[m]
D <sub>c</sub>	diamètre de la calandre	[m]
d <sub>e</sub>	Diamètre équivalent	[m]
G <sub>t</sub>	Flux massique de brut	kg/m <sup>2</sup> . S
G <sub>c</sub>	Flux massique de teg	kg/m <sup>2</sup> . S
h <sub>t</sub>	Coefficient de transfert coté tube	[W/m <sup>2</sup> .°C]
h <sub>c</sub>	coefficient de transfert thermique du film externe	[W/m <sup>2</sup> .°C]
h <sub>i</sub>	coefficient de transfert thermique du film interne	[W/m <sup>2</sup> .°C]
h <sub>ed</sub>	coefficient d'encrassement du film externe	[W/m <sup>2</sup> .°C]
h <sub>id</sub>	coefficient d'encrassement du film interne	[W/m <sup>2</sup> .°C]
h <sub>c</sub>	Coefficient de transfert coté calandre	[W/m <sup>2</sup> .°C]
j <sub>h</sub>	Coefficient de transfert	
k <sub>1,n1</sub>	Constantes dépendant du pas et du nombre de passes	
L	Langueur d'un tube	[m]
L <sub>b</sub>	Les espacements entre chicanes	[m]
m	Débit massique du brut	[m <sup>3</sup> /h]

M	Débit de TEG nécessaire pour préchauffer le brut	[m <sup>3</sup> /h]
n	Nombre de passe côté tube	
N	Nombre de tubes total	
P	Le pas	[m]
P <sub>r</sub>	Nombre de Prandtl	
R	Résistance thermique	[m <sup>2</sup> ·°C/W]
Re	Nombre de Reynolds	
S	Surface d'un tube	[m]
T <sub>1</sub>	Température d'entrée côté tube	[°C]
T <sub>2</sub>	Température de sortie côté tube	[°C]
t <sub>1</sub>	Température d'entrée côté calandre	[°C]
t <sub>2</sub>	Température de sortie côté calandre	[°C]
U <sub>cal</sub>	coefficient global de transfert thermique	[W/m <sup>2</sup> . °C]
λ	Conductibilité thermique	[W/m.°C]

### **Symboles grecs :**

η <sub>c</sub>	Nombre des chicanes;
μ <sub>c</sub>	Viscosité dynamique d'huile à sa température;
μ <sub>t</sub>	Viscosité dynamique du Brut à sa température;
λ	La conductivité thermique de matériaux;
ρ <sub>c</sub>	La masse volumique de TEG à sa température;
ρ <sub>t</sub>	La masse volumique de Brut à sa température.

### **Indices :**

1 : entré

2 : Sortie

Min : minimal

Max : maximal

DR : Délais de récupération

C : coût de l'échangeur.

c : coût unitaire

\$ : Dollar

DA : Dinar Algérien



# INTRODUCTION GENERALE

### INTRODUCTION GENERALE

Depuis de nombreuses années, le pétrole est considéré comme matière première la très importante jouant un rôle primordial dans l'industrie, il est le plus gros commerce de la planète en valeur (et en volume). D'après les statistiques récentes l'Algérie est le 17<sup>ième</sup> producteur de pétrole donc, elle joue un rôle majeur dans le commerce international de l'énergie. La commercialisation du pétrole à l'état brut doit subir un traitement (stabilisation) afin de répondre aux normes. Ce traitement peut comprendre plusieurs procédés à mettre en œuvre pour la mise aux spécifications commerciales en qualité de tension de vapeur reid. Les procédés les plus connus sont : (Séparation, Dessalage, le dégazage, la désulfuration ...). Le procédé de stabilisation consiste à enlever les hydrocarbures gazeux d'un pétrole brut par chauffage du brut jusqu'à une température précise, pour cela l'installation doit contenir un échangeur de chaleur. Les échangeurs de chaleur sont encore parmi les plus utilisés dans le secteur industriel, Pour l'industrie pétrolière, les échangeurs de chaleur constituent une composition essentielle, représentant souvent 30% des équipements des raffineries [1]. L'efficacité du processus de stabilisation et de chauffage du pétrole brut est principalement liée à l'état de la surface d'échange dans les échangeurs de chaleur. L'encrassement est un phénomène prépondérant agissant de la formation d'un dépôt à la surface d'échange, ce qui entraîne la réduction de la performance thermique de ces échangeurs. L'encrassement des échangeurs de chaleur du pétrole brut prétraité est un problème économique majeur, en 2005 ces dépenses ont annuel dû à l'encrassement était estimé à 6,75 milliards de dollars [1]. En dépit des progrès et le développement scientifique, le phénomène de l'encrassement reste le problème le plus obsessionnel en souffrance des sociétés pétrolières. Dans cette étude, le but de ce travail consiste à l'analyse des performances thermiques de l'échangeur 12X20400A par estimation des coefficients globaux de transfert thermique et à travers les résistances d'encrassement puis, la modélisation des résistances d'encrassement.

Dans ce but, le mémoire est organisé de la façon suivante :

Le premier chapitre présente des généralités sur les échangeurs de chaleur avec description d'un échangeur de chaleur de type faisceau calandre en U.

Le deuxième chapitre : énonce une étude générale du problème de l'encrassement des échangeurs thermique avec une description des différents types d'encrassement et remèdes.

Le troisième chapitre présent les résultant de l'étude pratique de l'analyse de problème d'encrassement en déterminant le modèle de l'encrassement et nous trouvons la meilleure tendance d'évolution de la résistance d'encrassement, cette partie est suivie par une étude économique

Nous avons achevé notre mémoire par une conclusion général.

**CHAPITRE I :**  
**GENERALITE SUR LES**  
**ECHANGEURS**  
**THERMIQUE**

**Introduction :**

Les procédés des industries pétrolières, pétrochimiques ou chimique demandant souvent que les fluides soient réchauffés ou refroidis avec ou sans changement de phases au cours des diverses opérations auxquelles on les soumet. La chaleur mise en œuvre alors représente une importante dépense énergétique, dont il est nécessaire de récupérer la plus grande quantité possible. La chaleur est alors transmise, dans la majorité des cas, à travers un échangeur de chaleur. [2]

**I.1. Définition d'un échangeur thermique :**

Les échangeurs thermiques sont des appareils qui permettent d'échanger de la chaleur entre deux fluides. Le principe mis en œuvre est simple parce qu'il s'agit de mettre en contact un fluide chaud et froid afin qu'ils se trouvent à la même température. Au cours du processus, un des fluides pourra changer de phase (condensation, évaporation). Ils peuvent être intégrés dans des équipements destinés aussi bien au refroidissement qu'au réchauffement. Utilisés depuis plus d'un siècle dans l'industrie agroalimentaire, les échangeurs thermiques ont maintenant de nombreuses applications, majoritairement dans l'industrie, mais également dans l'habitat (notamment le conditionnement d'air, la réfrigération et le chauffage urbain) ou dans les transports (conditionnement d'air, réfrigération et refroidissement des moteurs) [3]

**I.2. Les fonctions des échangeurs de chaleurs :**

Les échangeurs, sont des équipements permettant d'abaisser, de relever la température d'un fluide, ou de modifier son état physique. Dans les procédés pétrochimiques, il est nécessaire de modifier la température ou l'état d'un fluide pour le séparer, le distiller, le stocker et le transporter. Pour cela on doit lui ajouter ou lui enlever une certaine quantité de chaleur via des équipements de transfert de chaleur. Échangeur, condenseur, réchauffeur [4]

**I.2.1. ÉCHANGEUR :** Il permet le transfert de calorie d'un fluide vers un autre sans changement d'état de ces fluides.

**I.2.2. CONDENSEUR :** Il permet le changement d'état d'un fluide : exemple passer de l'état liquide à l'état gazeux.

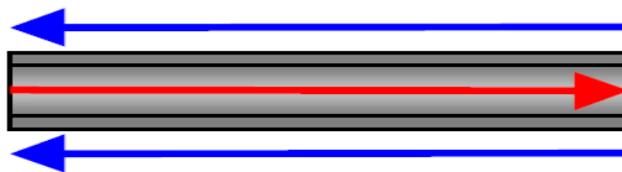
**I.2.3. REBOUILLEUR :** Échangeur de chaleur utilisé pour réchauffer ou vaporiser un fluide

**I.2.4. RÉCHAUFFEUR :** Il permet d'augmenter la température d'un fluide ou d'un solide pour l'utiliser dans un système exemple réchauffage de l'huile pour une meilleure circulation dans les pipes, réchauffage du gaz avant l'entrée dans une turbine.

**I.2.5. COOLER :** Il permet de refroidir un gaz ou un fluide après que celui-ci ait été utilisé exemple soustraire les calories emmagasinées par de l'huile lubrification d'un moteur thermique

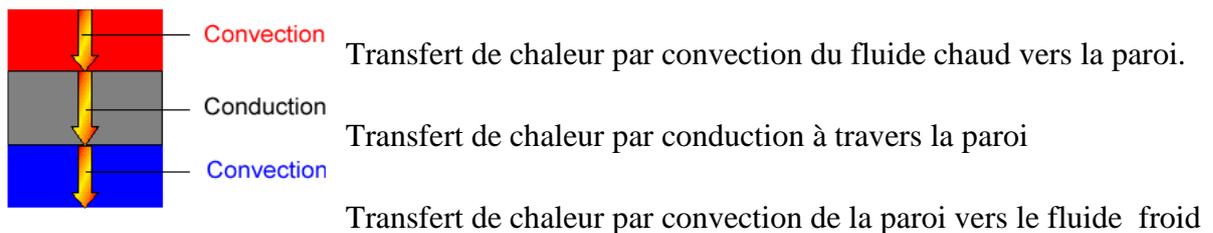
### I.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur :

En principe, pour les échangeurs les plus couramment utilisés dans l'industrie, les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison à faible inertie thermique au travers de laquelle les échanges se font par conduction. En effet, la chaleur que l'un des fluides cède à la paroi par convection le long de la surface de contact est transférée par conduction et, est cédée à l'autre fluide par convection le long de l'autre face (figure I.1). [1]



**Figure I.1: Principe de fonctionnement d'un échangeur [4]**

L'échange de chaleur entre les deux fluides suit trois étapes (figure I.2) [4] :



**Figure I.2 : Échange de chaleur entre deux fluides dans un échangeur**

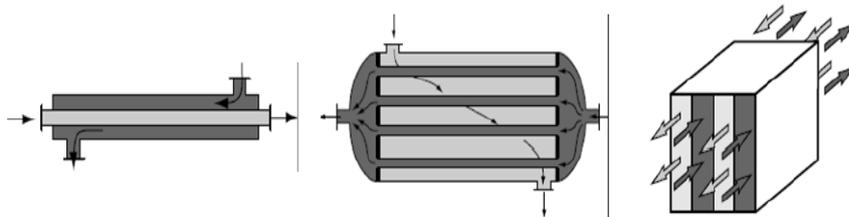
### I.4. Critères de classification des échangeurs :

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux :

### I.4.1. Classification selon le mode de circulation :

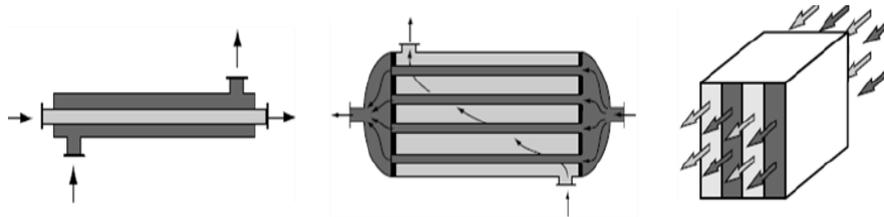
Une classification peut être établie, d'après le sens relatif des écoulements des deux fluides on distingue alors [5] :

**I.4.1.1 Circulation à contre-courant :** Dans ce cas, les deux fluides circulent dans un sens opposé, de chaque côté de la paroi (figure I.3).



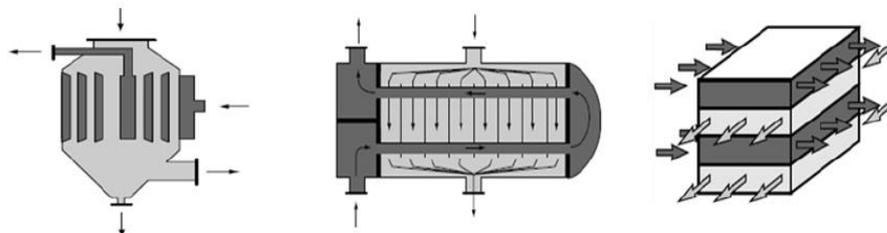
**Figure I.3 : Circulation à contre-courant [5]**

**I.4.1.2. Circulation à co-courant (courant-parallèle) :** Dans ce cas, les deux fluides circulent dans le même sens, de chaque côté de la paroi (figure I.4).



**Figure I.4 : Circulation à co-courant [5]**

**II.4.1.3. Circulation à courants croisés :** L'écoulement des deux fluides se fait dans deux directions perpendiculaires (figure I.15).



**Figure I.5 : Circulation à courant croisé [5]**

### I.4.1.4. Circulation à courants mixte :

Dans ce cas, les trois modes de courant précédents coexistent.

### I.4.2. Classification suivant la nature du matériau de la paroi d'échange :

On retiendra deux types de paroi [6] :

- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires.
- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc...

### I.4.3. Classification selon le type d'appareillage :

#### I.4.3.1. Échangeur coaxial (double tubes) :

Ces échangeurs sont constitués par des éléments rectilignes de deux tubes concentriques raccordés à leurs extrémités par des coudes. Les divers éléments sont tous assemblés par désaccords à démontage rapide, et le remplacement des tubes est possible. Les problèmes de dilatation thermique et d'étanchéité entre le tube intérieur et le tube extérieur sont résolus par l'utilisation de presse étoupe ou de joint torique. [4]



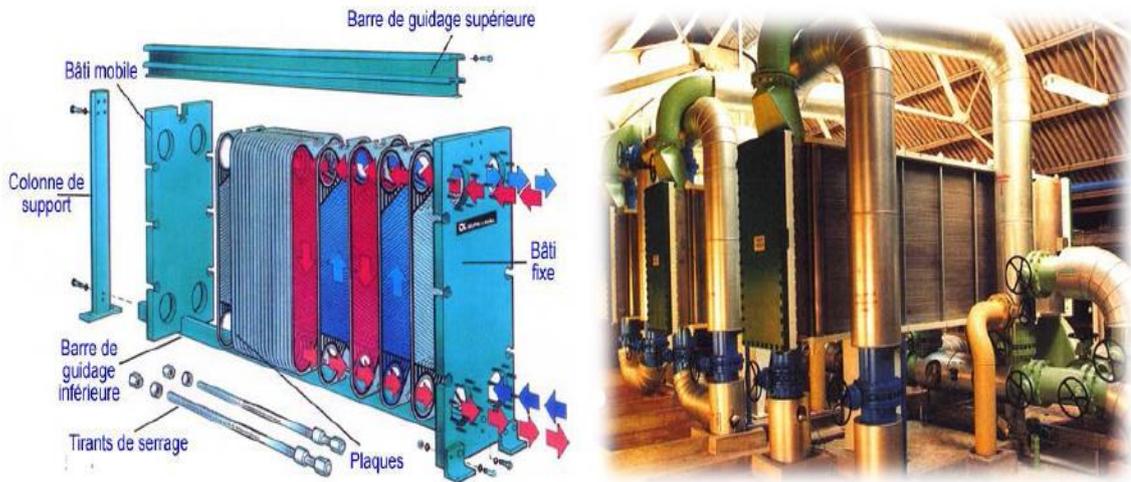
**Figure I.6 : Schéma et photographie d'un échangeur à double tubes [4]**

Les tubes sont généralement en acier et les longueurs courantes sont de 3,6 - 4,5 ou 6 m. On utilise également des tubes en verre et en graphite dans des applications particulières. Ces échangeurs utilisés depuis l'origine, conviennent aux produits sales, pour des débits faibles et des températures et des pressions élevées.

#### I.4.3.2. Échangeur à plaques :

Un échangeur à plaques est constitué d'un ensemble de plaques métalliques embouties au travers desquelles 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 inférieure et supérieure, Un joint : par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques.[4]



**Figure I.7 : Schéma et photographie d'un échangeur à plaques [4].**

De tels échangeurs peuvent être très polyvalents et on peut, en particulier, y faire circuler des fluides de très grandes viscosités. Par ailleurs, on ne peut dépasser des pressions supérieures à 30 atm et des températures supérieures à 150 °C.

#### **I.4.3.3. Échangeur Tubulaire :**

Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à dépressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contre balancent leur encombrement. [2]

On distingue, le plus souvent, les catégories suivantes :[1]

- a. Les échangeurs monotubes pour lequel le tube est placé dans un réservoir.
- b. Les échangeurs coaxiaux pour lesquels les tubes sont le plus souvent cintrés.
- c. Les échangeurs multitubulaires qui existent sous 4 formes :

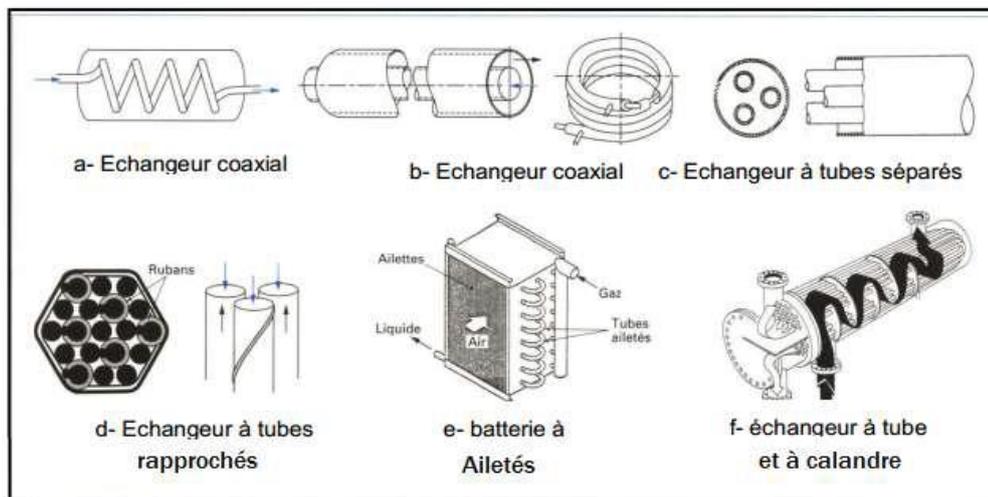
1. Les échangeurs à tubes séparés : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.

2. Les échangeurs à tubes rapprochés : les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire de rubans enroulés en spirale autour de certains d'entre eux.

3. Les échangeurs à tubes ailetés qui permettent d'améliorer le coefficient d'échange : lorsque l'un des fluides transitant dans l'échangeur s'avère moins bon caloporteur que l'autre, l'utilisation d'ailettes autour des tubes ou dans les tubes s'impose pour que la résistance thermique globale ne soit pas entièrement due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange thermique.

4. Les échangeurs à tube et calandre ou la calandre est une enveloppe métallique cylindrique entourant un faisceau de tubes : ils possèdent une boîte de distribution c'est-à-dire un dispositif qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes.

Ils peuvent être à boîte fixe, à boîte flottante, ou à tube en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur. Les tubes peuvent être supportés par des chicanes afin d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre dans le but d'améliorer le coefficient d'échange. Pour cela, un compromis doit être trouvé pour avoir simultanément un coefficient d'échange global et des pertes de charge acceptables.



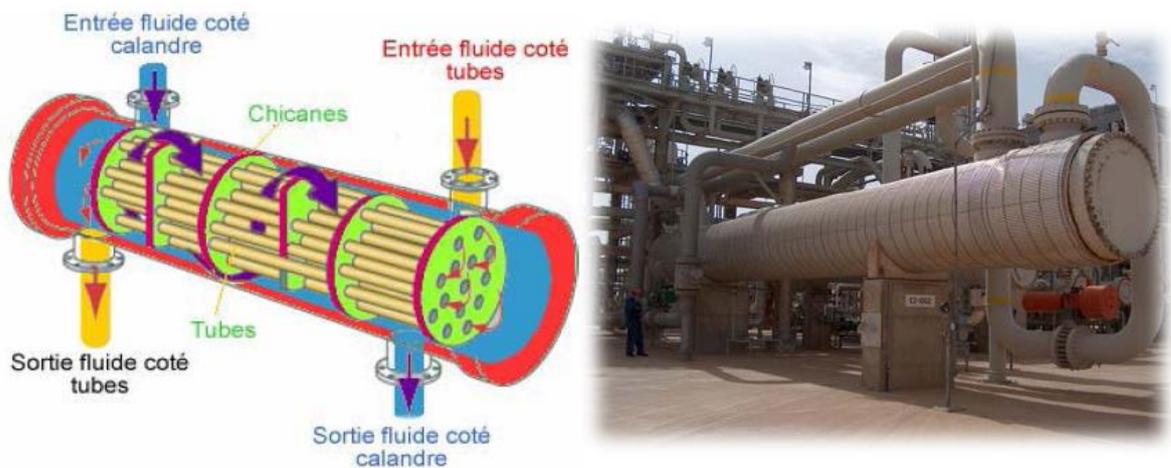
**Figure I.8 : Les différents types des échangeurs tubulaires**

### **I.5. Les échangeurs à faisceau de tube et calandre :**

Ce type d'échangeurs est de loin, le plus répandu dans les unités de transformations des industries chimiques et pétrochimiques. Un faisceau de tubes est situé à l'intérieur d'une

calandre, dans laquelle circule le deuxième fluide. Cette conception se retrouve également dans les condenseurs, les rebouilleurs et les fours multitubulaires. [4]

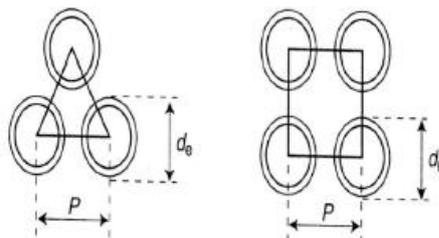
Le faisceau est monté en deux plaques en communication avec des boîtes de distribution, qu'assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en plusieurs passes. Le faisceau munie chicanes est logé dans une calandre possédant des tubulures d'entrée et de sortie pour imposer à la circulation du deuxième fluide, à l'extérieur des tubes du faisceau, un chemin, dicté par les chicanes.



**Figure I.9 : Schéma et photographie d'un échangeur à faisceau de tube et calandre [4].**

Tous les éléments entrant dans la construction de ces échangeurs ont fait l'objet d'une normalisation, tant par la T.E.M.A. (Tubular Exchangers Manufacturer's Association) que l'A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers) ou l'A.P.I. (American petroleum institute).

La perforation des trous dans les plaques est réalisée selon une disposition normalisée, soit au pas triangle, soit au pas carré. Le pas triangulaire permet de placer environ 15% de plus de tubes que le pas carré, sur une plaque tubulaire de diamètre donné, mais, en contrepartie, cette disposition des tubes rend difficile le nettoyage des tubes, qui se fait par insertion de grattoirs (figure I.10).



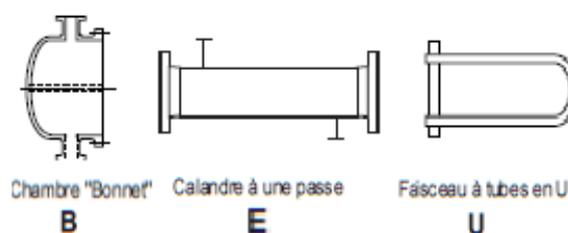
**Figure I.10 : Pas des tubes**

Les chicanes qui permettent d'allonger le chemin du fluide circulant dans la calandre. Elles sont souvent constituées par un disque de diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre comportant une section libre représentant 20 à 45% de la section. Les boîtes de distribution et de retour sont cloisonnées. Ce cloisonnement permet au fluide de traverser successivement plusieurs sections du faisceau, ce qui a pour objet d'accroître la vitesse du fluide et d'augmenter le coefficient de transfert thermique à l'intérieur des tubes. Cette disposition correspond toujours à un nombre pair de passages (ou passes) dans le faisceau.

## I.6. Technologie de l'échangeur de chaleur 12X20400A champs GEA-GS1 :

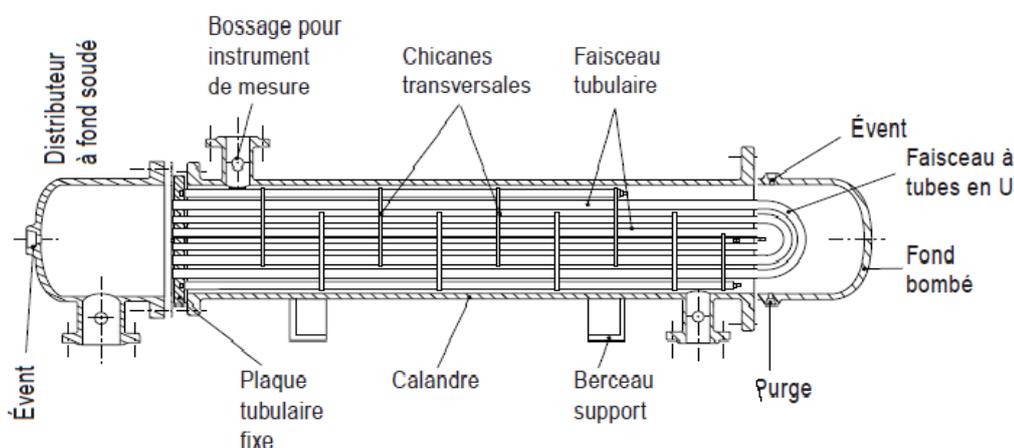
### I.6.1. Les éléments constitutifs de l'échangeur à faisceau et calandre 12X20400A :

La plupart des échangeurs à faisceaux et calandres utilisés dans l'industrie pétrolière sont normalisés selon les Standards TEMA. Ils sont désignés succinctement en précisant les dimensions principales et le type repéré par trois lettres (Exemple : BEU) ces éléments constitutifs de l'échangeur sont classés en différents types selon une nomenclature [5]. Notre échangeur est de type BEU (voir annexe, Figure I.11 et figure I.12).



**Figure I.11 : Composition de l'échangeur BEU**

BEU signifie : B : Boîte de distribution, E : Calandre, U : Faisceau tubulaire



**Figure I.12 : Echangeur de type BEU**

### I.6.2. Type de chambre de distribution :

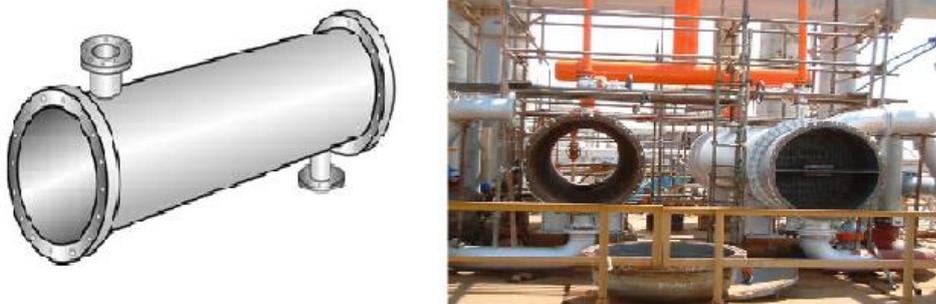
La chambre de distribution permet de distribuer le fluide dans le faisceau en vue de réaliser 1, 2, 4, passes (nombre pair). Le nombre de passes est généralement limité par la perte de charge admissible. Un autre facteur limitant est la tenue mécanique de la plaque tubulaire associée. Si la différence de température du fluide à l'entrée et à la sortie est importante, pour une différence de l'ordre de 150°C, une seule passe s'impose (figure I.13). [7]



**Figure I.13 : Chambre de distribution de type B**

### I.6.3. Type de la calandre :

Aucune normalisation n'intervient concernant le diamètre extérieur de la virole cylindrique constituant la calandre. Le diamètre intérieur doit être conforme aux normes dans l'hypothèse du respect des standards TEMA.



**Figure I.14 : Calandre de type E**

Dans la plupart des cas, la calandre est réalisée à partir d'une tôle rouée, soudée avec une tolérance de +1/8 inch sur le diamètre intérieur. Les deux diamètres sont contrôlés ainsi que la longueur développée. L'épaisseur est définie dans le respect des règles imposées par les codes et prend en compte, la surépaisseur de corrosion. Celle-ci ne peut en aucun cas être inférieure aux valeurs normalisées. [4]

#### I.6.4. Le faisceau de tubes :

Les tubes de section circulaire sont exclusivement utilisés dans les échangeurs. Puisque le transfert de chaleur souhaité dans l'échangeur s'effectue à travers la surface du tube, le choix des variables géométriques du tube est important de point de vue de la performance. Les tubes doivent pouvoir supporter les éléments suivants : température et pression de fonctionnement des deux côtés, Contraintes thermiques et la nature corrosive des fluides.[8]



Figure I.15 : faisceau de tube en U

#### I.6.5. Plaques tubulaires :

Ce sont des plaques percées supportant les tubes à leurs extrémités. Elles peuvent être en acier ordinaire, en acier spécial massif. Les plaques tubulaires sont les parties délicates des échangeurs. Les interstices entre tubes et plaques sont des lieux privilégiés de corrosion. Par ailleurs, des dilatations différentielles excessives peuvent faire céder les dudgeonnage sou les soudures [8]. Les tubes généralement sont fixés par : mandrinage, dudgeon nage, et par soudage dans les applications à haute pression.



Figure I.16 : la plaque tubulaire de l'échangeur 12X20400A

**Conclusion**

Dans le chapitre suivant en s'intéressent de parler en général sur les problèmes possèdent dans les échangeurs de chaleur qui provoque la diminution de son efficacité de travail tel que le bouchage ou la diminution du rendement de l'équipement et particulièrement la diminution de transfert de chaleur. Parmi ces problèmes en parle essentiellement sur la corrosion et l'encrassement.

**CHAPITRE II :**  
**GENERALITE SUR LE**  
**PROBLEME**  
**D'ENCRASSEMENT**

**Introduction :**

L'encrassement, des équipements de transfert thermique, ayant un impact significatif sur le parcours de production. L'encrassement entraîne une consommation importante et une perte d'énergie en affectant les performances telle que : la diminution du coefficient de transfert de chaleur, la réduction de la conductivité thermique, l'augmentation de la chaleur des liquides chauds, la réduction de la section de passage du fluide entraînant de réduit du débit de fluide (augmentation de perte de charge), d'autre part le début et l'aide de corrosion. Sans doute à ce que la corrosion et l'encrassement sont deux problèmes majeurs qui affectent toutes les activités industrielles. Les actifs se dégradent et nécessitent une surveillance et un entretien continu pour éviter les problèmes à grande échelle ou des méthodes bien planifiées doivent être trouvées pour le commander et traiter.

**II.1. Définition de l'encrassement :**

L'encrassement est défini comme la déposition des substances indésirable sur les surfaces des équipements industrielle. Dans les échangeurs de chaleurs, l'encrassement est une couche de dépôt qui s'accumule à la surface d'échange de chaleur et qui entravent le transfert de chaleur. Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments [9]. Les échangeurs de chaleur industriels fonctionnent rarement avec des liquides qui ne provoquent pas l'encrassement. La croissance des dépôts provoque une dégradation des performances thermo hydrauliques de l'échangeur de chaleur avec le temps. L'encrassement affecte la consommation d'énergie des procédés industriels. Les couches d'encrassement ont une conductivité thermique plus faible que les fluides ou la paroi de conduction, d'où elles augmentent la résistance thermique globale. L'encrassement des échangeurs de chaleur représente une dépense élevée. C'est quelque chose qui est indésirable et contre-productif. La présence d'encrassement sur les surfaces d'échange de chaleur entraîne des coûts supplémentaires.

**II.2. Différents types d'encrassement (classification) :**

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt, régime d'écoulement, et selon les conditions d'utilisation des équipements d'échange thermique ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt.[10] Six types différents peuvent alors être définis :

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

### **II.2.1. Encrassement particulaire :**

C'est la forme la plus courante de l'encrassement [11], La plupart des écoulements, de fluides industriels (liquides ou gazeux) transportent des particules en suspension dont la taille varie d'une fraction de  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  ; le dépôt est inévitable d'une partie de ces particules sur la surface d'échange [1] :

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

### **II.2.2. Entartrage :**

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin (tartre) à partir une solution liquide. Il dépend donc de la composition de l'eau industrielle [12]. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être réunies [1] :

- La limite de solubilité doit être dépassée, c'est à dire qu'il y ait saturation : c'est l'aspect thermodynamique
- La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c'est l'aspect cinétique.

### **II.2.3. Encrassement dû à la corrosion :**

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

La corrosion est un résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre le fluide en écoulement et le métal de la surface d'échange de chaleur permet la production des particules de carbone déposées pour former un dépôt.

La corrosion peut se produire en raison des impuretés situés dans le flux des fluides, telles que (l'hydrogène, le soufre et l'ammoniac...). Les produits de la réaction qui se forment et restent sur la surface d'échange créent le dépôt, il s'agit là, d'un mécanisme de corrosion, in situ, lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générés ex situ, l'encrassement correspondant est de type particulaire. [1]

#### **II.2.4. Encrassement biologique :**

Il est dû au développement de micro-organismes [1] en contact avec la surface d'échange et qui provoque la formation d'un film, ces organismes sont : les bactéries, champignons et les algues. Il existe des conditions chimiques et physiques dans les échangeurs de chaleur sont favorables à leur développement, Les hydrocarbures et l'ammoniac renforcent la présence des bactéries, tandis que les algues et les champignons se développent dans la présence des autres facteurs catalyseurs, notamment le soleil, l'humidité, etc....Le chlore est souvent utilisé comme une mesure préventive car il est considéré comme un biocide toxique à effet rapide pour la plupart des micro-organismes.

#### **II.2.5. Encrassement par réaction chimique :**

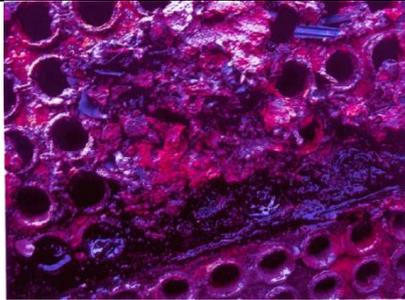
On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation ; il en résulte la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie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

#### **II.2.6. Encrassement par solidification :**

Il s'agit de solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace ou de givre à l'intérieur des conduites) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt d'hydrocarbures paraffiniques). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre).[12]

Le tableau (tableau II.1) suivant montre des exemples de formes d'encrassement :

**Tableau II.1 : Les types d'encrassement**

Encrassement particulaire : Dépôt de forte épaisseur dans un tube de surchauffeur	
Entartrage	
Dégradation (encrassement sous corrosion)	
Encrassement biologique : Dépôt bactérien	

### II.3. Nature du dépôt :

#### II.3.1. Dépôt dur :

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

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

### **II.3.2. Dépôt poreux :**

C'est le matériau d'un dépôt dur qui se présente en une structure moins dense, sous l'effet des conditions opératoires. Ce cas est plus sérieux que le précédent quand le fluide emprisonné dans les pores a une conductivité thermique plus faible que le matériau solide.

### **II.3.3. Dépôt mou :**

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

## **II.4. Les processus fondamentaux de l'encrassement (Mécanismes) :**

Les mécanismes d'encrassement sont décomposés en cinq (5) événements séquentiels [12] :

**II.4.1. Initiation :** Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.

**II.4.2. Transport des particules dans le fluide jusqu'au voisinage de la paroi :** Il peut être contrôlé par la diffusion turbulente, l'impaction inertielle ou un champ de forces extérieures (thermiques, électriques, etc.) ; ces mécanismes peuvent coexister.

**II.4.3. Adhésion des particules :** Les particules transférées à la paroi peuvent s'y maintenir grâce aux forces d'adhésion dues à l'attraction moléculaire (forces de Van der Waals), aux forces électriques ou capillaires.

**II.4.4. Réentrainement des particules déposées :** Certaines des particules déposées peuvent être réengrainés sous forme d'agglomérats arrachés à la couche de dépôt sous l'action des forces aérodynamiques.[13]

**II.4.5. Vieillessement du dépôt :** Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline du dépôt dû à des phénomènes tels que la déshydratation ou la polymérisation, il y'a diminution des forces d'adhésion du dépôt qui peut être arraché sous l'action des forces aérodynamiques.[13]

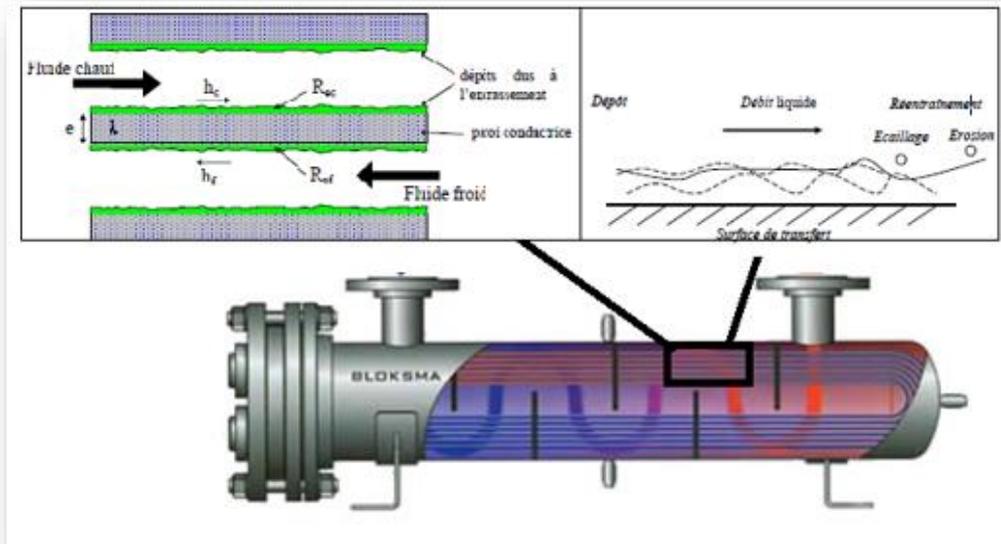


Figure II.1 : Représentation schématique de l'encrassement

## II.5. Facteurs affectent de l'encrassement :

### II.5.1. Paramètres de fonctionnement :

#### II.5. 1.1. Géométrie d'échangeur (Zones stagnantes) :

Les zones stagnantes sont des zones de dépôts préférentiels par exemple dans l'écoulement externe d'un échangeur à tubes et calandre, les particules se concentreront dans les zones de recirculation à l'aval des chicanes, avec le temps, les dépôts ont tendance dans certains cas s'agglomérer dans l'espace entre les tubes et les chicanes et créer ainsi un blocage de l'écoulement de fluide.[1]

#### II.5.1.2. Effet de la vitesse :

La vitesse d'écoulement est un facteur important sur l'augmentation de l'encrassement et l'accumulation des dépôts sur la surface d'échange, tels que plus la vitesse est importante plus l'encrassement est faible, elle est associée au débit de fluide. Afin d'éviter l'encrassement une vitesse importante d'écoulement fait diminuer l'accumulation de ces dépôts.

#### II.5.1.3. Effet de la température de surface :

La présence des points chauds (ou froids) sur la surface d'échange est souvent liées à un problème de répartition de vitesse au voisinage de la paroi. Il est bien connu que lorsque la température de surface croît, le dépôt des sels de solubilité inverse est favorisé. En ébullition,

cela reste vrai quelque soient les sels en présence. La même règle est encore vraie pour l'encrassement biologique jusqu'à une certaine température limite (de l'ordre de 35°C) [14]. Les dépôts particuliers sont également influencés par les gradients de températures, pratiquement, cela revient à accentuer les dépôts lorsqu'on refroidit le fluide encrassant et à diminuer ceux-ci lorsqu'on le chauffe.

### **II.5.2. Paramètres de l'échangeur de chaleur :**

#### **II.5.2.1. Structure et état de surface (Rugosité) :**

Les surfaces rugueuses ont tendance à favoriser les dépôts, particulièrement dans la phase d'initiation de l'encrassement, par contre, par la suite, le dépôt modifie la rugosité de la surface et ce n'est plus la rugosité initiale qui contrôle le phénomène, mais celle du dépôt.[15]

#### **II.5.2.2. Matériau de construction, corrosion :**

Le choix d'un matériau approprié constitue la méthode la plus radicale pour éviter la corrosion. En présence de produits chimiques, les problèmes de corrosion sont complexes, une variation de composition ou la présence d'impuretés dans la solution peuvent modifier le comportement du matériau. [15]

### **II.5.3. Propriétés des fluides :**

La nature du fluide et la nature des produits entraînés dans le fluide ont un impact significatif sur l'encrassement. Avec les gaz de combustion, la quantité de matières inorganiques volatiles (par exemple, le sulfate de sodium) et de particules de cendres volantes dans le flux influence le comportement de l'encrassement.

Dans les systèmes d'eau de refroidissement et du côté de l'eau des systèmes de production de vapeur, la qualité de l'eau est un facteur clé des problèmes d'encrassement pouvant survenir. Les solides en suspension dans l'eau d'appoint brute ou les produits peuvent se déposer sur les surfaces de transfert de chaleur. Pour les gaz la présence de micro-organismes et de nutriments peut entraîner un encrassement biologique sur les surfaces métalliques

## **II.6. Prévention de l'encrassement dans les échangeurs :**

Des procédés mécaniques et chimiques de prévention de l'encrassement permettent le fonctionnement de l'échangeur en bon état et peuvent améliorer de façon significative les performances de l'échangeur, le choix de la méthode dépend, du type d'encrassement et ainsi

de nombreux paramètres économiques, le tableau suivant (tableau II.2.) représente des différentes actions de prévention pendant les phases de vie d'un échangeur :

**Tableau II.2 : Action envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur [16]**

Phase de design	Phase d'installation de la construction	Phase Fonctionnement (En ligne)	Phase d'arrêt (Hors ligne)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix de type d'échangeur</li> <li>• choix de la géométrie et de la configuration</li> <li>• choix des conditions de fonctionnement (température, débit,)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle de la qualité de fabrication</li> <li>• Protection dans transport et stockage</li> <li>• Nettoyage et passivation pré-opération</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintien les températures d'un les conditions appropriées de fonctionnement</li> <li>• Maintien les débits d'un les conditions appropriées de fonctionnement</li> <li>• prétraitement des fluides</li> <li>• utilisation contrôlée avec les additifs (inhibiteurs, antitartres, dispersants, acides)</li> <li>• Nettoyage en ligne (Cornes soniques Souffleur, chaînes et grattoirs, choc thermique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• démontage et nettoyage manuel</li> <li>• prévention mécaniques (perçage, grattage)</li> <li>• nettoyage hydraulique à la lance (vapeur, jet d'air)</li> <li>• nettoyage chimique</li> </ul>

### II.6.1. Pendant la phase de fabrication de l'échangeur et de sa mise en route :

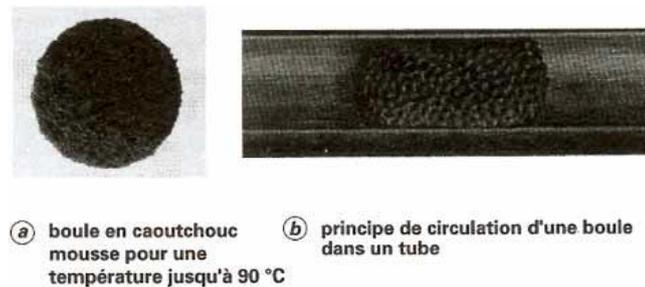
La construction des équipements de transfert thermique peut s'étendre sur une durée relativement longue et les surfaces d'échange sont alors exposées à des conditions diverses. L'encrassement peut être initié lorsque les essais sous pression de l'échangeur sont réalisés avec une eau de mauvaise qualité, non suffisamment rincée à l'eau propre et à l'azote. En conséquence, il est nécessaire de protéger les surfaces d'échange de tout environnement favorisant la corrosion ou le dépôt. Lors de la mise en service de l'installation, compte tenu de l'excès de surface attribuée pour tenir compte de l'encrassement, l'échangeur ne fonctionne pas dans des conditions optimales, en effet, des vitesses de circulation plus lentes et des températures de surface plus importantes favorisent l'encrassement. Des efforts doivent être

faits au démarrage de l'installation pour fonctionner aux conditions nominales et employer un moyen de traitement de l'eau limitant l'apparition de l'encrassement, il est conseillé d'équiper l'échangeur de plusieurs capteurs de températures et de débit pour pouvoir suivre l'évolution du degré d'encrassement et agir en conséquence lors d'un arrêt prolongé de l'installation, il faut prendre des précautions nécessaires (vidange, mise sous vide, traitement,...) pour éviter, d'une part la corrosion rapide des surfaces et d'autre part l'apparition d'un encrassement biologique de l'appareil.[17]

### II.6.2. Pendant la phase de fonctionnement (en ligne) :

Des opérations de maintenance et d'entretien sont utilisées pour prévenir la formation de dépôts encrassant dans l'échangeur. Elles permettent ainsi d'augmenter la durée de vie de l'appareil entre deux arrêts pour maintenance. Suivant la nature de l'encrassement, différents procédés existent [18] :

- Procédés mécaniques pour les liquides pour le nettoyage en continu de la surface interne d'échangeurs tubulaires : à boules, à ressorts, à brosses, etc...(figue II.2)



**FigureII.2 : Procédé de nettoyage en continu par boules**

- Procédés mécaniques pour des échangeurs fonctionnant avec des gaz encrassant tels que :
  - La projection de vapeur ou d'air comprimé,
  - Le nettoyage à l'eau,
  - Le grenailage,
  - Le soufflage acoustique,
  - Le nettoyage par chocs thermiques.
- Pour les changeurs à plaques, des systèmes analogues sont :
  - Des systèmes à surface raclée,
  - Un nettoyage par chocs thermiques,

-Des systèmes à inversion de débits,

### II.6.3. Pendant les phases d'arrêts (hors ligne) :

En général, les techniques utilisées pour enlever les encrassements des surfaces de l'échangeur de chaleur, peuvent être classées en deux catégories : (mécanique et chimique).

Le processus de nettoyage peut être utilisé pendant que l'échangeur en arrêts, appelés nettoyage hors ligne.



Figure II.3 : Nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique

#### II.6.3.1. Nettoyage mécanique :

- Nettoyage à l'eau sous pression.

Elle est efficace pour enlever les dépôts à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes d'échangeur ou pour d'autres types de géométrie, de façon occasionnelle, du sable peut être injecté avec l'eau pour arracher les dépôts durs mais dans ce cas, il y a risque d'érosion de la surface et sur tout de destruction du film protecteur anti corrosion.[1]

- Nettoyage à l'aide d'outils.

Cette technique est utilisée pour enlever les dépôts très durs à l'intérieur des tubes de des échangeurs de chaleur. Ces outils peuvent être :

-Moteur d'entraînement électrique ou pneumatique équipé à ça extrémité à une outil de grattage, outil à brosse, outil à lames

- Pistolet hydraulique (pression d'utilisation : 6 à 15bar) propulsant des écouvillons spéciaux dans les tubes : ils permettent d'enlever des dépôts de boues ou d'algues dans des tubes de petits diamètres.[1]



**Figure II.4 : Outil de nettoyage mécanique**

### **II.6.3.2. Nettoyage chimique :**

Les méthodes de nettoyage chimique majeures sont :

- Par circulation : à l'aide d'une pompe on circule une solution de nettoyage dans l'échangeur thermique.
- Nettoyage et d'absorption : l'échangeur de chaleur doit remplir avec une solution de nettoyage, puis nous l'évacuer après un certain temps.
- Nettoyage par injection de vapeur : Cette méthode implique une injection d'un mélange concentré de solutions de nettoyage et de vapeur.

Avantages de nettoyage chimique :

- Opération rapide et efficace.
- Moins de dégâts sur la surface d'échange.
- Les solutions chimiques pénètrent jusqu'aux zones, inaccessibles de l'échangeur et le traitement de toute la surface d'échange est réalisé.
- Il peut se réaliser sans démontage de l'appareil.

### **Conclusion**

Les échangeurs de chaleurs sont des équipements très importants dans les procédés de traitement de pétrole pour cela, on essaie de maximiser le transfert calorifique pour augmenter la performance de l'équipement. Cette performance est liée directement et de manière significative avec le problème de l'encrassement.

Dans le chapitre suivant, il est nécessaire de connaître d'une façon pratique l'effet et le développement d'encrassement dans un cas réel et l'intervention sur site pour suivre le déroulement de fonctionnement.

# CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE

## Introduction :

La mesure directe au borne de l'échangeur consiste à réaliser un bilan thermique aux bornes de l'échangeur, par l'intermédiaire des mesures de températures d'entrée et de sortie de chacun des fluides ,ainsi qu'au moins une mesure de débit sur un des deux fluides [19], il peut être également envisagée de suivre l'évolution de l'encrassement aux bornes de l'échangeur sur le circuit présentant des risques d'encrassement, cette méthode quoique indirecte, permet de détecter à quel moment il faut arrêter l'installation pour nettoyage.

### III.1. Description de l'unité OOS :

Le brut envoyé à HEH doit répondre aux spécifications internationales relatives à la pression de vapeur acceptable du brut (TVR). Pour atteindre la TVR voulue, un four et deux échangeurs de chaleur ont été construits et mis en service au centre GS-01. L'objectif est de maintenir la température de sortie de l'huile de la séparation BP à 50°C. La gamme de température de sortie de la séparation BP doit garantir que l'huile entrant dans le stockage est conforme à la spécification d'expédition du brut, notamment la TVR. L'huile est chauffée en circulant un fluide caloporteur, composé de 50% de Tri éthylène glycol (TEG) et 50 % d'eau, dans deux échangeurs de chaleur (figure III.1).

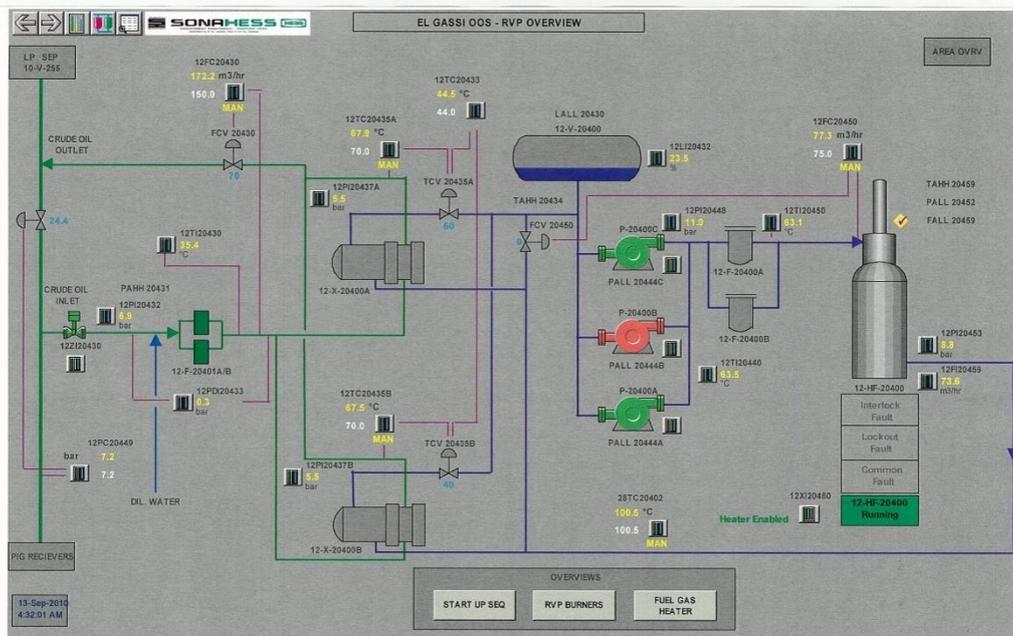


Figure III.1 : L'unité d'optimisation de brut (OOS)

### III.2. Position de problème :

L'unité OOS comprend deux échangeurs de chaleur de type faisceau calandre (12X20400 A/B) disposées en parallèle, l'un en service, l'autre en standbay. Etant donné la non existence de moyen technique de mesures adéquates pour traiter le problème d'encrassement de l'échangeur thermique 12X20400A on a proposé : Le monitoring des paramètres de fonctionnement durant des périodes de fonctionnement de l'échangeur, nous a permet de calculer et modéliser la résistance d'encrassement à l'intérieur et à l'extérieur des tubes tubulaires.

### III.3. Dimensionnement de l'changeur 12X20400A :

On utilise la méthode de **KERN** pour le dimensionnement de l'échangeur où les débits et les températures des fluides chaud et froid sont connus à l'entrée et à la sortie de l'échangeur. Du point de vue du dimensionnement mécanique, les échangeurs à faisceau et calandre sont des appareils chaudronnés, et à ce titre, soumis aux règles imposées par les codes selon les pays, les constructeurs, les sociétés d'ingénierie et les clients concernés [20]. Tous les éléments entrant dans la construction de ces échangeurs ont fait l'objet d'une normalisation T.E.M.A (Tubular Exchangers Manufacturer's Association).

#### III.3.1. Choix du type d'échangeur : [20]

En fonction des fluides, le cout, l'espace disponible, la pression et l'écart de température, on doit choisir notre échangeur par rapport à trois paramètres principaux :

- La chambre de distribution.
- Le type de la calandre.
- Le fond de la calandre (boite de sortie).

##### III.3.1.1.la chambre de distribution :

**Type B** : cette conception à fond bombé résiste mieux aux hautes pressions (10 bars) que le fond plat et permet une économie de poids et d'investissement. L'usage de ce type de chambre est réservé au produit propre ne demandant pas des nettoyages fréquents. Elle est alors souvent associée à l'utilisation d'un faisceau de tubes en U.

##### III.3.1.2. Le type de la calandre :

**Type E** : l'utilisation de ce type de calandre très courante, elle est munie d'une tubulure à chaque extrémité.

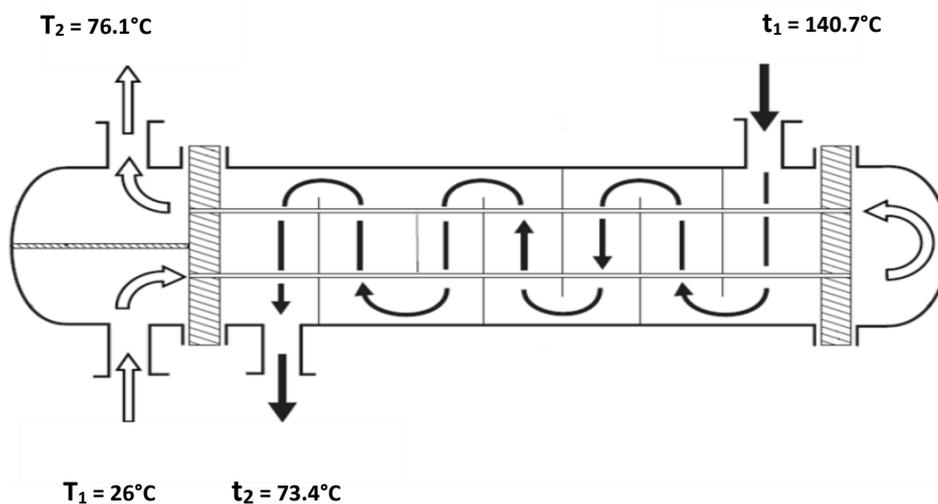
- Elle est utilisée pour de très importants débits des fluides.
- Elle assure une distribution uniforme.
- Et les risques d'érosion et de vibration des tubes sont très limités.

### III.3.1.3. Fond de la calandre :

**Type U :** Il permet de réaliser deux passes coté tube, bien étanches. Ces avantages sont importants :

- Son faible prix.
- Moins de risques de fuites coté tube.
- Résiste bien à la pression.
- En fonction des données disponibles, notre choix s'est alors porté sur l'échangeur de type BEU (Voir annexe, Figure 4).

Le préchauffage du Brut, ce fait avec l'échangeur de chaleur possédant les caractéristiques suivantes :



**Figure III.2 : Schéma de l'échangeur de chaleur en fonctionnement**

Tels que :

$t_1$ : température d'entrée de TEG ( $t_1 = 140.7 \text{ °C}$ ).

$t_2$ : température de sortie de TEG ( $t_2 = 73.4 \text{ °C}$ ).

$T_1$  : température de l'entrée de brut ( $T_1 = 26 \text{ °C}$ ).

$T_2$  : température de sortie de brut ( $T_2 = 76.1 \text{ °C}$ ).

### III.3.2. But de calcul :

Calcul de vérification des performances thermiques de l'échangeur thermique 12X20400A pendant un certain temps de fonctionnement.

### III.3.3. Hypothèses simplificatrices :

Nous allons poser dans ce qui suit certaines hypothèses :

- ❖ Le régime est permanent.
- ❖ On considère que la surface externe de l'échangeur de chaleur est parfaitement isolée, de sorte qu'il n'y a aucune perte de chaleur au milieu extérieur.
- ❖ Le transfert thermique ne s'effectue que par convection et conduction, transfert par rayonnement négligeable.
- ❖ Les températures ne varient que dans la seule direction de l'écoulement, le problème est monodimensionnel.
- ❖ Les propriétés physiques des fluides sont prises par rapport à la température moyenne des intervalles de températures envisagés

La méthode de KERN est utilisée pour avoir les résultats suivants :

- 1) Réassemblage des propriétés des fluides.
- 2) Réassemblage et détermination des informations de la géométrie de l'échangeur.
- 3) Estimation des Coefficients de transfert thermique par convection (cotés tube, calandre)
- 4) Estimation du Coefficients de transfert thermique global.

**III.3.4. Spécification des propriétés des fluides :****Tableau III.1 : Propriétés physicochimiques des fluides**

Fluides	Côté calandre Triéthylène glycol	Côté tube Brut
Débit volumique [m <sup>3</sup> /h] / [m <sup>3</sup> /s]	75/0.020	180/0.05
Chaleur massique moyenne [kcal/kg. °C] / [J/kg. °C]	0.868/3634.142	0.464/1942.675
Température d'entrée [°C]	140.7	26
Température sortie [°C]	73.4	76.1
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	1020	730
Viscosité dynamique [kg/h.m]	4.25	3.758
Conductibilité thermique [kcal/h.m.°C] / [W/m°C]	0.344/0.4	0.125/0.145
Nombre de passe	1	2

**III.3.5. Géométrie de l'échangeur thermique 12X20400A :**

Pour compléter la géométrie, On est besoin de présenter certaines caractéristiques de l'échangeur thermique :

**Tableau III.2 : Caractéristique de l'échangeur**

Echangeur	BEU
Matériau de construction	Acier au carbone
Conductivité thermique	$\lambda = 45 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$

Calandre	
Nombre de passe	1
Diamètre intérieur	$D_c = 668 \text{ mm}$
Resistance d'encrassement	$0.00035 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Nombre de chicanes	$\eta_c = 25$
Tube	
Nombre de passe	2
Nombres des tubes	$N = 408$
Longueur des tubes	$L = 7300 \text{ mm}$
Diamètre extérieur des tubes	$d_0 = 19.05 \text{ mm}$
Pas entre tubes	$P = 25.4 \text{ mm / Carré}$
Epaisseur des tubes	$e = 2.77 \text{ mm}$
Résistance d'encrassement	$0.0005 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Surface d'échange	$178.15 \text{ m}^2$

### III.3.5.1. Tubes :

Les dimensions des tubes sont normalisées et classés dans les séries correspondant à un même diamètre extérieur. Dans chaque série, les tubes se différencient par leur épaisseur et par le « Birmingham Wire Gage (BWG) » (Voir annexe, Tableau 1).

On choisit le diamètre intérieur  $d_i = 13.51 \text{ mm}$

On peut estimer la surface d'échange  $A$  d'après l'équation suivante :

$$\text{Nombre de tubes} = \frac{A}{S} = \frac{\text{Surface d'échange}}{\text{Surface d'un tube}} \quad (\text{III.1})$$

$$S = \pi d_0 L \quad (\text{III.2})$$

$$A = 178.15 \text{ m}^2$$

Calcule le diamètre de faisceau tubulaire  $D_b$  :

$$D_b = d_0 \left( \frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad (\text{III.3})$$

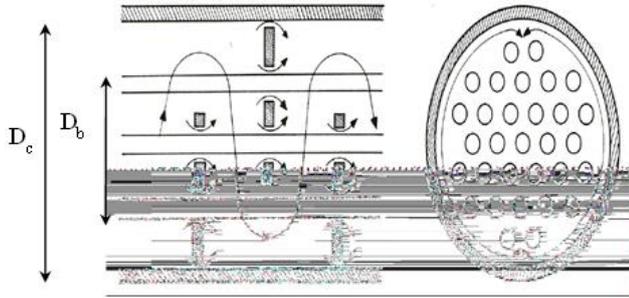


Figure III.3 : Diamètre de faisceau tubulaire  $D_b$

Diamètre de la calandre  $D_c$  :

$D_b$  : Diamètre du faisceau tubulaire (mm)

$D_0$  : Diamètre extérieur des tubes (mm)

$N_t$  : Nombre total de tubes

$K_1$  et  $n_1$  : Constantes dépendant du pas et du nombre de passes (Voir annexe, Tableau 2).

$$N_1 = 2.291 \text{ et } K_1 = 0.156$$

On arrive au diamètre du faisceau tubulaire, soit :

$$D_b = 591.04 \text{ mm}$$

### III.3.5.2. Chicanes :

$$L = \eta_c L_b \quad (\text{III.4})$$

On peut alors, estimer l'espace entre chicanes  $L_b$  est donnée par :

$$L_b = \frac{L}{\eta_c}$$

Donc :  $L_b = 292 \text{ mm}$

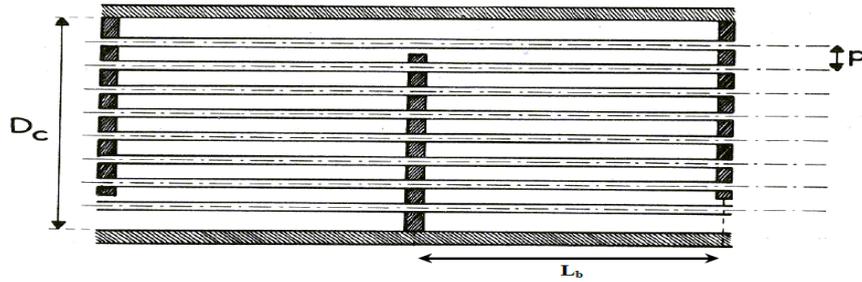


Figure III.4 : Distance  $L_b$  entre deux chicanes.

### III.3.6. Estimation des Coefficients de transfert thermique par convection :

#### III.3.6.1. Calcul du coefficient de transfert thermique coté tube $h_t$ :

##### 1.1. Régime d'écoulement :

Il peut être caractérisé par le calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{G_t d_i}{\mu_t} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$d_i$  : Diamètre intérieur du tube (m)

$G_t$  : flux massique de brut ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$ )

$\mu_t$  : Viscosité dynamique du brut à sa température ( $\text{kg}/\text{m h}$ )

##### a. Section droite (section de passage) :

$$A_t = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (\text{III.6})$$

D'où:  $A_t = 0.1432 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

##### b. Air d'écoulement :

$$\text{aire} = A_t (N_t / 2) \quad (\text{III.7})$$

D'où  $\text{aire} = 29.21 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

##### c. Flux massique de brut :

$$G_t = \frac{m}{\text{aire}} \quad (\text{III.8})$$

$m$  : Débit massique de but ( $m = 36.5 \text{ kg/s}$ )

$$G_t = 1249.57 \text{ kg/m}^2 \cdot S$$

D'après l'équation de « Reynolds », on trouve :

$$Re = \frac{1249.45 \times 13.51 \times 10^{-3}}{0.00104}$$

$$Re = 16230$$

Cette valeur étant strictement supérieure à celle du nombre de Reynolds critique correspondant à un régime d'écoulement turbulent ( $Re \geq 10000$ )

### 1.2. Calcul le nombre de « Prandtl » :

$$Pr = \frac{C_p \mu_t}{k_t} \quad (\text{III.9})$$

$C_p$  : Chaleur spécifique du brut ( $C_p = 0.464 \text{ kcal / kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$\mu_t$  : viscosité dynamique de brut ( $\mu_t = 3.758 \text{ kg / h.m}$ )

$k_t$  : Conductivité thermique du brut ( $k_t = 0.125 \text{ kcal / h.m}^\circ\text{C}$ )

$$Pr = 13.94$$

### 1.3. Calcul du nombre de « Nusselt » :

Pour le calcul de « Nusselt » à un régime turbulent ( $Re \geq 10000$ ) on utilise la corrélation de « MAG ADAMS » [21].

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,33} \left( \frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0,14} \quad (\text{III.10})$$

Nous négligeons le terme  $\frac{\mu}{\mu_p}$  ;

$$D'où ; \quad Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,33} \quad (\text{III.11})$$

$$Nu = 132.20$$

Finalement le coefficient de transfert thermique coté tube  $h_t$ :

$$h_t = \frac{k_t Nu}{d_i} \quad (\text{III.12})$$

D'où:  $h_t = 1418.87 \text{ Watt} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

### III.3.6.2. Calcule du coefficient de transfert thermique coté calandre $h_c$ :

#### 2.1. Régime d'écoulement :

$$\text{Re} = \frac{G_c d_e}{\mu_c} \quad (\text{III.13})$$

$d_e$  : Diamètre équivalent

$G_c$  : flux massique de côté calandre

$\mu_c$  : Viscosité dynamique de TEG ( $\mu_c=4.25 \text{ kg/h.m}$ )

#### a. Section droite de la calandre (section de passage) :

$$A_c = \frac{(P-d_0)D_c L_b}{P} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$P$  : pas entre tube ( $P=25.4 \text{ mm}$ )

$D_c$  : Diamètre de la calandre ( $D_c = 668 \text{ mm}$ )

$L_b$  : Distance entre chicanes ( $L_b=292 \text{ mm}$ )

D'où :  $A_c = 48.76 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

#### b. Le flux massique de TEG ( $M = 21.25 \text{ kg/s}$ ) :

$$G_c = \frac{M}{A_c} \quad (\text{III.15})$$

$G_c = 435.80 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$

#### c. Diamètre équivalent ( $d_e$ ) :

Pour un pas carré :

$$d_e = 4 \frac{P^2}{\pi d_0} - d_0 \quad (\text{III.16})$$

D'où :  $d_e = 24.09 \times 10^{-3} \text{ m}$

On peut alors résoudre le nombre de Reynolds :

$$Re=8154.48$$

### 2.2. Calcul du nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{C_{pc} \mu_c}{k_c} \quad (III.17)$$

$C_{pc}$  : Chaleur spécifique du TEG ( $C_{pc}=3634.14 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ )

$K_c$  : Conductivité thermique du TEG ( $k_c=0.4 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ )

D'où :  $Pr= 10.72$

### 2.3. Calcul du nombre du Nusselt :

$$Nu = j_h Re Pr^{0.33} \quad (III.18)$$

$J_h$  Coefficient de transfert à l'extérieur du tube : (Voir annexe, Figure 5)

On trouve que :  $j_h= 0.0061$

D'où :  $Nu= 108.86$

Finalement le coefficient de transfert thermique coté calandre  $h_c$  :

$$h_c = \frac{k_c Nu}{d_e} \quad (III.19)$$

$$h_c = \frac{0.4 \times 108.86}{24.09 \times 10^{-3}}$$

$$h_c = 1807.55 \text{ Watt / m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

### III.3.7. Calcul de coefficient global de transfert thermique $U_{cal}$ :

Pour l'échange thermique à travers un échangeur de chaleur tubulaire, le coefficient global de transfert thermique est donné par [22] :

$$\frac{1}{U_{cal}} = \left[ \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_{ed}} + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2\lambda} + \left( \frac{d_o}{d_i} \right) \frac{1}{h_{id}} + \left( \frac{d_o}{d_i} \right) \frac{1}{h_t} \right] \quad (III.20)$$

Avec :  $0.000553+0.0002+0.00007272+0.00099379+0.0002820$

$U_{cal}$ : coefficient global de transfert thermique ( $\text{W/ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$h_c$ : coefficient de transfert thermique du film externe ( $W/ m^2. ^\circ C$ )

$h_t$  : coefficient de transfert thermique du film interne ( $W/ m^2. ^\circ C$ )

$h_{ed}$  : coefficient d'encrassement du film externe ( $W/ m^2. ^\circ C$ )

$h_{id}$ : coefficient d'encrassement du film interne ( $W/ m^2. ^\circ C$ )

$\lambda$  : conductivité thermique de matériaux ( $W/m.^{\circ}C$ )

$d_0$  : diamètre externe des tubes (m)

$d_i$  : diamètre interne des tubes (m)

Les coefficients d'encrassement externe et interne ( $h_{ed}$  et  $h_{id}$ ) sont obtenus à partir du tableau (Voir annexe, Tableau 3).

$$h_{ed} = 5000 \text{ W/m}^2. ^\circ C$$

$$h_{id} = 5000 \text{ W/m}^2. ^\circ C$$

Pour l'acier au carbone, la conductivité thermique est :  $\lambda = 45 \text{ W/m } ^\circ C$

Le calcul du coefficient global de transfert thermique donne alors :

$$U_{cal} = 475.96 \text{ W/ m}^2. ^\circ C$$

### III.4. Calcul de la résistance d'encrassement :

Le coefficient global de transfert thermique est l'inverse de la résistance globale au transfert thermique, qui est la somme des différentes résistances.[22]

$$R = \frac{1}{U_{cal}} \quad (\text{III.21})$$

D'où :  $R = 0.00210 \text{ m}^2. ^\circ C / W$

#### III.4.1. Evaluation des performances thermiques de l'échangeur dans le temps :

La même méthode décrite précédemment sera utilisée pour le calcul des performances thermiques de l'échangeur.

**Tableau III.3 : performances thermiques de l'échangeur dans le temps :**

$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$t_1(^{\circ}\text{C})$	$t_2(^{\circ}\text{C})$	$h_t(\text{w/m}^2\text{C})$	$h_c(\text{w/m}^2\text{C})$	$U_{\text{cal}}(\text{w/m}^2\text{C})$	$R (\text{m}^2\text{C/W})$
15	79	146	70	1099,83962	2073,34684	431,196655	0,00231913
22	84	140	75	1046,32264	2071,84305	419,278034	0,00238505
38,6	82,1	135,7	86,9	945,815346	2080,83873	395,855717	0,00252617
38,4	81,2	134,9	87	956,675898	2006,54112	395,719444	0,00252704
38,4	82,9	141	87	948,209749	1975,94362	392,476979	0,00254792
38,2	83,7	141,4	87,9	883,814176	1920,44841	374,406347	0,00267089
37	82	135,7	84	871,874235	1668,64761	360,838924	0,00277132
31	78	133,3	82,1	822,475446	1932,68672	358,862561	0,00278658
34	73	124	72	780,276157	1873,61902	345,34988	0,00289561
28	78	140	89	742,765776	1958,27345	337,404249	0,0029638
37,5	83	140	88	725,22781	1957,73927	332,242295	0,00300985

#### III.4.2. Modélisation des résistances d'encrassement :

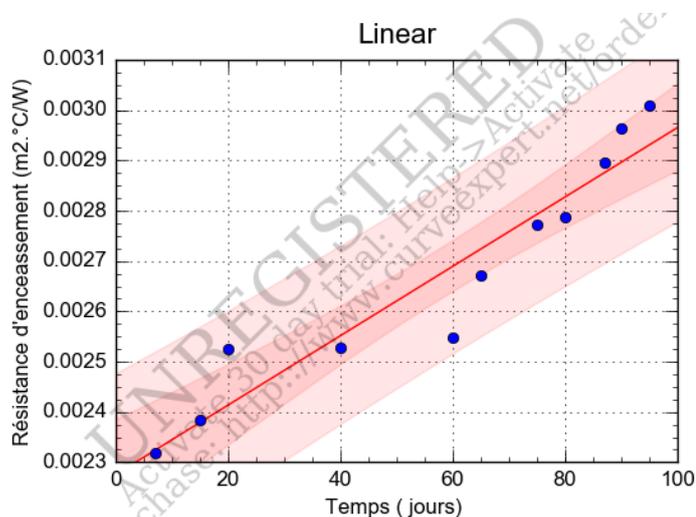
La modélisation consiste à créer des modèles mathématiques de la réalité, ces derniers, sont en général des équations qui sous certaines conditions ont des solutions. La résolution de ces équations peut dans certains cas se faire soit analytiquement pour les modèles simples soit numériquement pour les modèles compliqués ;La validité du modèle est fonction du degré de déviation inévitable entre le modèle choisi et la réalité [23], par ailleurs le choix du système de fonction, se base sur le modèle analytique de l'objet si ce dernier est connu, dans le cas contraire, on a recours au principe de la boîte noire qui consiste à supposer un modèle de la classe de fonction puis procéder à la vérification de la justesse du modèle ainsi obtenu. La méthode la plus utilisée pour estimer les coefficients de la régression en utilisant le logiciel curve expert 2.6.3

##### III .4 .2.1 Le logiciel curve expert :

Curve expert a été conçu pour être simple à utiliser mais puissant, afin que tous les utilisateurs puissent obtenir rapidement et facilement un modèle pour leurs données. Les données XY peuvent être modélisées à l'aide d'une boîte à outils de modèles de régression linéaire ou de modèles de régression non linéaire. Plus de 60 modèles sont intégrés, mais des modèles de régression personnalisés peuvent également être définis par l'utilisateur. La fonctionnalité graphique complète permet un examen approfondi de l'ajustement de la courbe. Le processus

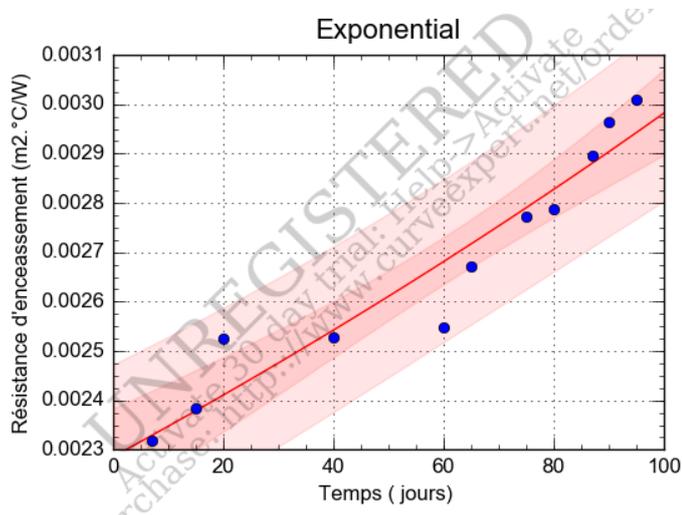
de recherche du meilleur ajustement peut être automatisé en laissant curve expert comparer vos données à chaque modèle afin de choisir la meilleure courbe.

### III.4.3 Résultats de modélisation de la résistance d'encrassement par curve expert :



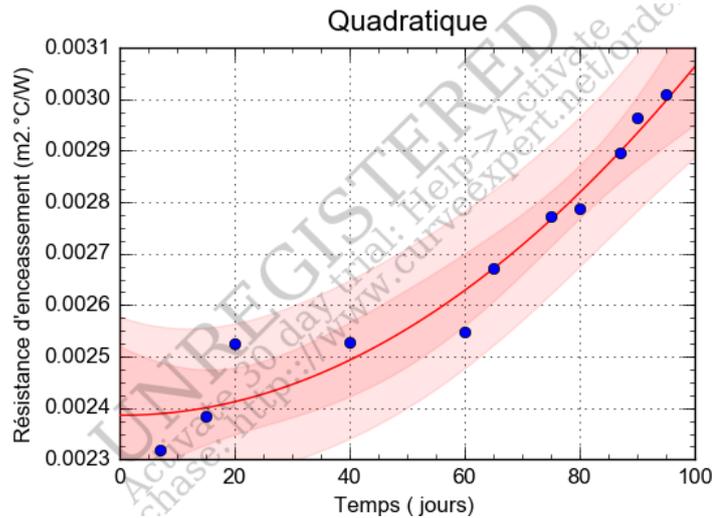
**Figure III.5 : Variation de la résistance d'encrassement de l'échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance linéaire**

Le modèle de cette variation linéaire est :  $R = 0.0022760 + 0.00000688 \times T$  avec :  $r = 0.9528$



**Figure III.6 : Variation de la résistance d'encrassement de l'échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance exponentiel**

Le modèle de cette variation exponentiel est :  $R = 0.0022861 \times \exp^{0.0026551 \times T}$  avec :  $r = 0.9582$

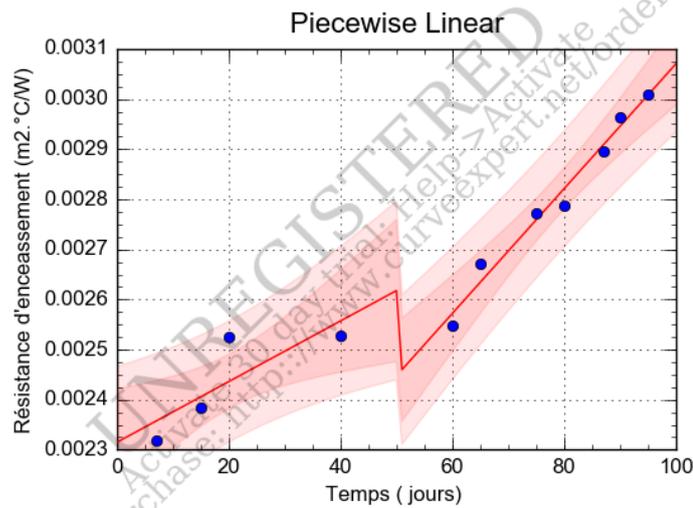


**Figure III.7 : Variation de la résistance d’encrassement de l’échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance quadratique**

Le modèle de cette variation quadratique est :

$$R = (0.0023860 - 0.0000000509 \times T + 0.0000000681 \times T^2)$$

Avec :  $r = 0.9737$



**Figure III.8 : Variation de la résistance d’encrassement de l’échangeur 12X20400A en fonction du temps avec la courbe de tendance piecewise linear**

Le modèle de cette variation hyperbolique est :  $R = 0.0000060496.T + 0.0023152 ; T < 50$

$$R = 0.000012442.T + 0.00182537 ; T \geq 50$$

Avec :  $r = 0.9862$

**III.4.3. Choix du modèle de la résistance d’encrassement :**

A partir des résultats de calcul du tableau (III-3) on a tracé la courbe de variation de résistance d’encrassement en fonction du temps de service de l’échangeur, par la suite le choix du modèle mathématique de chaque courbe modalisé par curve expert correspond au plus grand coefficient

de corrélation  $r$ , le tableau suivant présent 04 modèles de la résistance de l'encrassement les plus utilisés dans la littérature [1] avec les coefficients de corrélation

**Tableau III.4 : Différents modèles de la résistance d'encrassement avec leurs coefficients de corrélation.**

	Modèle linéaire	Modèle exponentiel	Modèle quadratique réciprocal	Modèle Piecewise Linear
Equation	$R = a + b \times T$ $a = 0.0022760$ $b = 0.00000688$	$R = a \times \exp^{b \times T}$ $a = 0.002281$ $b = 0.002651$	$R = (a + b \times T + c \times T^2)$ $a = 0.0023860$ $b = -0.0000000509$ $c = -0.0000000681$	$R = a.T + b ; T < 50,$ $R = c.T + b ; T \geq 50$ $a = 0.0000060496$ $b = 0.0023152$ $c = 0.000012442$ $d = 0.00182537$
Coefficient de corrélation $r$	$r = 0.9528$	$r = 0.9582$	$r = 0.9737$	$r = 0.9862$

#### ❖ Discussion et interprétation des résultats :

Pour le meilleur modèle de l'encrassement de l'échangeur est celui qui correspond au meilleur coefficient de corrélation  $r$  donc, L'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps suit une allure de courbe piecewise linear.

D'après les calculs de vérification de la résistance de l'encrassement et à travers le graphique correspondant il s'avère une évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps supérieur la valeur admissible.

L'augmentation, ou bien l'évolution de la valeur de la résistance explique la présence importante des dépôts sur les surfaces d'échange de l'échangeur 12X20400A quel que soit coté tube ou coté calandre, dans un autre sens que ces résultats traduisent et réalisent les mécanismes d'encrassement.

Cette augmentation de la valeur d'encrassement suivie dans un temps par des valeurs stables qui expliquent le phénomène de réentraînement, qui élimine l'accumulation des dépôts par

arrachement des particules de la surface d'échange. Cela peut aussi s'expliquer par un mauvais nettoyage de l'échangeur pendant les phases d'entretien ce qui ne mène inévitablement de rien change puis, la valeur d'encrassement reviens à évolue en fonction du temps après l'augmentation d'accumulation des dépôts sur la surface d'échange.

### III.5. Analyse de dépôt :

#### III.5.1. Analyse par diffractométrie des rayons X :

Deux (02) échantillons de dépôts, ont été analysés suite à la demande du 30 avril 2018 émanant de la Division Production, champs El-Gassi, en vue d'une caractérisation minéralogique qualitative par diffractométrie des rayons X (DRX).

#### III.5.2.Principe d'analyse :

L'échantillon solide finement broyé est monté sur un porte échantillon adéquat, puis soumis à un faisceau de rayons X pour être diffractés par les plans réticulaires des phases cristallines présentes. En effet, il existe une relation entre l'angle du faisceau diffracté et la distance réticulaire séparant les plans d'atomes au sein d'un réseau cristallin; celle-ci est régie par :

La loi de Bragg  $n \lambda = 2d \sin \theta$  (où  $\lambda$  =longueur d'onde en angströms,  $d$ = distance réticulaire en angströms et  $\theta$  = angle de diffraction ou de réflexion en degrés).

Les diffractogrammes ainsi obtenus, à l'aide d'un diffractomètre à rayons X, sont interprétés. Les positions et les intensités des pics observés sont comparés aux fichiers de référence *PDF-ICDD* (Powder Diffraction File - International Center for Diffraction Data) pour l'identification des phases minéralogiques présentes.

#### ● Echantillon N 1 : Dépôt coté calandre

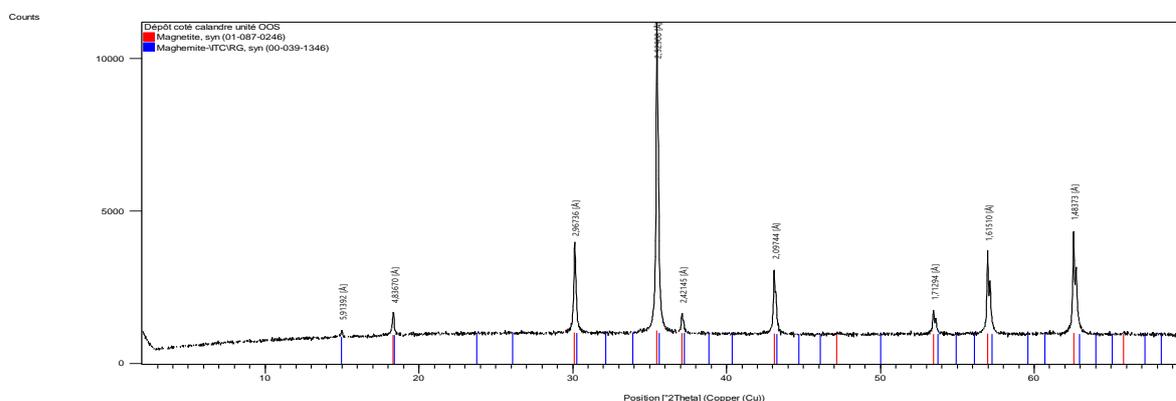
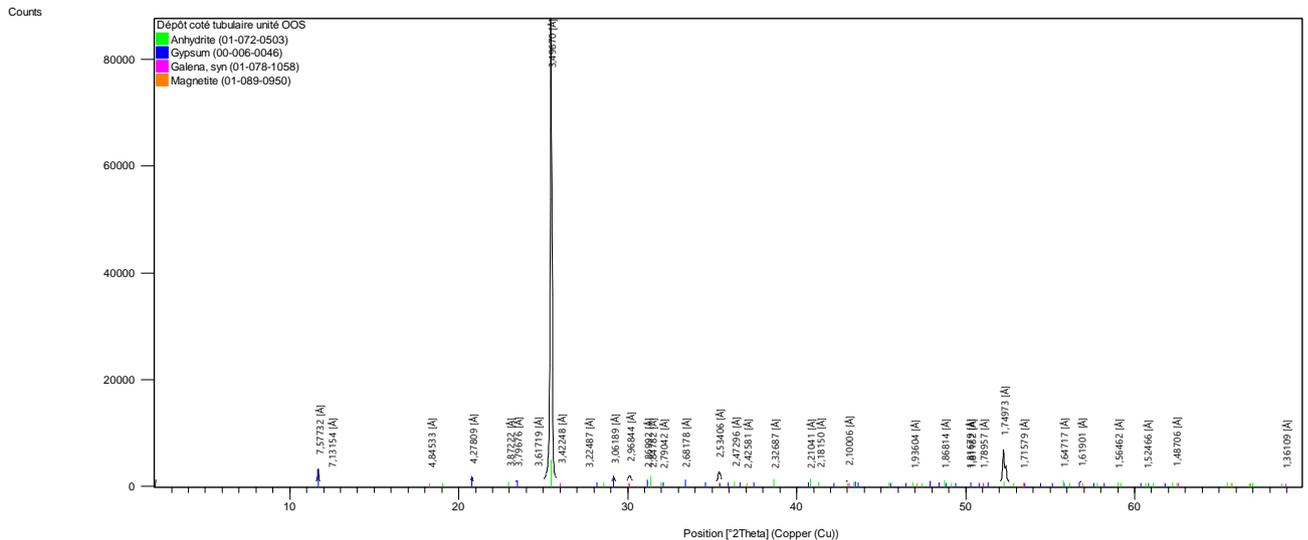


Figure III.9 : Diffractogramme de l'échantillon N°1

D'après l'analyse de cette courbe, en utilisant les fichiers de référence (PDF-ICDD) les résultats montrent la présence du :

- Magnétite  $\text{Fe}_3 \text{O}_4$
- Maghemite  $\text{Fe}_2 \text{O}_3$

### ● Echantillon N 2 : coté tube



**Figure III.10 : Diffractogramme de l'échantillon N°2**

D'après l'analyse de cette courbe, en utilisant les fichiers de référence (PDF-ICDD) les résultats montrent la présence du :

- Anhydrite  $\text{Ca S O}_4$
- Gypse  $\text{Ca S O}_4 \cdot 2 \text{H}_2 \text{O}$
- Magnétite  $\text{Fe}_3 \text{O}_4$
- Galène  $\text{Pb S}$

### III.5.3.Solution propose:

D'après les résultats d'analyse des dépôts, nous sommes contraints de prendre des actions pour éviter à l'avenir la formation d'un tel dépôt à l'intérieur des faisceaux tubulaires des deux échangeurs de chaleur.

- Côté Calandre : L'analyse a montré l'existence uniquement de la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  et de la maghemite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui sont deux produits issus de l'oxydation du fer ==> corrosion interne dans le circuit MEG suite au PH acide du produit caloporteur (Eau +MEG).

La raison pour laquelle nous utilisons une solution basique pour la neutralisation (PH devrait être maintenu entre 7 et 8) pour réduire la vitesse de corrosion et la formation de ces dépôts.

- Côté Tubes : L'analyse a montré l'existence de l'anhydrite  $\text{CaSO}_4$  et de gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  à l'intérieur des faisceaux tubulaires => Débit d'eau de dessalage  $1\text{m}^3/\text{h}$  jugé insuffisant sachant aussi que le gypse est soluble dans l'eau. La raison pour laquelle nous devons prévoir périodiquement (chaque 3 mois) une circulation d'un débit suffisant d'eau à travers chaque faisceau tubulaire, ce lavage sera effectué après l'isolement et le refroidissement du faisceau tubulaire. La modification demandée MOC, Tie in 2'' spool + vanne manuelle à l'entrée de chaque ligne d'alimentation des échangeurs de chaleur nous permettra de faire circuler un débit suffisant d'eau et d'éliminer les dépôts.

Maintenant dans le cas où le bouchage persiste, on doit procéder au remplissage du faisceau tubulaire avec l'eau + additif (acide borique (concentration 0.3%) ou acide tartrique (concentration 0.025%)) pour accélérer la dissolution de gypse ou tout dépôt de ce genre.

Dans le cas de l'indisponibilité de ces acides, on peut choisir d'autres produits chimiques d'une manière à ce que l'eau additivée soit un peu acide pour la dissolution rapide de ces dépôts.

En préciser que l'opération de lavage à l'eau (avec ou sans additif) sera effectuée après l'isolement et le refroidissement du faisceau tubulaire.

### **III.6. Evaluation technico économique de l'échangeur thermique**

#### **12X40200A :**

A ce stade de l'étude, L'encrassement est un problème qui se traduit par des dépenses pendant le fonctionnement d'un échangeur de chaleur et pendant l'arrêt de ce dernier pour le nettoyage. Pour cela une évaluation technico-économique doit être réalisée. Elle consiste à Déterminer l'investissement engendré en fonction de fonctionnement de l'échangeur de chaleur

#### **III.6.1. Termes économiques :**

##### **III.6.1.1. Investissement :**

Il est défini comme étant la décision de transformer des moyens financiers, physiques ou matériels ayant la capacité de produire des services pendant un temps.

L'investissement est un sacrifice de ressource que l'on fait aujourd'hui dans l'espoir de revenu futur, dont le total sera supérieur aux dépenses initiales. En fait, l'investissement, au sens large du terme, consiste à une acquisition ou création de bien dont la nature peut être variée. La décision d'investissement consiste à sélectionner le projet susceptible de générer le plus de valeur pour les entreprises. Les outils de décision se baseront sur les flux financiers et leur répartition dans le temps [23].

### III.6.1.2. Coûts :

Le coût d'un produit ou d'un service est défini comme étant l'ensemble des charges mobilisées pour réaliser un produit ou faire sélectionner un service au cours d'une période donnée. On distingue plusieurs types de coûts, qui peuvent être comptabilisés de façon différente en fonction des objectifs de gestion définis [24].

### III.6.1.3. Délai de récupération :

Le délai de récupération est égal au nombre d'années nécessaires au recouvrement de la mise de fonds initiale (investissements). Le présent calcul technico-économique consiste à relever la différence entre les pertes et les gains enregistrés relatifs à la récupération du condensât et à l'installation de l'échangeur de chaleur proposé [24].

## III.6.2. Calcul économique :

### III.6.2.1. Dépense :

Il est, tout d'abord, nécessaire d'estimer le coût de l'échangeur de chaleur.

#### a) - Estimation du coût de l'échangeur de chaleur [24] :

#### Méthode du calcul :

Le coût unitaire  $c$  par  $m^2$  de surface d'échange dépend de la surface totale de l'échangeur de chaleur. On prend en compte les coûts de la matière première et de la main d'œuvre. Ce coût est inversement proportionnel à la surface totale de l'échangeur de chaleur.

Le coût dépend également du faisceau de tube choisi (diamètre, BWG, longueur, disposition des tubes, matériaux, type d'échangeur et pression de calcul).

$$C=c S F_0F_1F_2F_3F_4(F_5+F_6) \quad (III.25)$$

Tels que :

C : coût de l'échangeur.

c : coût unitaire par m<sup>2</sup> de surface de l'échangeur.

S : surface d'échangeur en m<sup>2</sup>.

F<sub>i</sub> (i = 0 à 6) : facteurs correcteurs indiqués dans les tableaux (voir annexe -Tableau 4).

En fonction des caractéristiques de l'échangeur de chaleur, on trouve (voir annexe-Tableau 4):

$S \approx 178,15 \text{ m}^2$   $C = 500 \text{ \$/m}^2$

Tube ( $d_e = 1 \text{ in}$ ) BWG16  $F_0 = 1,20$

Type BEU  $F_1 = 0,85$

Longueur des tubes ( $L = 24 \text{ ft}$ )  $\Rightarrow F_2 = 0,95$

Disposition des tubes (□)  $F_3 = 1,10$

Acier au carbone  $F_4 = 1,00$

Pression coté tube  $F_5 = 0,32$  (coté tube)

Pression coté calandre  $F_6 = 0,63$  (coté calandre).

A partir l'équation (III.25), on a :

Par conséquent, le cout de l'échangeur est égal à :  $C = 90197,79\$ \approx 10787655 \text{ DA}$

$C = 90197,79\$ \approx 10787655 \text{ DA}$

#### b) - Coûts d'investissement :

C'est la somme des dépenses envisagées pour la réalisation de l'installation. Pour un échangeur de chaleur de diamètre de 0.668 m et 7.3 m de longueur (24ft) avec une surface d'échange thermique de 178.15 m<sup>2</sup>, on peut représenter les coûts d'investissement sur le tableau suivant :

**Tableau III.5 : Coûts d'installation de l'échangeur de chaleur.**

Installation	Cout en dollars \$	
	Calcul	/
Echangeur de chaleur	90197,79	/
Installation de l'échangeur	/	10 000,00
Instrumentation et contrôle	/	17 500,00
Piping	/	18 000,00
Building (fondation)	/	15 000,00
Engineering et supervision	/	10 000,00
Total	160697.79	

### III.6.2.2. Calcul de la durée de récupération (délai de l'amortissement) :

C'est le temps nécessaire pour récupérer les dépenses effectuées. Il dépend du gain de production et du coût total d'investissement.

Donc le délai d'amortissement (noté DR) correspond au rapport entre le cout total d'investissement et le revenu journalier de l'investissement. Le DR est calculé par la formule suivante :

$$DR = \frac{\text{dépenses DR}}{\text{Prix du baril} \times \text{revenu journalier de l'investissement}} \quad (\text{III.26})$$

Prix du baril pétrole = 50 \$

Gain (revenu de l'investissement) = 5000 bbl/jours

- **Estimation calculée :** DR = 15 heures et 42 min

Lorsque les revenus journaliers de l'investissement varient entre une valeur de production, minimal = 5000 bbl/jours et maximal = 40000 bbl/ jours le délai de

### III.7.2.3. Suivre d'évolution de délais de récupération en fonction du revenu journalier :

Nous déterminons ce développement à travers la courbe au-dessous :

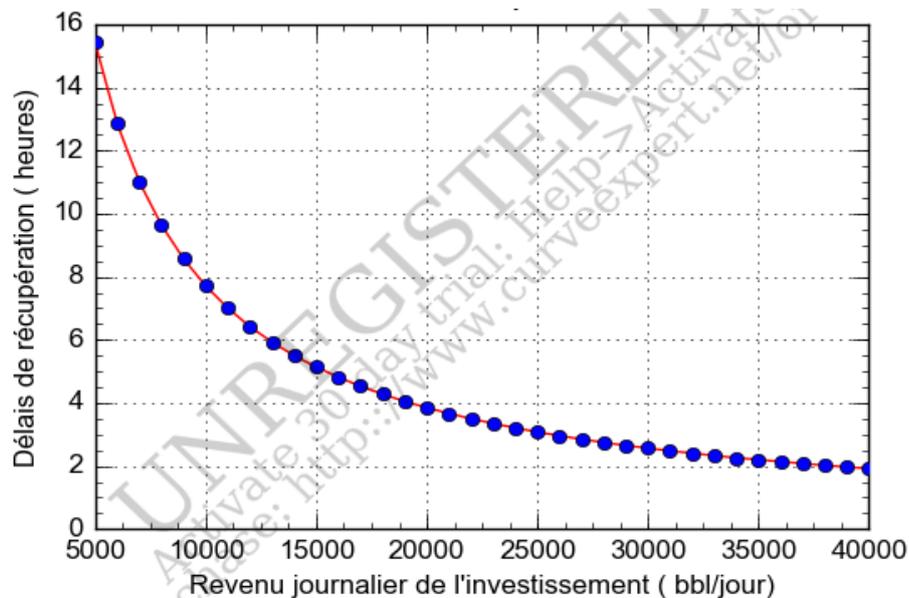


Figure III.11 : d'évolution de délais de récupération en fonction du revenu journalier de l'investissement.

La figure (III. 9) montre que le temps de retour sur investissement varie avec le prix de vente du pétrole, il diminue avec l'accroissement du prix de vente des barils

Du point de vue rentabilité économique, l'investissement ne dépend non seulement des prix de vente des barils mais également d'un certain nombre de paramètres spécifiques au site, qui doivent être pris en considération. Ces paramètres incluent :

- Instrumentation et contrôle notamment contrôle de corrosion
- Piping
- Building (fondation)
- Engineering et supervision de l'encrassement et d'autres problèmes
- Le prix des inhibiteurs

# CONCLUSION

### **Conclusion :**

L'encrassement des échangeurs thermique présent un problème majeur conduit à la diminution de leurs performances thermiques.

Le monitoring des échangeurs de chaleurs permet la bonne connaissance de l'évolution de l'encrassement sous les conditions spécifique au processus du traitement de brut de l'unité OOS.

L'exploitation rationnelle des échangeurs de chaleur est soumise à des impératifs techniques et économiques

L'une des méthodes classiques utilisées le plus couramment pour détecter l'encrassement repose sur la mesure de la variation de l'efficacité de l'échangeur à travers le calcul de la résistance d'encrassement.

Les résultats de l'analyse thermique de l'échangeur 12X20400A par calcul de la résistance d'encrassement montre une diminution de l'efficacité de l'échangeur, cela nous a conduit à modéliser la résistance d'encrassement pour prévoir la formation de dépôt solide dans n'importe quel moment de fonctionnement de l'échangeur.

La formation des dépôts est une résistance thermique qui provoque des pénalités économiques et nécessite des temps de protection adéquat pour éliminer ce dépôt.

La modélisation mathématique de la résistance d'encrassement en fonction de temps : peuvent savoir à prendre la décision des arrêts de l'unités pour le nettoyage des échangeurs

Le calcul économique de l'échangeur thermique nous à permet de connaitre le délai de récupération de l'investissement en fonction de la variation de revenue journalier total.

# **Références Bibliographiques**

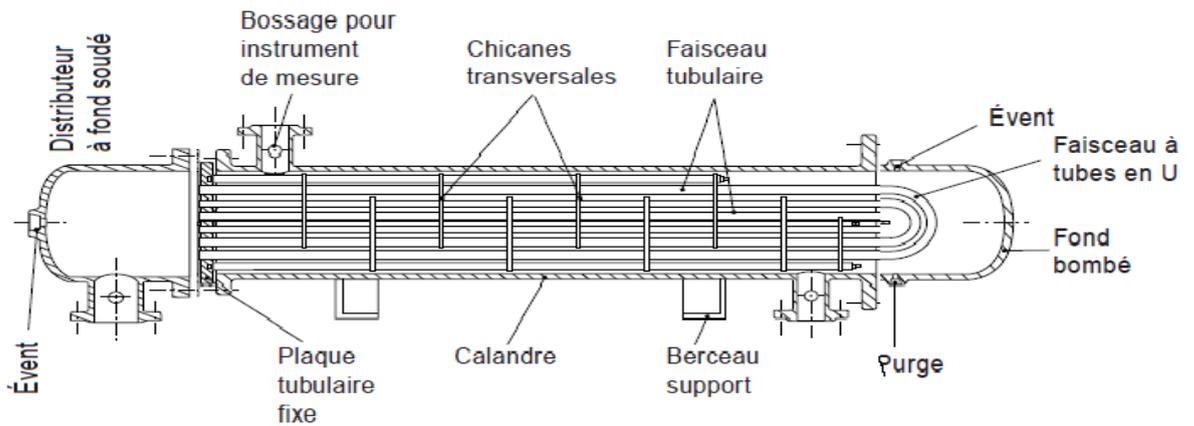
## Références Bibliographiques:

- [1] HARKAT YAMINA « Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'un échangeur de chaleur », Mémoire Magister, Université Mohammed Bougerra -Boumerdas, 2007
- [2] IFP 2005 ENSPM training. MATERIEL THERMIQUE « rôle des échangeurs de chaleur », Edition TECHNIP. EN ECH-02359\_A\_F-Rév.1 (18/04/2005).
- [3] MARIE-HELENE MATHONIERE, MARIE-DOMINIQUE HAGELSTEEN, avis n° 99-A-02 du conseil de concurrence relatif à l'acquisition de société Vicarb par la société Alfa Laval Holding AB, janvier 1999.
- [4] Documentation Total. Support de formation Exploration et production Cours des équipements. Total (EXP-PR-EQ120-FR). Révision 0.1 (16-04-2007)
- [5] P. TRAMBOUZE. « Le raffinage du pétrole ». Edition TECHNIP. Tome IV matériels et équipements. Paris. 1972. ISBN 2-7108-0685-1.
- [6] A. BONTEMPS, A. GAREIGUE, CH. GOUBIER, J. HUETZ, CH. MARVILLET et VIDIL « Description des échangeurs de chaleurs », technique de l'ingénieur [B 2 341].
- [7] Mémoire de Master « CALCUL THERMIQUE ET MECANIQUE DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR EA4501 » BENABDELHALIM Houssine, FEGAS Abderrazak, Mécanique des unités pétrochimiques-Université de Boumerdas-2017
- [8] Mémoire master 2 « SIMULATION D'UNE CONCEPTION D'UN ÉCHANGEUR DE CHALEUR À FAISCEAU ET CALANDRE », D. NADJEM EDDINE, SCIENCES ET TECHNOLOGIE - UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA-2017
- [9] Croix, J. « Généralités Sur L'encrassement Des Echangeurs » Note Technique Greth 83/12. (1983)
- [10] M.Bennejah, N.Chaouni- Echangeur de Chaleur, Technologie, calcule et design- Edition TECHIP-Paris –France- 2014.
- [11] « Fouling in Heat Exchangers » By: Hassan Al.Hadj Ibrahim
- [12] « Echangeur de chaleur problème de fonctionnement » par : A. BONTEMPS-A. GARRIGUE-CH. GOUBIER-J. HOTES-CH. MARVILLET-P. MERCIER-R. VIDAL, Tous ces auteurs font partie du Groupement pour la recherche sur les Échangeurs Thermiques
- [13] Epstein. “Thinking About Heat Transfer Fouling: A 5x5 Matrix”, Heat Transfer Engineering. (1983)
- [14] Crittenden, B, Khater, E« Fouling from Vaporising Kerosene » Fouling Of Heat Exchanger Equipment; ASME.HTD. VOL.35, ED.JW. SUTOR.AM A.M. PRITCHARD, (1984)

- [15] Garret, Price « Problem Characterisation, Economic Assessment And Review Of Prevention, Mitigation And Accommodation », Techniques Pnl-4883.
- [16] Industrial Fouling”Problem Characterization, Economic Assessment, and Review of Prevention, Mitigation, and Accommodation Techniques” B. A. Garrett-Price S. A. Smith R. L. Watts J. G. Knudsen February 1984
- [17] Duffau, J, M. Grillot, J, M.Navarro, R. « L’encrassement Dans Les Echangeurs, Description, Prévention, Remèdes » GRETH. (1991)
- [18] THÈSE pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L’UNIVERSITE DE PARIS – EST « Modélisation de l’encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois », Hamza Chérif SADOUK -Génie des Procédés- le 15 Juin 2009
- [19] Cassagne, Fourcher. « Étude Du Système De Contrôle De L’encrassement Biologique Des Tubes D’échangeurs D’une Centrales » (1984)
- [20] P. TRAMBOUZE. « Le raffinage du pétrole ». Edition TECHNIP. Tome IV matériels et équipements. Paris. 1972.
- [21] « Échangeur de chaleur, Problème de fonctionnement » Technique de l’ingénieur
- [22] R.C. COVIE (1938). Costing of Shell and tube heat exchanger. HEDH (Heat Exchanger Hand Book) Hemisphere Publishing Corporation.
- [23] G.P. PUROCHIT, (1993) Estimate cost of sell and tube heat exchanger. Chemical Engineering. 1993 August 22,26.

# ANNEX

## Annex



**Figure 1: Echangeur de type BEU**

<b>Triéthylène glycol</b>	
<b>Structure du triéthylène glycol</b>	
<b>Identification</b>	
<b>Nom UICPA</b>	2-[2-(2-hydroxyéthoxy)éthoxy]éthanol
<b>N° CAS</b>	112-27-6
<b>N° EINECS</b>	203-953-2
<b>PubChem</b>	8172
<b>SMILES</b>	
<b>InChI</b>	
<b>Propriétés chimiques</b>	
<b>Formule brute</b>	$C_6H_{14}O_4$
<b>Masse molaire<sup>1</sup></b>	150,173 ± 0,007 g/mol C 47,99 %, H 9,4 %, O 42,62 %
<b>Propriétés physiques</b>	
<b>Paramètre de solubilité <math>\delta</math></b>	21,9 MPa <sup>1/2</sup> (25 °C) <sup>2</sup> ; 27,2 J <sup>1/2</sup> .cm <sup>-3/2</sup> ( $\leq 20$ °C) <sup>3</sup>
<b>Unités du SI et <u>CNTP</u>, sauf indication contraire.</b>	

**Figure 2 : propriété de TEG**

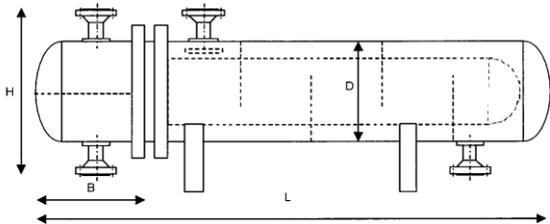
 <b>OPTIMISATION OF OIL SYSTEMS EL GASSI</b> 		PROJECT No.	JU-06911	ITEM No.	12-X-20400A / 20400B																												
		DOCUMENT No.	C166-148B																														
		SPECIFICATION No.	3PS-MES0-F0001																														
		REVISION No.	E	DATE	03-Apr-07																												
		PAGE	5 OF 8	BY	SPO																												
<b>MECHANICAL DATA SHEETS FOR SHELL &amp; TUBE HEAT EXCHANGERS</b>																																	
<b>MECHANICAL DATA</b>																																	
<b>EXCHANGER DETAILS</b>			<b>CONSTRUCTION OF ONE UNIT (mm)</b>																														
			<table border="1"> <tr><td>L LENGTH</td><td>8,799.00</td></tr> <tr><td>B CHANNEL</td><td>869.00</td></tr> <tr><td>H HEIGHT</td><td>1060.00</td></tr> <tr><td>D DIAMETER</td><td>668.00</td></tr> <tr><td>SHELL WITHDRAWAL</td><td>7,500.00</td></tr> <tr><td>TUBES TYPE</td><td>SEAMLESS</td></tr> <tr><td>TUBES NO.</td><td>204U</td></tr> <tr><td>TUBES OD</td><td>19.05</td></tr> <tr><td>TUBES THICKNESS</td><td>2.77</td></tr> <tr><td>TUBES LENGTH</td><td>7,300.00</td></tr> <tr><td>TUBES PITCH</td><td>25.4 SQUARE</td></tr> <tr><td>BAFFLES TYPE</td><td>SINGLE SEG.</td></tr> <tr><td>BAFFLES % CUT (DIA)</td><td>25.00</td></tr> <tr><td>BAFFLES SPACING: (C/C)</td><td>289.00</td></tr> </table>			L LENGTH	8,799.00	B CHANNEL	869.00	H HEIGHT	1060.00	D DIAMETER	668.00	SHELL WITHDRAWAL	7,500.00	TUBES TYPE	SEAMLESS	TUBES NO.	204U	TUBES OD	19.05	TUBES THICKNESS	2.77	TUBES LENGTH	7,300.00	TUBES PITCH	25.4 SQUARE	BAFFLES TYPE	SINGLE SEG.	BAFFLES % CUT (DIA)	25.00	BAFFLES SPACING: (C/C)	289.00
L LENGTH	8,799.00																																
B CHANNEL	869.00																																
H HEIGHT	1060.00																																
D DIAMETER	668.00																																
SHELL WITHDRAWAL	7,500.00																																
TUBES TYPE	SEAMLESS																																
TUBES NO.	204U																																
TUBES OD	19.05																																
TUBES THICKNESS	2.77																																
TUBES LENGTH	7,300.00																																
TUBES PITCH	25.4 SQUARE																																
BAFFLES TYPE	SINGLE SEG.																																
BAFFLES % CUT (DIA)	25.00																																
BAFFLES SPACING: (C/C)	289.00																																
<b>WEIGHT OF ONE UNIT (kg)</b>																																	
15 DRY			6,000																														
16 OPERATING			8,320																														
17 FULL OF WATER			9,000																														
18 BUNDLE			3,750																														
<b>MINIMUM REQUIREMENT</b>		<b>REQUIRED</b>	<b>INCLUDED</b>	<b>REMARKS</b>																													
<b>EXCHANGER MATERIALS</b>																																	
23 TUBES	X	X	ASTM A179																														
24 TUBESHEET	X	X	ASTM A516 GR 70																														
25 CHANNEL	X	X	ASTM A516 GR 70																														
26 SHELL	X	X	ASTM A516 GR 70																														
27 GASKET	X	X	SPIRAL WOUND																														
28 SADDLES/SUPPORTS	X	X	ASTM A516 GR 60																														
29 TUBE TO TUBESHEET JOINT	X	X	WELDED (NO EXPANSION)																														
30 INSULATION	X	X	50mm THICK by OGSL																														
31 EARTHING BOSS	X	X	2 REQUIRED																														
<b>INSPECTION AND TESTING</b>																																	
34 HYDROTEST	X	X	22.2 BarG (Shellside) / 27.8 BarG (Tubeside)		X																												
35 NDT	X	X	100%																														
36 MATERIAL CERTIFICATION	X	X	BS EN 10204 3.1																														
37 THIRD PARTY STAGE INSPECTION	X	X	Royal & Sun Alliance (RSA)		X																												
38			Subject to DPP inspection		X																												
<b>STANDARDS</b>																																	
41 PRESSURE VESSEL CODE	ASME VIII Div 1 & TEMA R																																
42 HEAT EXCHANGER CODE	3PS-MES0-F0001																																
43 OTHERS	GEA-055-ME-FS-004																																
<b>PAINTING, PACKAGING, DELIVERY</b>																																	
46 FINAL PAINTING	X	X	SP-004068-M-000611 (Channel Ceramkote Lined)		X																												
47 PACKING	X	X	Suitable for UK transport to skid packager's works																														
48 DELIVERY	X	X	UK																														
49 EXTENDED STORAGE AT SITE																																	
<b>DRAWINGS &amp; DOCUMENTATION</b>																																	
52 PROCESS DATA SHEET	X	X	Refer to Basis of Process Design																														
53 SKETCH OF ONE UNIT	X	X	See page 8 of this data sheet																														
54 DOCUMENTATION	X	X	Full certification data book to be provided																														
55																																	

Figure 3 : Data sheet des d'échangeurs 12-X-20400

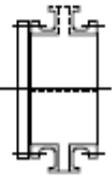
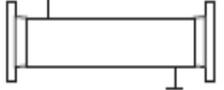
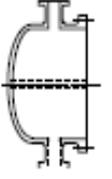
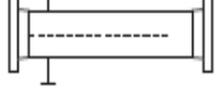
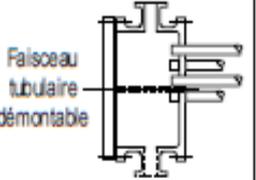
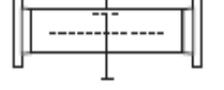
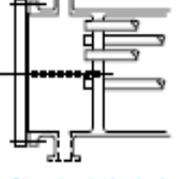
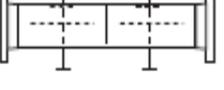
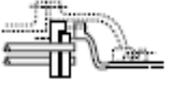
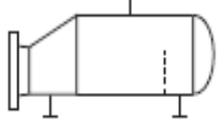
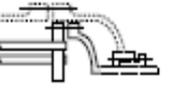
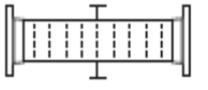
	Type de chambre de distribution		Type de calandre		Type de fond de calandre
<b>A</b>	 <p>Chambre avec couvercle démontable</p>	<b>E</b>	 <p>Calandre à une passe</p>	<b>L</b>	 <p>Plaque tubulaire fixe type "A"</p>
<b>B</b>	 <p>Chambre "Bonnet"</p>	<b>F</b>	 <p>Calandre à deux passes avec cloison longitudinale</p>	<b>M</b>	 <p>Plaque tubulaire fixe type "B"</p>
<b>C</b>	 <p>Faisceau tubulaire démontable</p> <p>Chambre intégrée à une plaque tubulaire avec couvercle démontable</p>	<b>G</b>	 <p>Écoulement séparé</p>	<b>N</b>	 <p>Plaque tubulaire fixe type "N"</p>
<b>N</b>	 <p>Chambre intégrée à une plaque tubulaire avec couvercle démontable</p>	<b>H</b>	 <p>Double écoulement séparé</p>	<b>P</b>	 <p>Fond flottant ou tête flottante avec garniture externe</p>
<b>D</b>	 <p>Chambre à fermeture spéciale pour haute pression</p>	<b>J</b>	 <p>Écoulement divisé</p>	<b>S</b>	 <p>Fond flottant ou tête flottante avec contre bride démontable</p>
		<b>K</b>	 <p>Rebouilleur "Kettle"</p>	<b>T</b>	 <p>Fond flottant ou tête flottante à passage direct</p>
		<b>X</b>	 <p>Courants croisés</p>	<b>U</b>	 <p>Faisceau à tubes en U</p>
				<b>W</b>	 <p>Fond flottant ou tête flottante avec garniture externe à détecteur de fuite</p>

Figure 4 : Type des éléments constitutifs de l'échangeur (Selon Standards TEMA)

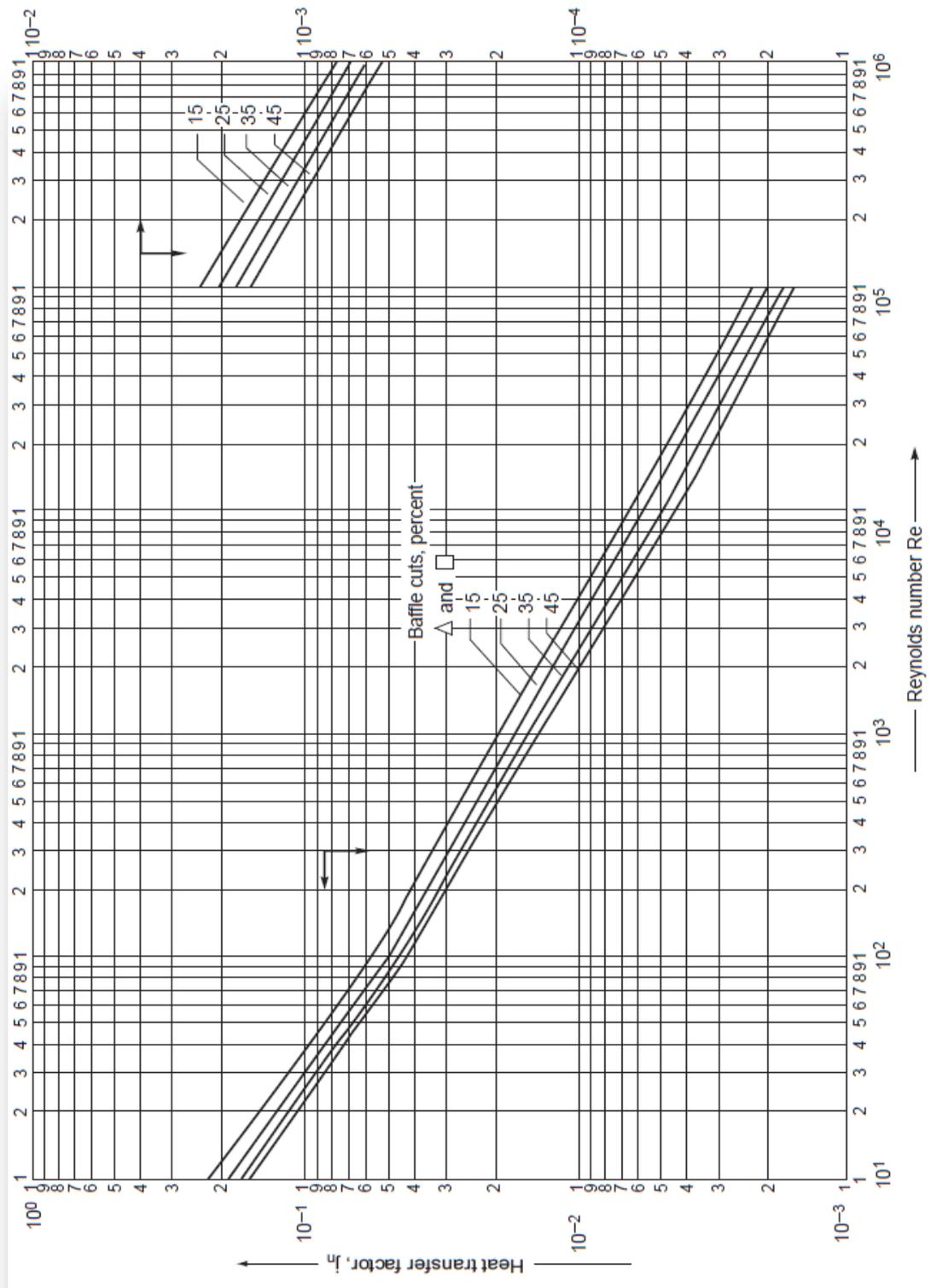
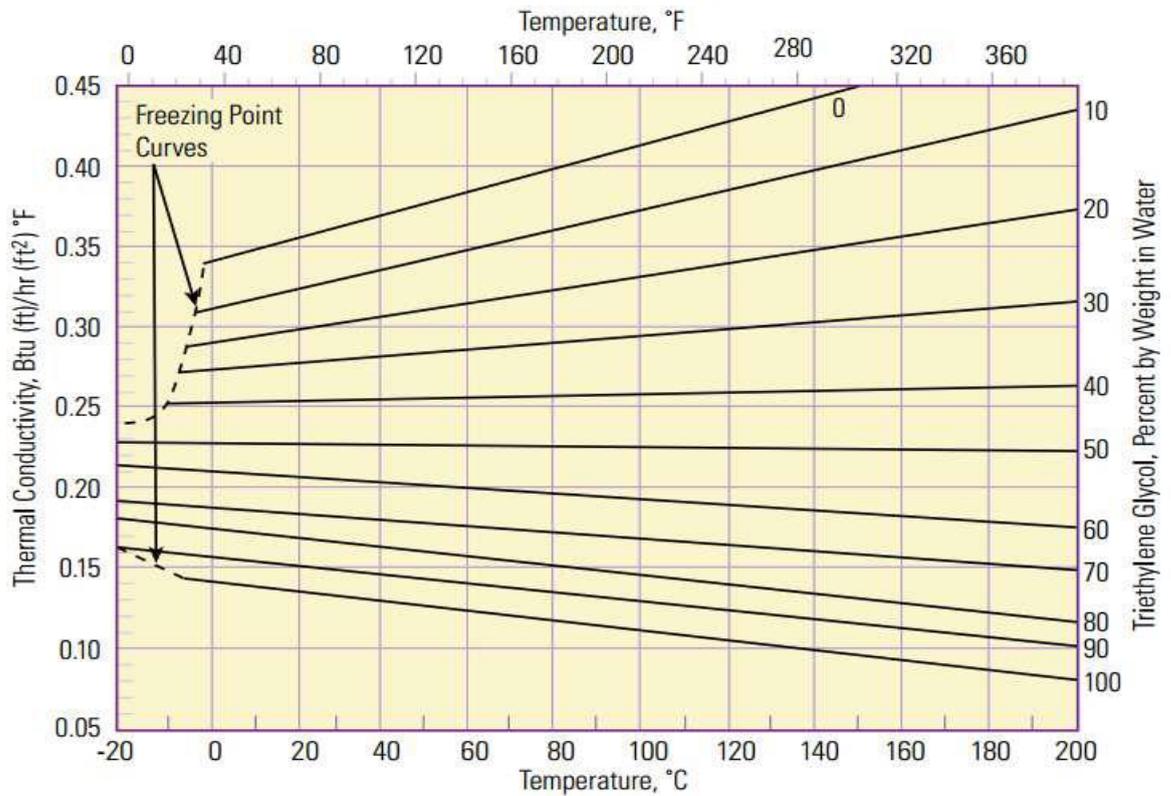


Figure 5 : Facteur de transfert thermique  $j_h$

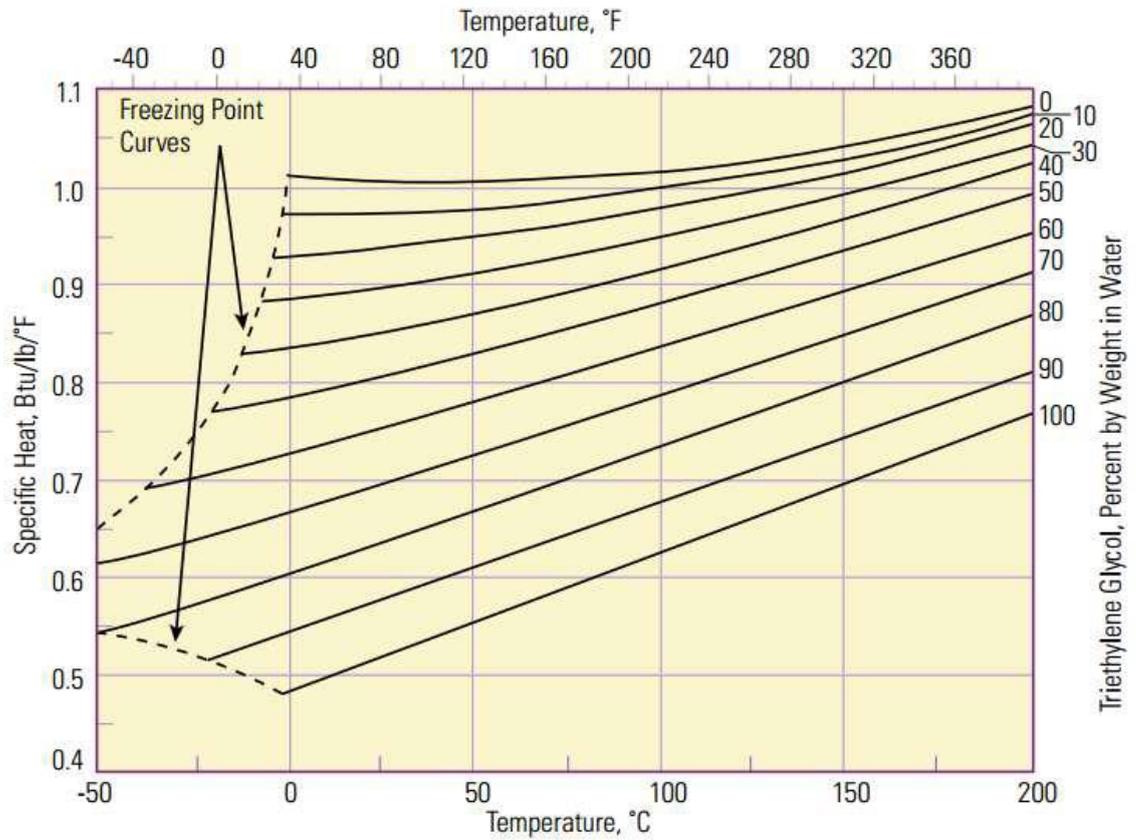
## Thermal Conductivities of Aqueous Triethylene Glycol Solutions



Thermal Conductivity = A + BT		
T = Temperature, °C		
TriEG, Wt%	A	B
0	0.33667	7.1667E-4
10	0.31000	6.0000E-4
20	0.29000	4.0000E-4
30	0.27200	2.0000E-4
40	0.25133	3.3333E-5
50	0.22767	3.3333E-5
60	0.20933	-1.6667E-4
70	0.18800	-2.0000E-4
80	0.17267	-2.8333E-4
90	0.15567	-2.8333E-4
100	0.14133	-3.1667E-4

Figure 6 : Variation de la conductivité thermique de TEG en solution en fonction de température

## Specific Heats of Aqueous Triethylene Glycol Solutions



Specific Heat = A + BT+CT <sup>2</sup> T = Temperature, °C			
TriEG, Wt%	A	B	C
0	1.00540	-2.7286E-4	2.9143E-6
10	0.96705	-2.7144E-5	2.4952E-6
20	0.92490	2.0429E-4	2.4524E-6
30	0.88012	4.3000E-4	1.6952E-6
40	0.83229	6.2286E-4	1.3714E-6
50	0.78229	7.9286E-4	1.0857E-6
60	0.72200	9.4000E-4	8.0000E-7
70	0.66688	1.0871E-3	4.7620E-7
80	0.60393	1.2043E-3	2.8571E-7
90	0.53888	1.2800E-3	1.9048E-7
100	0.48614	1.3929E-3	-5.7140E-8

Figure 7 : Variation de la chaleur spécifique de TEG en solution en fonction de température

DIAMÈTRE EXTÉRIEUR (in et mm)	BWG	ÉPAISSEUR (mm)	DIAMÈTRE INTÉRIEUR (cm)	SECTION (cm <sup>2</sup> )	SURFACE (m <sup>2</sup> /m)		POIDS (kg/m)
					extérieure	intérieure	
1/2 in (12,7 mm)	14	2,10	0,848	0,565	0,0399	0,0266	0,600
	16	1,65	0,940	0,694		0,0295	0,490
	18	1,24	1,021	0,819		0,0321	0,384
3/4 in (19,05 mm)	10	3,40	1,224	1,177	0,0598	0,0384	1,436
	12	2,77	1,351	1,434		0,0424	1,216
	14	2,10	1,483	1,727		0,0466	0,963
	16	1,65	1,575	1,948		0,0495	0,774
	18	1,24	1,656	2,154		0,0520	0,597
1 in (25,4 mm)	10	3,40	1,859	2,714	0,0798	0,0584	2,024
	12	2,77	1,986	3,098		0,0624	1,696
	14	2,10	2,118	3,523		0,0665	1,324
	16	1,65	2,210	3,836		0,0694	1,057
	18	1,24	2,291	4,122		0,0720	0,811
1 1/4 in (31,75 mm)	10	3,40	2,494	4,885	0,0997	0,0783	2,604
	12	2,77	2,616	5,375		0,0822	2,158
	14	2,10	2,743	5,909		0,0862	1,682
	16	1,65	2,845	6,357		0,0894	1,340
	18	1,24	2,921	6,701		0,0918	1,024
1 1/2 in (38,1 mm)	10	3,40	3,124	7,665	0,1197	0,0981	3,185
	12	2,77	3,251	8,300		0,1021	2,634
	14	2,10	3,378	8,962		0,1061	2,039
	16	1,65	3,480	9,512		0,1093	1,622
	18	1,24	3,556	9,931		0,1171	1,237

**Tableau 1 : Tableau représentant les différentes dimensions des tubes selon la norme standards TEMA**

Triangular pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
$K_1$	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
$n_1$	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Square pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
$K_1$	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
$n_1$	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

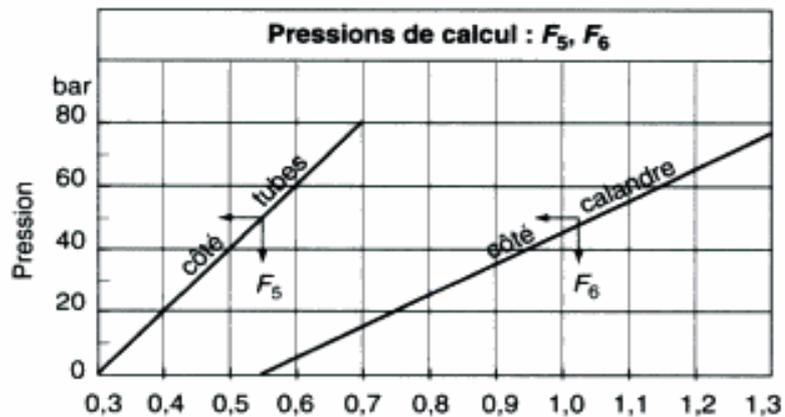
**Tableau 2 Tableau représentant la constante K1 et n1 pour le calcul de diamètre de faisceau**

Fluid	Coefficient ( $W/m^2\text{°C}$ )	Factor (resistance) ( $m^2\text{°C}/W$ )
River water	3000–12,000	0.0003–0.0001
Sea water	1000–3000	0.001–0.0003
Cooling water (towers)	3000–6000	0.0003–0.00017
Towns water (soft)	3000–5000	0.0003–0.0002
Towns water (hard)	1000–2000	0.001–0.0005
Steam condensate	1500–5000	0.00067–0.0002
Steam (oil free)	4000–10,000	0.0025–0.0001
Steam (oil traces)	2000–5000	0.0005–0.0002
Refrigerated brine	3000–5000	0.0003–0.0002
Air and industrial gases	5000–10,000	0.0002–0.0001
Flue gases	2000–5000	0.0005–0.0002
Organic vapours	5000	0.0002
Organic liquids	5000	0.0002
Light hydrocarbons	5000	0.0002
Heavy hydrocarbons	2000	0.0005
Boiling organics	2500	0.0004
Condensing organics	5000	0.0002
Heat transfer fluids	5000	0.0002
Aqueous salt solutions	3000–5000	0.0003–0.0002

**Tableau 4 : Les facteurs d'encrassement**

	Type									
	AEM	AES	AEU	AKT	BEM	BES	BEU	BKT	BKM	BKU
$F_1$	0,92	1,00	0,90	1,25	0,90	0,95	0,85	1,20	1,05	1,03

	Longueur des tubes (ft)					Disposition des tubes	
	10	16	20	24		□	△
$F_2$	1,20	1,05	1,00	0,95	$F_3$	1,10	1,00



Matériaux		$F_4$
Calandre	Tubes	
Acier au carbone	Acier au carbone	1,0
Acier au carbone	Laiton Amiraute	1,7
Acier au carbone	Bronze aluminium	1,8
Acier au carbone	5% chrome	1,6
Acier au carbone	Inox 304	2,4
Acier au carbone	Inox 316	2,7
0,5% molybdène	0,5% molybdène	1,3
1,25% chrome	1,25% chrome	1,6
5% chrome	5% chrome	1,9
Inox 304	Inox 304	2,8
Inox 316	Inox 316	3,3
Cladded Monel	Monel	6
20% Cr-25% Ni	20% Cr - 25% Ni	7

Tableau 4 : les Facteurs correcteurs pour le calcul de cout