

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara Boumerdes

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département : Transport et équipements des hydrocarbures

Mémoire de Master

Spécialité : Génie mécanique : Mécanique des unités pétrochimiques

Présenté par : **BENABDELHALIM Houssine**

FEGAS Abderrazak

THEME

**CALCUL THERMIQUE ET MECANIQUE DE L'ECHANGEUR
DE CHALEUR EA4501**

Soutenu publiquement le 02 / 07 / 2017

Devant le jury :

Président de jury : MEFTAH Siham

Encadreur : BENBRIK Abderrahmane

Examineurs : BETTAYEB Mourad

Examineurs : HALIMI Djamel

Année universitaire 2016 / 2017

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire en particulier notre encadreur M.BENBRIK pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportés.

Nos remerciements vont également à tout le personnel de service maintenance du DP-REB pour leurs accueils et leur soutien durant notre séjour de stage.

On adresse nos remerciements à tous ceux qui de près ou de loin, même avec un sourire ont contribué à la finalisation de ce travail.

Enfin, on tient à remercier les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et apporter leurs critiques et corrections.

Sommaire

Introduction	01
Chapitre 1 Présentation de lieu de stage	02
1.1) Situation géographique	02
1.2) Description générale de la région de REB	02
1.3) Le centre CPF (Central Production Facilites)	03
1.3.1) Section de traitement	04
1.3.1.1) Séparateurs HP, MP et LP	04
1.3.2) Unité d'optimisation	04
1.3.2.1) La section stabilisation basse pression	05
1.3.2.2) Unité de déshydratation au tri éthylène glycol (TEG)	06
1.3.2.3) La section stabilisation haute pression	06
1.4) Le centre TCF (Turbo Compresseur Facilité)	07
1.4.1) Description de l'unité	07
1.4.2) Description du procédé	08
1.5) Organisation du champ de Rhourde El Baguel	09
1.5.1) Division maintenance	09
1.5.2) Service méthodes	10
1.5.3) Service mécanique	10
Chapitre 2 Technologie de l'échangeur EA4501	11
2.1) Introduction	11
2.2) Échangeur à faisceau et calandre à tête flottante	12
2.3) L'échangeur EA4501	12
2.4) Les éléments d'échangeur EA4501	13
2.4.1) Boîte de distribution	13
2.4.2) La calandre	14
2.4.3) Plaques tubulaires	15
2.4.4) Les tubes	15
2.4.5) Le faisceau tubulaire	16
2.4.6) La tête flottante	17
2.4.7) Chicanes	18
2.4.8) Déflecteurs longitudinaux et d'entrée	18

2.4.9) Évents, vidange	18
2.5) Le problème présent dans l'échangeur de chaleur EA4501	19
2.5.1) L'encrassement	19
2.6) Maintenance	19
2.7) Vérification de la qualité de l'échangeur de chaleur existant	19
2.8) Démontage du faisceau tubulaire	20
2.9) Nettoyage des échangeurs de chaleur	20
2.9.1) Techniques de nettoyage	21
2.9.1.1) Nettoyage mécanique hors ligne	21
2.9.1.2) Nettoyage chimique	21
2.10) Localisation des fuites dans les tubes	22
2.11) Le retubage de l'échangeur EA4501	23
2.11.1) Procédure de retubage	23
2.12) Démarrage de l'échangeur de chaleur	24
2.13) Critiques et recommandation	24
2.14) Sécurité technique de l'échangeur	24
Chapitre 3 Calcul thermique de l'échangeur EA4501	26
3.1) But de calcul	26
3.2) Hypothèses simplificatrices	26
3.3) Calcul de vérification	26
3.3.1) données de calcul	26
3.3.2) Evaluation des caractéristiques des fluides à les températures caloriques - Calcul des températures caloriques	27
3.3.3) Calcul de T_{lm}	30
3.3.4) Correction de T_{lm}	30
3.3.5) Calcul du coefficient de transfert propre	31
3.3.6) Le flux échangé	37
3.3.7) Calcul de la résistance d'encrassement	37
3.3.8) Calcul des pertes de charge	37
3.3.9) Calcul de l'efficacité de transfert de chaleur	38
3.3.10) Résultats de calcul	39
3.4) Suivi des performances thermiques de l'échangeur dans le temps	40
3.5) Interprétation des résultants	42

Chapitre 4 Calcul mécanique de l'échangeur EA4501	43
4.1) But de calcul mécanique	43
4.2) Détermination des pressions et des températures de calcul.....	43
4.3) Caractéristiques mécaniques des éléments d'échangeur de chaleur d'après les normes ASTM	43
4.4) Calcul des contraintes admissibles à la traction	44
4.4.1) Pour la calandre (acier A515 Gr60)	44
4.4.2) Pour les tubes (acier A179)	45
4.4.3) Pour la plaque tubulaire (acier A105)	45
4.5) Vérification des épaisseurs	45
4.5.1) Calcul de l'épaisseur de la calandre	45
4.5.2) Calcul de l'épaisseur de la paroi de tube	46
4.6) Calcul de la plaque tubulaire fixe à la flexion	46
4.7) Conclusion	47
Conclusion générale	48

Annexes

Références bibliographiques

Nomenclature

Nomenclature

t_1 : Température d'entrée du pétrole brut.

t_2 : Température de sortie du pétrole brut.

T_1 : Température d'entrée de l'huile.

T_2 : Température de sortie de l'huile.

\dot{m} : Débit du pétrole brut.

\dot{M} : Débit de l'huile chaude.

μ_7 : Viscosité dynamique du pétrole brute à l'entrée.

μ_1 : Viscosité dynamique du pétrole brute à la sortie.

μ_2 : Viscosité dynamique de l'huile chaude à l'entrée.

μ_1 : Viscosité dynamique de l'huile chaude à la sortie.

c_p : Chaleur spécifique du pétrole brute.

C_p : Chaleur spécifique de l'huile chaude.

λ_c : Conductivité thermique du pétrole brute.

λ_t : Conductivité thermique de l'huile chaude.

F_c : Coefficient de correction.

r : le rapport des différences de température aux extrémités froide et chaude.

d_T : Densité de l'huile à T°C.

d_t : Densité du pétrole brute à T°C.

ν_t : Viscosité cinématique du pétrole brute.

ν_T : Viscosité cinématique de l'huile chaude.

μ_t : Viscosité dynamique du pétrole brute.

μ_T : Viscosité dynamique de l'huile chaude.

F : facteur de correction.

U_p : Coefficient de transfert propre.

A_t : Section passage coté tube.

G_t : La vitesse massique coté tube.

Re : Nombre de Reynolds.

h_1 : Coefficient de film interne.

Nomenclature

ϕ_t : Fonction correctrice pour le chauffage ou refroidissement coté tube.

h_{it} : Coefficient de film interne rapporté à la surface extérieure.

j_{it} : Fonction de transfert pour l'huile, elle est déterminée d'après le nombre de Reynolds.

A_c : Section par calandre.

G_c : La vitesse massique coté calandre.

D_e : Le diamètre équivalent.

h_{oe} : Coefficient de film externe.

ϕ_c : Fonction correctrice pour le chauffage coté calandre.

j_{oc} : Fonction de transfert pour le brut, elle est déterminée d'après le nombre de Reynolds.

t_t : La température du tube.

$\mu_{1.7}$: La viscosité de l'huile à la température du tube.

$\mu_{1.7}$: La viscosité du pétrole brut à la température du tube.

R_s : La résistance d'encrassement.

U_s : coefficient de transfert sale.

ΔP_t : Perte de charge coté tube.

f_t : Coefficient de friction.

ΔP_c : Perte de charge coté calandre.

ϵ : L'efficacité de l'échangeur de chaleur.

P_{cc} : La pression de calcul de la calandre.

P_{ct} : La pression de calcul coté tube.

r : Limite de résistance à la rupture.

e : Limite d'élasticité.

[] : contrainte admissible.

f : résistance pratique à la flexion du matériau de la plaque.

[]_{fl} : contrainte admissible à la flexion.

Introduction

Toute notre civilisation s'est construite et développée autour de ce concentré d'énergie exceptionnel qu'est le pétrole. Sa forte densité énergétique (une grande quantité d'énergie dans un faible volume) et sa facilité de stockage et de transport en ont fait une énergie prépondérante dans le bouquet énergétique mondial.

L'Algérie est le 18^e producteur de pétrole, malgré la chute des prix et une tendance mondiale de baisse des investissements dans ce secteur, l'Algérie est déterminée à maintenir, voire à augmenter ses investissements en amont et en aval. La priorité consiste non seulement à soutenir l'effort d'exploitation pour assurer la sécurité énergétique à très long terme, mais aussi à renforcer son rôle en tant qu'acteur important du commerce international de l'énergie.

L'expédition du pétrole brut nécessite des spécifications commerciales en qualité de TVR. Pour satisfaire cette condition le brut doit être stabilisé.

Le procédé de stabilisation consiste à enlever les hydrocarbures gazeux ou volatils d'un pétrole brut sans toucher aux hydrocarbures les plus lourds, par chauffage du brut jusqu'à une température précise, pour cela l'installation de stabilisation est dotée d'un échangeur de chaleur tubulaires.

Les échangeurs tubulaires sont encore parmi les plus utilisés dans le secteur industriel, ils constituent une technologie ancienne qui même si elle se trouve de plus en plus concurrencée reste une technologie indispensable notamment pour des fluides à forte pression ou très visqueux.

Dans le but d'obtenir le diplôme de master, ce mémoire est le résultat d'un stage pratique d'une durée de 15 jours au niveau de division production de Rhourd el Baguel, Hassi Messouad.

Dans ce travail nous étudierons l'échangeur EA4501 à travers les performances thermiques et mécaniques, et l'analyser de l'effet d'encrassement sur le coefficient de transfert.

Notre mémoire est structuré comme suit : dans une première partie nous procédons à la présentation de lieu de stage. Un deuxième chapitre est réservé à la description détaillée d'un échangeur de chaleur à calandre à tête flottante et son entretien. Un troisième chapitre englobe les résultats de calculs après et avant le nettoyage qui seront interprétés par la suite. Le quatrième chapitre est dédié au calcul mécanique. Nous avons achevé notre mémoire par une conclusion générale.

1.1) Situation géographique

Le champ de Rhourde El Baguel se trouve sur le système de structures qui borde la province d'Illizi et de Ghadamès vers l'Ouest. Sa surface est estimée à 164,05 km². Rhourde El Baguel fait partie de la commune d'El-Borma - Daïra Hassi Messaoud – Wilaya de Ouargla Les coordonnées géographiques de REB sont les suivantes :

X = 6° 54' 00'' à 7° 01' 00'' (Longitude Est) Y = 31° 20' 00'' à 31° 28' 00'' (Latitude Nord).
Avec une altitude moyenne du champ est de 170,68 m.

Le mot Rhourde El Baguel signifie « Grande dune » ; le champ est situé à 90 km Sud-Est de la ville d'Hassi Messaoud sur la bordure Ouest du bassin de Ghadamès, et à environ 1000 km d'Alger.



Figure 1.1 : situation géographique de la région Rhourde EL BAGUEL.

1.2) Description générale de la région de REB

La région de REB ensemble de nombreux puits, des puits producteur à partir desquels le Pétrole brut se est produit. Des puits injecteurs de gaz avec 18 millions mètres cube de gaz sont réinjectés chaque jour pour maintenir la pression du gisement. Et également on trouve des puits d'eau utile.

L'huile issue des puits est rassemblée à l'aide de 3 manifolds (Nord, Est et Sud), possédant chacun 3 systèmes d'exploitation :

- Système Haute Pression (HP).
- Système Moyenne Pression (MP).
- Système Basse Pression (BP).

Afin de stabiliser l'huile et de récupérer le gaz, deux centres d'exploitation ont été mis en place : le centre CPF (Central Production Facilities) ou phase A, et le centre TCF (Turbo Compression Facilities) ou phase B. CPF et TCF se sont deux centres de traitement du brut et de gaz d'injection et ils sont le cœur de REB.

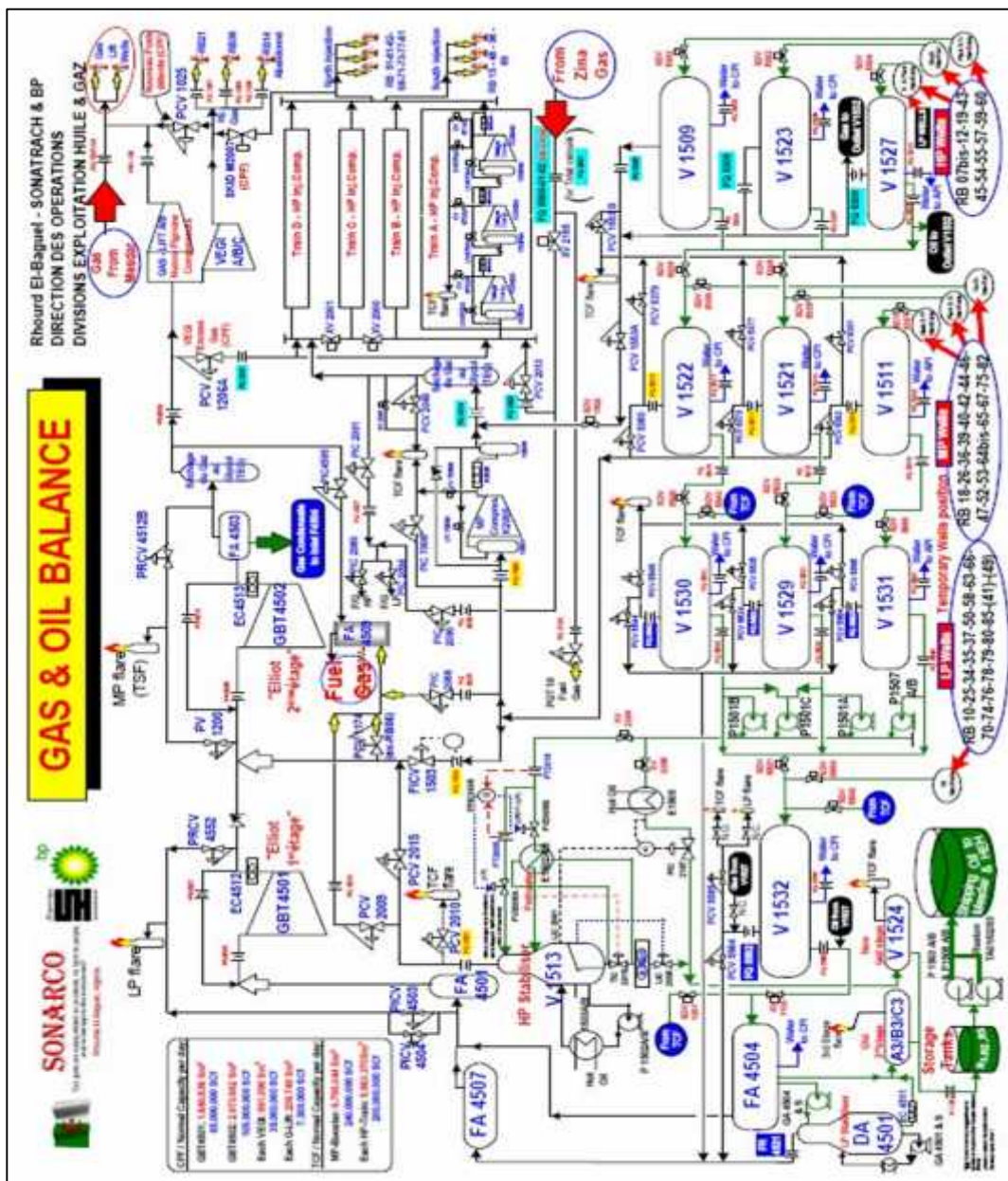


Figure 1.2 : Vue générale des principales unités composant du CPF et TCF.

1.3) Le centre CPF (Central Production Facilities) :

Il est constitué de deux sections : section de traitement et une section d'optimisation

1.3.1) Section de traitement

La section de traitement de brut est composée des sections suivantes :

- Séparateurs HP, MP et LP.
- Unité traitement des eaux EDR.
- Stockage et expédition.
- Section utilités.
- Section API/CPI

1.3.1.1) Séparateurs HP, MP et LP

Les séparateurs HP ; reçoivent la charge des manifolds HP à une pression de 30-35 bars et une température de 46°C et assurent la séparation de brut et gaz. Le débit gazeux se dirige vers TCF (unité TEG) pour être déshydraté, comprimé à une pression de 350 bars et par la suite injecté dans les puits, tandis que, le brut s'écoule vers les séparateurs MP1, V1511, V1521 et V1522 pour être séparé, de nouveau du gaz ; d'autres part, les séparateurs reçoivent également une charge des manifolds MP. Ces séparateurs fonctionnent actuellement à une pression de 14-17 bars et une température de 42°C, une partie du gaz séparé se dirige vers TCF (compresseur MP) et l'autre partie s'achemine vers le ballon aspiration du compresseur GBT4502. Ensuite, Le brut traverse les séparateurs MP2 ; V1529, V1530 et V1531, qui fonctionnent actuellement à 10-12 bars et une T° de 32°C, par la suite, il rejoint la séparatrice basse pression LP1532 et FA4504 fonctionnant sous une pression moyenne de 3-4bars. Le gaz des séparateurs MP2, LP et FA4504 est dirigé vers le ballon FA4507.

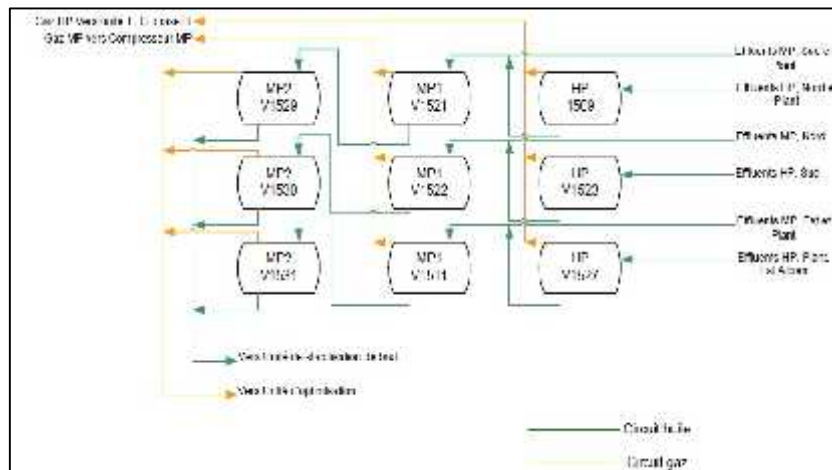


Figure 1.3 : schéma simplifié de la séparation

1.3.2) Unité d'optimisation

L'unité optimisation est constituée de deux sections principales :

1.3.2.1) La section stabilisation basse pression

Le brut sortant du ballon FA4504 est refoulé par la pompe GA4504 à 7 bars vers la colonne stabilisation LP (DA4501), celle-ci est composée de 18 plateaux, fonctionne sous 2 bars et assure la séparation des gaz légers du brut afin d'améliorer la tension de vapeur du brut (TVR). Le rebouillage de la charge à une température de 132°C est assuré par deux rebouilleurs EA4501&S fonctionnant en standby, le brut circule côté calandre et l'huile chaude côté tube.

Le brut ainsi stabilisé, après avoir été refroidi dans les aéro-réfrigérants EC4511 à une température de 40°C, sera envoyé vers le séparateur V1524 pour être débarrassé des légers puis envoyé vers les bacs de stockage. Le débit gazeux sortant de la tête de colonne DA4501 et le gaz provenant des Séparateurs MP2 et V1532 alimentent le ballon FA4507. La partie gazeuse est envoyée vers le ballon d'aspiration 1er étage FA4501, tandis que les condensats seront recyclés vers FA4504.



Figure 1.5 : section stabilisation BP

Le gaz du ballon FA4501 est aspiré à une pression 1.6bars et comprimé par l'intermédiaire d'un compresseur GBT4501 à une pression de 14bars. Après avoir été refroidi l'aéro EC4512 à une température de 33°C, l'effluent est recueilli dans le ballon FF4501 puis envoyé vers le ballon aspiration 2ème étage FA4510.

La partie gazeuse, portée à la pression de 14bars, est comprimée, par le compresseur GBT4502 à 44bars, refroidie puis recueillie dans le ballon FA4503, le gaz sortant, après avoir été déshydraté dans l'unité déshydratation au TEG, est envoyé vers TCF. Les condensats de

FA4503 s'acheminent vers la colonne DA4502, qui comprend 36 plateaux, fonctionne sous 14 bars et assure la séparation des légers C1 et C2 en tête qui entrent le ballon FA4510, les condensats du fond sont envoyés vers la colonne DA4501.

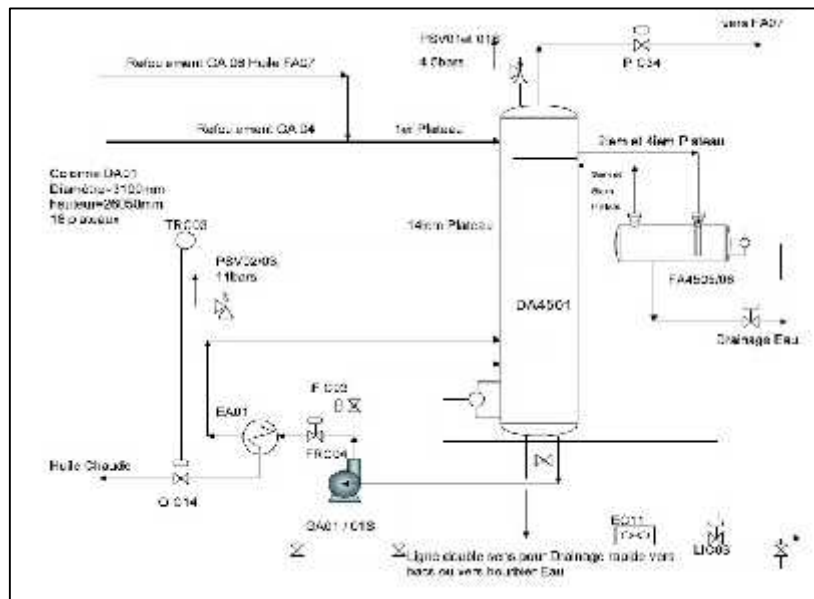


Figure 1.6 : Vue générale de l'unité de stabilisation basse pression.

1.3.2.2) Unité de déshydratation au tri éthylène glycol (TEG)

Le gaz provenant du ballon FA4503 est dirigé vers le séparateur MV-1401-I pour éliminer les condensats, puis alimente le contacteur MV-1401-A où se fait l'absorption à contre courant, l'effluent ascendant et le TEG descendant, l'absorption se fait à une température avoisinante de 40°C, le TEG humide sortant du fond du contacteur est dirigé vers la section régénération, tandis que le gaz de tête du contacteur alimente le ballon séparateur à cyclone V-1404 où s'effectue la récupération des traces du TEG entraînées dans le gaz, le gaz de tête est envoyé vers compresseurs VEGI et gaz lift tandis que le TEG récupéré au fond est acheminé vers la section régénération TEG.

1.3.2.3) La section stabilisation haute pression

Le brut sortant des séparateurs V1529, V1530 et V1531 est pompé à une pression de 17bars, chauffé dans l'échangeur E1502, puis alimente la colonne de stabilisation HP. La colonne V1513 comprend 20 plateaux et assure la même fonction que la colonne DA4501, mais la stabilisation se fait à une pression de 17 bars. La circulation du rebouillage se fait par les pompes P1502A /B en échangeant la chaleur dans les échangeurs E1503 avec l'huile chaude provenant du four F5001.

Le brut stabilisé, après avoir été refroidi dans l'aéro E1501, se dirige vers le ballon V1524 pour être séparé des gaz légers, puis envoyer vers les bacs de stockage, tandis que les gaz de tête s'acheminent vers FA4510 et le réseau fuel gaz existant.



Figure 1.7 : section stabilisation HP

1.4) Le centre TCF (Turbo Compresseur Facilité)

Le but de cette unité est d'injecter du gaz sec et comprimé dans le réservoir pour augmenter la pression du réservoir à la pression de miscibilité, cette augmentation de la pression de réservoir augmentera la production de pétrole brut.

Le gaz injecté est constitué de :

- Gaz associés HP provenant des séparateurs HP situés dans l'unité de traitement de brut.
- Gaz associés MP provenant des séparateurs MP situés dans l'unité de traitement de brut.
- Gaz en excès de la VEGI, ce gaz provient du refoulement du compresseur GB 4502 de l'unité d'optimisation après déshydratation dans l'unité de TEG de la phase A.
- Gaz importé de GR1, c'est un gaz sec ayant les spécifications du gaz de vente.

1.4.1) Description de l'unité

L'unité d'injection de gaz est constituée de :

4 trains turbocompresseurs parallèles, chaque train est constitué de trois compresseurs entraînés par une seule et même turbine :

- A) La turbine KT2002A entraîne les compresseurs K2002A, K2003A, K2004A.
- B) La turbine KT2002B entraîne les compresseurs K2002B, K2003B, K2004B.
- C) La turbine KT2002C entraîne les compresseurs K2002C, K2003C, K2004C.

D) La turbine KT2002D entraîne les compresseurs K2002D, K2003D, K2004D.

1 train turbocompresseur moyenne pression constitué de la turbine KT2005 entraînant le compresseur K2005.

4 trains de déshydratation de gaz au TEG, ces 4 trains sont identiques et parallèles :

- a) Le train M1403A appelé train A.
- b) Le train M1403B appelé train B.
- c) Le train M1403C appelé train C.
- d) Le train M1403D appelé train D.

Une ligne de 30 pouces de diamètre et 60 Km de long permet d'importer du gaz à partir du gazoduc GR1 au niveau de la station de ZINA. Un réseau de distribution qui partant du refoulement des turbocompresseurs permet d'alimenter les puits injecteurs.

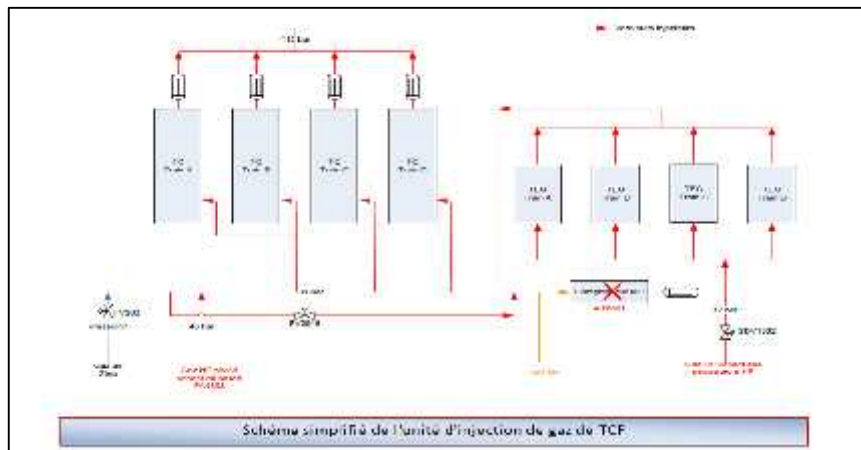


Figure 1.8 : schéma simplifié de l'unité d'injection du gaz

1.4.2) Description du procédé

Les différentes alimentations de gaz de l'unité d'injection de gaz miscible sont donc : le gaz MP, le gaz HP, le gaz d'importation et le gaz en excès de la station VEGI. Le gaz MP provenant des séparateurs MP est d'abord comprimé par le train turbocompresseur MP (K2005-KT2005), ce train d'une capacité de 6 825 000 Sm³ par jour élève la pression du gaz MP de 15,2 Bars à 33,4 bars, le gaz ainsi comprimé est refroidi puis est mélangé au gaz HP en provenance des séparateurs HP de l'unité de traitement de brut.

Le mélange des deux gaz alimente les trains de déshydratation au TEG ou il est débarrassé de l'eau qu'il contient, ainsi déshydratés, les gaz associés (MP et HP) alimente le manifold d'entrée des trains turbocompresseurs. Le manifold d'entrée est muni de vannes de telle façon à ce qu'il

peut être divisé en deux sections opérant à différentes pressions, La section basse pression du manifold d'entrée travaille à 31 Bars et peut alimenter le train D ou le train D et C simultanément. La section haute pression du manifold d'entrée fonctionne à une pression pouvant aller de 31 Bars jusqu'à 48 Bars et est configurée de façon à alimenter les trains A, B et C ou simplement les trains A et B. L'ouverture de toutes les vannes du manifold d'entrée permettra d'alimenter tous les trains à la même pression d'aspiration.

1.5) Organisation du champ de Rhourde El Baguel

La direction régionale de Rhourde el Baguel, est régie par l'organigramme suivant :

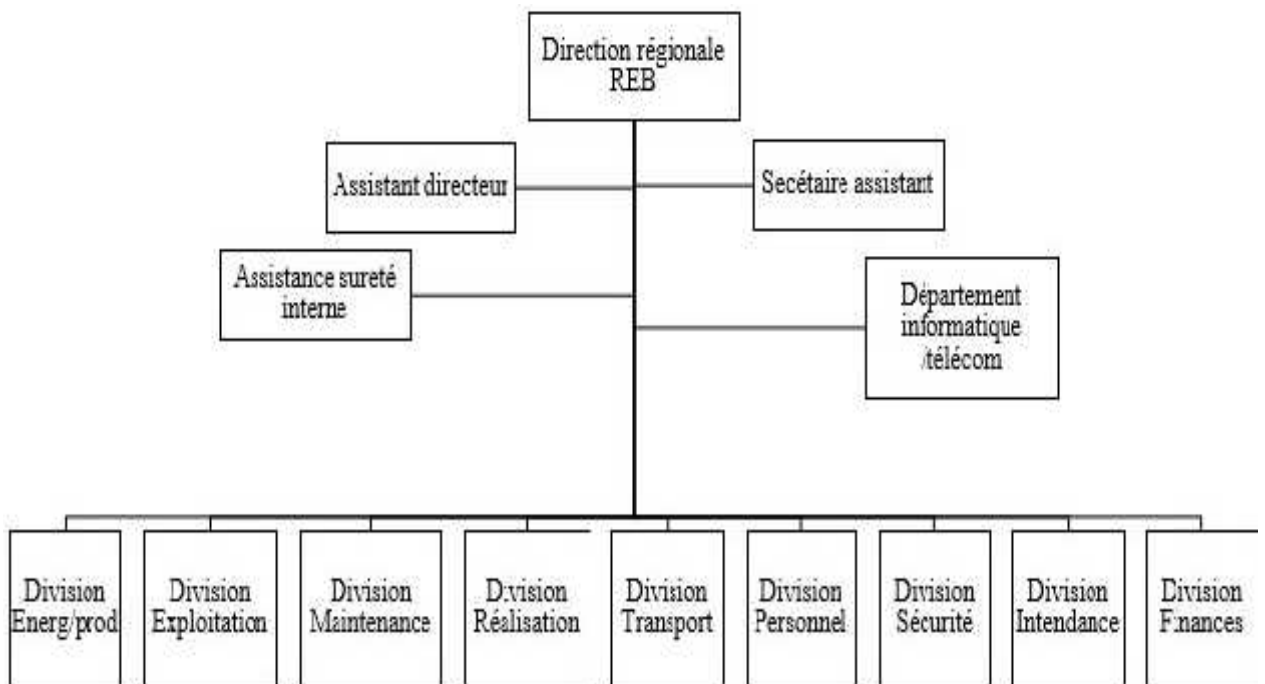


Figure 1.4 : Organigramme de la direction de REB

1.5.1) Division maintenance

La division Maintenance est organisée comme suit :

- Un service Méthodes
- Un service Mécanique
- Un service Instrumentation
- Un service Electricité

1.5.2) Service Méthodes

Ce service a pour but principales les taches de planification et le suivi de toutes les opérations d'exécution et la gestion des équipements. Le calendrier de la maintenance préventive et la préparation des plans d'interventions sont générés dans ce service.

Les principales tâches sont : programmation prévisionnelle des inspections, programmation de la maintenance PM et CM, vérification et suivi du stock, supervision des travaux et leur taux d'avancement, l'approvisionnement en pièces de rechange. Le service méthode utilise pour accomplir ces taches un système de gestion de la maintenance assisté par ordinateur appelé MAXIMO et TENU DE STOCK.

1.5.3) Service mécanique

Ce service s'occupe de la maintenance et de la réparation de tous les équipements et les machines statiques et tournantes qui retrouvant au centre de production à savoir : Echangeurs de chaleur, Colonnes, Fours, turbines à gaz, pompes, Compresseurs et moteurs...etc. Ce service travaille en collaboration avec le service méthode et planification pour assurer sa tâche qui consiste à maintenir le plus longtemps possible le bon fonctionnement des équipements mécaniques.

2.1) Introduction

L'échangeur de chaleur tubulaire à calandre est le plus utilisée. C'est le principal élément «workhorse» du transfert de chaleur des procédés industriels. Il a de nombreuses applications dans la production d'énergie, raffinage du pétrole, les industries chimiques. Ils sont utilisés comme refroidisseur d'huile, condenseur, chauffe-eau, etc. D'autres types d'échangeurs de chaleur sont utilisés à des termes économiques. Bien que l'application d'autres types d'échangeurs de chaleur augmente, l'échangeur de chaleur tubulaire à calandre continuera sa popularité pendant une longue période, en grande partie grâce à sa polyvalence.

Les principaux composants d'un échangeur tubulaire à calandre sont les tubes, les chicanes, tête avant, tête arrière et les buses. Le Joint de dilatation est un élément important dans le cas de l'échangeur à plaque tubulaire fixe pour certaines conditions de conception. Les autres composants comprennent les tirants et les entretoises, les déflecteurs, les joints d'étanchéité, les supports et les pattes. Les critères de sélection pour une combinaison appropriée de ces composants dépendent des pressions de fonctionnement, des températures, des contraintes thermiques, des caractéristiques de corrosion des fluides, de l'encrassement, de la propreté et du coût. Les principaux composants des échangeurs de chaleur à calandre et une coupe d'un échangeur de chaleur sont représentés sur la figure 2.1.

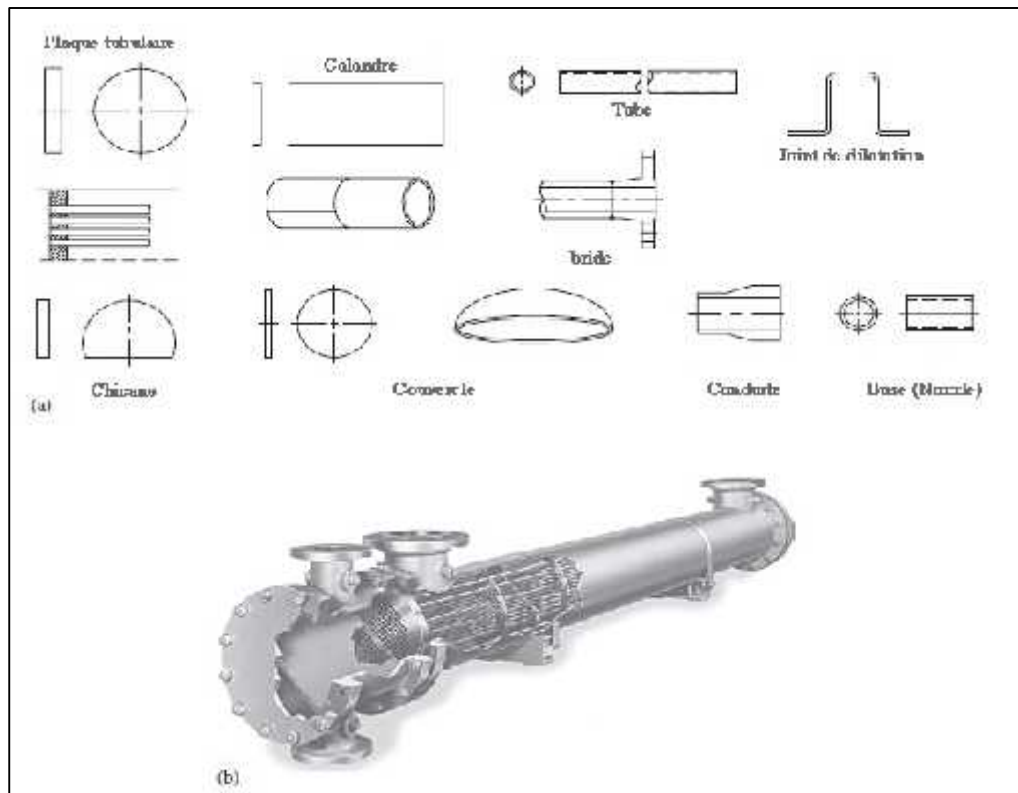


Figure 2.1 : (a) les composants major de l'échangeur à calandre. (b) Section de coupe d'un échangeur de chaleur à calandre.

Tous les éléments entrant dans la construction de ces échangeurs ont fait l'objet d'une normalisation, publiée par la T.E.M.A. (Standard of Tubular Exchanger Manufacturer Association) qui spécifie les caractéristiques mécaniques et thermiques correspondant aux diverses conditions de fonctionnement.

Cette normalisation est complétée par d'autres codes tels que ceux de l'A.P.I. (American Petroleum Institute) ou l'A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers)

2.2) Échangeur à faisceau et calandre à tête flottante

Ce type d'échangeurs est de loin, le plus répandu en raffinerie. Le principe du faisceau logé à l'intérieur d'une calandre a été retenu également dans la construction des condenseurs et des rebouilleurs. L'appareil est constitué par un faisceau de tubes montés sur deux plaques tubulaires et portant un certain nombre de chicanes. L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et la boîte de distribution. La seconde plaque, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre. La calandre est munie de tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide qui circule à l'extérieur des tubes suivant le chemin imposé par les chicanes.

Ces appareils, permettant l'expansion thermique du faisceau ainsi que son nettoyage mécanique, constituent la presque totalité des échangeurs utilisés en raffinerie. (environ 80%)

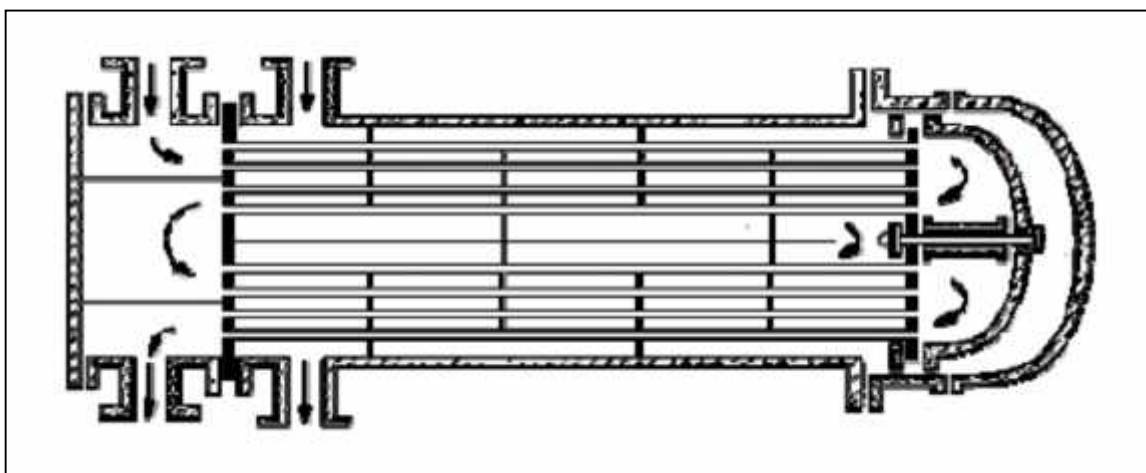


Figure 2.2 : Échangeur à faisceau et calandre à tête flottante.

2.3) L'échangeur EA4501

Le rôle de l'échangeur de chaleur dans le procédé de stabilisation et de chauffer le pétrole brut non stabiliser provenant de la colonne par l'huile chaude, après le chauffage le brut sera injecté dans la colonne côté stabiliser à une température de 132°C. Le brut circule côté calandre et l'huile chaude côté tube.



Figure 2.3 : L'échangeur de chaleur EA4501.

Cet échangeur a six passes côté tube et une passe côté calandre, il a 580 tubes, disposés en pas carré renversé.

L'échangeur de chaleur EA4501 est de type AJS selon la norme TEMA. La première lettre de la désignation TEMA représente le type de tête avant (boîte de distribution) où le fluide côté tube entre dans l'échangeur de chaleur, la deuxième lettre représente le type de la calandre et la dernière lettre représente le type de la tête arrière.

AJS signifie :

- A : boîte de distribution avec couvercle démontable
- J : écoulement divisé
- S : tête flottante avec contre bride démontable

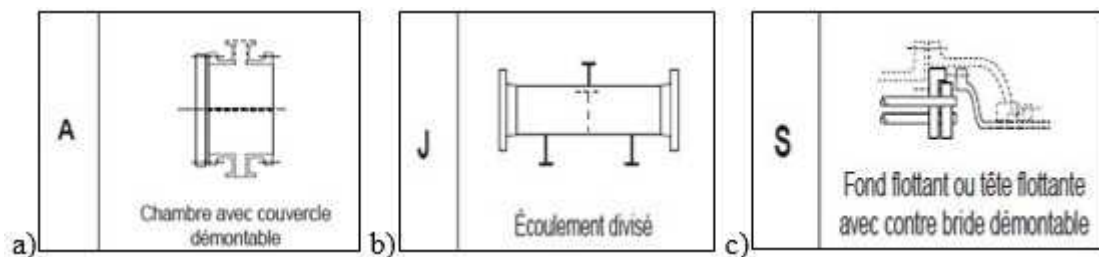


Figure 2.4 : a) la boîte de distribution, b) la calandre, c) la tête flottante.

2.4) Les éléments d'échangeur EA4501

2.4.1) Boîte de distribution

C'est l'organe qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes. Sauf pour le tube en U, il y a une boîte à chaque extrémité de l'échangeur. La disposition de la boîte dépend non seulement du type choisi, mais aussi du nombre de passes. La liaison cloison-plaque tubulaire

est en général assurée par un joint. La boîte est le plus souvent réalisée avec un matériau peu différent de celui des tubes.



Figure 2.5 : La boîte de distribution de l'échangeur EA4501.

2.4.2) La calandre

C'est l'enveloppe métallique entourant le faisceau tubulaire. L'acier au carbone est le matériau le plus couramment utilisé pour la construction des calandres. A chaque extrémité sont soudées les brides qui porteront le couvercle et la boîte de distribution. Les tubulures d'entrée et de sortie sont soudées avec plaques de renforcement ou non, selon la pression de service. Enfin, la calandre pourra être équipée d'anneaux pour le levage et portera la plaque d'identité de l'appareil.

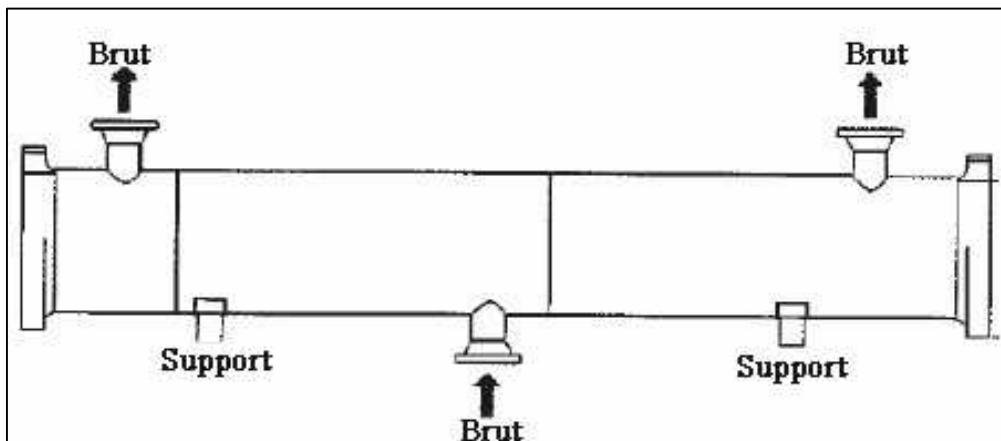


Figure 2.6 : Schéma simplifié de la calandre.

Tableau 2.1 : Caractéristique de la calandre.

Fluide	Pétrole brut
Matériau	A515 Gr60
Pression de calcul (bar)	11
Température de calcul (°C)	200
Pression de fonctionnement (bar)	2,3
Pression d'épreuve (bar)	16,5
Sur épaisseur de corrosion (mm)	3
Volume (m ³)	4,10

2.4.3) Plaques tubulaires

Ce sont des plaques percées supportant les tubes à leurs extrémités. Elles peuvent être en acier ordinaire, en acier spécial massif.

Les tubes peuvent être fixés à la plaque tubulaire par dudgeonnage ou par soudure, quelquefois aussi par dudgeonnage allié à une soudure qui sert alors simplement à assurer l'étanchéité.

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 dudgeonnages ou les soudures.



Figure 2.7 : Plaque tubulaire de l'échangeur EA4501.

2.4.4) Les 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.

Deux dispositions de tubes sont possibles : le pas triangulaire et le pas carré (Figure 2.7). La disposition en pas carré offre une plus grande facilité de nettoyage (toute la surface extérieure des tubes est accessible par un jet d'eau sous pression ou par un instrument de nettoyage). La disposition en pas triangulaire est plus compacte, donc plus économique.

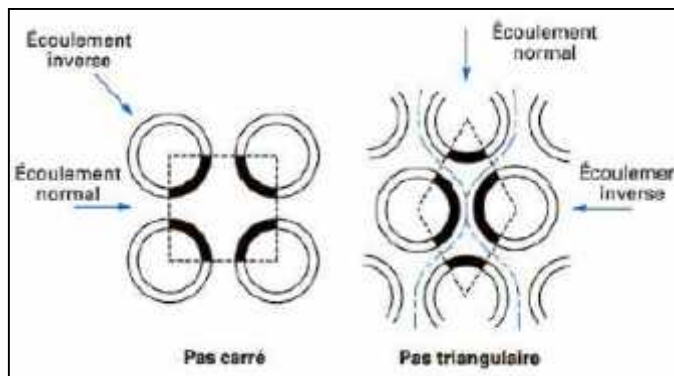


Figure 2.8 : Pas des tubes.

Pour l'échangeur EA4501 la disposition des tubes est carrée renversée

Tableau 2.2 : Caractéristique des tubes d'échangeur EA4501.

Fluide	Huile chaude
Nombre	580
Matériau	Acier A179
Pression de calcul (bar)	12
Température de calcul (°C)	315
Pression de fonctionnement (bar)	5
Pression d'épreuve (bar)	18
Sur épaisseur de corrosion (mm)	3
Volume (m ³)	2,05

2.4.5) Le faisceau tubulaire

Le faisceau tubulaire est un ensemble de tubes, chicanes, plaque tubulaire, entretoises, des tirants et des chicanes. Les entretoises et les tirants sont nécessaires pour maintenir l'espace entre les chicanes.

Le faisceau tubulaire est maintenu en un ensemble et les chicanes sont situées dans leurs positions correctes par un certain nombre des tirants et d'entretoises. Les tirants sont vissés dans la plaque tubulaire et accordent la longueur du faisceau jusqu'au dernier déflecteur, où ils sont fixés par des contre-écrous. Entre les chicanes, les tirants il y a les entretoises installées sur eux.

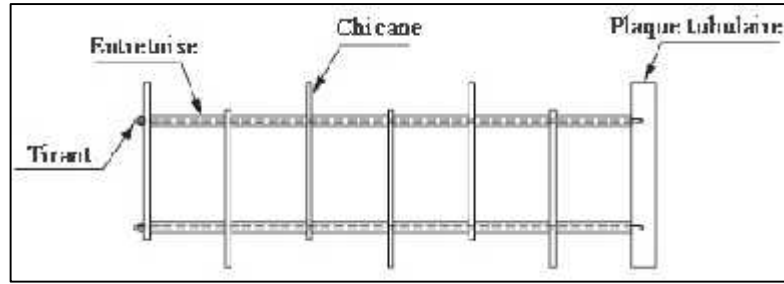


Figure 2.9 : Entretoise et tirant.



Figure 2.10 : Faisceau tubulaire de l'échangeur EA4501.

2.4.6) La tête flottante

L'échangeur à tête flottante se compose d'une plaque tubulaire stationnaire et d'une plaque tubulaire flottante qui est libre pour contenir la dilatation thermique du faisceau tubulaire. Dans la tête flottante avec dispositif de support (type S), le couvercle de la tête flottante (au lieu d'être boulonné directement sur la plaque tubulaire flottante comme dans les autres types) est boulonné sur une bague de support. Le couvercle de la coque sur la tête flottante a un diamètre supérieur à la calandre. Les deux extrémités de l'échangeur de chaleur doivent être démontées pour le nettoyage et la maintenance. Ce type est recommandé pour les fluides de processus non dangereux.



Figure 2.11 : La tête flottante de l'échangeur EA4501.

2.4.7) Chicanes

Les chicanes sont généralement utilisées sur le côté calandre pour supporter les tubes, pour maintenir l'espacement des tubes et pour diriger le fluide dans la calandre à travers le faisceau tubulaire d'une manière spécifiée. Il existe plusieurs types de chicane, et peuvent être installés de différentes façons pour fournir le modèle de flux requis pour une application donnée.

Les chicanes sont soit normales, soit parallèles aux tubes. En conséquence, les chicanes peuvent être classées comme transversales ou longitudinales. Les chicanes transversales dirigent le fluide dans la calandre à peu près perpendiculairement aux tubes et augmentent la turbulence du fluide. La majorité des échangeurs tubulaire à calandre ont des chicanes transversales.

Tableau2.3 : Caractéristique des chicanes.

Nombre	26
Matériau	A155 Gr55
Épaisseur (mm)	6
Espacement entre chicanes (mm)	273

2.4.8) Déflecteurs longitudinaux et d'entrée

Entre les tubes périphériques et la calandre subsiste nécessairement un vide non négligeable. Une part importante du fluide peut alors contourner le faisceau (phénomène de by-pass) et ne pas participer à l'échange de chaleur, ce que l'on atténue en utilisant des déflecteurs longitudinaux.

Au niveau des buses d'entrée, il faut un certain type de protection contre les chocs pour éviter l'érosion et les vibrations des tubes, pour cela il y a les déflecteurs d'entrée.

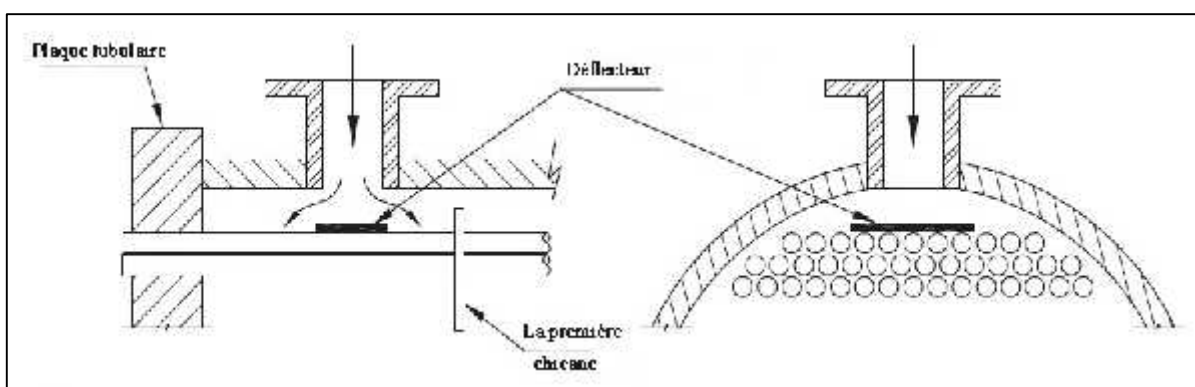


Figure 2.12 : Déflecteur d'entrée.

2.4.9) Événements, vidange

Dans la conception d'un échangeur devant réchauffer ou refroidir du liquide, il faut s'assurer qu'aucune poche de gaz ne peut stagner et ainsi diminuer la surface efficace. Il est donc nécessaire de prévoir des piquages d'événements et de vidange.

2.5) Le problème présent dans l'échangeur de chaleur EA4501

Il s'agit de l'encrassement excessif côté calandre, qui touche l'échangeur de chaleur EA4501, ce qui fait réduire le transfert de chaleur entre le brut et l'huile chaude dans l'échangeur, donnant lieu à une mauvaise stabilisation du pétrole brut au niveau de la colonne de stabilisation, altérant ainsi les spécifications du pétrole brut en augmentant la tension de vapeur.

2.5.1) L'encrassement

L'encrassement est défini comme la formation des dépôts indésirables sur les surfaces de transfert de chaleur qui entravent le transfert de chaleur, ce qui entraîne une chute de pression plus élevée. 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 thermohydrauliques de l'échangeur de chaleur avec le temps. L'encrassement affecte la consommation d'énergie des procédés industriels.

Les couches d'encrassement aux surfaces intérieures et extérieures augmentent avec le temps pendant l'utilisation de l'échangeur de chaleur. 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 réduira l'efficacité thermique des échangeurs de chaleur, ce qui affectera les processus ultérieurs.

L'encrassement des échangeurs de chaleur représente une dépense élevée. L'encrassement est quelque chose qui est indésirable et contre-productif. La présence d'encrassement sur les surfaces d'échange de chaleur entraîne des coûts supplémentaires.

Les considérations économiques devraient figurer parmi les paramètres les plus influents pour déterminer les indemnités appropriées pour l'encrassement.

2.6) Maintenance

Contrôle quotidien : Vérifier s'il y a des fuites de fluide dans les zones fermées de l'échangeur de chaleur.

Maintenance périodique : Réviser l'échangeur de chaleur et nettoyez les pièces selon le calendrier. Dans le même temps, vérifiez s'il existe des fissures visibles.

2.7) Vérification de la qualité de l'échangeur de chaleur existant

La première étape dans la vérification des performances consiste à recueillir des informations sur les performances thermiques actuelles de l'échangeur de chaleur et à les comparer avec les conditions de conception. La deuxième partie consiste à examiner la procédure de maintenance

périodique, examiner les méthodes de nettoyage et les résultats des performances de l'échangeur de chaleur après le nettoyage et effectuons une inspection pour détecter tout signe de fuites.

2.8) Démontage du faisceau tubulaire

Pour éviter tout dommage lors de l'enlèvement d'un faisceau tubulaire à partir d'une calandre, un dispositif de traction doit être fixé sur des boulons à œillets vissés dans la plaque tubulaire. Si la plaque tubulaire n'a pas de trous taraudés pour les boulons à œillets, des barres d'acier ou des câbles insérés à travers les tubes et attachés à des plaques de support peuvent être utilisés. Le faisceau doit être supporté sur les chicane, ou sur les plaques tubulaires et manipulé soigneusement pour éviter l'endommagement du faisceau tubulaire. Le joint d'étanchéité et les surfaces de contact doivent être protégés. Un grand nombre d'appareils de traction et de manipulation de faisceau tubulaire sont disponibles pour le démontage et la remise à neuf des échangeurs de chaleur.



Figure 2.13 : Extraction du faisceau tubulaire en utilisant l'extracteur hydraulique désigné spécialement pour l'extraction des faisceaux tubulaire, avec une grue de 60 tonnes.

2.9) Nettoyage des échangeurs de chaleur

Dans la plupart des applications, on sait que l'encrassement se produit malgré une bonne conception, un fonctionnement efficace et une maintenance. Par conséquent, les échangeurs de chaleur et les équipements associés doivent être nettoyés. Le temps entre les opérations de nettoyage dépend de la gravité du problème d'encrassement. Dans certains cas, le nettoyage peut être effectué pendant les programmes de maintenance périodique, par exemple deux fois par an ou chaque année, mais dans d'autres cas un nettoyage fréquent sera nécessaire, peut-être mensuel ou trimestrielle.

2.9.1) Techniques de nettoyage

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 fonctionne, appelé nettoyage en ligne, ou pendant l'arrêt de l'équipement pour le nettoyer, appelés nettoyage hors ligne.

2.9.1.1) Nettoyage mécanique hors ligne

Les techniques utilisant des moyens mécaniques pour l'élimination des dépôts sont fréquentes dans l'industrie. Les différentes méthodes de nettoyage mécanique hors ligne sont :

- Nettoyage manuel : lorsqu'il y a un bon accès, comme pour un échangeur de chaleur à un faisceau tubulaire à un pas carré, et que le dépôt est doux, le lavage à mains peut être utilisé, bien que les coûts de main-d'œuvre soient élevés.
- Nettoyage à jet : cette méthode consiste à diriger des jets d'eau puissants sur des surfaces encrassées par des pistolets spéciaux ou des lances. L'efficacité de cette procédure de nettoyage dépend de l'accessibilité
- Passage des brosses à travers les tubes d'échangeur : L'unité se compose d'une cheville en plastique longue enveloppée de poils en nylon. Les brosses sont propulsées à travers le tube par un arbre flexible et les débris sont expulsés par l'air ou l'eau.

L'avantage des méthodes de nettoyage mécanique comprend la simplicité et la facilité d'utilisation, et la capacité de nettoyer des tubes complètement bouchés. Cependant, cette méthode peut endommager l'équipement, en particulier les tubes.

2.9.1.2) Nettoyage chimique

La pratique habituelle consiste à recourir au nettoyage chimique des échangeurs de chaleur uniquement lorsque d'autres méthodes ne sont pas satisfaisantes. Les méthodes de nettoyage chimique majeures sont :

- Par circulation : cette méthode implique le remplissage de l'équipement avec une solution de nettoyage. Et le faire circuler par une pompe.
- Nettoyage de remplissage et d'absorption : dans cette méthode, l'équipement est rempli d'une solution de nettoyage chimique et évacué après une période.
- Nettoyage par injection de vapeur : Cette méthode implique une injection d'un mélange concentré de solutions de nettoyage et de vapeur.

Le nettoyage chimique offre les avantages suivants sur le nettoyage mécanique : nettoyage uniforme et parfois nettoyage complet, l n'est pas nécessaire de démonter l'échangeur, capable de nettoyer les zones inaccessibles. Mais les produits chimiques utilisés pour le nettoyage sont

souvent dangereux et nécessitent des procédures d'élimination élaborées. Des gaz nocifs peuvent être émis par la solution de nettoyage.

2.10) Localisation des fuites dans les tubes

Le test hydraulique côté calandre est le test préféré pour localiser les tubes perforés ou le joint entre les tubes et la plaque tubulaire qui fuit. Dans la plupart des cas, toute la face avant de la plaque tubulaire sera inspectée. Le point où le fluide s'échappe indique un tube ou un joint défectueux.

- Procédure du test hydraulique

Après le nettoyage de l'échangeur de chaleur, on effectue un test hydraulique pour vérifier s'il y a des fuites, les étapes à suivre pour effectuer ce test :

- 1- Installation de l'anneau de test avant et arrière avec les joints d'étanchéité.
- 2- Installation de la jauge de pression.
- 3- Branchez la pompe à eau.
- 4- Remplissage de la calandre par l'eau.
- 5- Augmentation de la pression jusqu'à la pression d'essai.
- 6- Vérifier les fuites des tubes.

Il faut s'assurer que l'air est enlevé complètement avant d'effectuer le test hydrostatique. On surveille la jauge du manomètre pour détecter la chute de pression qui indique les fuites. La pression d'épreuve doit être maintenue pendant au moins 30 minutes. Si des fuites sont détectées, elles doivent être réparées et les essais sont répétés jusqu'à ce qu'aucune fuite ne soit détectée.



Figure 2.14 : les anneaux de test côté boîte de distribution et côté tête flottante

Les tubes qui ont été détectés peuvent être bouchés par une goupille conique ou remplacés par des tiges solides à la place des tubes. Le nombre des tubes bouchés ne doit pas dépasser 10% du nombre des tubes. Ces goupilles de bouchage sont installées en appliquant un couple. Une autre option est le remplacement d'une partie ou de tous les tubes d'un échangeur de chaleur existant.

2.11) Le retubage de l'échangeur EA4501

Lors de l'inspection de l'échangeur de chaleur et après le nettoyage, il y'avait plus que 10% des tubes défailants d'où la nécessité de changement des tubes défailant, mais dans le service maintenance ont décidé de changer tous les tubes.

2.11.1) Procédure de retubage

Après l'extraction du faisceau tubulaire, on le transporte à l'atelier mécanique pour faire le retubage par un personnel qualifié.

- **Détubage** : consiste à l'extraction des anciens tubes du faisceau tubulaire et pour cela il faut dessouder les tubes de la plaque tubulaire. Dans l'échangeur EA4501, les tubes sont dudgeonnés.

Pour l'extraction des tubes, on utilise un gabarit d'extraction.



Figure 2.15 : extraction des anciens tubes du faisceau tubulaire

- **Tubage** : consiste à l'insertion de nouveaux tubes à travers les plaques tubulaires et les chicanes et le dudgeonnage des tubes aux plaques tubulaires.



Figure 2.16 : insertion des nouveaux tubes

Le dudgeonnage est l'opération qui consiste en l'expansion des tubes de façon à obtenir l'étanchéité nécessaire des fluides circulants dans les tubes et la calandre, en agissant sur l'épaisseur des tubes avec des outils appelés dudgeons choisis en fonction des caractéristiques des tubes et des plaques tubulaires.



Figure 2.17 : dudgeonnage des tubes



Figure 2.18 : outil de dudgeonnage

2.12) Démarrage de l'échangeur de chaleur

Pendant le démarrage, il faut que toutes les conditions d'utilisation soient conformes aux spécifications de l'échangeur de chaleur. L'équipement ne doit pas être utilisé à des conditions dépassant les paramètres de conception.

Démarrage de l'échangeur : les fluides doivent être introduits de manière à réduire la dilatation thermique entre la calandre et les tubes. L'échangeur peut être mis en service en remplissant d'abord le fluide plus froid, puis l'introduction progressive du fluide chaud.

2.13) Critiques et recommandation

Les résultats d'analyse d'un échantillon d'encrassement prise de l'échangeur EA4501 montrant que l'encrassement est causé par la présence des sels minéraux dans le pétrole brut. Ce problème est dû à l'absence d'un dessaleur, on recommande l'installation d'un dessaleur.

Malgré le bon nettoyage le problème d'encrassement se réapparaît après une petite période de fonctionnement, ce qui résulte une fréquence élevée inévitable des arrêts d'entretien qui provoquant des arrêts de production.

On a remarqué que l'arrêt de nettoyage prend beaucoup de temps à cause des méthodes utilisées. On propose d'utiliser le nettoyage chimique, qui permettrait de réduire le temps de nettoyage de façon significative. La solution proposée consiste à faire circuler une solution diluée de détergent, éliminant ainsi la nécessité de sortir le faisceau tubulaire. La circulation serait assurée par le personnel et les équipements.

2.14) Sécurité technique de l'échangeur

La défaillance de l'échangeur résulte que la TVR après traitement reste trop élevée, elle peut conduire à des accidents au niveau des bacs de stockage, il pourra aussi apparaître des bouchons de gaz, ces bouchons perturbent les mesures, les pompes et créent des pertes de charge parasites et imprévisibles dans le réseau de transport. Il existe aussi un risque d'incendie en cas de fuite

dans l'échangeur. Maintenir le bon fonctionnement de l'échangeur est obligatoire pour éviter les risques et les arrêts de production.

Le passage à l'entretien est un excellent moyen pour limiter les risques. Créer un planning basé sur des opérations régulières et planifiées, améliorant nettement la sécurité.

Lors des opérations d'entretien le personnel est exposé à des risques d'où la nécessité de suivre quelque consigne : Avant le démontage, il convient de s'assurer de l'absence de surpression dans les tubes, l'isolation et la vidange complète de l'équipement puis on ouvre l'appareil.

L'utilisation des dispositifs d'aide à la manutention peut réduire les risques dus aux positions douloureuses.

Sur le lieu d'intervention, il est essentiel de bien éclairer les sols pour éviter les chutes.

Enfin, la surveillance périodique de notre équipement est la base de notre sécurité, et il faut rappeler que la sécurité des techniciens passe avant toute chose.

Conclusion :

Les échangeurs de chaleurs sont des équipements très importants dans les procédés de traitement de pétrole. Pour cela un bon programme de maintenance de ces équipements est nécessaire pour préserver la performance de ces équipements.

4.1) But de calcul

Le but de notre calcul concerne en premier lieu la vérification des performances de l'échangeur EA4501 après nettoyage et changement des tubes (retubage), en calculant la résistance d'encrassement, ses pertes de charge et son efficacité. Et dans la deuxième partie on s'intéresse au suivi des performances de l'échangeur dans le temps avant l'entretien.

4.2) 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

4.3) Calcul de vérification

Ce calcul est basé sur la méthode de **KERN**, c'est un calcul de vérification d'échangeur.

4.3.1) données de calcul

Tableau 4.1 : caractéristique des fluides

Propriétés	Unité	Côté calandre	Côté tube
Fluide en circulation		Pétrole brut	Huile
Température d'entrée	°C	$t_1 = 70$	$T_1 = 288$
Température de sortie	°C	$t_2 = 132$	$T_2 = 163$
Débit	kg/s	$\dot{m} = 63,44$	$\dot{M} = 39,76$
Densité	d20/4	0,784	0,86
Viscosité dynamique	Pa.s	$\mu_7 = 6,22 \times 10^{-4}$ $\mu_1 = 5,6 \times 10^{-4}$	$\mu_2 = 4,36 \times 10^{-4}$ $\mu_1 = 1,44 \times 10^{-4}$
Chaleur spécifique	J/kg.°C	$c_p = 2847,024$	$C_p = 2344,608$
Conductivité thermique	J/s.m.°C	$\lambda_c = 0,13$	$\lambda_t = 0,12$

Tableau 4.2 : caractéristique de l'échangeur

Calandre	
Nombre de passe	Nc = 1
Diamètre intérieur	Di = 1016 mm
Espacement des chicanes	B = 273 mm
Epaisseur des chicanes	ec = 6 mm
Résistance d'encrassement	rc = 0,00034 °C.m ² .s/J
Pertes de charge admissible	P _{adm} = 1 kg/cm ²
Faisceau	
Nombre de passes	Np = 6
Nombres des tubes	Nt = 580
Longueur des tubes	L = 7320 mm
Diamètre intérieur des tubes	di = 19.86 mm
Diamètre extérieur des tubes	de = 25.4 mm
Pas carré renversé	P = 31,75 mm
Conductivité thermique	= 50 J/s.m.°C
Résistance d'encrassement	rt = 0,00034 °C.m ² .s/J
Pertes de charge admissible	P _{adm} = 1,01972 kg/cm ²

4.3.2) Evaluation des caractéristiques des fluides à les températures caloriques - Calcul des températures caloriques

- La température calorique du fluide chaud (huile) :

$$T_c = T_2 + F_c \times (T_1 - T_2)$$

- La température moyenne du fluide froid :

$$t_c = t_1 + F_c \times (t_2 - t_1)$$

F_c : Coefficient de correction.

On a : F_c = f(r, K_c)

r : le rapport des différences de température aux extrémités froide et chaude.

$$r = \frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_2} = \frac{163 - 70}{288 - 132} = 0,596$$

D'après l'abaque (figure 4.1) on a :

$$K_c = 0,05 \quad \text{et} \quad F_c = 0,45$$

Donc :

$$T_c = T_2 + F_c \times (T_1 - T_2) = 163 + 0,45 \times (288 - 163) = 219,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_c = 219,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_c = t_1 + F_c \times (t_2 - t_1) = 70 + 0,45 \times (132 - 70) = 97,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_c = 97,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Caractéristiques de l'huile à T_c

- La densité

$$d_T = d_{20^\circ\text{C}} - k \times (T_c - 20)$$

$$k = 0,001828 - 0,00132 \times d_{20^\circ\text{C}}$$

$$k = 0,001828 - 0,00132 \times 0,86$$

$$k = 0,0006928$$

$$d_{225,5} = 0,86 - 0,0006928 \times (219,25 - 20) = 0,7219$$

$$d_{225,5} = 0,7219$$

- La viscosité

On détermine la viscosité en appliquant la loi de GROSSE :

$$\log\left(\frac{\nu_T}{\nu_{T_1}}\right) = k \times \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad \text{tel que } T_1 < T_2$$

On détermine d'abord la constante K, pour cela il faut connaître la viscosité du brut à deux températures différentes :

$$\nu_2 = \frac{\mu_2}{\rho} = \frac{4,3 \times 10^{-4}}{6} = 6,507 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu_1 = \frac{\mu_1}{\rho} = \frac{1,4 \times 10^{-4}}{7} = 1,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{6,5 \times 10^{-7}}{1,9 \times 10^{-6}}\right)}{\ln\left(\frac{219}{163}\right)} = 1,884$$

$$\log(\nu_2) = \log(\nu_1) - k \times \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$\log(\nu_2) = \log(1,9 \times 10^{-6}) - 1,884 \times \log\left(\frac{219}{163}\right)$$

$$\nu_2 = 1,0869 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\mu_2 = \nu_2 \times \rho = 1,0869 \times 10^{-6} \times 721,9 = 7,8469 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

$$\mu_2 = 7,8469 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

- La conductivité thermique

D'après l'abaque (Figure 4.2) à la température moyenne on a :

$$\lambda_t = 0,119 \text{ J/s.m.}^\circ\text{C}$$

- La chaleur spécifique

D'après le graphe de la chaleur spécifique en fonction de la température et de la densité (figure 4.3), on détermine la chaleur spécifique à la température moyenne :

$$C_p = 3014,496 \text{ J/Kg.}^\circ\text{C}$$

- Caractéristiques du pétrole brut à t_c

- La densité

$$d_t = d_{20^\circ\text{C}} - k \times (t_c - 20)$$

$$k = 0,001828 - 0,00132 \times d_{20^\circ\text{C}}$$

$$k = 0,001828 - 0,00132 \times 0,784$$

$$k = 0,000793$$

$$d_{101} = 0,784 - 0,000793 \times (97,9 - 20) = 0,7222$$

$$d_{101} = 0,7222$$

- La viscosité

On détermine la viscosité en appliquant la loi de GROSSE :

$$\log\left(\frac{v_{t_2}}{v_{t_1}}\right) = k \times \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

Tel que $t_1 < t_2$

On détermine d'abord la constante K, pour cela il faut connaître la viscosité du brut à deux températures différentes :

$$v_7 = \frac{\mu_7}{\rho} = \frac{6,2 \times 10^{-4}}{6} = 9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$v_1 = \frac{\mu_1}{\rho} = \frac{5,6 \times 10^{-4}}{7} = 8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{v_{t_2}}{v_{t_1}}\right)}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{9,9 \times 10^{-7}}{8 \times 10^{-7}}\right)}{\ln\left(\frac{97}{7}\right)} = 0,185$$

$$\log(v_{9,9}) = \log(v_7) - k \times \log\left(\frac{t_c}{t_1}\right)$$

$$\log(v_{9,9}) = \log(9 \times 10^{-7}) - 0,185 \times \log\left(\frac{97,9}{7}\right)$$

$$v_{9,9} = 8,4584 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\mu_{9,9} = v_{9,9} \times \rho = 8,44584 \times 10^{-7} \times 722,2 = 6,1089 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

$$\mu_{9,9} = 6,1089 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

- La conductivité thermique

D'après l'abaque (Figure 4.2) à la température moyenne on a :

$$\lambda_c = 0,129 \text{ J/s.m.}^\circ\text{C}$$

- La chaleur spécifique

D'après le graphe de la chaleur spécifique en fonction de la température et de la densité (Figure 4.3), on détermine la chaleur spécifique à la température moyenne :

$$C_p = 2386,476 \text{ J/Kg.}^\circ\text{C}$$

4.3.3) Calcul de T_{lm}

Le mode d'écoulement est contre-courant

- Détermination des écarts de température

$$T_1 = T1 - t_2 = 288 - 132 = 156 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T2 - t_1 = 163 - 70 = 93 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Calcul de T_{lm}

$$T_{lm} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{(156 - 93)}{\ln(156/93)} = 121,796 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{lm} = 121,796 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.3.4) Correction de T_{lm}

Il faut introduire le facteur de correction, dans notre échangeur on a une passe côté calandre et six passes côté tube

$$T_{lm-corr} = F \times T_{lm}$$

$F = f(P, R)$ est obtenue à partir de l'abaque (Figure 4.4)

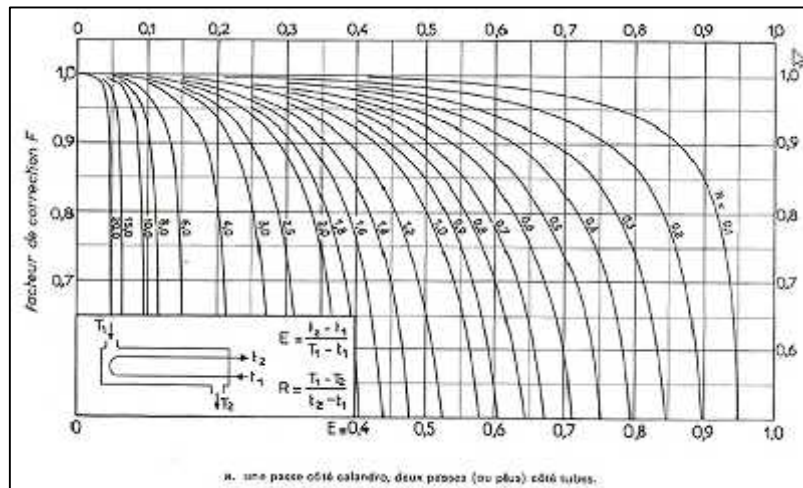


Figure 4.4 : facteur de correction $F = f(P, R)$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{1}{2} \frac{-7}{-7} = 0,284$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{2}{1} \frac{-1}{-7} = 2,016$$

Pour $P = 0,284$ et $R = 2,016$ le graphe (Fig.4.4) donne $F = 0,87$ donc :

$$T_{lm-corr} = F \times T_{lm} = 0,87 \times 121,796 = 106 \text{ °C}$$

$$T_{lm-corr} = 106 \text{ °C}$$

4.3.5) Calcul du coefficient de transfert propre

Le coefficient de transfert propre est déterminé par la formule :

$$U_p = \frac{h_c \times h_{iq}}{h_c + h_{iq}}$$

La détermination se fait par le calcul des deux coefficients d'échange par convection

➤ Coté tube (huile)

- Section passage coté tube

$$A_t = \frac{\pi \times d_t^2}{4} \times \frac{N_t}{N_p}$$

Avec :

d_t : Diamètre intérieur d'un tube.

N_t : Nombre des tubes.

N_p : Nombre de passes côté tube.

$$A_t = \frac{\pi \times 0,0^2}{4} \times \frac{5}{6} = 0,029945 \text{ m}^2$$

$$A_t = 0,029945 \text{ m}^2$$

- La vitesse massique

$$Gt = \frac{\dot{M}}{A_t}$$

Avec :

\dot{M} : Débit massique de l'huile.

$$Gt = \frac{3,7}{0,0} = 1327,7652 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$Gt = 1327,7652 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

-Nombre de Reynolds

On calcule le nombre de Reynolds pour déterminer la nature de régime d'écoulement

$$Re = \frac{d_i \times G_t}{\mu_t} = \frac{0,07 \times 1,7}{7,8 \times 10^{-4}} = 35604,91 \quad \boxed{Re = 35604,91}$$

35604,91 > 10000 donc le régime est turbulent.

- Coefficient de transfert à l'intérieur du tube

On a la formule suivante :

$$j_h = 0,027 \times Re^{0,8} = \left(\frac{h_i \times d_i}{\lambda_t} \right) \left(\frac{C_p \times \mu_t}{\lambda_t} \right)^{-1/3} \phi_t^{-1}$$

h_i : Coefficient de film interne.

ϕ_t : Fonction corrective pour le chauffage ou refroidissement coté tube.

$$\phi_t = \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{0,1}$$

j_h : Fonction de transfert pour l'huile, elle est déterminée d'après le nombre de Reynolds.

$$j_h = 0,027 \times Re^{0,8} = 0,027 \times 35604,91^{0,8} = 112,846$$

D'après la formule précédente on a :

$$\left(\frac{h_i}{\phi_t} \right) = j_h \left(\frac{\lambda_t}{d_i} \right) \left(\frac{C_p \mu_t}{\lambda_t} \right)^{1/3}$$

$$\left(\frac{h_i}{\phi_t} \right) = 112,846 \left(\frac{0,119}{0,01986} \right) \left(\frac{3014,496 \times 7,8469 \times 10^{-4}}{0,119} \right)^{1/3} = 1831,649 \text{ J/s. m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$\boxed{\left(\frac{h_i}{\phi_t} \right) = 1831,649 \text{ J/s. m}^2 \cdot \text{°C}}$$

On a aussi :

$$\left(\frac{h_{i0}}{\phi_t} \right) = \left(\frac{h_i}{\phi_t} \right) \times \left(\frac{d_i}{d_0} \right)$$

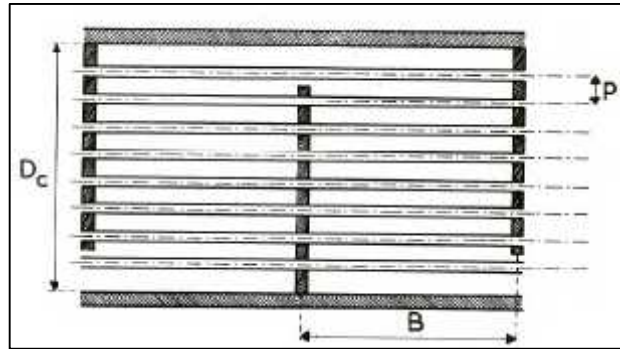
h_{i0} : Coefficient de film interne rapporté à la surface extérieure.

$$\frac{h_{i0}}{\phi_t} = 1831,649 \times \left(\frac{0,07}{0,0} \right) = 1432,147 \text{ J/s. m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$\boxed{\frac{h_{i0}}{\phi_t} = 1432,147 \text{ J/s. m}^2 \cdot \text{°C}}$$

➤ **Coté calandre (pétrole brut)**

- Section par calandre



Figur4.5 : Aire de passage entre deux chicanes.

Soit B, l'espacement des chicanes, P, le pas des tubes et D_i , le diamètre intérieur de la calandre. L'aire de passage entre deux chicanes varie selon l'arrangement des tubes. La disposition des tubes de l'échangeur EA4501 est carrée renversé.

Donc :

$$A_c = \sqrt{2} \times \frac{D_i}{P} \times (P - d_e) \times B$$

$$A_c = \sqrt{2} \times \frac{1,0}{0,0} \times (0,03175 - 0,0254) \times 0,273 = 0,0784 \text{ m}^2$$

$$A_c = 0,0784 \text{ m}^2$$

- La vitesse massique

$$G_c = \frac{\dot{m}}{A_c}$$

Avec :

\dot{m} : Débit massique du pétrole brut.

$$G_c = \frac{6,4}{0,0} = 808,6523 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$G_c = 808,6523 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

- Le diamètre équivalent

Kern tient compte de la géométrie du faisceau et définit un diamètre équivalent, fonction de la disposition des tubes. La disposition des tubes de l'échangeur EA4501 est carrée renversé.

Donc :

$$D_e = \frac{4 \times P^2}{\pi \times d_e} - d_e$$

$$D_e = \frac{4 \times 0.0}{\pi \times 0.0} - 0,0254 = 0,02513 \text{ m}$$

$$D_e = 0,02513 \text{ m}$$

-Nombre de Reynolds

On calcule le nombre de Reynolds pour déterminer la nature de régime d'écoulement

$$Re = \frac{D_e \times G_c}{\mu_c} = \frac{0.0 \times 8}{6.1 \times 10^{-4}} = 33265,25$$

$$Re = 33265,25$$

33265,25 > 10000 donc le régime est turbulent

- Coefficient de transfert à l'extérieur du tube

On a la formule suivante :

$$j_h = 0,027 \times Re^{0,8} = \left(\frac{h_0 \times D_e}{\lambda_c} \right) \left(\frac{c_p \times \mu_c}{\lambda_c} \right)^{-1/3} \phi_c^{-1}$$

h_0 : Coefficient de film externe.

ϕ_c : Fonction corrective pour le chauffage coté calandre.

$$\phi_c = \left(\frac{\mu_f}{\mu} \right)^{0,1}$$

j_h : Fonction de transfert pour le brut, elle est déterminée d'après le nombre de Reynolds.

$$j_h = 0,027 \times Re^{0,8} = 0,027 \times 33265,25^{0,8} = 111,9325$$

D'après la formule précédente on a :

$$\left(\frac{h_0}{\phi_c} \right) = j_h \left(\frac{\lambda_c}{D_e} \right) \left(\frac{c_p \mu_c}{\lambda_c} \right)^{1/3}$$

$$\left(\frac{h_0}{\phi_c} \right) = 111,9325 \left(\frac{0,129}{0,0251} \right) \left(\frac{2386,476 \times 6.1089 \times 10^{-4}}{0,129} \right)^{1/3} = 1289,428 \text{ J/s. m}^2. \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{h_0}{\phi_c} \right) = 1289,428 \text{ J/s. m}^2. \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Calcul de la température du tube

La température du tube est déterminée par la formule suivante :

$$t_t = T_c - \left[\frac{h_{it}/\phi_t}{h_o/\phi_c + h_{it}/\phi_t} \times (T_c - t_c) \right]$$

$$t_t = 219,5 - \left[\frac{1432,147}{1289,428 + 1432,147} \times (219,5 - 97,5) \right] = 144.73 \text{ °C}$$

$$t_t = 144.73 \text{ °C}$$

- La viscosité de l'huile à la température du tube :

D'après la loi de grosse :

$$\log\left(\frac{\nu_{T_1}}{\nu_{T_2}}\right) = k \times \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$\log \nu_{1,7} = k \times \log\left(\frac{T_1}{t_t}\right) + \log \nu_1 = 1,884 \times \log\left(\frac{163}{144.73}\right) + \log(1.9 \times 10^{-6})$$

$$\nu_{1,7} = 2,3770 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Pour déterminer la viscosité dynamique il faut d'abord déterminer la densité à la température du tube :

$$d_t = d_{20^\circ\text{C}} - k \times (t_t - 20)$$

$$d_{1,7} = 0,86 - 0,0006928 \times (144.73 - 20) = 0,7736$$

Donc :

$$\mu_{1,4} = \nu_{1,4} \times \rho = 2,3770 \times 10^{-6} \times 773,6 = 1,839 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$\mu_{1,7} = 1,839 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

- La viscosité du pétrole brut à la température du tube :

D'après la loi de grosse :

$$\log\left(\frac{\nu_{T_1}}{\nu_{T_2}}\right) = k \times \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$\log \nu_{1,7} = k \times \log\left(\frac{T_2}{t_t}\right) + \log \nu_7 = 0,185 \times \log\left(\frac{70}{144.73}\right) + \log(9 \times 10^{-7})$$

$$\nu_{1,7} = 7,8683 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Pour déterminer la viscosité dynamique il faut d'abord déterminer la densité à la température du tube :

$$d_t = d_{20^\circ\text{C}} - k \times (t_t - 20)$$

$$d_{1.7} = 0,784 - 0,000793 \times (144,73 - 20) = 0,6851$$

Donc :

$$\dot{\mu}_{1.7} = v_{1.7} \times \rho = 7,8683 \times 10^{-7} \times 685,1 = 5,39 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

$$\dot{\mu}_{1.7} = 5,39 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

- Calcul des fonctions de correction et détermination de h_{t} et h_{c}

Coté tube

$$\phi_{\text{t}} = \left(\frac{\mu_{\text{t}}}{\mu} \right)^{0,1} = \left(\frac{7,8469 \times 10^{-4}}{1,839 \times 10^{-3}} \right)^{0,1} = 0,88$$

Alors :

$$h_{\text{t}} = \frac{h_{\text{t0}}}{\phi_{\text{t}}} \times \phi_{\text{t}} = 1432,147 \times 0,88 = 1271,187 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

$$h_{\text{t}} = 1271,187 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

Coté calandre

$$\phi_{\text{c}} = \left(\frac{\mu_{\text{c}}}{\mu} \right)^{0,1} = \left(\frac{6,1089 \times 10^{-4}}{5,39 \times 10^{-4}} \right)^{0,1} = 1,02$$

Alors :

$$h_{\text{c}} = \frac{h_{\text{c0}}}{\phi_{\text{c}}} \times \phi_{\text{c}} = 1289,428 \times 1,02 = 1312,211 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

$$h_{\text{c}} = 1312,211 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

➤ Le coefficient de transfert propre

$$U_{\text{p}} = \frac{h_{\text{c}} \times h_{\text{t}}}{h_{\text{c}} + h_{\text{t}}}$$

$$U_{\text{p}} = \frac{h_{\text{c}} \times h_{\text{t}}}{h_{\text{c}} + h_{\text{t}}} = \frac{1312,211 \times 1271,187}{1312,211 + 1271,187} = 645,6866 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

$$U_{\text{p}} = 645,6866 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

4.3.6) Le flux échangé

$$Q = \dot{m} \times c_p \times (t_2 - t_1)$$

$$Q = 39,76 \times 2340,84 \times (288 - 163) = 11652701,76 \text{ J/s}$$

$$Q = 11652701,76 \text{ J/s}$$

4.3.7) Calcul de la résistance d'encrassement

$$R_s = \frac{U_p - U_s}{U_p \cdot U_s}$$

- calcul de coefficient de transfert sale

$$U_s = \frac{Q}{N_t \times \pi \times d_o \times L \times (t_2 - t_1)} = \frac{11652701,76}{5 \times \pi \times 0,073 \times (288 - 163)} = 554,7691 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

$$U_s = 554,7691 \text{ J/s.m}^2.\text{°C}$$

- détermination de la résistance d'encrassement

$$R_s = \frac{U_p - U_s}{U_p \cdot U_s} = \frac{6,6 - 5,7}{6,6 \times 5,7} = 2,54 \times 10^{-4} \text{ s.m}^2.\text{°C/J}$$

$$R_s = 2,54 \times 10^{-4} \text{ °C.m}^2.\text{s/J}$$

4.3.8) Calcul des pertes de charge

- Coté tube

$$\Delta P_t = \frac{N_p \times N_c \times G_t^2}{1,271 \times 10^1 \times d_t} \left[\frac{f_t \times L}{d_i \times \phi_t} + 2 \right]$$

Avec :

- N_p, N_c : Nombre de passe coté tube et coté calandre respectivement.
- G_t : Vitesse massique en (Kg/h.m²)
- d_t : densité de l'huile chaude
- f_t : Coefficient de friction

La valeur du coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds en régime turbulent est donnée par l'expression suivante :

$$f_t = 0,0028 + 0,25 \times R_e^{-0,3}$$

$$f_t = 0,0028 + 0,25 \times 33395,07215^{-0,32} = 0,0117$$

$$\Delta P_t = \frac{6 \times 1 \times 4}{1,2 \times 1^3 \times 0,8} \left[\frac{0,0 \times 7,3}{0,0 \times 0,8} + 2 \right] = 0,87 \text{ Kg/cm}^2$$

$\Delta P_t = 0,87 \text{ kg/cm}^2$

- Coté calandre

$$\Delta P_c = \frac{N_c \times f_c \times G_c^2 \times (N_c + 1) \times D_i}{1,271 \times 10^1 \times d \times D_e \times \phi_c}$$

Avec :

- N_c : Nombre de chicane transversale
- D_i : Diamètre intérieur de la calandre
- D_e : Diamètre équivalent de la calandre
- f_c : Coefficient de friction

La valeur du coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds en régime turbulent est déterminée à partir de l'abaque (figure 4.6) :

$$f_c = 0,09$$

$$\Delta P_c = \frac{1 \times 0,0 \times 2}{1,2 \times 1^3 \times 0,7} \frac{0,2^2 \times (2 + 1) \times 1,0}{\times 0,0 \times 1,0} = 0,7848 \text{ Kg/cm}^2$$

$\Delta P_c = 0,7848 \text{ kg/cm}^2$

4.3.9) Calcul de l'efficacité de transfert de chaleur

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_m}$$

Avec:

- Q : Puissance réelle

$$Q = \dot{m} \times c_p \times (t_2 - t_1) = 39,76 \times 2340,84 \times (288 - 163) = 11652701,76 \text{ J/s}$$

- Q_m : Puissance maximal possible

$$Q_m = q_m \times \Delta t_m$$

$$q_b = c_p \times \dot{m} = 2847,024 \times 63,44 = 180615,2026 \text{ J/s.}^\circ\text{C}$$

$$q_{nu} = C_p \times \dot{M} = 2344,608 \times 39,76 = 93221,61 \text{ J/s.}^\circ\text{C}$$

Donc :

$$q_m = q_{nu} = 93221,61 \text{ J/s.}^\circ\text{C}$$

$$q_m = 93221,61 \text{ J/s.}^\circ\text{C}$$

Alors :

$$Q_m = q_m \times \Delta t_m = q_m \times (T_1 - t_1) = 93221,61 \times (288 - 70) = 20322310,98 \text{ J/s}$$

$$Q_m = 20322310,98 \text{ J/s}$$

On aura:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_m} = \frac{1}{2} \frac{,7}{,9} = 0,5724 = 57,24\%$$

$$\varepsilon = 57,24\%$$

4.3.10) Résultats de calcul

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.3 : résultats de calcul

Paramètre	Cas design	Cas calculé
Résistance d'encrassement ($^\circ\text{C.m}^2.\text{s/J}$)	0,00034	0,000254
Perte de charge côté tube (kg/cm^2)	1	0,87
Perte de charge côté calandre (kg/cm^2)	1	0,7848
Coefficient de transfert global ($\text{J/s.m}^2.\text{}^\circ\text{C}$)	533,1282	
Efficacité	57,24%	

4.4) Suivi 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 en exploitant les paramètres de marche enregistrée avant l'entretien, pour voir l'influence de l'encrassement sur les performances de l'échangeur de chaleur EA4501.

Tableau 4.4 : performances thermiques de l'échangeur dans le temps

t ₁	t ₂	T ₁	T ₂	T _{lm}	h _{io}	h _o	U _s	Rs
70	132	288	163	106	1271,187	1312,211	554,7691	0,000254
95	132	180	140	43,23	1004,198	1369,246	297,4762	0,001635
87	130	201	160	67,67	1109,309	1360,089	262,3671	0,002175
83	123	183	151	60,72	1041,937	1348,095	220,1324	0,002841
64	103	204	184	109,12	1000,795	1282,055	141,1105	0,005307

La meilleure façon pour analyser et interpréter nos résultats obtenus est de les représenter graphiquement.

Figure 4.7 : Variation de la résistance d'encrassement dans le temps.

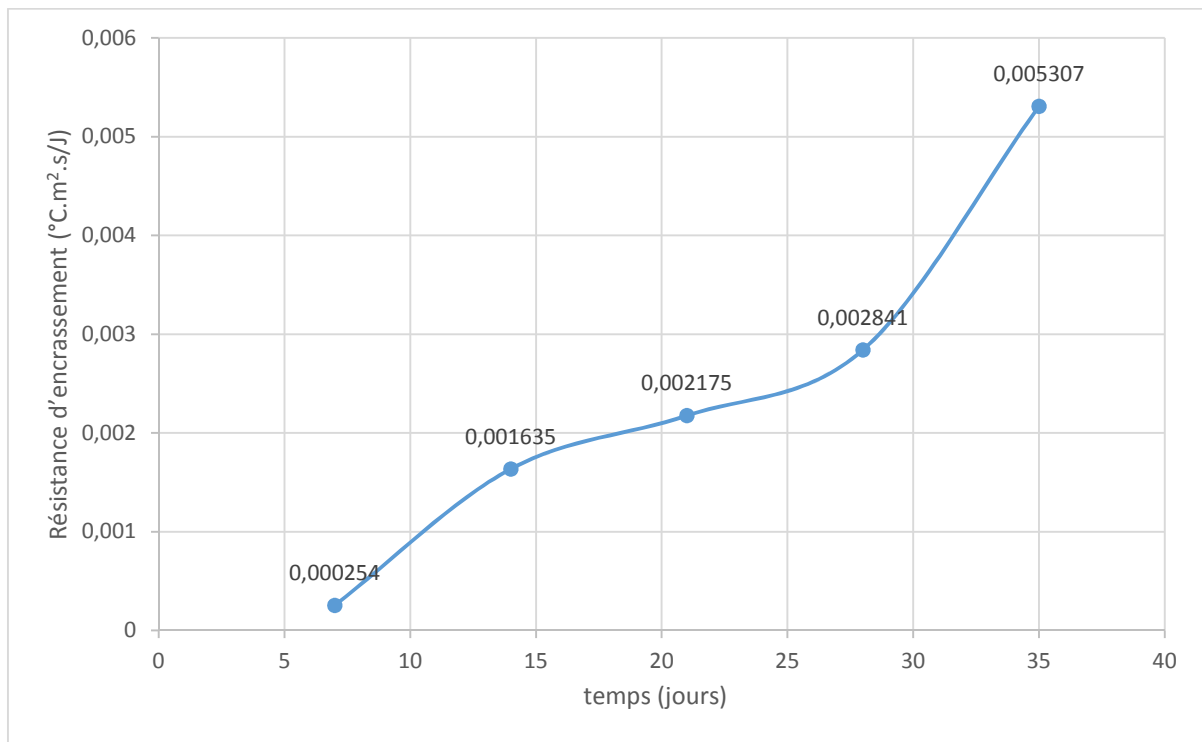


Figure 4.8 : Evolution du coefficient d'échange global dans le temps.

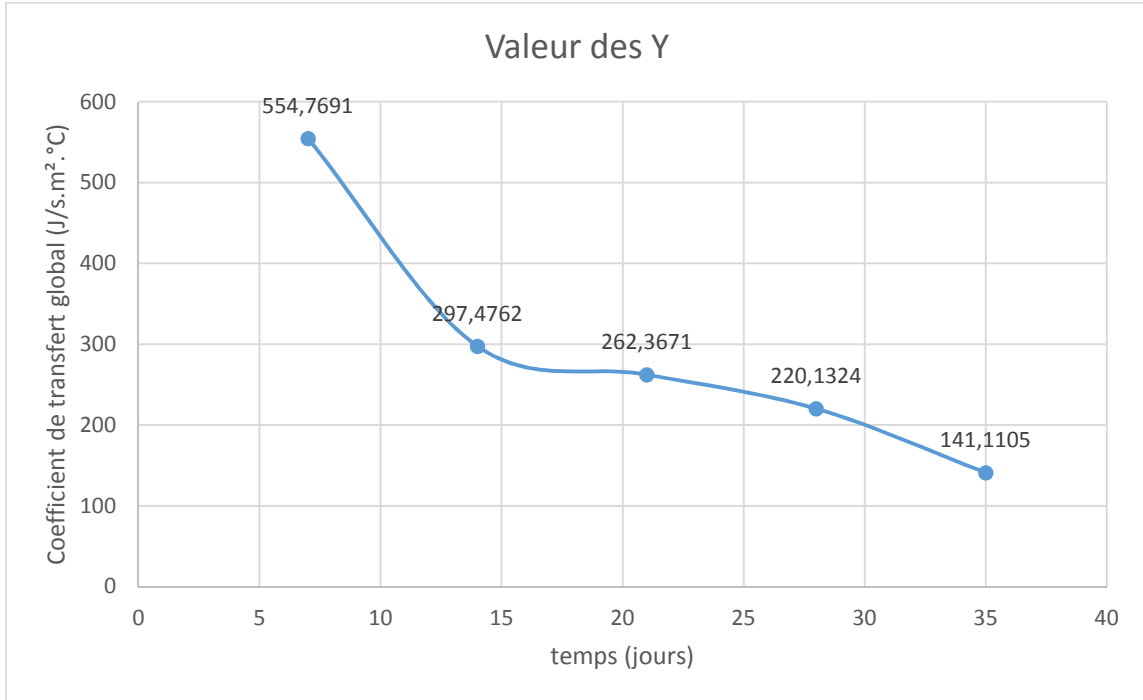
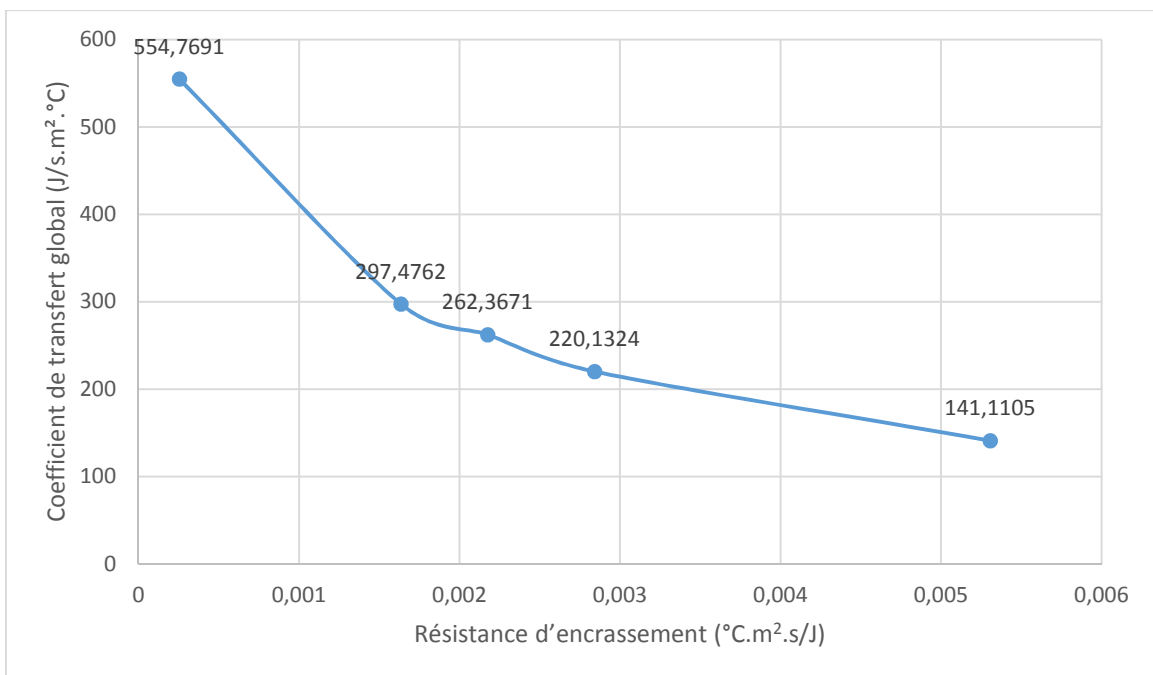


Figure 4.9 : Evolution du coefficient d'échange global en fonction de la résistance d'encrassement.



4.5) Interprétation des résultats :

Dans le calcul de vérification, après l'entretien, on remarque que l'encrassement calculé est bien inférieur à l'encrassement admissible, les pertes de charges calculées sont inférieures aux pertes de charges admissibles et la température de sortie du pétrole brut est conforme aux exigences de procédé. Donc notre échangeur de chaleur satisfait bien les performances thermiques prévus par le désigne.

Et pour le suivie des performances avant l'entretien :

La figure 4.8 montre bien qu'une réduction du coefficient d'échange total a eu lieu lors de la durée de service de l'échangeur de chaleur. Cette réduction atteint son minimum à 141,1105 J/s.m².°C pour le coefficient d'échange. D'autre part, les figures 4.7 et 4.9 montrent une augmentation de la résistance d'encrassement au fur et à mesure de la diminution du coefficient d'échange global. Cette augmentation de la résistance d'encrassement reflète la présence d'un dépôt qui est le sel faisant ainsi une résistance au transfert de chaleur et par conséquent réduction des performances thermiques de l'échangeur.

5.1) But de calcul mécanique

Le calcul mécanique d'un échangeur de chaleur à faisceau et calandre à tête flottante, a pour but la vérification de la résistance de l'appareil aux charges provoquées par les pressions.

5.2) Détermination des pressions et des températures de calcul

La pression de calcul est la valeur la plus grande des deux valeurs calculées d'après la formule suivante :

$$P_c = \max (P_s+1 ; P_s+10\% P_s).$$

- La pression de calcul de la calandre

$$P_{cc} = P_s + 1 = 2,3 + 1 = 3,3 \text{ Bar}$$

- La pression de calcul coté tube

$$P_{ct} = P_s + 1 = 5 + 1 = 6 \text{ Bar}$$

Les températures de calcul sont données par le constructeur.

Tableau 5.1 : Les données de calcul.

	Coté calandre	Coté tube
Pression de service (MPa)	$P_{s,c} = 0,23$	$P_{s,t} = 0,23$
Température de service (°C)	70/132	288/163
Pression de calcul (MPa)	$P_{c,c} = 0,33$	$P_{c,t} = 0,23$
Température de calcul (°C)	200	315

5.3) Caractéristiques mécaniques des éléments d'échangeur de chaleur d'après les normes ASTM

Tableau 5.2 : Les caractéristiques mécaniques à la température ambiante.

Les éléments	Matériaux	r (MPa)	e (MPa)	ΔL (%)
Plaque tubulaire	A105	485	205	22
Tube	A179	325	180	35
Calandre	A515 Gr60	415-550	220	25

σ_r : Limite de résistance à la rupture.

σ_e : Limite d'élasticité.

ΔL : L'allongement.

5.4) Calcul des contraintes admissibles à la traction

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_e^t}{n_e} ; \frac{\sigma_r^t}{n_r} \right\}$$

σ_r^t : Résistance à la rupture à la température de calcul. Avec $\sigma_r^t = k \times \sigma_r^Z$

σ_e^t : La limite d'élasticité à la température de calcul. Avec $\sigma_e^t = k \times \sigma_e^Z$

n_r, n_e : Coefficients de sécurité d'après les normes français $n_r = 3$; $n_e = 1,5$

5.4.1) Pour la calandre (acier A515 Gr60)

D'après le graphe (Figure 5.1) de comportement des aciers $k = 0,89$

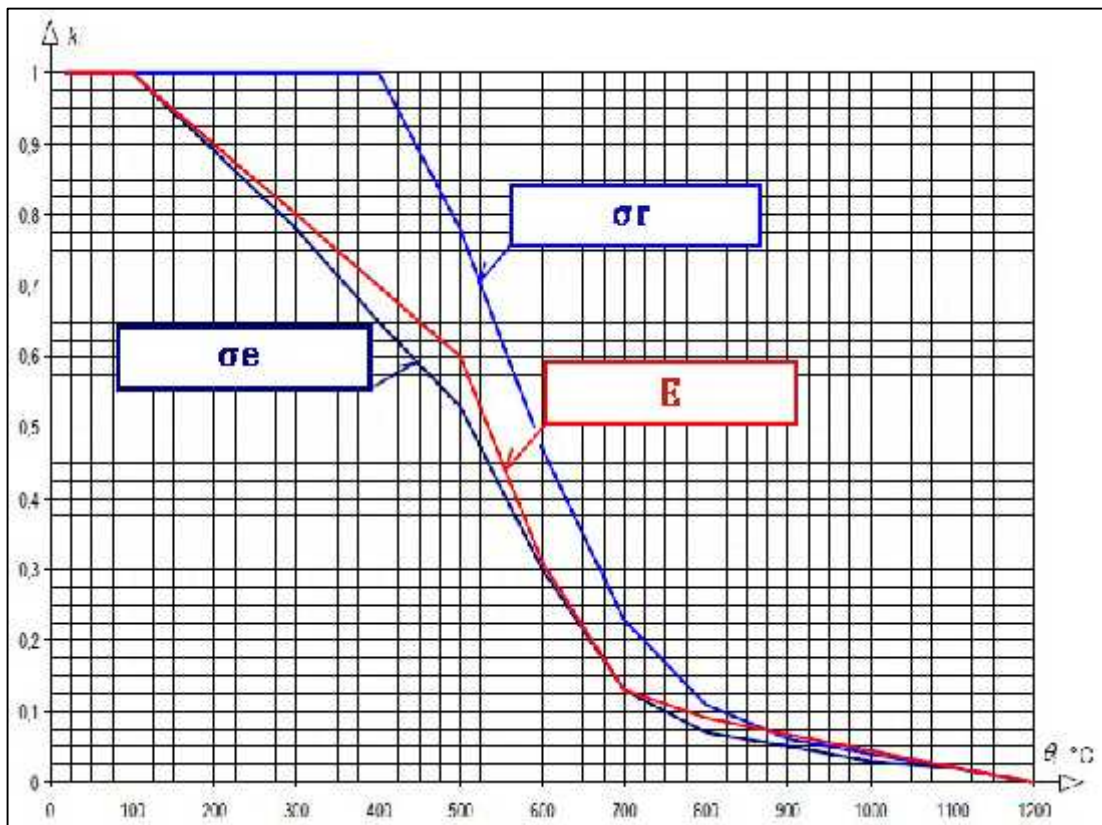


Figure 5.1 : coefficients de réduction des caractéristiques mécaniques de l'acier en fonction de la température.

$$\sigma_e^t = k \times \sigma_e^Z = 0,89 \times 220 = 195,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r^t = k \times \sigma_r^Z = 0,89 \times 415 = 369,35 \text{ MPa}$$

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{1,8}{1,5}, \frac{3,3}{3} \right\} = \min \{ 130,54 ; 123,12 \}$$

Donc pour la calandre

$$[\sigma] = 123,12 \text{ MPa}$$

5.4.2) Pour les tubes (acier A179)

D'après le graphe (Figure 4.1) de comportement des aciers $k = 0,762$

$$\sigma_e^t = k \times \sigma_e^2 = 0,762 \times 180 = 137,16 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r^t = k \times \sigma_r^2 = 0,762 \times 325 = 247,65 \text{ MPa}$$

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{1,1}{1,5}, \frac{2,6}{3} \right\} = \min \{ 91,44 ; 82,55 \}$$

Donc pour les tubes

$$[\sigma] = 82,55 \text{ MPa}$$

5.4.3) Pour la plaque tubulaire (acier A105)

D'après le graphe (Figure 4.1) de comportement des aciers $k = 0,99$

$$\sigma_e^t = 0,99 \times 205 = 202,95 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r^t = 0,99 \times 485 = 480,15 \text{ MPa}$$

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{2,9}{1,5}, \frac{4,1}{3} \right\} = \min \{ 135,3 ; 160,05 \}$$

Donc pour les tubes

$$[\sigma] = 135,3 \text{ MPa}$$

5.5) Vérification des épaisseurs

5.5.1) Calcul de l'épaisseur de la calandre

$$e = \frac{P_{c,e} \times D_i}{2 \times \beta \times [\sigma] - P_{c,e}} + c$$

e : épaisseur de calandre.

$P_{c,e}$: pression de calcul coté calandre.

D_i : diamètre intérieur de la calandre.

β : coefficient de soudure. ($\beta = 0,8$)

C : addition supplémentaire ($C = 5 \text{ mm}$)

$$e = \frac{P_{c,e} \times D_i}{2 \times \beta \times [\sigma] - P_{c,e}} + c = \frac{0,3 \times 1}{2 \times 0,8 \times 123,12 - 0,3} + 5 = 6,7 \text{ mm}$$

$$e = 6,7 \text{ mm}$$

On a l'épaisseur de la calandre d'après le constructeur est : 13mm

Alors notre calcul est vérifié.

5.5.2) Calcul de l'épaisseur de la paroi de tube

$$e = \frac{P_{c,t} \times d}{2 \times \beta \times [\sigma] + P_{c,t}} + c$$

d_{ext} : diamètre extérieur de tube.

c : surépaisseur de corrosion.

$$e = \frac{P_{c,t} \times d}{2 \times \beta \times [\sigma] + P_{c,t}} + c = \frac{0,6 \times 2,4}{2 \times 1 \times 8,5 + 0,5} + 3 = 3,09 \text{ mm}$$

$e = 3,09 \text{ mm}$

On a l'épaisseur de la plaque d'après le constructeur est : 6,4 mm

Alors notre calcul est vérifié.

5.6) Calcul de la plaque tubulaire fixe à la flexion

La plaque tubulaire est un couvercle plat sollicitée à la flexion elle est en acier A105.

On a:

$$\sigma_f \leq \Psi[\sigma]_{fl}$$

$$\sigma_f = \frac{5 \times D_i^2 \times P_{c,t}}{1 \times e^3} \leq \Psi[\sigma]_{fl}$$

Avec : $[\sigma]_{fl} = \dots$

= 1,2 acier au carbone.

f : résistance pratique à la flexion du matériau de la plaque.

e : épaisseur de la plaque tubulaire.

$P_{c,t}$: pression coté tube.

D_i : diamètre intérieure de la calandre.

$[\sigma]$: contrainte admissible = 135,3 MPa.

$[\sigma]_{fl}$: contrainte admissible à la flexion.

Ψ : coefficient de diminution de résistance du à la perforation de la plaque

$$\Psi = \frac{t-d}{t} = \frac{3,7 - 2,2}{3,7} = 0,17$$

t : le pas des tubes.

\ddot{d} : diamètre de logement.

Alors :

$$[\sigma]_{fr} = [\sigma] = 1,2 \times 135,3 = 162,36 \text{ MPa}$$

$$\text{Et : } e = \sqrt{\frac{5 \times D_t^2 \times P_{c,t}}{1 \times \Psi \times [\sigma]_{fr}}}$$

$$e = \sqrt{\frac{5 \times 1^2 \times 0,6}{1 \times 0,1 \times 162,36}} = 83,74 \text{ mm}$$

$e = 83,74 \text{ mm}$

On a l'épaisseur de la plaque d'après le constructeur est : 90 mm

Alors notre calcul est vérifié.

Résultats de calcul

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant

Paramètres	Calandre	La plaque tubulaire	Les tubes
Les épaisseurs Calculées (mm)	6,7	83,74	3,09
Les épaisseurs Données par le constructeur (mm)	13	90	6,4

4.7) Conclusion

Les calculs de vérification mécanique nous ont permis d'évaluer l'épaisseur de la calandre, l'épaisseur des tubes ainsi que l'épaisseur de la plaque tubulaire. Les résultats obtenus sont positifs étant donné que les valeurs du constructeur sont supérieures à nos valeurs calculées car le constructeur a dû ajouter un coefficient de sécurité.

Conclusion générale

Cette mise en situation professionnelle au sein de SONATRACH DP-REB (Rhourd EL Baguel) été très intéressante. Ce stage nous a permis d'acquérir un savoir-faire technique, d'élargir nos connaissances dans le domaine pétrolier et de nous familiariser avec les installations de traitement de pétrole et du gaz.

Notre étude durant le stage a été sur l'échangeur de chaleur tubulaire à calandre (EA4501), on a pu comprendre son fonctionnement, son rôle important dans l'installation de stabilisation et voir les différents éléments qu'ils le constituent

L'un des problèmes existant dans notre échangeur est l'encrassement, si on ne prend pas en compte le phénomène d'encrassement, il y'aura une augmentation des pertes énergétiques et des frais de nettoyage élevé. Mais s'il est pris à temps, peut être nettoyé à moindre coût.

En effet, l'une des méthodes classiques utilisées le plus couramment pour détecter l'encrassement repose sur la mesure de la variation de l'efficacité de l'échangeur à travers le coefficient de transfert de chaleur.

D'après les résultats de calculs de vérification thermique qu'on a réalisé, on a pu voir l'évolution de la résistance d'encrassement, qui entraîne une diminution remarquable du coefficient de transfert résultant un mal fonctionnement de l'échangeur, pour cela le service maintenance a recouru au nettoyage de l'échangeur et le changement des tubes.

Les calculs nous ont permis aussi d'évaluer la résistance d'encrassement, le coefficient de transfert et les pertes de charge après le nettoyage. Les résultats obtenus sont positifs ce qui montre l'efficacité de l'entretien effectué.

Le fait de pouvoir détecter l'encrassement permettrait de mettre en place un système de nettoyage effectué au meilleur moment, ce qui pourrait minimiser les pertes d'énergie et les coûts dus à un nettoyage trop récurrent ou trop tardif.

D'après le calcul mécanique l'échangeur est stable et toutes les épaisseurs de la calandre, les tubes et la plaque tubulaire résistent aux conditions de service.

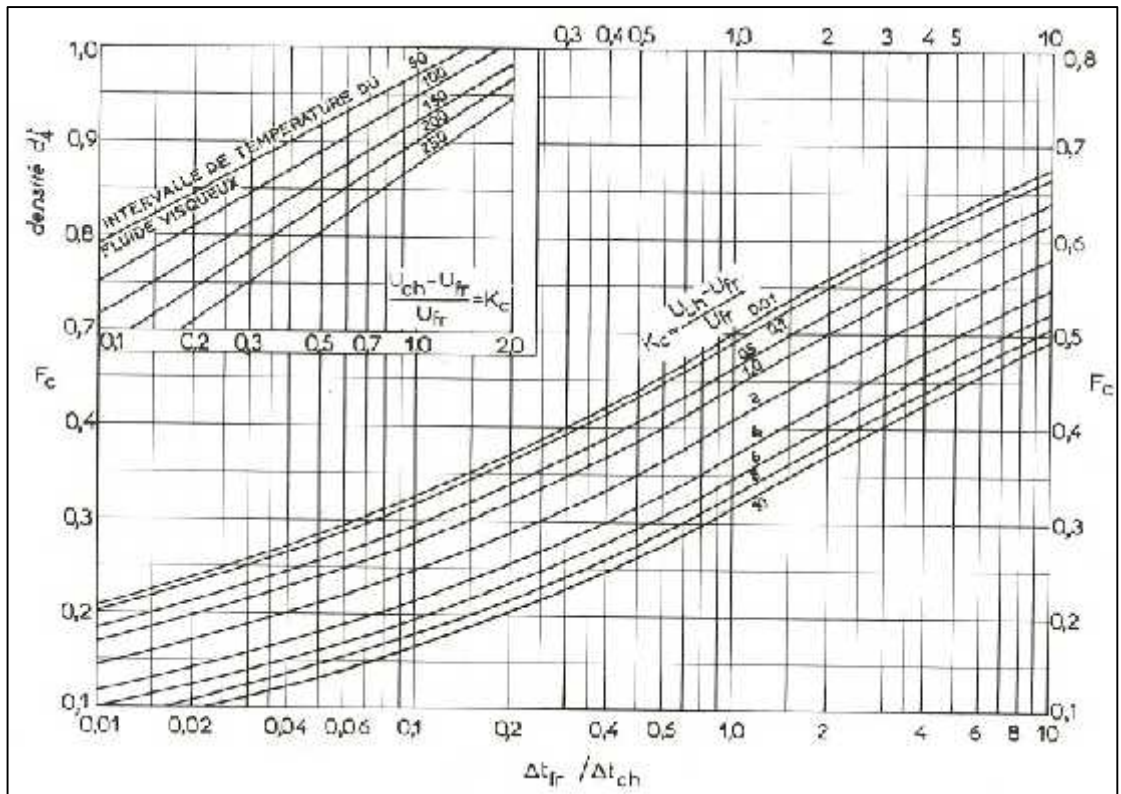


Figure 4.1 : Détermination des températures caloriques.

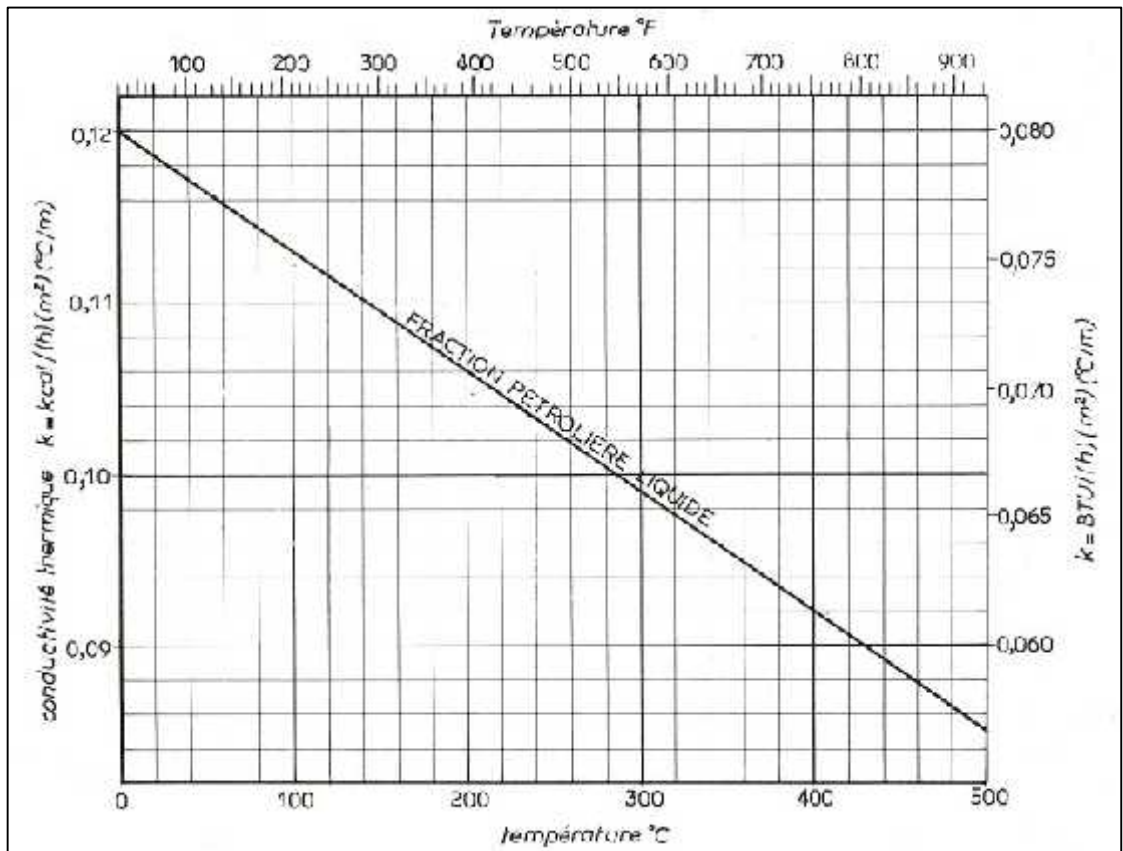


Figure 4.2 : Conductivité thermique des hydrocarbures liquides.

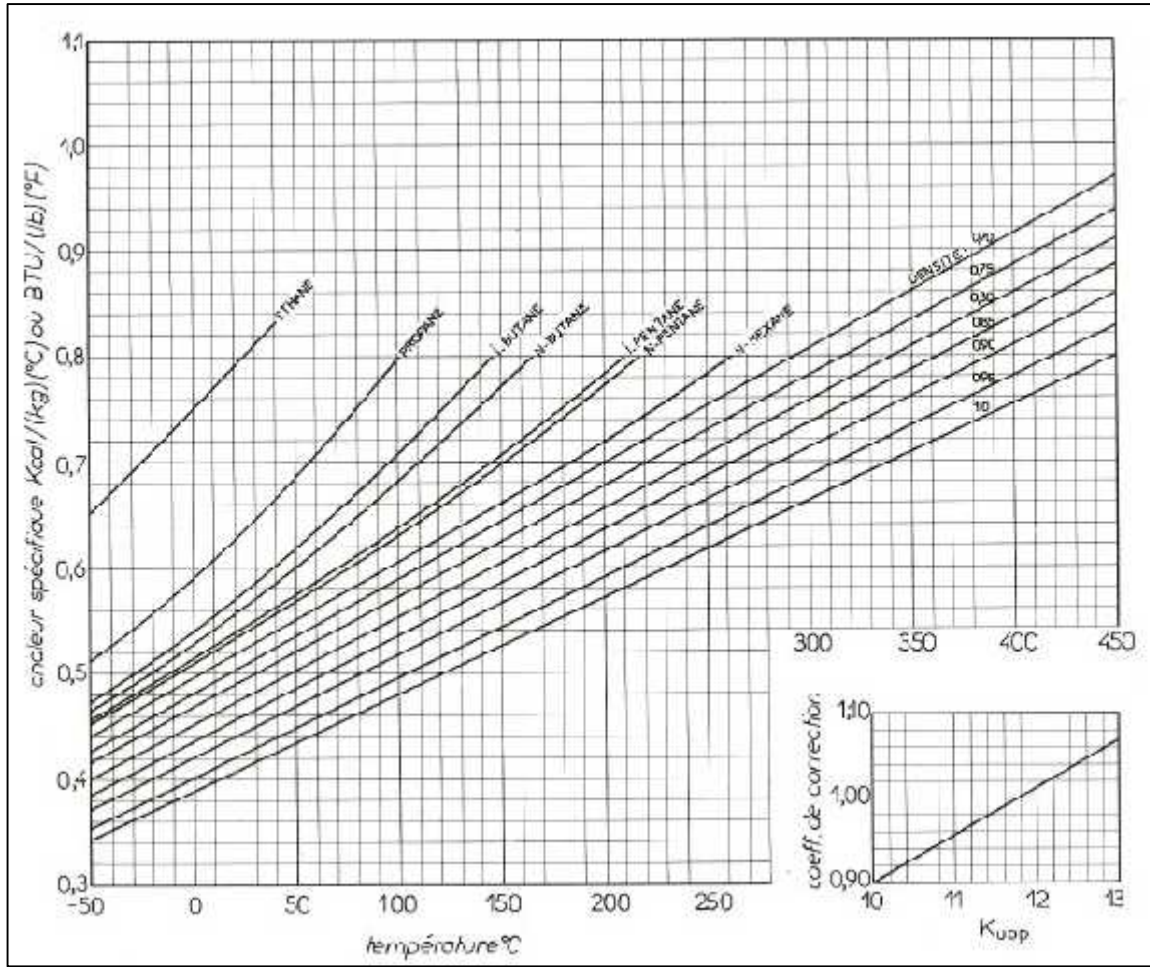


Figure 4.3 : Chaleur spécifique des hydrocarbures et fractions pétrolières liquides.

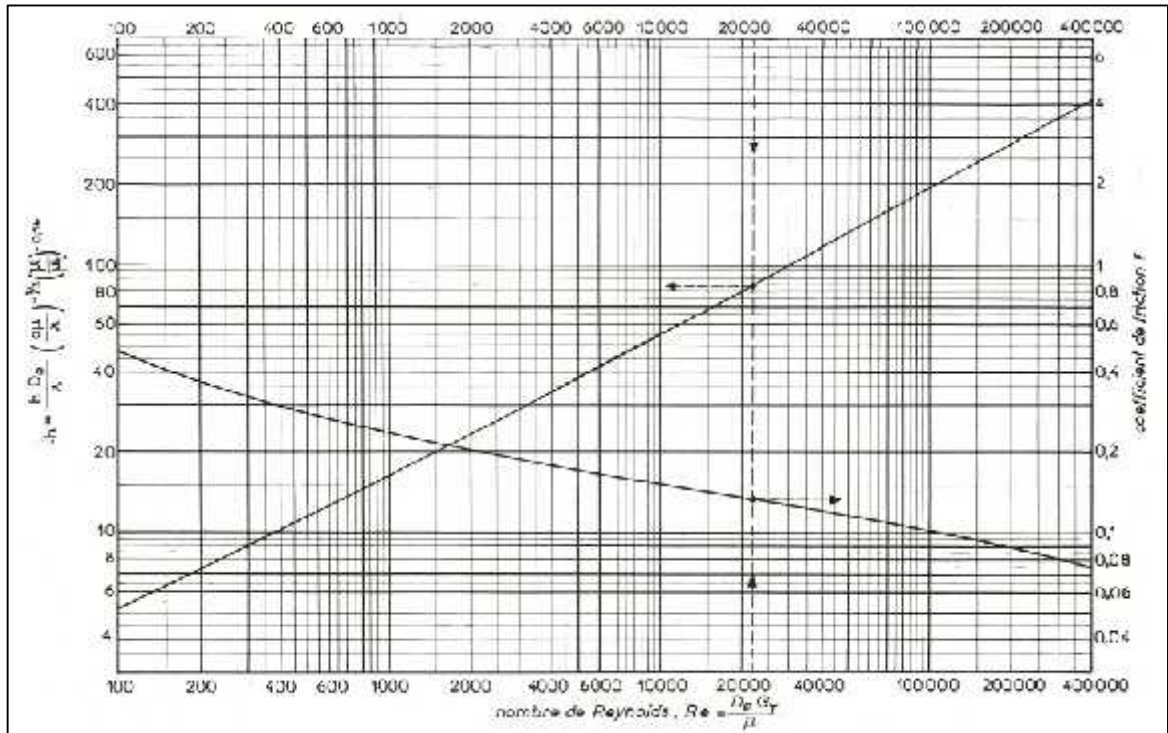


Figure 4.6 : Coefficient de transfert et coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds à l'extérieur des tubes.

Références bibliographiques

1. A. Benbrik. Cours Echangeur de chaleur, polycopié, Boumerdès.
2. Techniques de l'Ingénieur, Echangeurs de chaleur.
3. Kuppan Thulukkanam. *Heat Exchanger Design Handbook*. Second edition. New York. 2013.
4. P.Wuither. *Le Pétrole Raffinage et Génie Chimique*. Deuxième édition. Paris. 1972.
5. Zemmour. Cours équipements des unités pétrochimiques.
6. Documentation au niveau de division production REB.
7. Pierre Trambouze. *Le Raffinage du Pétrole, Matériels et équipements*. Paris. 1999.
8. Normes ASTM Standards. Trouvay and Cauvin – Pinping Equipment. 2001.