

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 Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Hydrocarbure

**Option** : Génie mécanique-Mécanique des unités pétrochimiques

Présenté par :

BENZAID Salh Eddine.

BETTA Amazigh.

THEME

**Analyse de l'encrassement des échangeurs de chaleur de l'unité de reforming catalytique  
U100 de la raffinerie RA1K de Skikda**

Soutenu publiquement le 22 / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Président de jury	KHELIFI TOUHAMI M.S	MCA	UMBB
Examinateur	YAHY Fatima	MCB	UMBB
Examinateur	HALOUANE Yacine	MCA	UMBB
Encadreur	HARKAT Yamina	MAA	UMBB

Boumerdes 2024

## Remerciement

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement DE Madame **Harkat Yamina**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Notre remerciement s'adresse également à tout nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

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

## Dédicace

*Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie*

*À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, maman.*

*À celui qui m'a fait un homme, ma source de vie, d'amour et d'affection, à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon prince, papa.*

**BETTA AMAZIGH**

*Je voudrais dédier cet humble travail :*

*À mes très chers parents qui m'ont*

*Toujours soutenus et qui ont sacrifiés leurs vies*

*Afin de faire de moi ce que je suis. Que dieu les*

*Protège*

*A mes adorables frères, sœurs pour leur patience*

*A toute ma grande famille, pour leurs soutient et*

*encouragements.*

*A mes amis et tous les gens qui m'aiment.*

*A toutes les personnes qui me connaissent*

*de près ou de loin, Seulement pour leur existence*

*A tous ceux qui sont proches de mon*

*cœur et dont*

*Je n'ai pas cité le nom.*

***BENZAID SALH EDDINE***

## Résumé :

Dans les sociétés pétrolières, l'échangeur de chaleur joue un rôle crucial dans la gestion de l'énergie, la politique de maintenance pour ces équipements est primordial surtout pour remédier le phénomène de l'encrassement qui a des effets néfastes sur le fonctionnement des échangeurs, la production et l'environnement. L'objectif de cette étude est d'analyser le phénomène d'encrassement, ses différentes formes et leur influence sur les performances des échangeurs de chaleur à tubes et calandres, à travers le calcul des performances des échangeurs, de la résistance d'encrassement dans trois cas différents de fonctionnement. Enfin, nous proposons des solutions pour prolonger la durée de fonctionnement des échangeurs et diminuer les effets négatifs de l'encrassement.

**Mots clé :** Echangeur chaleur, performance thermique, encrassement, perte charge.

## ملخص :

في شركات النفط، يلعب المبادل الحراري دورًا حاسمًا في إدارة الطاقة، وتعد سياسة الصيانة لهذه المعدات ضرورية، خاصة لمعالجة ظاهرة القاذورات التي لها آثار ضارة على المبادلات والإنتاج والبيئة. الهدف من هذه الدراسة هو تحليل ظاهرة التلوث وأشكاله المختلفة وتأثيرها على أداء المبادلات الحرارية الأنبوبية والصدفية من خلال حساب أداء المبادل ومقاومة التلوث في ثلاث حالات تشغيل مختلفة. وأخيرًا، نقترح حلولًا لإطالة العمر التشغيلي للمبادلات الحرارية وتقليل الآثار السلبية للقاذورات.

**الكلمات المفتاحية:** المبادل الحراري، الأداء الحراري، التلوث، فقدان الضغط.

## Abstract :

In oil companies, the heat exchanger plays a crucial role in energy management. The maintenance policy for this equipment is essential, especially to remedy the phenomenon of fouling, which has harmful effects on the exchangers, production and the environment. The aim of this study is to analyse the phenomenon of fouling, its various forms and their influence on the performance of tube and shell heat exchangers, by calculating exchanger performance and fouling resistance in three different operating cases. Finally, we propose solutions for extending the operating life of heat exchangers and reducing the negative effects of fouling.

**Key words :** heat exchanger, thermal performance, fouling, Head losses

## Nomenclature

- T1** : Température d'entrée côté calandre [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- T2** : Température de sortie côté calandre [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- t1** : Température d'entrée côté tube [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- t2** : Température de sortie côté tube [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- A** : Surface d'échange [ $\text{m}^2$ ].
- m** : Débit massique du fluide côté calandre et côté tube [ $\text{kg/s}$ ].
- C<sub>pt</sub>**: Chaleur spécifique côté tube [ $\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ].
- C<sub>pc</sub>**: Chaleur spécifique côté calandre [ $\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ].
- $\mu_t$**  : Viscosité dynamique côté tube [ $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ].
- $\mu_c$**  : Viscosité dynamique côté calandre [ $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ].
- $\lambda_t$**  : Conductivité thermique côté tube [ $\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ].
- $\lambda_c$**  : Conductivité thermique côté calandre [ $\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ].
- U<sub>s</sub>** : coefficient transfert sale [ $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ].
- U<sub>p</sub>** : coefficient de transfert propre [ $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ].
- $\Delta\text{TLM}$**  : Différence de température logarithmique moyenne [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- F** : Facteur de correction.
- N<sub>u</sub>**: Nombre de Nusselt.
- P<sub>r</sub>**: Nombre de Prandtl.
- R<sub>et</sub>**: Nombre de Reynolds côté tubes.
- R<sub>ec</sub>** : Nombre de Reynolds côté calandre.
- G<sub>t</sub>**: vitesse massique côté tubes [ $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ ].
- G<sub>c</sub>**: vitesse massique côté calandre [ $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ ].
- L** : La longueur du tube [ $\text{m}$ ].
- N<sub>t</sub>** : Nombre de tube.
- nt** : Nombre de passe côté tube.
- nc** : Nombre de passe côté calandre.
- P** : Le pas [ $\text{m}$ ].
- Q** : Quantité de chaleur. [ $\text{J/s}$ ].

**Dc**: Diamètre de la calandre [m].

**De** : Diamètre équivalent [m].

**di** : Diamètre intérieur [m].

**de** : Diamètre extérieur [m].

**act** : La section de la calandre [ m<sup>2</sup>].

**at** : La section par passe [ m<sup>2</sup> ].

**B** : espace entre chicane [m].

**h<sub>o</sub>**: Coefficient du film externe. [w/m<sup>2</sup>. °C].

**h<sub>i</sub>** : Coefficient du film interne [w/m<sup>2</sup>. °C].

**h<sub>io</sub>**: Coefficient de film interne rapporté à la surface extérieure [w/m<sup>2</sup>. °C].

**Rs** : résistance d'encrassement [s. m<sup>2</sup>. °C/j].

**ΔP<sub>c</sub>**: Perte de charge côté calandre [kg/cm<sup>2</sup>].

**ΔP<sub>t</sub>** : Perte de charge côté tube [kg/cm<sup>2</sup>].

**ε** : Efficacité thermique.

**Q** : Puissance réelle échangé entre les deux fluides [j/s].

**Q<sub>max</sub>** : puissance maximal possible échangé [j/s].

**d** : densité [kg/m<sup>3</sup>].

# Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre I Présentation de la raffinerie de Skikda RA1K.....	2
I.1 Présentation générale de la raffinerie de Skikda RA1K.....	2
I.1.1 Situation géographique :.....	2
I.1.2 Historique de construction :.....	3
I.2 Présentation des différentes unités de production :.....	4
I.2.1 Unités 10-11 Distillation atmosphérique (TOPPING).....	4
I.2.2 Unités 100 et 103 (Unités Magnaforming, Platforming).....	4
I.2.3 Unités 30-31-104 (Séparation et Traitement des Gaz).....	4
I.2.4 Unité 200 (Extraction des Aromatiques).....	5
I.2.5 Unité 400 (Séparation du Paraxylène).....	5
I.2.6 Unité 500 (Isomérisation du M-xylène).....	5
I.2.7 Unités 700/701/702/703 (Unité d'isomérisation du naphta léger A).....	5
I.2.8 Unité 70 (Production de Bitume).....	6
I.2.9 Unité 600 (Unité Melexe).....	6
I.2.10 Centrale thermoélectrique.....	7
I.2.11 Unité 900 (Unité de purification de l'hydrogène).....	7
I.3 Projets de réhabilitation et adaptation de la raffinerie de Skikda.....	7
I.3.1 Plan et programme de réhabilitation :.....	7
I.3.2 Bilan de production de la raffinerie RA1K :.....	9
I.4 Le schéma des procédés principaux et installations dans la raffinerie de Skikda.....	10
Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur.....	11
II.1 Généralités sur le transfert de chaleur.....	11
II.1.1 Les trois modes de transfert de chaleur.....	11
II.1.2 Phénomène de conduction thermique :.....	11
II.1.3 Phénomène de convection thermique :.....	12
II.1.4 Phénomène de rayonnement :.....	13
II.2 Généralités sur les échangeurs de chaleur.....	13
II.2.1 Introduction.....	13
II.2.2 Définition.....	14
II.2.3 Classification des échangeurs de chaleur.....	14
II.2.4 Différents types des échangeurs de chaleur.....	17

II.2.5 Recommandations du TEMA : .....	22
II.3 Principe de calcul thermique d'un échangeur .....	23
II.3.1 Méthode du $\Delta TLM$ : .....	23
II.3.2 Méthode de Nombre d'Unité de Transfert (NUT) : .....	24
II.3.3 Principe de la méthode Kern : .....	25
II.4 Conclusion.....	27
Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs .....	28
III.1 Introduction : .....	28
III.2 Définition de l'encrassement .....	29
III.3 Différents types d'encrassement .....	29
III.4 Apparition et développement de l'encrassement.....	31
III.5 Effet de l'encrassement sur le fonctionnement des échangeurs .....	31
III.6 La maintenance des échangeurs de chaleur .....	32
III.6.1 Définition .....	32
III.7 Les méthodes de maintenances .....	32
III.7.1 Les solutions pour prévenir l'encrassement des échangeurs de chaleur....	33
III.7.2 Nettoyage de l'échangeur : .....	35
III.7.3 Étapes du processus de nettoyage .....	36
III.8 Conclusion .....	36
Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement .....	38
IV.1 Introduction.....	38
IV.2 But de calcul : .....	38
IV.3 Présentation de l'échangeur 100-E1A~D .....	39
IV.3.1 Positionnement de l'échangeur de chaleur 100-E1A~D : .....	39
IV.3.2 Le rôle de préchauffeur 100-E1A~D : .....	39
IV.3.3 Les éléments d'échangeur 100-E1A~D .....	40
IV.4 Composition de la charge (%) : .....	45
IV.5 Données sur l'échangeur 100-E1A~D : .....	47
IV.6 Les trois cas des calculs : .....	49
IV.6.1 Premier cas (après 9 mois de marche) : .....	49
IV.6.2 Deuxième cas : .....	55
IV.6.3 Troisième cas : .....	59
IV.7 Résultats et Interprétation : .....	64

IV.8 Conclusion .....	66
Conclusion générale.....	67

## Table des figures

Figure I-1 : Situation géographique de la raffinerie de Skikda.....	2
Figure I-2 : Schéma de la raffinerie de Skikda .....	10
Figure II-1 : Les trois modes de transfert de chaleur .....	11
Figure II-2 : Echangeur a co-courant (parallèles).....	15
Figure II-3 : Echangeurs à contre-courant. ....	15
Figure II-4 : Echangeur de chaleur a courant croisés. ....	16
Figure II-5 : Classement selon type de conception des échangeurs.....	16
Figure II-6 : Echangeur monotube en serpentin. ....	18
Figure II-7 : Echangeur coaxial. ....	18
Figure II-8 : Echangeur à tubes séparés. ....	18
Figure II-9 : Echangeur à tubes rapprochés. ....	19
Figure II-10 : Echangeur à tubes et calandre. ....	20
Figure II-11 : Echangeur à tête flottante. ....	20
Figure II-12 : Echangeurs à tête fixe.....	21
Figure II-13 : Echangeur a tube en U.....	21
Figure II-14 : Echangeurs à plaques. ....	22
Figure II-15 : Construction standard des échangeurs à calandre. ....	23
Figure II-16 : Schéma de calcul par la méthode de la différence moyenne logarithmique.....	24
Figure II-17 : Schéma de calcul par la méthode du nombre d'unité de transfert.....	24
Figure III-1 : Echangeur encrassé. ....	28
Figure III-2 : représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide. ....	31
Figure III-3 : Nettoyage par un brosses rotatif.....	35
Figure III-4 : Nettoyage par ultrasons.....	36
Figure IV-1 : Positionnement de l'échangeur de chaleur 100-E1A~D.....	39
Figure IV-2 : Schéma de l'échangeur 100-E1 .....	39
Figure IV-3 : a) la boîte de distribution, b) la calandre, c) Faisceau à tubes en U. ....	40
Figure IV-4 : Boîte de distribution (deux passes côté tubes).....	40
Figure IV-5 : Calandre une seule passe. ....	41
Figure IV-6 : Photo et Schéma de la plaque tubulaire. ....	42
Figure IV-7 : dispositions des tubes.....	43
Figure IV-8 : Entretoise et tirant. ....	43
Figure IV-9 : Faisceau tubulaire de l'échangeur.....	44
Figure IV-10 : chicane transversale. ....	45
Figure IV-11 : Déflecteurs. ....	45
Figure IV-12 : L'évolution du coefficient global de transfert de chaleur en fonction du temps.....	64
Figure IV-13 : L'évolution de la DTLM en fonction du temps.....	65
Figure IV-14 : L'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps.....	65
Figure IV-15 : faisceau tubulaire colmaté de l'échangeur 100-E1A. ....	66

## Liste des tableaux

Tableau I-1 : Dates des démarrages progressifs des unités de production à la raffinerie de Skikda. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau I-2 : Plan de réhabilitation des unités de la RA1K. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau I-3 : Bilan de production de la RA1K avant et après la réhabilitation. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Signet non défini.</b>	
Tableau IV-1 : Caractéristique de la calandre. ....	41
Tableau IV-2 : Caractéristique de la plaque tubulaire. ....	42
Tableau IV-3 : Caractéristique des tubes d'échangeur. ....	44
Tableau IV-4 : Composition de la charge. ....	46
Tableau IV-5 : Données sur l'échangeur 100-E1A~D. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau IV-6 : caractéristique des fluides a la température calorifique. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>non défini.</b>	
Tableau IV-7 : caractéristique des fluides a la température calorifique. ....	55
Tableau IV-8 : caractéristique des fluides a la température calorifique. ....	59
Tableau IV-9 : résultats de calcul. ....	64

## Introduction générale

Les procédés utilisés au niveau de l'industrie, notamment l'industrie du raffinage des produits pétroliers demandent souvent que les fluides traités soient réchauffés ou refroidis, avec ou sans changement de phase, au cours des diverses opérations auxquelles ils sont soumis. De ce fait, pour assurer cette fonction de chauffage ou de refroidissement, il est indispensable d'utiliser des équipements thermiques, appelés les échangeurs de chaleur. Ces appareillages sont des éléments essentiels et omniprésents dans toute installation industrielle.

Les échangeurs de chaleur permettent de maîtriser toute politique d'énergie. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.).

Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés.

Le souci technologique majeur des échangeurs de chaleur est l'amélioration de l'échange thermique entre les deux fluides tout en générant le moins de pertes de charge ou en les réduisant à leur plus bas niveau possible. Dans notre cas, la cause principale de cette réduction est l'encrassement, un phénomène prépondérant dans la réduction des performances de ces installations. Son degré s'évalue par la mesure du coefficient global de transfert thermique et de la résistance d'encrassement en fonction du temps.

Dans le cadre de l'obtention du diplôme de master, ce mémoire résulte d'un stage pratique de 15 jours à la raffinerie RA1K, Skikda. Ce travail porte sur l'étude de l'échangeur 100-E1A~D, en évaluant ses performances thermiques et mécaniques, ainsi que l'impact de l'encrassement sur le coefficient de transfert thermique

Notre mémoire est structuré comme suit :

- Chapitre 1 : Ce chapitre est consacré à la zone d'étude. Il fournit une description générale de la raffinerie de Skikda RA1K et présente les différentes unités de production.
- Chapitre 2 : Il constitue une étude bibliographique sur le transfert de chaleur et les échangeurs de chaleur.
- Chapitre 3 : Ce chapitre traite des problèmes de fonctionnement des échangeurs.
- Chapitre 4 : Cette partie est dédiée aux calculs et aux analyses pratiques.

Le travail se termine par une Conclusion générale.

## Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K

### Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K

#### **I.1 Présentation générale de la raffinerie de Skikda RA1K**

Le complexe de raffinerie de pétrole de Skikda baptisé RA1/K, a pour mission de transformer le pétrole brut provenant de Hassi Messaoud avec une capacité de traitement (18 millions t/an), ainsi que le brut réduit importé (277.000 t/an).

##### **I.1.1 Situation géographique :**

Cette raffinerie est située dans la zone industrielle à 7 Km à l'est de Skikda et à 2 Km de la mer, elle est aménagée sur une superficie de 190 hectares avec un effectif à l'heure actuelle de 1280 travailleurs environ. Elle est alimentée en brut algérien par le brut venant de Hassi Messaoud.

Le transport du pétrole brut est réalisé à l'aide d'un Pipe-line à une distance de champs pétroliers jusqu'à le complexe de 760 Km.

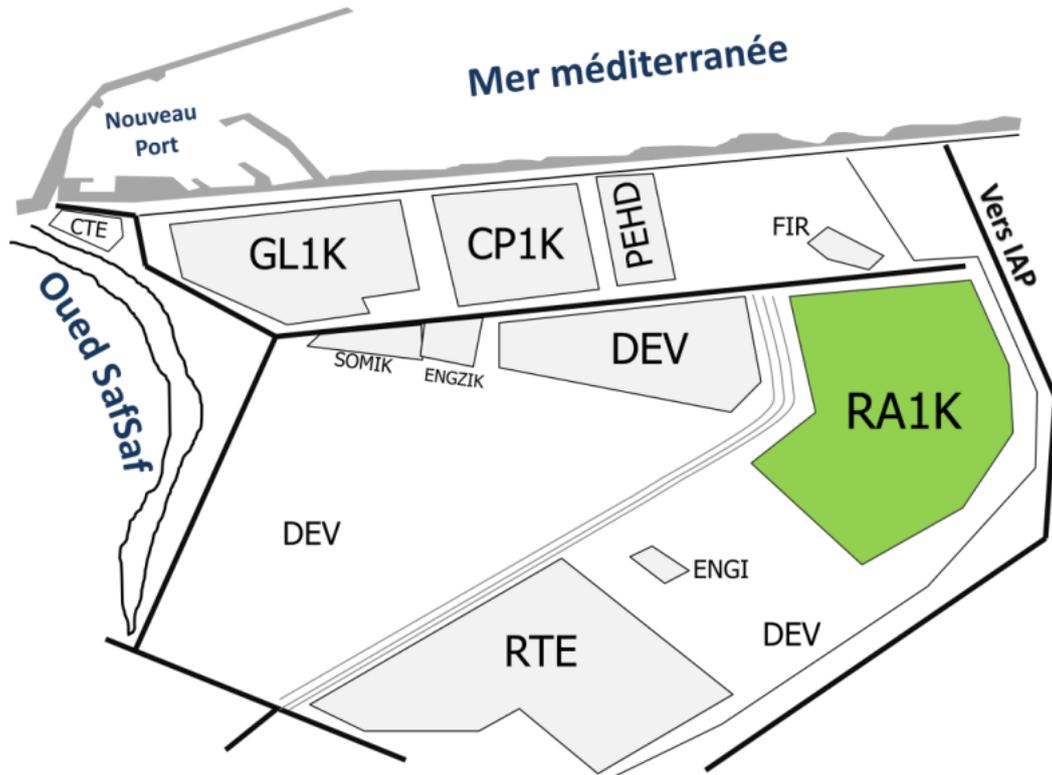


Figure I-1 : Situation géographique de la raffinerie de Skikda.

## Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K

### I.1.2 Historique de construction :

La raffinerie a été construite en janvier 1976 à la suite d'un contrat signé le 30 avril 1974 entre le gouvernement algérien et le constructeur italien SNAM PROGETTI et SAIPEM.

Le démarrage du chantier a commencé le 02 janvier 1976, jusqu'au mars 1980, le démarrage progressif des unités de production se sont succédés comme suit :

Tableau I-1 : Dates des démarrages progressifs des unités de production à la raffinerie de Skikda.

<b>Unité</b>	<b>Capacité T/an</b>	<b>Date</b>
<b>Topping(U10)</b>	7.500.000	1980
<b>Topping (U11)</b>	7.500.000	1980
<b>Séparation GPL (U30)</b>	306.500	1980
<b>Séparation GPL (U31)</b>	283.000	1980
<b>Reforming catalytique (U-100)</b>	1.165.000	1980
<b>Extraction et fractionnement des aromatiques (U200)</b>	285.000	1980
<b>Cristallisation du paraxylène (U400)</b>	430.000	1980
<b>Distillation sous vide et oxydation de bitume (U70)</b>	277.000	1980
<b>Reforming catalytique (U103)</b>	1.165.000	1993
<b>Séparation GPL (U104)</b>	96.000	1993
<b>Parc de stockage (U600)</b>	2.700.000 m3	1980 et 1993
<b>Centrale thermoélectrique</b>		1980 et 1993

## **Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K**

### **I.2 Présentation des différentes unités de production :**

La raffinerie est équipée des installations suivantes :[1]

- Unité 10/11 : distillation atmosphérique (TOPPING) ;
- Unité 100 : prétraitement et de reforming catalytique (MAGNAFORMING) ;
- Unité 101/103 : prétraitement et de reforming catalytique (PLATFORMING) ;
- Unité 30/31 et 104 : traitement et séparation des gaz (GPL) ;
- Unité 200 : extraction des aromatiques ;
- Unité 400 : cristallisation et séparation du para xylène ;
- Unité 500 : isomérisation de m, ortho xylène en para xylène ;
- Unité 700/701/702/703 : isomérisation du naphta léger A ;
- Unité 70 : distillation sous vide (Production des bitumes) ;
- Les utilités sont :
- Unité 600 : stockage, mélange et expédition (MELEX) ;
- Unité 62 : déminéralisation des eaux ;
- Unité 1050 : centrale thermique électrique et utilités (C. T. E) ;
- Unité 900 : purification de l'hydrogène ;

#### **I.2.1 Unités 10-11 Distillation atmosphérique (TOPPING)**

Le Topping ou la distillation atmosphérique a pour but de fractionner le brut en différentes coupes stabilisées pouvant être utilisées pour l'obtention de produits finis (naphta, gas-oil, jet). Les unités U10-11 traitent le brut de Hassi Messaoud pour avoir les produits suivants : G.P.L, Iso-pentane, Naphta A, Naphta B (89.5°-155°), Naphta C (155°-180°), Kérosène (180°-225°), Gasoil léger (225°-320°), Gasoil lourd (320°-360°), et Résidu (>360°).

#### **I.2.2 Unités 100 et 103 (Unités Magnaforming, Platforming)**

- La Magnaforming et le Platforming ont pour but de transformer la naphta moyenne et lourde obtenues du Topping en réformât utilisé comme charge pour les unités d'aromatiques.
- (unité 200 et 400). Cette transformation a pour conséquence une augmentation de l'indice d'octane de 45 à 99 permet ainsi d'utiliser le réformât obtenu pour la fabrication des essences.

#### **I.2.3 Unités 30-31-104 (Séparation et Traitement des Gaz)**

Ces unités sont destinées à traiter les gaz liquides venant des unités 10, 11, 100 et 103 dans l'ordre suivant :

- **Unité 30** : traite le gaz liquide qui vient de l'unité 100 en particulier ceux de tête de la

## **Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K**

colonne C7 où les GPL sont séparés du pentane.

- **Unité 31** : reçoit les gaz provenant de la tête des colonnes de stabilisation de l'essence des deux unités de Topping.
- **Unité 104** : elle a été conçue dernièrement avec la nouvelle unité de Platforming 103 afin de traiter les GPL venant de cette unité.

### **I.2.4 Unité 200 (Extraction des Aromatiques)**

L'installation d'extraction des aromatiques a été projetée pour extraire de l'essence réformée des aromatiques qui seront fractionnées par la suite en benzène et toluène très pures.

La charge est constituée par la coupe de réformât léger provenant directement ou à travers un réservoir de la colonne C5 splitteur du réformât de l'unité 100.

### **I.2.5 Unité 400 (Séparation du Paraxylène)**

Cette unité est conçue pour récupérer le para-xylène produit très recherché sur le marché.

La charge venant de l'unité de Magnaforming, permet par cristallisation de séparer le para-xylène des autres xylènes (métha-ortho) et l'éthyle-benzène. Le para-xylène est commercialisé tel qu'il est, le reste peut être utilisé comme base pour l'obtention des essences ou commercialisé sous forme de mélange xylène pouvant être utilisé comme solvant pour la fabrication des peintures, etc.

### **I.2.6 Unité 500 (Isomérisation du M-xylène)**

L'installation d'isomérisation des aromatiques a été projetée pour récupérer le filtrat des cristalliseurs de l'Unité 400 (unité de l'extraction du p-xylène) et l'isomérisation, après l'isomérisat obtenu sera séparé en deux fractions essentielles :

- Une fraction riche en benzène envoyée vers l'Unité 200.
- L'autre riche en p-xylène envoyée vers l'Unité 400.

Le but principal de cette unité est d'augmenter la production en p-xylène.

### **I.2.7 Unités 700/701/702/703 (Unité d'isomérisation du naphta léger A)**

Leur but est la conversion des paraffines normales en iso paraffines est une réaction de plus en plus recherchée par le raffineur pour obtenir un indice d'octane élevé sans ajout des additifs. Les paraffines allant du butane à l'hexane peuvent être isomérisées en utilisant des catalyseurs modernes, très actifs à base de platine. L'isomérisation peut être poussée à l'extrême par l'utilisation de séparation par distillation et/ou par tamis moléculaire des paraffines

## **Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K**

normales non converties.

Les coupes C5-C6, peuvent également être totalement isoméries en composants à haut indice d'octane très recherchés pour le pool essence.

Le procédé d'isomérisation est devenu pour le raffineur un outil précieux pour élargir la gamme de ses produits et améliorer leurs qualités, tout en augmentant la flexibilité d'opérations et leur rentabilité. De plus, la production de ces constituants à haute indice d'octane, mais exempts d'aromatiques, permet de réduire la contribution au pool essence du reformât, riche en aromatiques, améliorant ainsi la qualité de l'essence en terme de protection de l'environnement, ce qui est aujourd'hui un facteur très important.

Dans la raffinerie de Skikda on a installé deux trains pour l'isomérisation de la fraction légère des essences produites aux topping (U10&U11) afin de fournir un additif sans aromatiques au pool des essences pour la fabrication des carburants.

### **I.2.8 Unité 70 (Production de Bitume)**

L'unité 70 a été conçue pour traiter 271 100 t/an de brut réduit importé (BRI) qui peut être :

- Charge A : résidu TIA juan médium 372°C plus.
- Charge B : résidu TIA juan lourd 450°C plus.
- Charge C : résidu du brut du Koweït.

L'unité se compose principalement d'une colonne de distillation sous vide et d'un réacteur d'oxydation des bitumes. Le produit de fond de colonne est le bitume routier ordinaire qui est envoyé :

- Une partie vers le stockage.
- L'autre partie comme charge à la section d'oxydation où elle sera oxydée au moyen de l'air en bitume oxydé.

### **I.2.9 Unité 600 (Unité Melexe)**

Mélange, chargement et expédition, il s'occupe de :

- Bacs de stockage des différentes charges et produits des unités.
- Expédition des produits vers les différents dépôts de stockage, exemple : dépôt d'EIKheroub.
- Mélange des gasoils.
- Contrôle le chargement des produits qui est au niveau du port de Skikda.

## **Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K**

### **I.2.10 Centrale thermoélectrique**

C'est le système nerveux de la raffinerie, La CTE se compose de 11 sections à savoir :

- La section 62 : pour la production d'eau déminéralisée.
- La section 1020 : pour tours de refroidissement de l'eau.
- La section 1030 : pour le stockage et le pompage de l'eau de barrage ou de l'eau potable.
- La section 1040 : pour le stockage et le pompage de l'eau anti-incendie.
- La section 1050 : pour la génération de la vapeur « chaudières ».
- La section 1060 : pour la récupération et le traitement du condensât.
- La section 1070 : ou système Fuel-gas.
- La section 1080 : pour la production de l'air instrument et l'air service.
- La section 1100 pour le traitement des effluents.
- La section 1110 : de production de l'azote (N<sub>2</sub>).
- La section de production de l'électricité.

### **I.2.11 Unité 900 (Unité de purification de l'hydrogène)**

Elle a pour but l'augmentation de la pureté de l'hydrogène issu de l'unité 100, afin de l'envoyer vers les autres unités consommatrices de l'hydrogène (unité 500...).

Elle a pour but l'augmentation de la pureté de l'hydrogène issu de l'unité 100, afin de l'envoyer vers les autres unités consommatrices de l'hydrogène (unité 500...).

## **I.3 Projets de réhabilitation et adaptation de la raffinerie de Skikda**

### **I.3.1 Plan et programme de réhabilitation :**

Le tableau regroupe le plan et le programme de réhabilitation successivement des unités principales et des utilités.

## Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K

Tableau I-2 : Plan de réhabilitation des unités de la RA1K.

N °	Unités	Désignation	Capacité avant réhabilitation kg/hr	Capacité après réhabilitation kg/hr
1	Topping -1(*)	10	7 500 000	9 375 000
2	Topping -2(*)	11	7 500 000	9 375 000
3	Gas Plant-1(*)	30	306 500	339 500
4	Gas Plant-2(*)	31	283 000	339 500
7	Reforming I (*)	100	1 165 000	1 174 600
8	Section Splitter Platformât (**)	100	-	989 950
10	Extraction des aromatiques (*)	200	285 000	627 100
11	Extraction du Paraxylène (#)	400	430 000	1 782 800
12	Isomérisation du Xylène (**)	500	-	1 380 400
13	Purification d'Hydrogène (**)	900	-	27 200
14	Stripper des eaux acides II (*)	10	33 530	28 000
15	Stripper des eaux acides-I (**)	12	-	17 070

(\*) = rénové    (\*\*) = Nouveau,    (#) = déplacé et rénové

## Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K

### I.3.2 Bilan de production de la raffinerie RA1K :

Tableau I-3 : Bilan de production de la RA1K avant et après la réhabilitation.

<b>Charges</b>	<b>Avant Réhabilitation</b>	<b>Après Réhabilitation</b>
<b>Pétrole brut, TPA</b>	15 000 000	18 000 000
<b>Produits</b>		
<b>Gpl</b>	365 000	644 200
<b>Naphta</b>	1700 000	3 753 800
<b>Essence</b>	2 180 000	2 135 400
<b>Jet a1</b>	1 500 000	1 500 000
<b>Diesel</b>	4 250 000	5 913 800
<b>Fuel oil</b>	4 300 000	4 270 800
<b>Benzene</b>	90 000	197 300
<b>Toluene</b>	11 000	16 900
<b>Paraxylene</b>	38 000	220 100

## Chapitre I Présentation de la raffinerie de SkikdaRA1K

### I.4 Le schéma des procédés principaux et installations dans la raffinerie de Skikda :

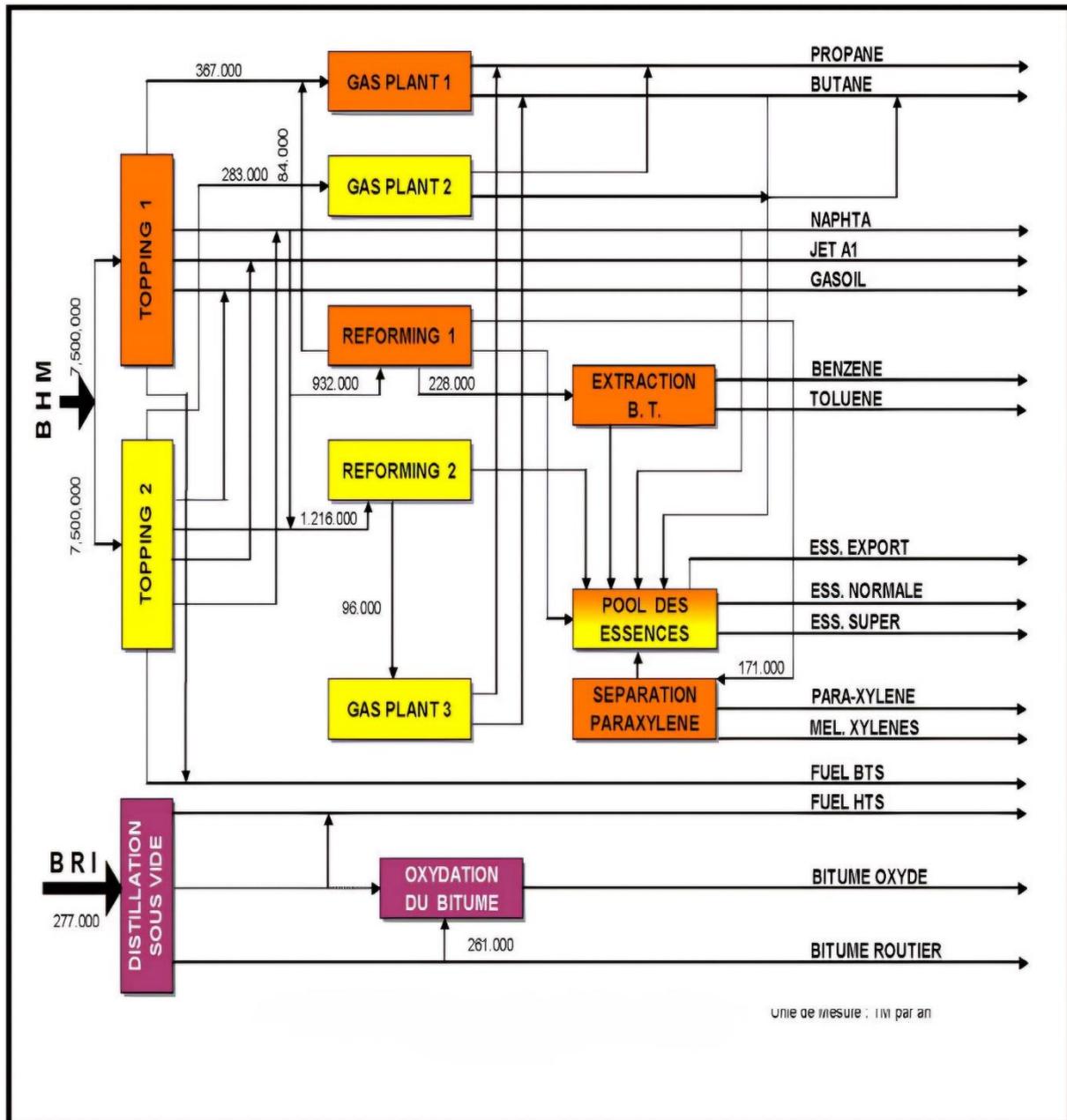


Figure I-2 : Schéma de la raffinerie de Skikda

### Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

#### II.1 Généralités sur le transfert de chaleur

Les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur, soit parce que c'est le but recherché (fours, coulée, échangeurs, lits fluidisés, trempe, refroidissement), soit parce que ceux-ci interviennent d'une manière inévitable (chocs thermiques, pertes de chaleurs, rayonnement). Des connaissances de base en ce domaine sont donc nécessaires à l'ingénieur de production ou de développement.[2]

##### II.1.1 Les trois modes de transfert de chaleur

Pour se transmettre, la chaleur fait appel à trois mécanismes fondamentaux :

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement.

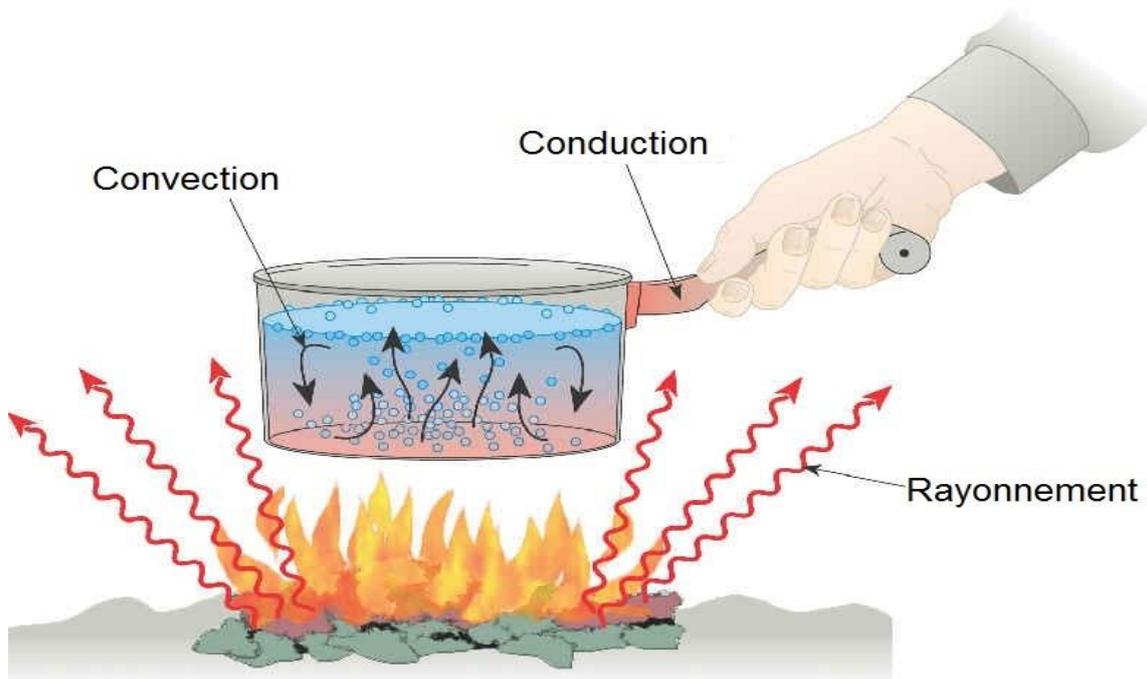


Figure II-1 : Les trois modes de transfert de chaleur

##### II.1.2 Phénomène de conduction thermique :

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (agitation des

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

atomes ou des molécules, flux d'électrons libres...). Il peut être vu comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques (les particules chaudes qui ont une énergie de vibration élevée) vers les particules les moins énergétiques (les particules froides d'énergie de vibration moins élevée), dû aux collisions entre particules. Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres dans le réseau cristallin (par exemple pour les métaux). Ainsi les bons conducteurs d'électricité sont en général également de bons conducteurs de la chaleur.[3]

### ➤ **Loi de Fourier**

D'après l'hypothèse fondamentale de Fourier qui régit le transfert de chaleur unidimensionnel par conduction.

La loi énoncée par Fourier s'écrit :  $Q = - \lambda A (dt/dx)$

Où :

**Q** : Quantité de chaleur échangée [kw].

**A** : Surface d'échange de chaleur [ $m^2$ ].

**dt/dx** : Gradient de température le long de x.

**$\lambda$**  : Coefficient de proportionnalité de la loi de Fourier (ou conductivité thermique) [kw/m.k].

Le signe (-) qui apparaît dans cette expression signifie que la chaleur se propage dans le sens des températures décroissantes.

### **II.1.3 Phénomène de convection thermique :**

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement. On distingue deux types de convection.

- **Convection naturelle** : les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition.

- **Convection forcée** : le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...). [3]

### ➤ **Loi de Newton :**

## **Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur**

C'est la loi fondamentale de la convection thermique donnée par la loi de Newton :

$$Q = h A (T_s - T_\infty)$$

Où :

**Q** : Quantité de chaleur échangée [kW].

**A** : Surface d'échange de la chaleur [ $m^2$ ].

**T<sub>s</sub>** : Température de la surface du solide en contact avec le fluide.

**T<sub>∞</sub>** : Température du fluide.

**h** : Coefficient de la loi de Newton (coefficient de convection thermique) [ $kW/m^2 \cdot ^\circ C$ ].

### **II.1.4 Phénomène de rayonnement :**

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Le phénomène d'émission d'un corps correspond à la conversion d'énergie matérielle (agitation des électrons constituant la matière dont l'intensité dépend de la température) en énergie radiative. Le phénomène d'absorption est la conversion inverse. [3]

#### **➤ Loi de Boltzmann :**

Elle concerne l'émission totale d'une surface d'un corps noir ou gris, qui surmonte cette surface. La loi de Boltzmann exprime le flux de chaleur émis par la surface :

$$Q = \varepsilon \sigma T^4$$

Où :

**Q** : Flux de chaleur émis [ $kW/m^2$ ].

**ε** : Emissivité de la surface

**σ** =  $5.669 \cdot 10^{-8} W/m^2 k^4$ : constante de Stéphane-Boltzmann.

## **II.2 Généralités sur les échangeurs de chaleur**

### **II.2.1 Introduction**

Les courants de matières premières qui alimentent une unité de production chimique sont rarement disponibles exactement dans l'état thermodynamique nécessaire. Les conditions dans lesquelles un courant sort d'un appareil, quel qu'il soit, correspondent rarement à celles souhaitées pour entrer dans l'appareil suivant. Enfin, les courants de produits finis ne quittent

## **Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur**

pratiquement jamais le dernier appareil de l'unité dans un état convenable pour leur stockage. Voilà pourquoi les ateliers de production chimique comprennent toujours un grand nombre d'appareils qui permettent d'ajuster l'état thermodynamique des pompes ou des compresseurs pour changer la pression, des échangeurs de chaleur pour modifier la température, des évaporateurs et des condenseurs pour changer l'état physique du courant. Ce transfert de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid (qui ne doivent pas être mis en contact) est généralement effectué dans des appareils où les deux fluides circulent de part et d'autre des parois solides. Ces appareils sont appelés échangeurs de chaleur.[4]

### **II.2.2 Définition**

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs qui facilitent l'échange de chaleur entre deux fluides de températures différentes, tout en les empêchant de se mélanger. Les échangeurs de chaleur sont couramment utilisés dans la pratique dans un large éventail d'applications, allant des systèmes de chauffage et de climatisation dans les ménages au traitement chimique en passant par la production d'électricité dans les grandes installations. Les échangeurs de chaleur diffèrent des chambres de mélange en ce qu'ils ne permettent pas aux deux fluides impliqués de se mélanger. Exemples : radiateur d'automobile, évaporateur de climatiseur, ...etc. [5]

### **II.2.3 Classification des échangeurs de chaleur**

On peut classer les échangeurs de chaleur de plusieurs manières Suivante :

- Mode d'écoulement des fluides.
- Type de conception.
- Type de contact
- Type d'échange de fluide.
- La nature du matériau de la paroi d'échange.

#### **A. Mode d'écoulement des fluides :**

- Echangeur a co-courant (parallèles) :

Dans ce cas, les deux fluides froid et chaud circulent parallèlement dans le même sens. La figure (II.2) représente le profil de température pour les deux fluides en fonction de la longueur de l'échangeur.

Dans le cas où l'écoulement est parallèle, on dit aussi : fonctionnement anti-méthodique ou Co-courant. [5]

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

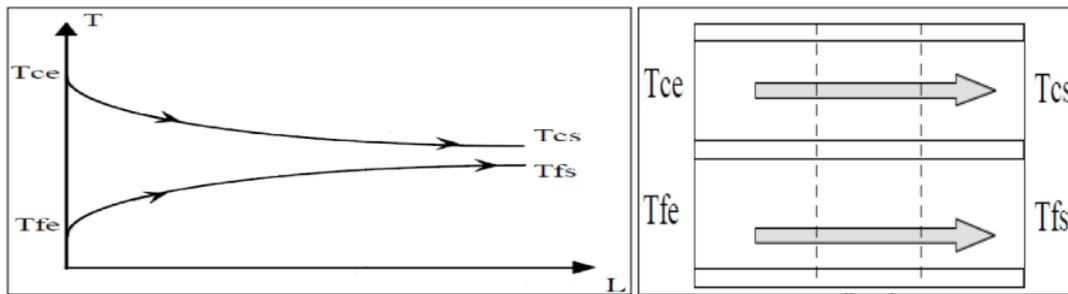


Figure II-2 : Echangeur a co-courant (parallèles).

➤ Echangeurs à contre-courant :

Dans ce cas, les deux fluides froid et chaud circulent parallèlement, mais dans le sens contraire. La température de sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour augmenter l'échange thermique. La figure (II.3) représente le profil de température pour les deux fluides froid et chaud en fonction de la longueur de l'échangeur.

Dans le cas où l'écoulement est à contre-courant, on dit aussi écoulement méthodique.[5]

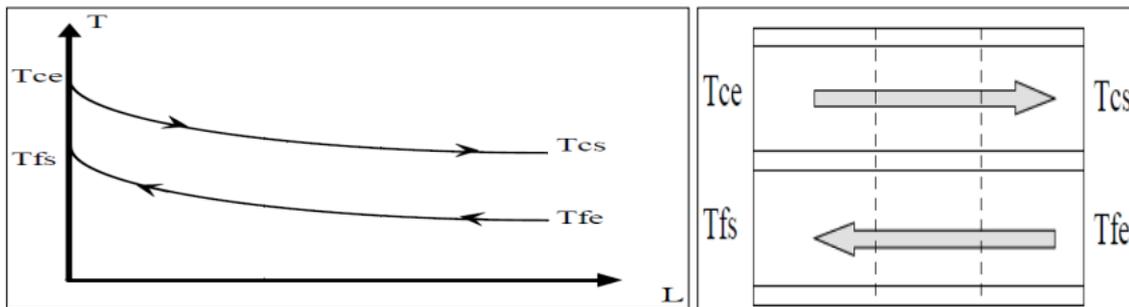


Figure II-3 : Echangeurs à contre-courant.

➤ Echangeur de chaleur a courant croisés :

Dans un échangeur de chaleur à courant croisé, les deux fluides circulent dans des directions perpendiculaires, favorisant un transfert de chaleur efficace sur une grande surface de contact.

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

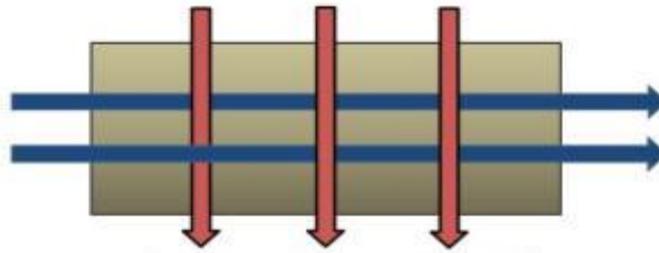


Figure II-4 : Echangeur de chaleur a courant croisés.

### B. Type de conception :

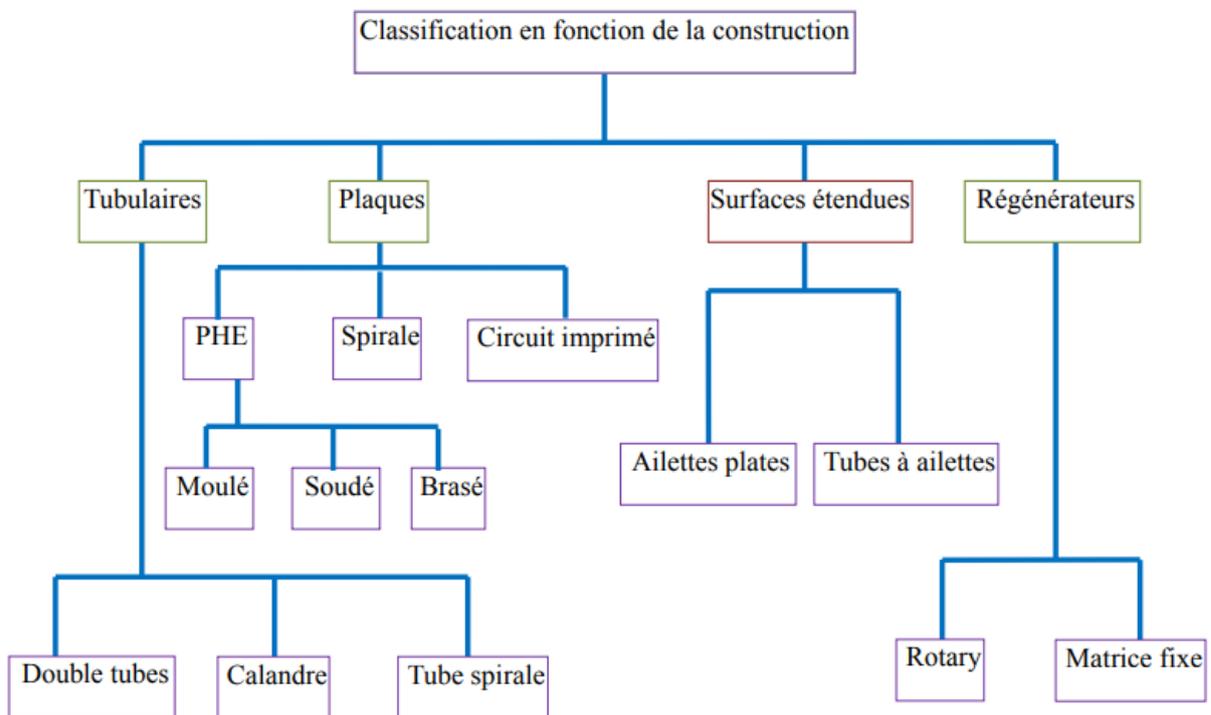


Figure II-5 : Classement selon type de conception des échangeurs.

### C. Type de contact :

#### ➤ Echangeur contact direct :

Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent presque la même température finale.

#### ➤ Echangeur contact indirect :

Dans ce cas, les deux fluides s'écoulent à l'intérieur de l'échangeur dans des espaces séparés par une paroi, le plus souvent métallique. [5]

## **Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur**

### **D. Type d'échange de fluide :**

On distingue les échangeurs de chaleur monophasiques et biphasiques :

- Échangeur sans changement de phase :

Les Échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des deux fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait un changement de phase. Les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur. [5]

- Échangeur avec changement de phase :

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

- L'un des deux fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.
- Le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.
- Le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état. [5]

### **E. La nature du matériau de la paroi d'échange :**

On distingue deux types des échangeurs selon la paroi des tubes :

**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.

### **II.2.4 Différents types des échangeurs de chaleur**

Le choix d'un échangeur de chaleur pour une application donnée dépend de nombreux paramètres : les propriétés physiques des fluides, leur agressivité, les températures ainsi que les pressions de service. Les contraintes d'encombrement et de maintenance doivent aussi être prises en compte, ainsi que les considérations économiques. [5]

#### **A. Échangeurs tubulaires :**

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leurs arrangements toujours réalise pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée

- **Echangeur monotube** : Le tube est placé dans ce cas à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent. [5]

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

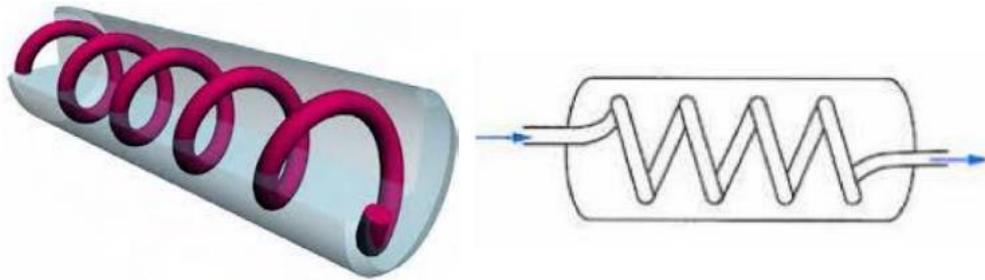


Figure II-6 : Echangeur monotube en serpentins.

- **Echangeur coaxial** : Les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur. [5]

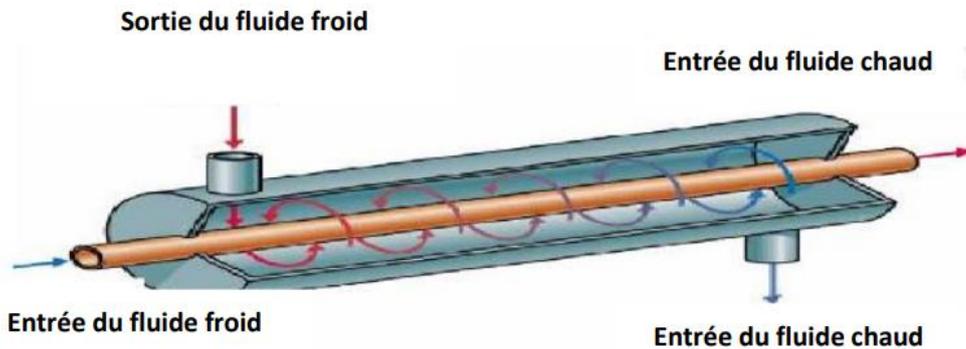


Figure II-7 : Echangeur coaxial.

- Echangeurs multitubulaires :

Ce type d'échangeurs existe sous plusieurs formes, on distingue :

- Echangeur à tubes séparés :

Dans cette catégorie, à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm), maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé. [5]

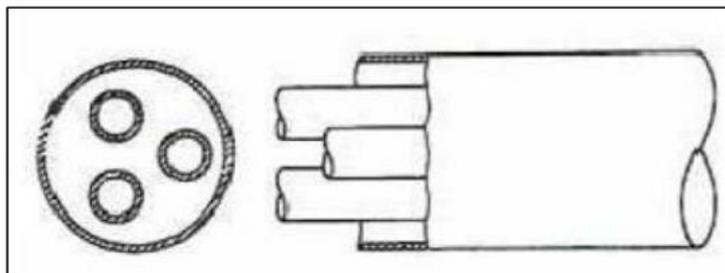


Figure II-8 : Echangeur à tubes séparés.

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

### ➤ Echangeur à tubes rapprochés :

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban ou un fil, enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.

L'échangeur à tubes rapprochés peut être soit lisse, soit à ailettes, ce dernier permet d'améliorer le coefficient d'échange thermique par l'augmentation de la surface d'échange entre le fluide et les parois solides. [5]

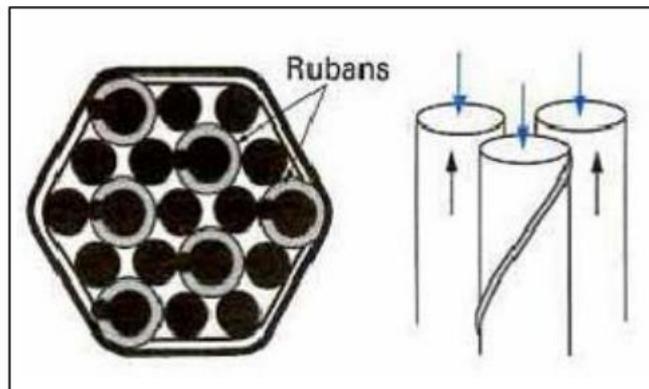


Figure II-9 : Echangeur à tubes rapprochés.

### ➤ Echangeur à tubes et calandre :

L'appareil est constitué d'un faisceau de tubes, disposé à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre. L'un des fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes. On ajoute en général des chicanes dans la calandre, qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et améliorent le transfert à l'extérieur des tubes. A chaque extrémité du faisceau sont fixées des boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en une ou plusieurs passes. La calandre est aussi 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. [6]

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

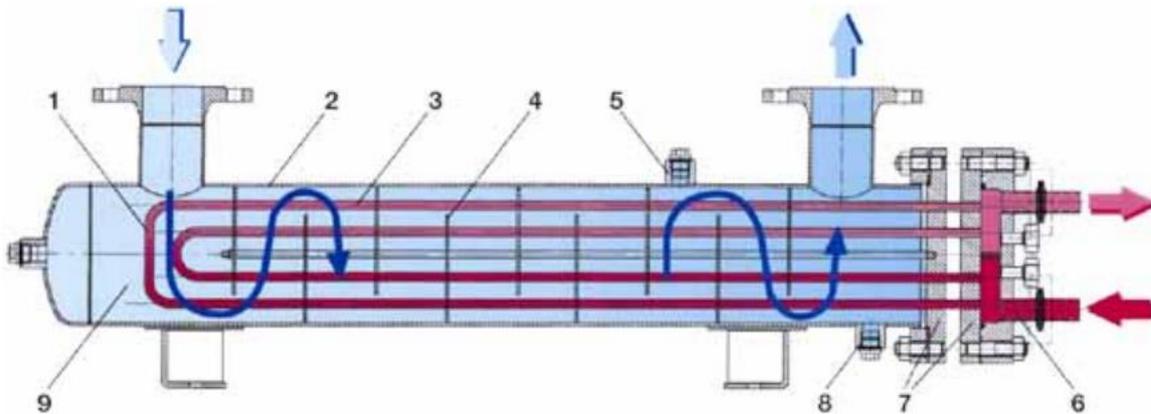


Figure II-10 : Echangeur à tubes et calandre.

- |                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. Faisceau tubulaire    | 6. Intérieur boîte à eau. |
| 2. Enveloppe (calandre). | 7. Plaque tubulaire.      |
| 3. Intérieur tube        | 8. Raccord vidange.       |
| 4. Chicane.              | 9. Intérieur enveloppe.   |
| 5. Raccord évent.        |                           |

➤ Echangeur à tête flottante :

L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La seconde plaque, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre. [7]

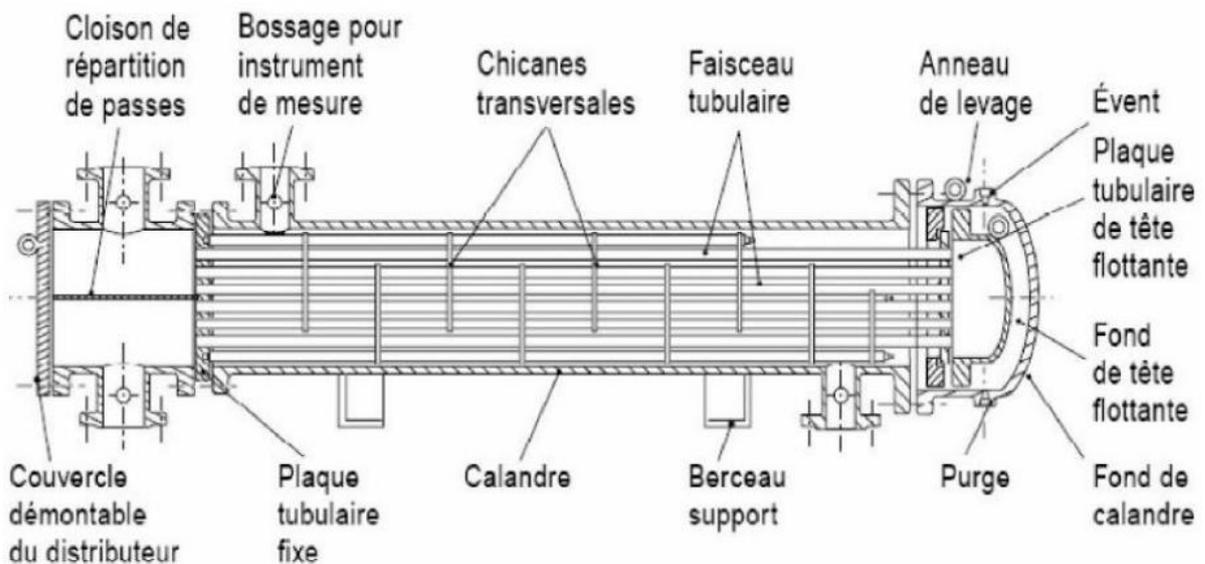


Figure II-11 : Echangeur à tête flottante.

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

### ➤ Echangeurs à tête fixe :

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre. [7]

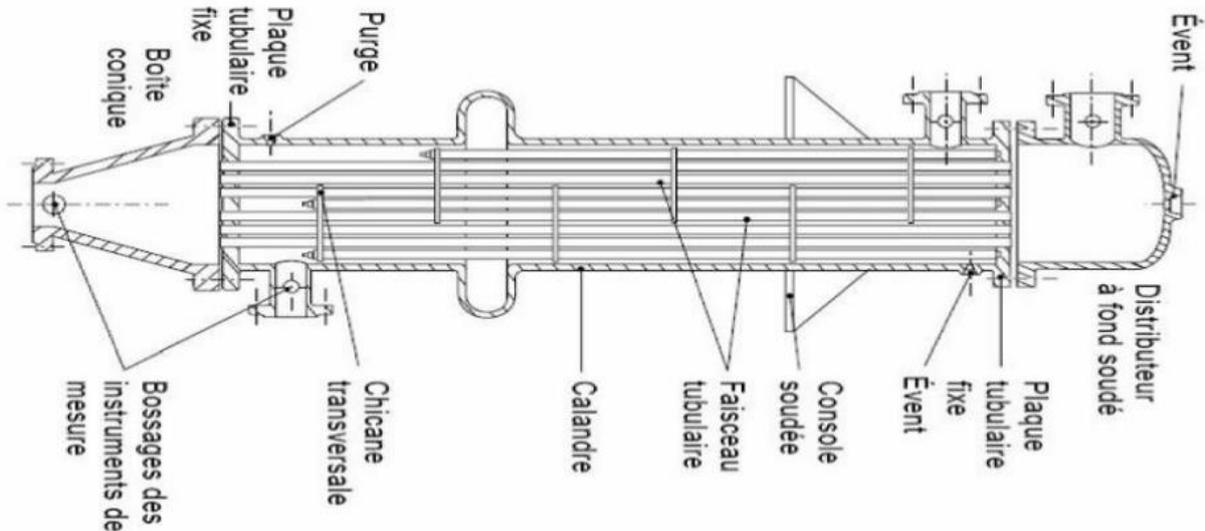


Figure II-12 : Echangeurs à tête fixe.

### ➤ Echangeur a tube en U :

Le faisceau est constitué de tubes coudés en forme d'épingle, il n'est donc porté que par une seule plaque tubulaire. Ce système permet la libre dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable autrement que par voie chimique. [7]

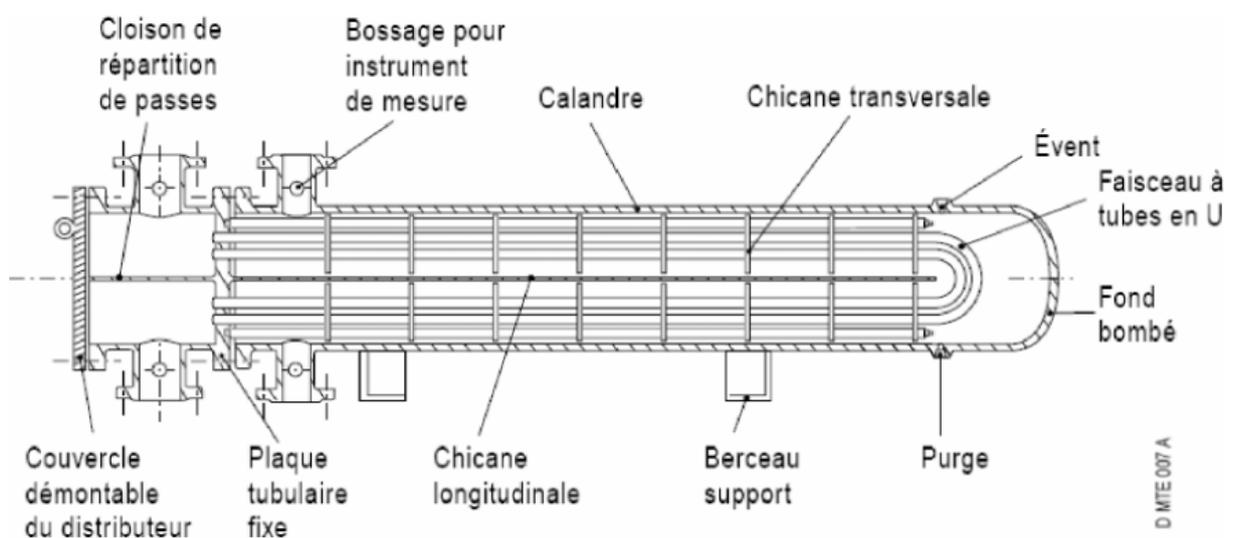


Figure II-13 : Echangeur a tube en U.

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

### **B. Echangeurs à plaques :**

Ces échangeurs se composent de séries d'alliage de plaques minces et ondulées servant de surface de transmission thermique. Ces plaques sont jointes et compactées ensemble à l'intérieur d'une armature en acier au carbone. Une fois compressé, le paquet de plaques forme un arrangement parallèle de canaux d'écoulement. Les deux fluides chaud et froid circulent à contre-courant dans des canaux alternatifs. Ce type d'échangeur est fréquemment trouvé dans diverses applications de chauffage et refroidissement dans les industries chimiques, pétrochimiques, de pétrole...

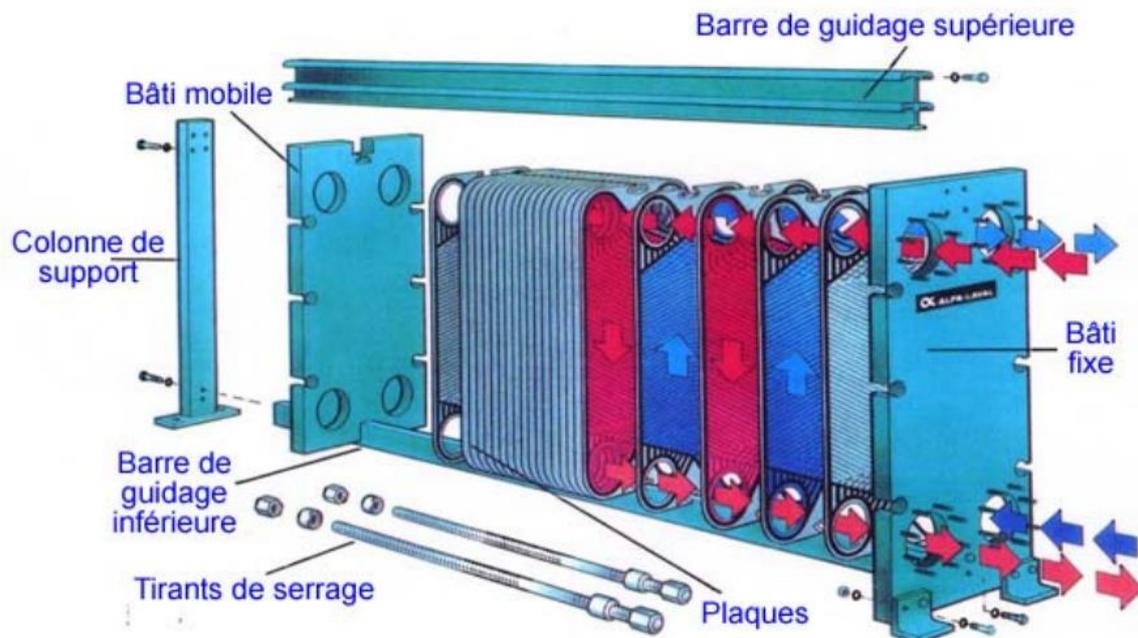


Figure II-14 : Echangeurs à plaques.

### **II.2.5 Recommandations du TEMA :**

TEMA est une norme américaine qui différencie les appareils multitubulaires en fonction des conditions de pression et températures. Elle définit une nomenclature pour les différents types d'échangeurs à tubes et calandre, qui se distinguent par la forme et la disposition de la chambre de distribution, de la calandre et du fond.[4]

Chaque type est désigné par trois lettres exp :(AEM, BES, CFU...)

- La Première lettre indique le type de chambre de distribution (côte tubes).
- La deuxième lettre indique le type de calandre.
- La troisième lettre indique le de fonde de calandre (boite de retour).

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

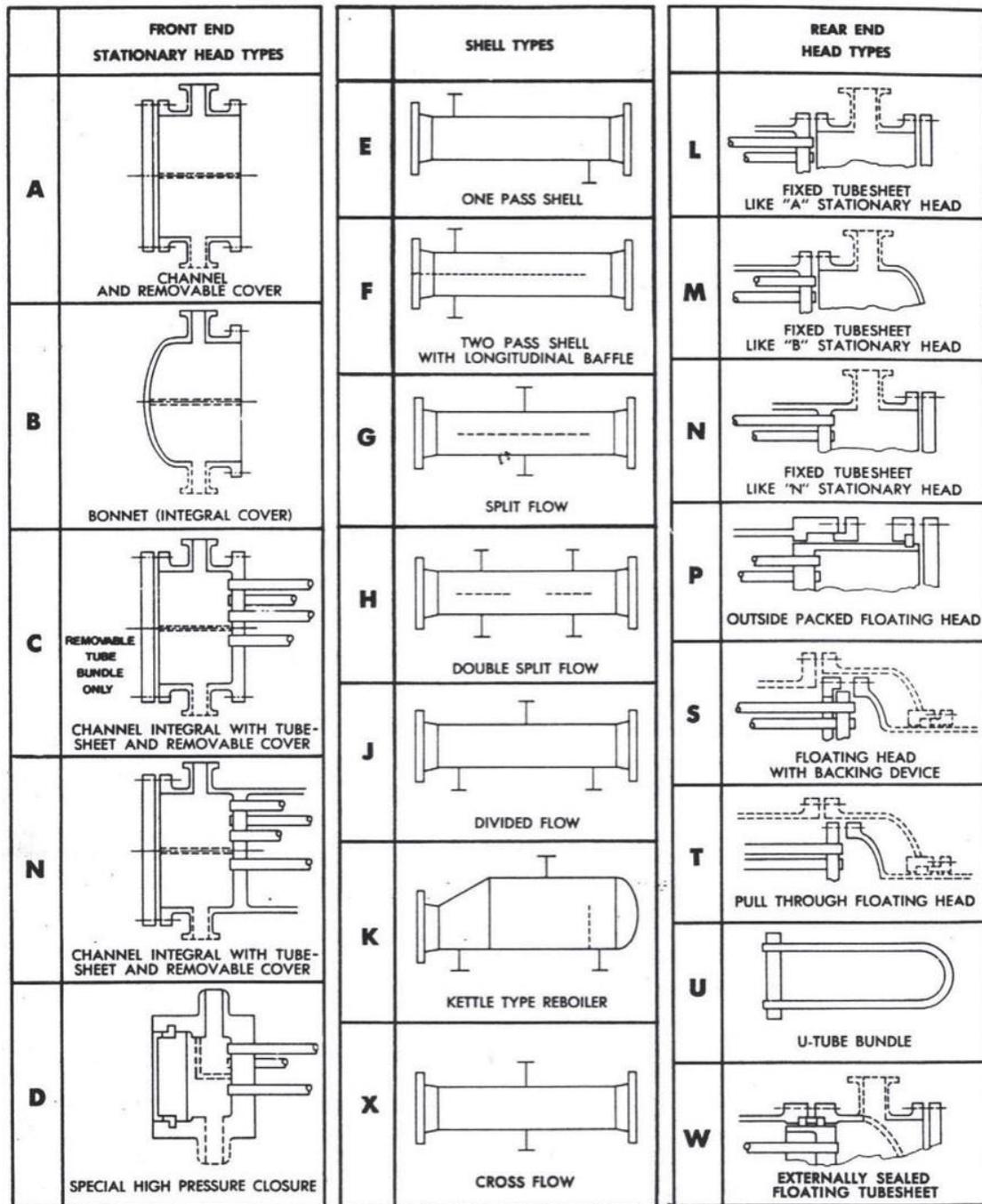


Figure II-15 : Construction standard des échangeurs à calandre.

### II.3 Principe de calcul thermique d'un échangeur

#### II.3.1 Méthode du $\Delta T_{LM}$ :

La différence de température moyenne entre les deux fluides sur l'ensemble de l'échange.

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

En pratique, on préfère exprimer cette différence moyenne en utilisant la différence moyenne logarithmique de température (LMTD) pour un échangeur à contre-courant, calculée avec les mêmes températures d'entrée et de sortie des fluides, puis multipliée par un facteur correctif F.

Ce facteur correctif F est égal à 1 dans le cas d'un échangeur à contre-courant. Le processus de calcul peut être représenté schématiquement par la figure (II.16).

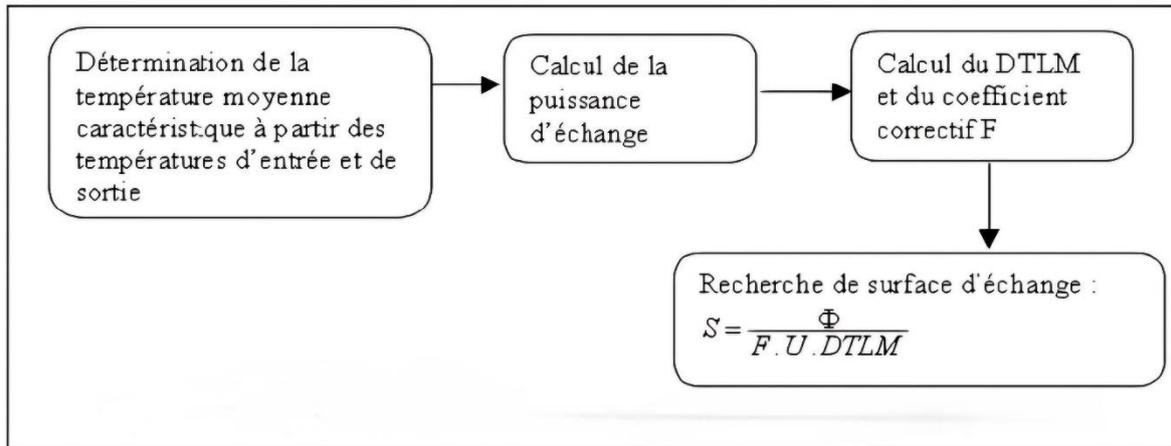


Figure II-16 : Schéma de calcul par la méthode de la différence moyenne logarithmique.

### II.3.2 Méthode de Nombre d'Unité de Transfert (NUT) :

La méthode NUT offre une solution élégante et rapide pour la majorité des problèmes rencontrés dans les études d'ingénierie concernant les échangeurs.

Le déroulement du calcul peut être schématiquement le suivant :

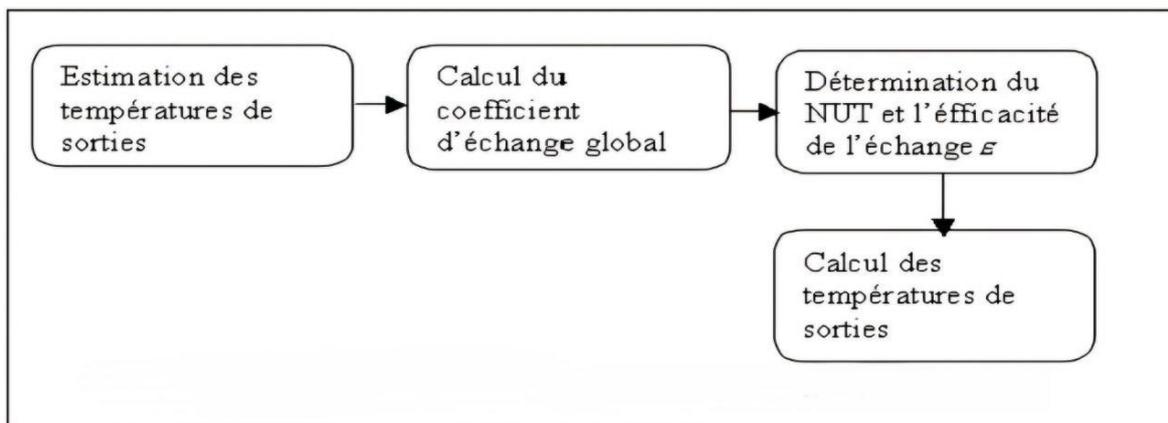


Figure II-17 : Schéma de calcul par la méthode du nombre d'unité de transfert

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

### II.3.3 Principe de la méthode Kern :

- Bilan thermique :

$$Q = m * C_{pt}(t_1 - t_2) = m * C_{pc}(T_2 - T_1) \quad (\text{II—1})$$

- Calcul de la température moyenne logarithmique  $\Delta\text{TLM}$

$$\Delta\text{TLM} = \frac{(t_1 - T_2) - (t_2 - T_1)}{\text{Ln} \frac{t_1 - T_2}{t_2 - T_1}} \quad (\text{II—2})$$

- Calcul de la température moyenne corrigée :

$$\Delta\text{TLM corrigée} = \Delta\text{TLM} \cdot F \quad (\text{II—3})$$

Ou : F est déterminée à partir de graphe  $F = f(R, E)$  (voir l'annexe n°01).

Avec :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (\text{II—4})$$

$$E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_1} \quad (\text{II—5})$$

- Détermination de coefficient  $U_S$  pour une surface donnée A

$$U_S = \frac{Q}{A \cdot \Delta\text{TLM}_{\text{corrigé}}} \quad (\text{II—6})$$

- Calcul de la température calorique  $T_c, t_c$  :

$$T_c = T_1 + F_c(T_2 - T_1) \quad (\text{II—7})$$

$$t_c = t_2 + F_c(t_1 - t_2) \quad (\text{II—8})$$

- Calcul du coefficient de transfert propre  $U_p$  :

$$U_p = \frac{h_o * h_{i0}}{h_o + h_{i0}} \quad (\text{II—9})$$

**Coté tube :**

- Section par passe :

$$a_t = \left(\frac{N_t}{n_t}\right) * \left(\frac{\pi d_i^2}{4}\right) \quad (\text{II—10})$$

- Vitesse massique :

$$G_t = \frac{m}{a_t} \quad (\text{II—11})$$

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

- Nombre de Reynolds :

$$R_{et} = \frac{(d_i * G_t)}{\mu_t} \quad (\text{II—12})$$

- Nombre de Prandtl :

$$P_r = \frac{c_{pt} * \mu_t}{\lambda_t} \quad (\text{II—13})$$

- Nombre de Nusselt :

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{\frac{1}{3}} * \Phi_t^{0.14} \quad (\text{II—14})$$

$$\Phi_t = \frac{\mu}{\mu_c} \simeq 1 \quad (\text{II—15})$$

- Coefficient du film interne  $h_i$  :

$$h_i = \frac{N_u * \lambda_t}{d_i} \quad (\text{II—16})$$

- Coefficient de film interne rapporté à la surface extérieure :

$$h_{i0} = h_i * \frac{d_i}{d_0} \quad (\text{II—17})$$

### **Coté calandre :**

- Section par calandre :

$$a_{ct} = \left(\frac{D_c}{P}\right) * (P - d_0) * B \quad (\text{II—18})$$

- Vitesse massique :

$$G_c = \frac{m}{a_{ct}} \quad (\text{II—19})$$

- Diamètre équivalent :

$$D_e = \frac{4 * P^2}{d_0 * \pi} - d_0 \quad (\text{II—20})$$

- Nombre de Reynolds :

$$R_{ec} = \frac{(D_e * G_c)}{\mu_c} \quad (\text{II—21})$$

- Nombre de Prandtl :

$$P_r = \frac{c_{pc} * \mu_c}{\lambda_c} \quad (\text{II—22})$$

- Nombre de Nusselt :

## Chapitre II Généralités sur le transfert et les échangeurs de chaleur

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}} * \Phi_t^{0.14} \quad (\text{II—23})$$

- Coefficient du film externe  $h_0$  :

$$h_0 = \frac{Nu * \lambda_c}{D_e} \quad (\text{II—24})$$

- Calcul de la Résistance d'encrassement :

$$R_s = \frac{U_p - U_s}{U_p * U_s} \quad (\text{II—25})$$

- Calcul des pertes des charges :

**Coté tube :**

$$\Delta P_t = \frac{n_c * n_t * G_t^2}{1.271 * 10^{15} * d_t} \left[ \frac{f_t * L}{d_i * \left(\frac{\mu}{\mu_c}\right)^{0.14}} + 2 \right] \quad (\text{II—26})$$

Et :

$$f_t = 0.0028 + 0.25Re_t^{-0.32} \quad (\text{II—27})$$

**Coté calandre :**

$$\Delta P_c = \frac{n_c * f_{ct} * G_c^2 * (Nc + 1) * D_c}{1.271 * 10^{15} * d_c * D_e * \left(\frac{\mu}{\mu_c}\right)^{0.14}} \quad (\text{II—28})$$

$f_{ct}$ : Coefficient de friction.

$$f_{ct} = 1.5 * \left[ \frac{d_0}{(P - d_0)Re_c} \right]^{0.2} \quad (\text{II—29})$$

### **Conclusion**

Ce chapitre est un aperçu descriptif des échangeurs et du transfert de chaleur. En effet, nous avons passé en revue non détaillé des différents types d'échangeurs, leur fonctionnement, leur classification et les méthodes de calcul.

### Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs

#### **Introduction :**

Les principaux problèmes de fonctionnement rencontrés par les utilisateurs d'échangeur de chaleur ont trait aux phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibrations et de tenue mécanique.

L'encrassement et la corrosion restent les phénomènes les moins compris de l'industrie ; ils se traduisent par :

- Un surdimensionnement des appareils dans les bureaux d'études.
- Une dépense d'énergie supplémentaire.
- Le remplacement des appareils corrodés.
- Des coûts d'arrêt des installations pour démontage et nettoyage.

Les phénomènes vibratoires doivent également être pris en compte dans le dimensionnement des échangeurs au même titre que les transferts de chaleur ou les pertes de charge. Une méthodologie permettant d'évaluer les vibrations induites par le fluide est détaillée dans le présent article.

Enfin, les problèmes de tenue mécanique sont, pour les géométries les plus classiques, traités dans divers textes réglementaires décrits succinctement en fin de l'article, de même qu'une normalisation européenne en matière d'essais qui s'est mise en place depuis les années 2000.[8]

Dans notre cas en prenons le problème d'encrassement comme cas d'étude.



Figure III-1 : Echangeur encrassé.

## **Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs**

### **III.1 Définition de l'encrassement**

L'encrassement des équipements de transfert thermique peut être définie comme étant la déposition des matières indésirables sur la surface d'échange 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. Il existe différentes catégories de l'encrassement dont l'un ou plusieurs peuvent se produire dans une situation donnée, le degré d'encrassement varié considérablement avec la nature des fluides circulant dans les tubes et calandre.[9]

### **III.2 Différents types d'encrassement**

L'encrassement thermique peut être classé selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de sédimentation, le type d'installation de transfert de chaleur, ou la raison de l'encrassement. Il est important de noter que, dans la réalité industrielle, l'encrassement est souvent mixte, c'est-à-dire qu'il résulte de la combinaison d'au moins deux types fondamentaux. Toutefois, au stade de la formation du dépôt, un type peut prédominer et accélérer la contribution des autres. Les types d'encrassement comprennent :

- Encrassement particulaire
- Encrassement par corrosion
- Encrassement par entartrage
- Encrassement par réaction chimique
- Encrassement biologique
- Encrassement par solidification

#### **A. Encrassement particulaire**

Il s'agit du dépôt de particules transportées par l'écoulement des fluides industriels de provenance diverses :

- L'eau des chaudières contenant des produits corrosifs (oxydes et hydroxydes de fer),
- Eaux des tours de refroidissement,
- Particules transportées par l'air,
- Écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussière,
- Fumées industrielles de résidus solides de combustion.[4]

#### **B. Encrassement dû à la corrosion**

L'encrassement par corrosion est le conséquent d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface d'échange de chaleur et le fluide qui la traversé, Les produits qui se produisent et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement.[10]

Il existe quatre types de corrosion :

## **Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs**

- Corrosion uniforme caractérisée par des pertes d'épaisseur fréquentes mais dont la vitesse n'est pas nécessairement proportionnelle au temps.
- Corrosion par piqûres, lorsque l'attaque est limitée à des zones de très petite surface.
- Corrosion fissurante à l'échelle microscopique ou intergranulaire.
- Corrosion sélective dans laquelle un seul élément de l'alliage est sélectivement attaqué.

### **C. Entartrage**

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin (tartre) à partir d'une solution liquide. Il dépend donc de la composition de l'eau industrielle. Il reflète le déplacement de l'équilibre calco-carbonique de l'eau dans le sens de production de tartre en raison de la dureté de l'eau et de l'augmentation de température. L'entartrage peut se produire dans les échangeurs refroidis à l'eau, dans les unités de dessalement d'eau de mer ou saumâtre, dans les chaudières, dans les échangeurs de l'industrie agroalimentaire, dans les systèmes géothermiques. Il existe différentes méthodes de prévention de l'entartrage.[4]

### **D. Encrassement biologique**

Il est dû au développement de micro-organismes (bactéries, algues ou champignons) qui créent un film au contact de la surface d'échange : il peut même, à l'échelle macroscopique, être caractérisé par le développement de coquillages. Les actions de prévention consistent soit à détruire les micro-organismes, soit à empêcher leur développement. Les traitements correspondants utilisent des biocides (chlore) toxiques pour la plupart des micro-organismes. Il s'agit, dans ce cas, d'une action rapide. Le choix final du traitement à adopter est en général un compromis entre les problèmes de toxicité, de pollution, de coût et de maintenance. La tendance à l'encrassement biologique est naturelle puisque les bactéries sont omniprésentes dans l'eau ; en outre, les conditions physico-chimiques rencontrées dans les échangeurs sont le plus souvent favorables à son développement.[4]

### **E. Encrassement par réactions chimiques**

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Ce type d'encrassement est souvent lié aux réactions de polymérisation produisant la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques.[4]

### **F. Encrassement par solidification**

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace 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).[1]

## Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs

### III.3 Apparition et développement de l'encrassement

Les auteurs s'accordent en général pour considérer cinq phases dans l'apparition et le développement de l'encrassement. Ces cinq phases peuvent chronologiquement se décomposer comme suit.

- **Initiation** : Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.
- **Transfert des particules à 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.
- **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.
- **Réentraînement des particules déposées** : Il est classique de supposer que le mécanisme de réentraînement est lié aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt. Lorsque la force aérodynamique est supérieure aux forces d'adhésion d'une particule, le réentraînement se produit par érosion ; lorsqu'il concerne des agglomérats de particules, il correspond à un phénomène d'écaillage.

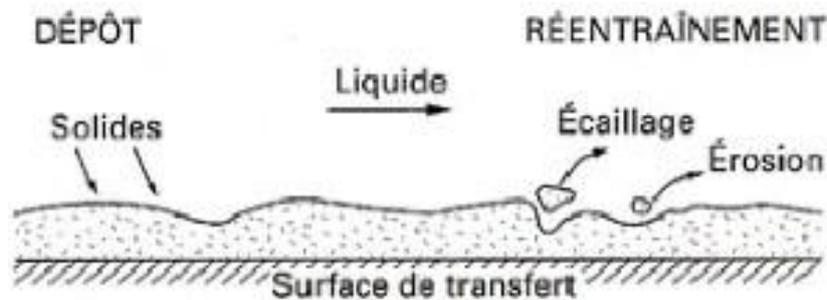


Figure III-2 : représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide.

- **Viellissement du dépôt** : Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline, du dépôt dû à des phénomènes tels que la polymérisation, la cristallisation ou la déshydratation. La consolidation du dépôt ou son écaillage peuvent, alors, être observés.[11]

### III.4 Effet de l'encrassement sur le fonctionnement des échangeurs

L'encrassement des échangeurs thermiques induit un certain nombre d'effets indésirables ayant un coût économique ou environnemental non négligeable, ainsi : [4]

- L'encrassement affaiblit le coefficient de transfert thermique. Par conséquent, le coût dépensé pour obtenir le coefficient de transfert thermique voulu augmente.

## **Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs**

- L'encrassement peut provoquer un écart de température supérieur à la normale et augmenter ainsi les consommations énergétiques. Ceci peut aussi engendrer des pannes des équipements en raison des surchauffes (surtout la surchauffe des pompes et compresseurs).
- Les coûts d'entretien sont plus élevés afin de supprimer les dépôts d'encrassement avec des produits chimiques, des dispositifs anti-salissures ou mécaniques, ou le remplacement des équipements corrodés.
- Les coûts de consommation d'eau, d'électricité et de carburant augmentent pour compenser les effets de l'encrassement.
- Des pertes de production liées aux arrêts d'entretien planifiés ou non causés par l'encrassement entraînent une augmentation des coûts d'exploitation.

### **III.5 La maintenance des échangeurs de chaleur**

#### **III.5.1 Définition**

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. (AFNOR, norme NFX 60-010)

#### **III.6 Les méthodes de maintenances**

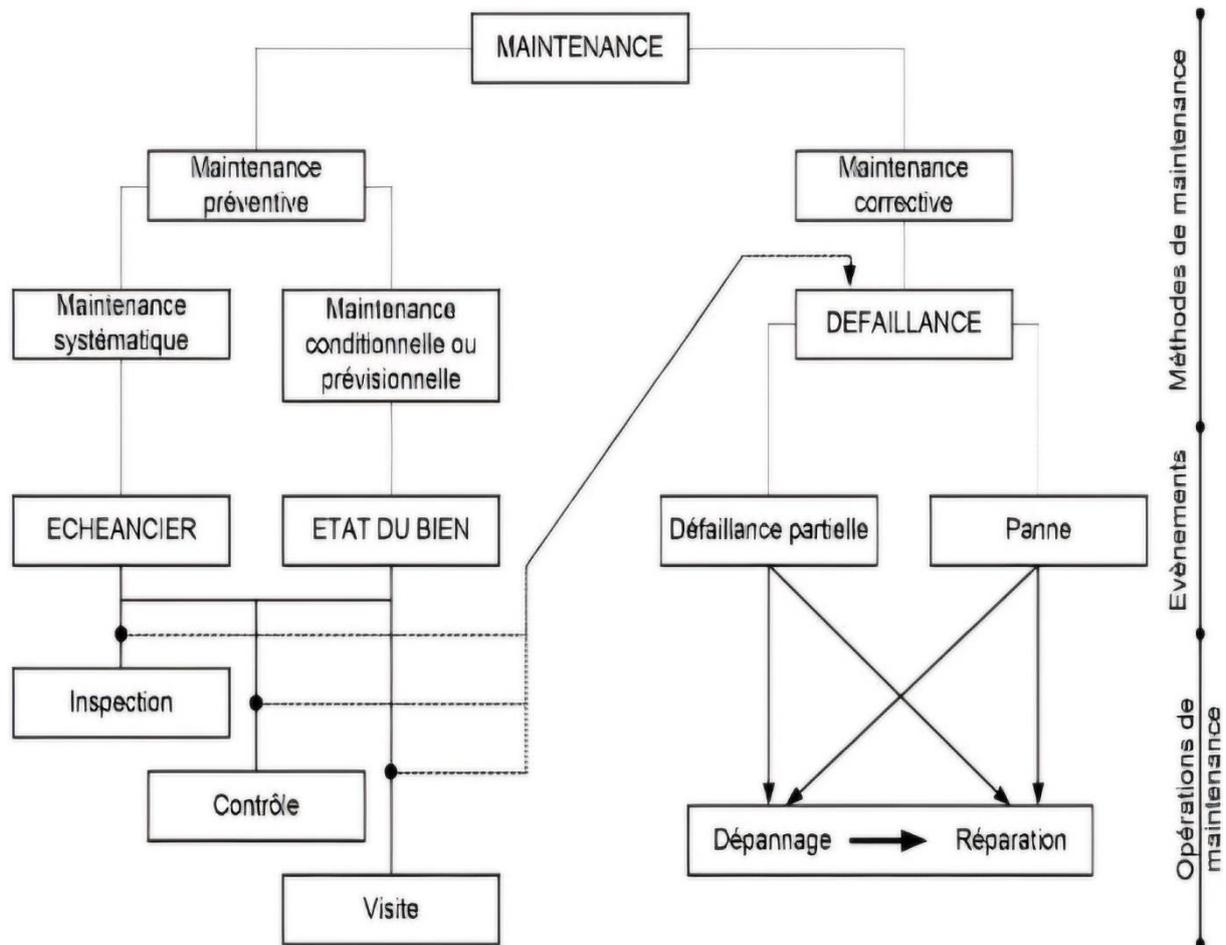
On distingue deux types : la maintenance corrective et la maintenance préventive cette dernière comprend la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle.

**La maintenance préventive** : Elle consiste à effectuer des inspections et des interventions régulières sur un bien afin de prévenir les pannes et les dégradations. Cela peut inclure des tâches telles que la lubrification des machines, le remplacement des filtres et la mise à jour des logiciels.

**La maintenance corrective** : Elle consiste à réparer les pannes et les dégradations lorsqu'elles surviennent. Cela peut inclure des tâches telles que la réparation de machines, le remplacement de pièces défectueuses et la correction de bogues logiciels.

Ce schéma simplifié les différents types de maintenance :

## Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs



### III.6.1 Les solutions pour prévenir l'encrassement des échangeurs de chaleur

L'encrassement des échangeurs de chaleur peut être un problème majeur, entraînant des pertes d'efficacité, des coûts de maintenance élevés et une durée de vie réduite des équipements. Voici plusieurs solutions pour prévenir l'encrassement dans les échangeurs de chaleur :

#### 1. Choix de matériaux appropriés

- **Matériaux résistants à la corrosion et à l'encrassement** : Utiliser des matériaux comme l'acier inoxydable, les alliages de nickel, et les matériaux composites qui résistent mieux à l'encrassement.

#### 2. Conception de l'échangeur de chaleur

- **Augmentation de la vitesse d'écoulement** : Concevoir des échangeurs avec des vitesses d'écoulement plus élevées pour réduire la sédimentation des particules.
- **Designs autonettoyants** : Utiliser des échangeurs de chaleur à plaques ou des tubes ondulés qui favorisent un nettoyage plus facile et réduisent les zones mortes où les dépôts peuvent s'accumuler.

## Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs

### 3. Traitement des fluides

- **Filtration** : Installer des filtres en amont pour enlever les particules solides avant qu'elles n'entrent dans l'échangeur.
- **Conditionnement chimique** : Utiliser des inhibiteurs de corrosion et des anti-encrassements pour traiter les fluides afin de prévenir la formation de dépôts.
- **Adoucissement de l'eau** : Si l'eau utilisée est dure, envisager l'utilisation de systèmes d'adoucissement pour réduire la formation de tartre.

### 4. Maintenance régulière

- **Nettoyage périodique** : Mettre en place un programme de nettoyage régulier, en utilisant des méthodes telles que le nettoyage chimique, le nettoyage mécanique (brosses ou balles de nettoyage) ou le nettoyage à haute pression.
- **Surveillance et inspection** : Effectuer des inspections régulières pour détecter précocement les signes d'encrassement et intervenir rapidement.

### 5. Techniques spécifiques

- **CIP (Clean-In-Place)** : Utiliser des systèmes de nettoyage en place pour nettoyer l'équipement sans le démonter, ce qui permet de réduire les temps d'arrêt et d'améliorer l'efficacité.
- **Traitement UV** : Pour certaines applications, l'utilisation de lumière ultraviolette peut aider à détruire les micro-organismes qui contribuent à l'encrassement biologique.
- **Électrodéposition** : Utiliser des technologies d'électrodéposition pour éviter la formation de dépôts sur les surfaces internes des échangeurs.

### 6. Innovation technologique

- **Revêtements anti-encrassement** : Appliquer des revêtements spéciaux sur les surfaces internes des échangeurs pour réduire l'adhésion des dépôts.
- **Échangeurs de chaleur à surface étendue** : Utiliser des conceptions qui maximisent la surface d'échange thermique tout en minimisant les zones propices à l'encrassement.

### 7. Gestion proactive des opérations

- **Optimisation des paramètres de fonctionnement** : Ajuster les paramètres de fonctionnement tels que la température et la pression pour minimiser les conditions favorables à l'encrassement.
- **Recirculation et dilution** : Utiliser la recirculation des fluides et la dilution pour maintenir des concentrations de dépôts potentiels à des niveaux bas.

## Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs

### III.6.2 Nettoyage de l'échangeur :

Pour améliorer la performance des échangeurs de chaleur il faut réduire l'encrassement périodiquement, il faut éliminer toutes les substances afin d'avoir un échangeur presque neuf [12].

#### A. Nettoyage mécanique :

- **Brossage** : Utilisation de brosses métalliques ou en nylon pour éliminer les dépôts et les encrassements des surfaces des tubes.



Figure III-3 : Nettoyage par un brosses rotatif.

- **Écouvillonnage** : Introduction d'écouvillons à travers les tubes pour enlever les dépôts.
- **Grattage** : Utilisation de racleurs ou de grattoirs pour enlever les dépôts tenaces.

#### B. Nettoyage chimique :

- **Circulation de produits chimiques** : Utilisation de solutions chimiques pour dissoudre les dépôts, tels que les agents détartrants pour les dépôts de calcaire.
- **Trempage chimique** : Immersion des parties encrassées dans une solution chimique pour dissoudre les dépôts.

#### C. Nettoyage par haute pression :

- **Hydrojetting** : Utilisation de jets d'eau à haute pression pour éliminer les dépôts et les encrassements des surfaces des tubes et des plaques.
- **Hydrodynamique** : Utilisation de techniques hydrodynamiques pour nettoyer les surfaces internes des tubes.

#### D. Nettoyage ultrasonique :

- **Bains ultrasoniques** : Utilisation d'ondes ultrasoniques pour créer des vibrations dans une solution de nettoyage, ce qui aide à détacher les dépôts et les encrassements.

## **Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs**

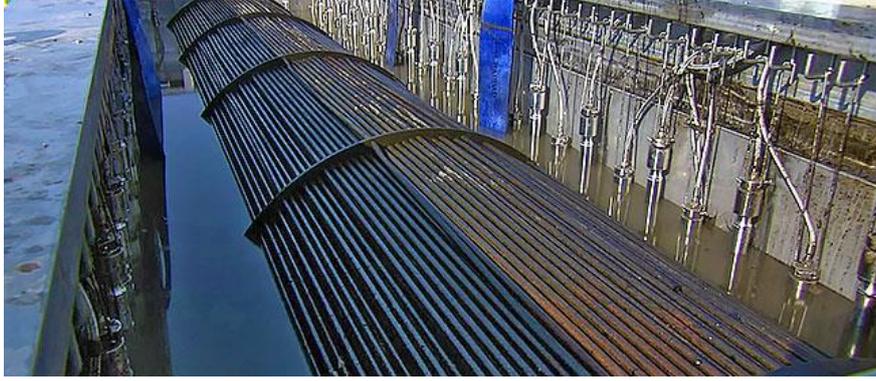


Figure III-4 : Nettoyage par ultrasons.

### **E. Nettoyage avec des balles éponge :**

- **Circulation de balles éponge :** Introduction de balles éponge dans le système de l'échangeur de chaleur pour frotter et enlever les dépôts à l'intérieur des tubes.

### **III.6.3 Étapes du processus de nettoyage**

#### **A. Inspection initiale :**

- Évaluer l'état de l'échangeur de chaleur et identifier les zones encrassées.
- Drainer les fluides et retirer les couvercles pour accéder aux surfaces internes.

#### **B. Nettoyage :**

- Appliquer la méthode de nettoyage choisie (mécanique, chimique, haute pression, etc.).
- Utiliser des équipements appropriés pour garantir un nettoyage efficace.

#### **C. Rinçage :**

- Rincer l'échangeur de chaleur pour éliminer les résidus de produits chimiques ou les dépôts détachés.

#### **D. Inspection finale :**

- Vérifier la propreté de l'échangeur de chaleur.
- Réassembler et reconnecter l'échangeur de chaleur au système.

#### **E. Tests de performance :**

- Effectuer des tests pour s'assurer que l'échangeur de chaleur fonctionne correctement après le nettoyage.

### **Conclusion**

Le contrôle de l'encrassement et la maintenance régulière de l'échangeur de chaleur sont essentielles pour assurer une performance optimale et prolonger la durée de vie de l'équipement,

### **Chapitre III Les Problèmes de fonctionnement des échangeurs**

la maîtrise de la politique de maintenance nous aide à surveiller constamment les conditions opérationnelles et à agir à temps pour remédier le problème de l'encrassement.

### Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

#### **Introduction**

L'analyse de l'encrassement d'un échangeur de chaleur est essentielle pour le bon fonctionnement de l'équipement et l'unité de production, cette analyse permet de suivre une politique de maintenance adéquate dans le but d'assurer le meilleur compromis performance-coût et environnement.

#### **IV.1 But de calcul :**

Le but de notre calcul concerne la vérification des performances de l'échangeur 100-E1A~D avec le calcul de la résistance d'encrassement, les pertes de charge et de l'efficacité dans les trois cas différents (après nettoyage, après 2 mois de nettoyage, et pendant un fonctionnement de neuf mois).

Dans le cas de notre étude le préchauffeur est composé de quatre échangeurs placés en série, peuvent être considérés comme étant un seul échangeur ayant les caractéristiques suivantes :

- Le même débit de naphta traverse le côté tube et le côté calandre de chaque échangeur.
- Le nombre total de tubes est la somme des tubes de chaque échangeur.
- Le nombre total de passages côté tube est égal à quatre fois le nombre de passages côté tube de chaque échangeur.
- Le nombre total de passages côté calandre est égal à quatre fois le nombre de passages côté calandre de chaque échangeur.
- Les températures d'entrée et de sortie des fluides sont mesurées aux extrémités de la batterie d'échangeurs.
- Le débit volumique du naphta reste constant tout au long du circuit de préchauffage.

#### **Hypothèses simplificatrices :**

Nous nous limitons dans notre étude au volet thermique du problème, en posant pour cela certaines hypothèses, à savoir :

- le régime est permanent,
- les propriétés thermo physiques des fluides sont constantes (dans l'intervalle de température considéré),
- l'échangeur est adiabatique,
- le transfert de chaleur s'effectue par convection et conduction,
- la seule surface d'échange est la surface de séparation des deux fluides (pas de changement de phase).

**IV.2 Présentation de l'échangeur 100-E1A~D**

**IV.2.1 Positionnement de l'échangeur de chaleur 100-E1A~D :**

L'échangeur (100E-1 A-D) est installé dans l'unité de reformage catalytique (U-100), précisément dans la section de prétraitement catalytique, entre les réservoirs de stockage (600-s-20/21) et le réchauffeur à combustion (100 F-1).

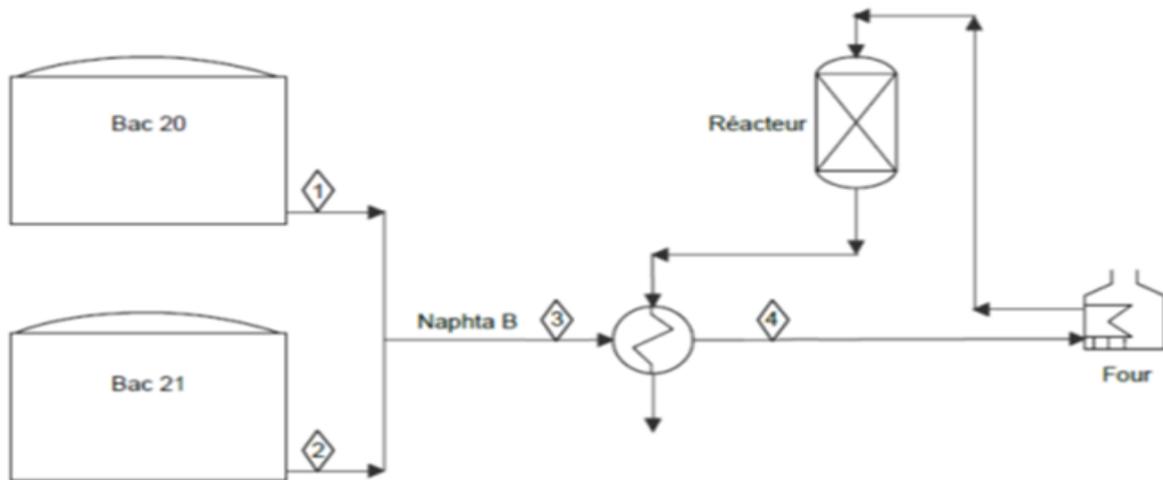


Figure IV-1 : Positionnement de l'échangeur de chaleur 100-E1A~D

**IV.2.2 Le rôle de préchauffeur 100-E1A~D :**

Le préchauffeur 100-E1A~D est constitué de quatre échangeurs de chaleur en série qui permettent de chauffer le naphta « B » non traité provenant des réservoirs de stockage 600-S-20/21 par Les effluents de réacteur 100-R-1 ( naphta « B » traité), après le chauffage le naphta « B » non traité sera injecté dans le réchauffeur à combustion 100 F-1 à une température de 252°C, après le chauffage le naphta « B » non traité dans le réchauffeur à combustion 100 F-1 sera injecté dans le réacteur 100-R-1. Le naphta « B » non traité circule côté calandre et le naphta « B » traité chaude côté tube.

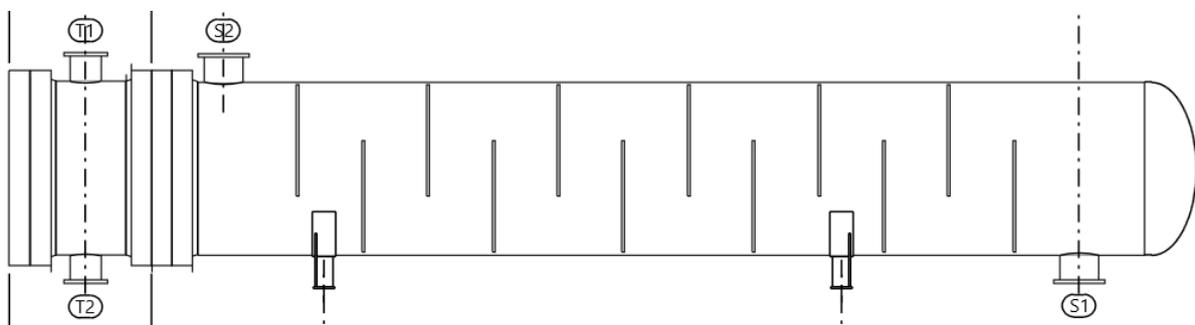


Figure IV-2 : Schéma de l'échangeur 100-E1

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

Chaque échangeur dans 100-E1A~D a deux passes côté tube et une passe côté calandre, il a 765 tubes en U, disposer en pas carré incliné.

L'échangeur de chaleur 100-E1A~D est de type AEU 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.

AEU signifie :

- A : Boîte de distribution avec couvercle démontable
- E : Simple passe
- U : Faisceau à tubes en U

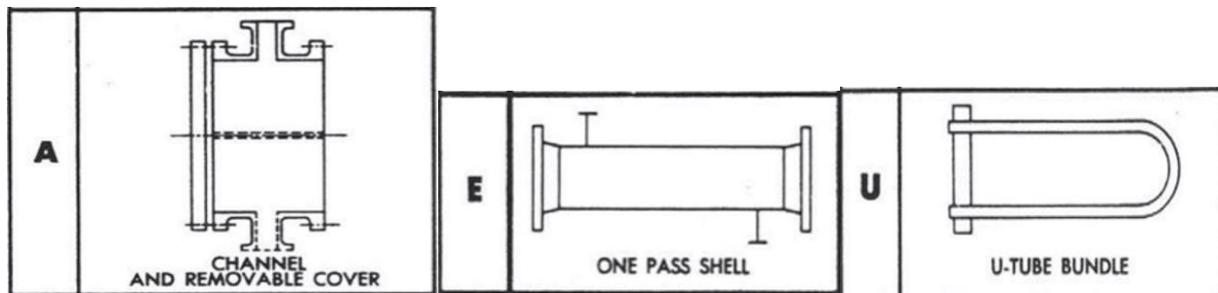


Figure IV-3 : a) la boîte de distribution, b) la calandre, c) Faisceau à tubes en U.

### IV.2.3 Les éléments d'échangeur 100-E1A~D

#### A. Boîte de distribution

La boîte de distribution, également appelée tête de canal ou boîte de compartiment, est fixée à l'extrémité des tubes. Elle répartit le fluide entrant de manière uniforme dans les tubes et collecte le fluide sortant. Dans les échangeurs en U, cette boîte est située à une seule extrémité, car les deux extrémités des tubes sont fixées à la même plaque tubulaire.



Figure IV-4 : Boîte de distribution (deux passes côté tubes).

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

### **B. La calandre**

C'est l'enveloppe métallique cylindrique se trouvant dans le faisceau tubulaire, acier et carbone sont les matériaux les plus couramment utilisés pour la construction de la calandre. Pour un diamètre nominal inférieur à 24", la calandre est constituée par un tube d'acier, pour des pressions de service inférieure à 20 kg /cm<sup>2</sup>.

Au-delà de 24", la calandre est réalisée à partir des plaques d'acier reliés et soudés. A chaque extrémité sont soudées les brides qui porteront le couvercle et la boîte de distribution. Les tubulaires d'entrée et de sortie sont soudées avec plaque de renforcement ou non. Selon la pression de service. Enfin la calandre pourra être équipée par des anneaux pour le lavage porteras la plaque d'identité.[13]

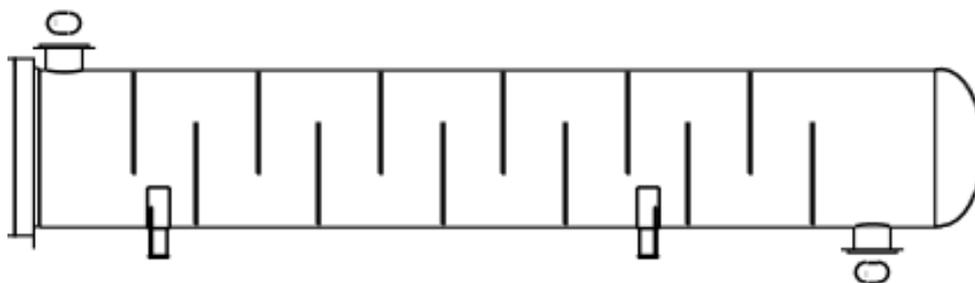


Figure IV-5 : Calandre une seule passe.

Tableau IV-1 : Caractéristique de la calandre.

Longueur (mm)	7735
Diamètre (mm)	1194
Epaisseur (mm)	21
Température de calcul (°C)	367
Pression de calcul (kg /cm <sup>2</sup> )	36.5
Surépaisseur de corrosion (mm)	3
Matériau	A 515 Gr 60

### **C. Les plaques tubulaires**

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

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

Les plaques tubulaires peuvent être en acier ordinaire ou en acier spécial massif.

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

Les plaques tubulaires sont les parties délicates des échangeurs. Les interstices entre tubes et plaques sont des lieux privilégiés de corrosion (la concentration en produit agressif y est parfois très supérieure à celle mesurée dans les autres parties de l'échangeur, car il y a stagnation du fluide). Par ailleurs, des dilatations différentielles excessives peuvent faire céder les dudgeonnages ou les soudures.

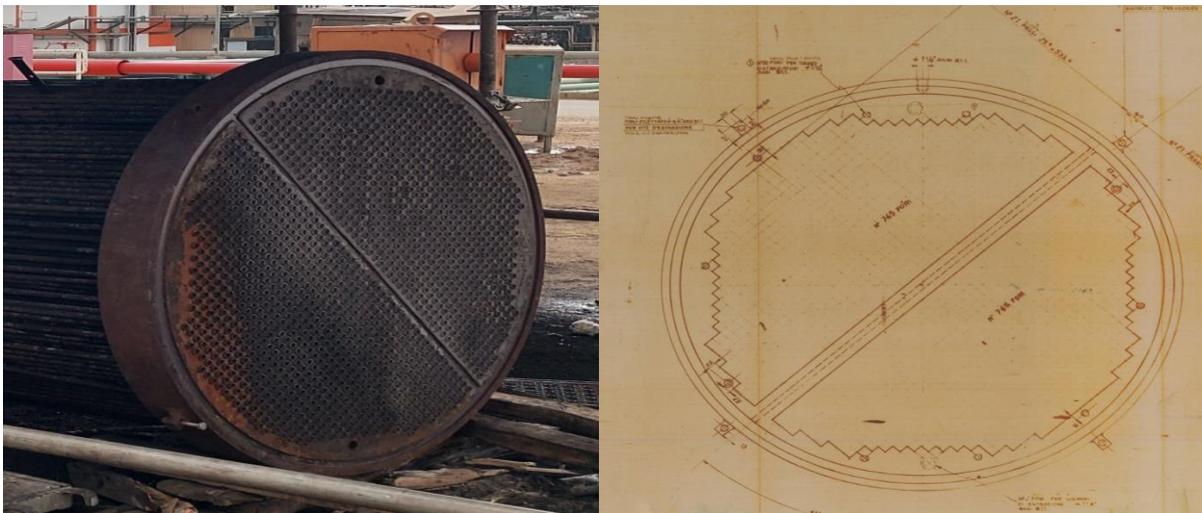


Figure IV-6 : Photo et Schéma de la plaque tubulaire.

Tableau IV-2 : Caractéristique de la plaque tubulaire.

Diamètre (mm)	1194
Epaisseur (mm)	106
Matériau	A 105

### **D. Les tubes**

Ce sont généralement des tubes normalisés dont le diamètre annoncé correspond exactement au diamètre extérieur.

Les matériaux utilisés dépendent des fluides choisis ; les plus courants sont les aciers ordinaires, les aciers inoxydables, le cuivre ou le laiton... etc.

Il y a quatre dispositions des tubes, comme indiqué dans la figure : triangulaire (30 °), tourné triangulaire (60 °), carré (90 °), et faire tourner carré (45 °).

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

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.

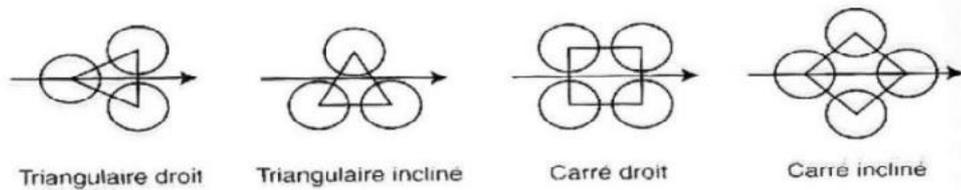


Figure IV-7 : dispositions des tubes.

### **E. Le faisceau tubulaire**

Le faisceau tubulaire se compose de tubes, de chicanes, de plaques tubulaires, d'entretoises et de tirants. Les entretoises et les tirants sont essentiels pour maintenir l'écart entre les chicanes.

Le faisceau tubulaire est assemblé de manière à ce que les chicanes soient correctement positionnées grâce à plusieurs tirants et entretoises. Les tirants sont vissés dans la plaque tubulaire et ajustent la longueur du faisceau jusqu'au dernier déflecteur, où ils sont fixés par des contre-écrous. Les entretoises sont placées entre les chicanes et installées sur les tirants.

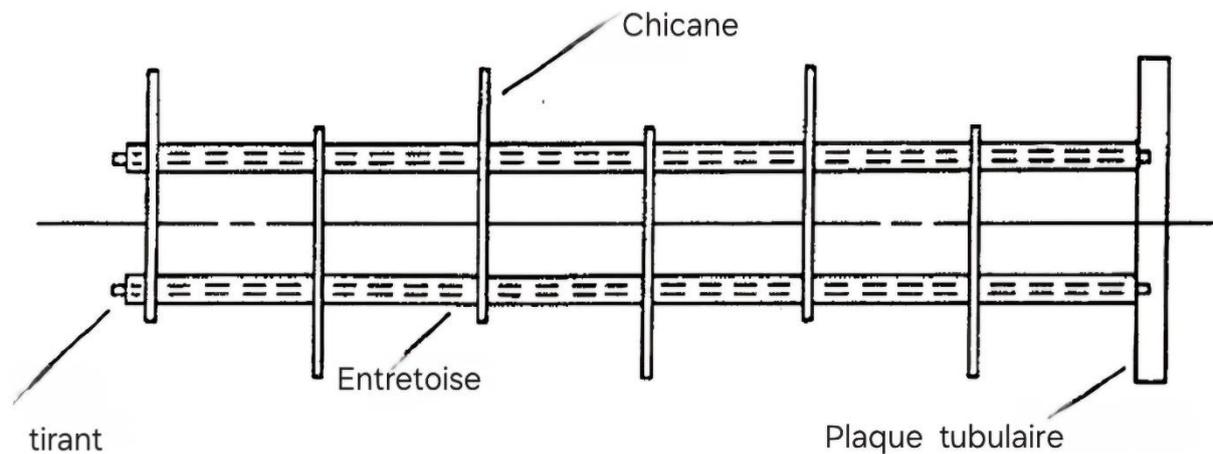


Figure IV-8 : Entretoise et tirant.

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement



Figure IV-9 : Faisceau tubulaire de l'échangeur.

Tableau IV-3 : Caractéristique des tubes d'échangeur.

Longueur (mm)	6096
Diamètre (mm)	19.05
Epaisseur (mm)	2.11
Température de calcul (°C)	432
Pression de calcul (kg /cm <sup>2</sup> )	32
Nombre des tubes	765 en U
Matériau	A 209 Gr-T1
Pas (carré incliné)	25.4

### **F. Chicanes**

Les chicanes sont généralement utilisées du côté de la calandre pour soutenir les tubes, maintenir leur espacement et diriger le fluide dans la calandre à travers le faisceau tubulaire de manière précise. Il existe plusieurs types de chicanes, qui peuvent être installées de différentes façons pour obtenir le modèle de flux nécessaire à une application spécifique.

Les chicanes peuvent être orientées normalement ou parallèlement aux tubes. Elles se classent ainsi en chicanes transversales ou longitudinales. Les chicanes transversales dirigent le fluide dans la calandre de manière presque perpendiculaire aux tubes, augmentant ainsi la turbulence du fluide. La majorité des échangeurs tubulaires à calandre utilisent des chicanes transversales.

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

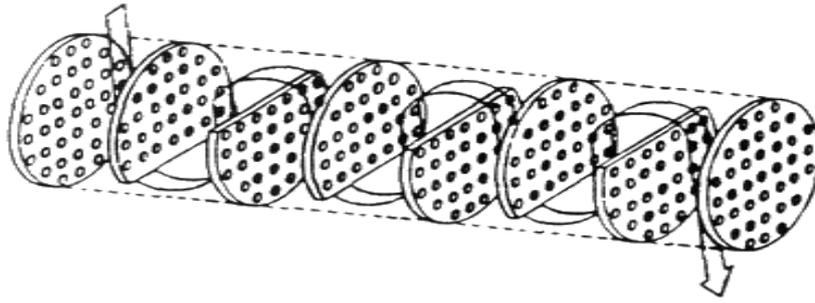


Figure IV-10 : chicane transversale.

### G. Les déflecteurs

Sont installés au niveau des tubulaires, il sert à protéger dans certains cas le faisceau contre l'impact du fluide entrant et de diminué l'érosion des tubes par le flux des fluides.

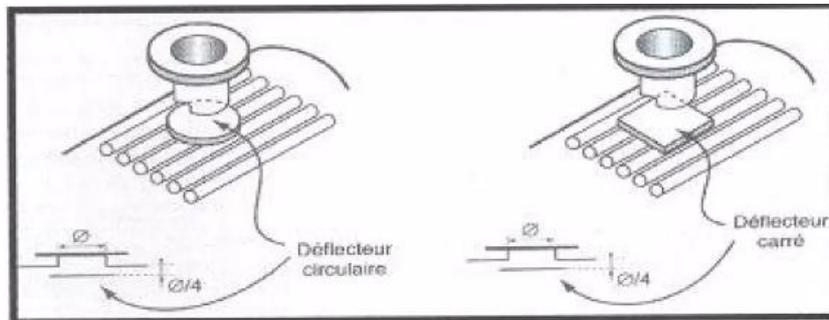


Figure IV-11 : Déflecteurs.

### IV.3 Composition de la charge (%) :

## **Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement**

Tableau IV-4 : Composition de la charge.

<b>PARAFFINES</b>	
<b>NC4</b>	<b>0.18</b>
<b>IC5</b>	<b>0.90</b>
<b>NC5</b>	<b>2.28</b>
<b>IC6</b>	<b>4.26</b>
<b>NC6</b>	<b>6.40</b>
<b>IC7</b>	<b>7.71</b>
<b>NC7</b>	<b>8.87</b>
<b>IC8</b>	<b>7.94</b>
<b>NC8</b>	<b>6.80</b>
<b>IC9</b>	<b>6.82</b>
<b>NC9</b>	<b>5.23</b>
<b>IC10</b>	<b>4.99</b>
<b>NC10</b>	<b>1.27</b>
<b>NAPHTENES</b>	
<b>C-PENTANE</b>	<b>0.24</b>
<b>C-HEXANE, M-C-PENTANE</b>	<b>3.90</b>
<b>C7</b>	<b>9.06</b>
<b>C8</b>	<b>8.91</b>
<b>C9</b>	<b>3.49</b>
<b>C10</b>	<b>0.90</b>
<b>AROMATIQUES</b>	
<b>BENZENE</b>	<b>1.12</b>
<b>TOLUENE</b>	<b>2.09</b>
<b>C8</b>	<b>3.27</b>
<b>C9</b>	<b>3.03</b>
<b>C10</b>	<b>0.34</b>

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

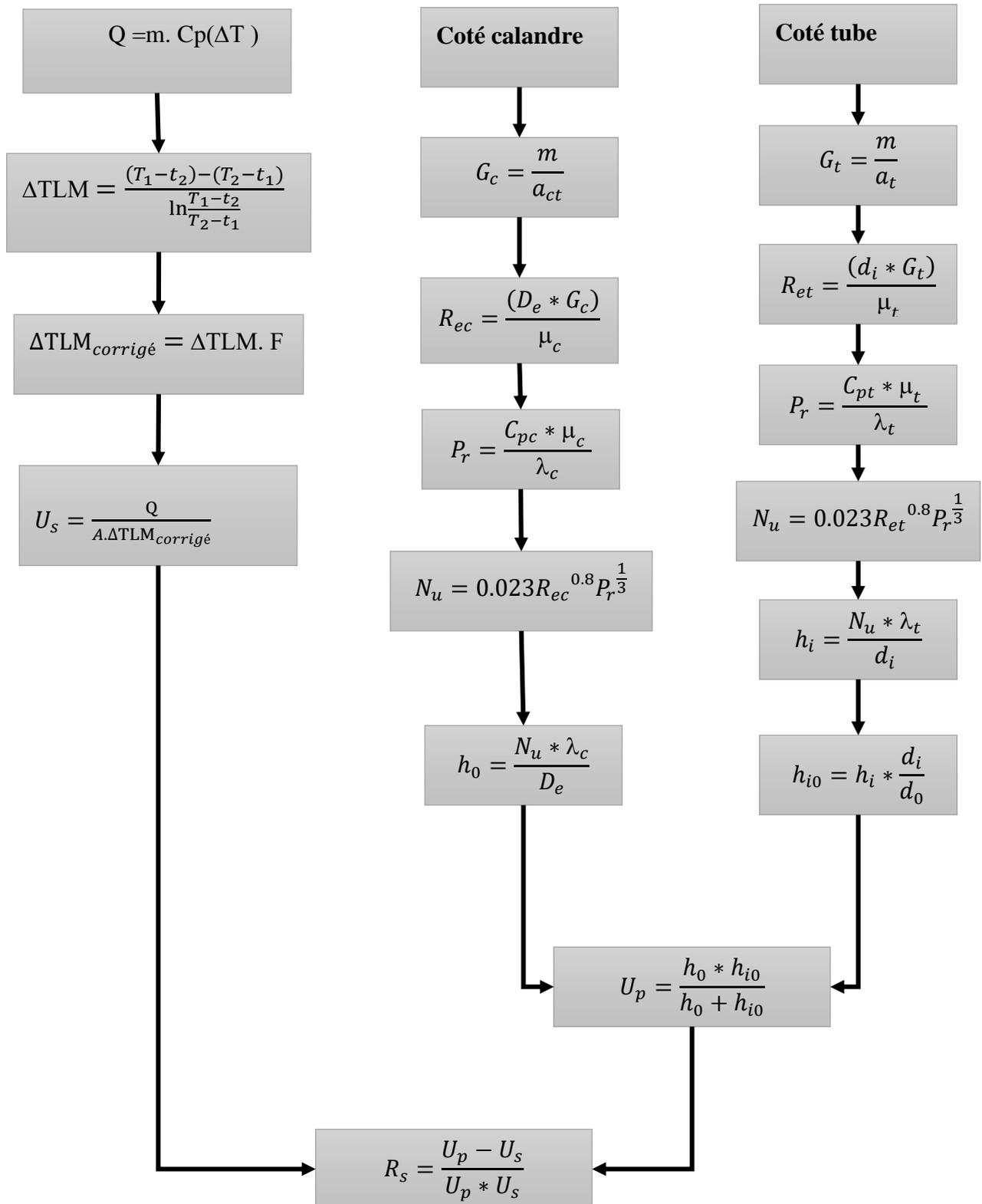
### IV.4 Données sur l'échangeur 100-E1A~D :

Tableau IV-5 : Données sur l'échangeur 100-E1A~D.

<b>Calandre</b>	
Fluide en circulation	Naphta non traité
Débit (kg/s)	31.67
Nombre de passes	4
Diamètre intérieur de la calandre (mm)	1194
Nombre de chicanes	12
Espacement des chicanes (mm)	460
Coef d'encrassement hr.m <sup>2</sup> .°c/ Kcal	0.00062
<b>Faisceau</b>	
Fluide en circulation	Naphta traité
Débit (kg/s)	31.67
Nombre de passes	8
Nombre des tubes	3060 en U
Longueur des tubes (mm)	6096
Diamètre extérieur des tubes (mm)	19.05
Epaisseur des tubes (mm)	2.11
Pas carré incliné (mm)	25.4
Coef. d'encrassement hr.m <sup>2</sup> .°c/ Kcal	0.00041

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

Le calcul de la résistance d'encrassement est réalisé en suivant l'organigramme illustré sur la figure suivante :



## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

### IV.5 Les trois cas des calculs :

#### IV.5.1 Premier cas (après 9 mois de marche) :

Tableau IV-6 : caractéristique des fluides a la température calorifique.

Propriétés	Côté calandre	Côté tube
Température d'entrée (°C)	43.3	290
Température de sortie (°C)	246.7	113.9
Viscosité dynamique kg/m.s	$0.17369 \cdot 10^{-3}$	$0.109 \cdot 10^{-3}$
Chaleur spécifique (J/kg.°C)	2567	2896
Conductivité thermique (w/m.°C)	0.0909	0.0684
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	596	491

#### A. Calcul de la quantité de chaleur échangée

Fluide chaud : (coté tube)

$$Q_1 = m \cdot C_{pt}(\Delta t) = m \cdot C_{pt}(t_1 - t_2) = 31.67 \cdot 2896 \cdot (290 - 113.9)$$

$$Q_1 = 16.15 \cdot 10^6 \text{ j/s}$$

Fluide froid : (coté calandre)

$$Q_2 = m \cdot C_{pc}(\Delta T) = m \cdot C_{pc}(T_2 - T_1) = 31.67 \cdot 2567 \cdot (246.7 - 43.3)$$

$$Q_2 = 16.53 \cdot 10^6 \text{ j/s}$$

Donc :

$$Q = 16.53 \cdot 10^6 \text{ j/s}$$

#### B. Calcul de la température moyenne logarithmique $\Delta TLM$

$$\Delta TLM = \frac{(t_1 - T_2) - (t_2 - T_1)}{\ln \frac{t_1 - T_2}{t_2 - T_1}} = \frac{(290 - 246.7) - (113.9 - 43.3)}{\ln \frac{290 - 246.7}{113.9 - 43.3}} = 55.97^\circ\text{C}$$

Facteur de correction F = f (E. R)

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{43.3 - 246}{113.9 - 290} = 1.155$$

[49]

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{113.9 - 290}{43.3 - 290} = 0.713$$

Pour  $R=1.15$  et  $E=0.71$  on obtient du graphe  $F=0.9$

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = \Delta TLM \cdot F = \boxed{50.37 \text{ °C}}$$

**C. Détermination de coefficient  $U_S$  pour une surface donnée  $A=2174 \text{ m}^2$**

$$U_S = \frac{Q}{A \cdot \Delta TLM_{\text{corrigé}}} = \frac{16.53 \cdot 10^6}{2178.4 \cdot 50.37} = \boxed{150.64 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

**D. Calcul de la température calorique  $T_c, t_c$  :**

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

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

Avec :

$F_c$  : est un facteur de correction calculé comme suit :

$$F_c = \frac{\Delta TLM - \Delta T}{\Delta t - \Delta T}$$

Si les écarts de température sont faibles ( $\Delta TLM < 30^\circ\text{C}$  ou  $\Delta T < 60^\circ\text{C}$  ou  $\Delta t < 60^\circ\text{C}$ ) alors, on prend directement :  $F_c = 0.5$

$$\Delta TLM = 50.37^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 246.7 - 43.3 = 203.4^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 290 - 113.9 = 176.1^\circ\text{C}$$

Donc on prend  $F_c = 0.5$

$$T_c = 43.3 + 0.5(246.7 - 43.3) = \boxed{145^\circ\text{C}}$$

$$t_c = 113.9 + 0.5(290 - 113.9) = \boxed{201.95^\circ\text{C}}$$

**E. Calcul du coefficient de transfert propre :**

Détermination de  $h_i$  et  $h_o$  :

Coté tube :

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re_t = \frac{(d_i * G_t)}{\mu_t}$$

Calcul de la vitesse massique :

$$G_t = \frac{m}{a_t}$$

$$a_t = \left(\frac{N_t}{n_t}\right) * \left(\frac{\pi d_i^2}{4}\right) = 750 * \left(\frac{\pi * 0.01483^2}{4}\right) = 0.132139 \text{ m}^2$$

$$G_t = \frac{31.67}{0.132139} = 239.6718 \text{ kg/s.m}^2$$

$$Re_t = \frac{0.01483 * 239.6718}{0.109 * 10^{-3}} = 32608.55$$

Re > 10<sup>4</sup> donc le régime d'écoulement est turbulent.

Calcul du coefficient du film interne hi :

$$h_i = \frac{N_u * \lambda_t}{d_i}$$

Calcul du nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{C_{pt} * \mu_t}{\lambda_t}$$

$$Pr = \frac{2896 * 0.109 * 10^{-3}}{0.0684} = 4.61497$$

Calcul du nombre de Nusselt :

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} * \Phi_t^{0.14}$$

$$\Phi_t = \frac{\mu}{\mu_c} \simeq 1$$

$$Nu = 0.023 * 32608.55^{0.8} * 4.61497^{\frac{1}{3}} = 156.236$$

$$h_i = \frac{156.2365 * 0.0684}{0.01483} = 720.605 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Calcul du coefficient de film interne rapporté à la surface extérieure :

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$h_{i0} = h_i * \frac{d_i}{d_0}$$

$$h_{i0} = 720.605 * \frac{0.01483}{0.01905} = 560.9749 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Coté calandre :

Diamètre équivalent :

$$D_e = \frac{4 * P^2}{d_0 * \pi} - d_0$$

$$D_e = \frac{4 * 0.0254^2}{0.01905 * \pi} - 0.01905 = 0.02407 \text{ m}$$

Calcul de la vitesse massique :

$$G_c = \frac{m}{a_{ct}}$$

$$a_{ct} = \left( \frac{D_c}{P} \right) * (P - d_0) * B$$

$$a_{ct} = \left( \frac{1.194}{0.0254} \right) * (0.0254 - 0.01905) * 0.460 = 0.13731 \text{ m}^2$$

$$G_c = \frac{31.67}{0.13731} = 230.64598 \text{ kg/s.m}^2$$

Calcul du nombre de Reynolds :

$$R_{ec} = \frac{(D_e * G_c)}{\mu_c}$$

$$R_{ec} = \frac{0.02407 * 230.64598}{0.17369 * 10^{-3}} = 31962.97$$

$R'_e > 10^4$  donc le régime d'écoulement est turbulent.

Coefficient du film externe  $h_0$  :

$$h_0 = \frac{N_u * \lambda_c}{D_e}$$

Calcul du nombre de Prandtl :

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$P_r = \frac{C_{pc} * \mu_c}{\lambda_c}$$

$$P_r = \frac{2567 * 0.17369 * 10^{-3}}{0.0909} = \boxed{4.90497}$$

Calcul du nombre de Nusselt :

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{\frac{1}{3}} * \Phi_t^{0.14}$$

$$N_u = 0.023 * 31962.97^{0.8} * 4.90497^{\frac{1}{3}} = \boxed{156.91254}$$

$$h_0 = \frac{156.91254 * 0.0909}{0.02407} = \boxed{592.57789 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Coefficient de transfert global propre Up :

$$\frac{1}{U_p} = \frac{1}{h_0} + \frac{1}{h_{i0}} = \frac{h_0 + h_{i0}}{h_0 * h_{i0}}$$

$$U_p = \frac{h_0 * h_{i0}}{h_0 + h_{i0}} = \frac{592.57789 * 560.9749}{592.57789 + 560.9749} = \boxed{288.17 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}}$$

**F. Calcul de la Résistance d'encrassement :**

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

$$R_s = \frac{288.17 - 150.64}{288.17 * 150.64} = \boxed{0.00316 \text{ s. m}^2 \cdot \text{°C/j}}$$

**G. Calcul des pertes des charges :**

Coté tube :

$$\Delta P_t = \frac{n_c * n_t * G_t^2}{1.271 * 10^{15} * d_t} \left[ \frac{f_t * L}{d_i * \left( \frac{\mu}{\mu_c} \right)^{0.14}} + 2 \right]$$

$f_t$  : Coefficient de friction en fonction de nombre de Reynolds est donné par les expressions suivantes :

Dans notre cas, le régime turbulent et le tube lisse.

Danc le coefficient de friction :

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$f_t = 0.0028 + 0.25R_{et}^{-0.32}$$

$$f_t = 0.0028 + 0.25 * 32608.55^{-0.32} = 0.01148$$

$$\rho_{moy} = 491 \text{ kg/m}^3$$

$$d_t : \text{densité} = 0.491$$

$$\Delta P_t = \frac{4 * 8 * (862818.48)^2}{1.271 * 10^{15} * 0.491} * \left[ \frac{0.01148 * 6.096}{0.01483 * 1} + 2 \right] = \boxed{0.25648 \text{ kg/cm}^2}$$

Coté calandre :

$$\Delta P_c = \frac{n_c * f_{ct} * G_c^2 * (N_c + 1) * D_c}{1.271 * 10^{15} * d_c * D_e * \left( \frac{\mu}{\mu_c} \right)^{0.14}}$$

$f_{ct}$ : Coefficient de friction.

$$f_{ct} = 1.5 * \left[ \frac{d_0}{(P - d_0)R_{ec}} \right]^{0.2}$$

$$f_{ct} = 1.5 * \left[ \frac{0.01905}{(0.0254 - 0.01905) * 31962.97} \right]^{0.2} = 0.23474$$

$$\rho_{moy} = 596 \text{ kg/m}^3$$

$$d_c : \text{densité} = 0.596$$

$$\Delta P_c = \frac{4 * 0.23474 * (830325.52)^2 * (12 + 1) * 1.194}{1.271 * 10^{15} * 0.596 * 0.02407 * 1} = \boxed{0.54289 \text{ kg/cm}^2}$$

**H. Calcule de l'efficacité de l'échangeur :**

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$$

Avec :

$Q$  : Puissance réelle échangé entre les deux fluides

$Q_{max}$ : Puissance maximal possible échangé

$$Q = m * C_{pc}(T_2 - T_1) = 31.67 * 2567 * (246.7 - 43) = 16.53 * 10^6 \text{ j/s}$$

$$Q_{max} = q_{min} * \Delta T_{max}$$

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$q_t = m * C_{pt} = 31.67 * 2896 = 91716.32 \text{ j/s. } ^\circ\text{C}$$

$$q_c = m * C_{pc} = 31.67 * 2567 = 81296.89 \text{ j/s. } ^\circ\text{C}$$

Donc :

$$q_{min} = q_c = \boxed{81296.89 \text{ j/s. } ^\circ\text{C}}$$

Alors :

$$Q_{max} = q_{min} * \Delta T_{max} = q_{min} * (t_1 - T_1) = 81296.89 * (290 - 43.3) = \boxed{20.05 * 10^6 \text{ j/s}}$$

On aura :

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{16.53 * 10^6}{20.05 * 10^6} = \boxed{82.4}$$

Pour le deuxième et troisième cas, nous utilisons les mêmes étapes précédentes.

### IV.5.2 Deuxième cas (après 50 jour de marche) :

Tableau IV-7 : caractéristique des fluides a la température calorifique.

Propriétés	Côté calandre	Côté tube
Température d'entrée (°C)	33	290
Température de sortie (°C)	252	113
Viscosité dynamique kg/m.s	$0.1759 * 10^{-3}$	$0.109 * 10^{-3}$
Chaleur spécifique (J/kg.°C)	2560	2896
Conductivité thermique (w/m.°C)	0.0921	0.0909
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	603	491

#### A. Calcul de la quantité de chaleur échangée :

$$Q = m. C_{pc}(\Delta T) = m * C_{pc}(T_2 - T_1) = 31.67 * 2560 * (252 - 33)$$

$$Q = \boxed{17.75 * 10^6 \text{ j/s}}$$

#### B. Calcul de la température moyenne logarithmique $\Delta T_{LM}$ :

$$\Delta T_{LM} = \frac{(t_1 - T_2) - (t_2 - T_1)}{\ln \frac{t_1 - T_2}{t_2 - T_1}} = \frac{(290 - 252) - (113 - 33)}{\ln \frac{290 - 252}{113 - 33}} = \boxed{59.47^\circ\text{C}}$$

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

Facteur de correction  $F = f(E, R)$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{33 - 252}{113 - 290} = 1.23$$

$$E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{113 - 290}{33 - 290} = 0.68$$

Pour  $R=1.23$  et  $E= 0.68$  on obtient du graphe  $F= 0.9$

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = \Delta TLM \cdot F = 53.54^\circ\text{C}$$

**C. Détermination de coefficient  $U_S$  :**

$$U_S = \frac{Q}{A \cdot \Delta TLM_{\text{corrigé}}} = \frac{17.75 * 10^6}{2178.4 * 53.54} = 152.18 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

**D. Calcul de la température calorique  $T_c, t_c$  :**

$$T_c = 142.5^\circ\text{C}$$

$$t_c = 201.5^\circ\text{C}$$

**E. Calcul du coefficient de transfert propre :**

Détermination de  $h_i$  et  $h_o$  :

Coté tube :

Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re_t = \frac{(d_i * G_t)}{\mu_t}$$

$$Re_t = \frac{0.01483 * 239.6718}{0.109 * 10^{-3}} = 32608.55$$

$Re > 10^4$  donc le régime d'écoulement est turbulent.

Calcul du coefficient du film interne  $h_i$  :

$$h_i = \frac{N_u * \lambda_t}{d_i}$$

Calcul du nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{C_{pt} * \mu_t}{\lambda_t}$$

**[56]**

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$P_r = \frac{2896 * 0.109 * 10^{-3}}{0.0684} = 4.61497$$

Calcul du nombre de Nusselt :

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{\frac{1}{3}} * \Phi_t^{0.14}$$

$$N_u = 0.023 * 32608.55^{0.8} * 4.61497^{\frac{1}{3}} = 156.236$$

$$h_i = \frac{156.2365 * 0.0684}{0.01483} = 720.605 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Calcul du coefficient de film interne rapporté à la surface extérieure :

$$h_{i0} = h_i * \frac{d_i}{d_o}$$

$$h_{i0} = 720.605 * \frac{0.01483}{0.01905} = 560.9749 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Coté calandre :

Calcul du nombre de Reynolds :

$$R_{ec} = \frac{(D_e * G_c)}{\mu_c}$$

$$R_{ec} = \frac{0.02407 * 230.64598}{0.176 * 10^{-3}} = 31543.45$$

$R'_e > 10^4$  donc le régime d'écoulement est turbulent.

Coefficient du film externe  $h_0$  :

$$h_0 = \frac{N_u * \lambda_c}{D_e}$$

Calcul du nombre de Prandtl :

$$P_r = \frac{C_{pc} * \mu_c}{\lambda_c}$$

$$P_r = \frac{2560 * 0.176 * 10^{-3}}{0.0921} = 4.86565$$

Calcul du nombre de Nusselt :

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{\frac{1}{3}} * \Phi_t^{0.14}$$

$$N_u = 0.023 * 31543.45^{0.8} * 4.86565^{\frac{1}{3}} = 154.84676$$

$$h_0 = \frac{154.84676 * 0.0921}{0.02407} = 592.496 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Coefficient de transfert global propre Up :

$$U_p = \frac{h_0 * h_{i0}}{h_0 + h_{i0}} = \frac{592.496 * 560.97}{592.496 + 560.97} = 288.15 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

**F. Calcul de la Résistance d'encrassement :**

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

$$R_s = \frac{288.15 - 152.18}{288.15 * 152.18} = 0.0031007 \text{ s. m}^2 \cdot \text{°C/j}$$

**G. Calcul des pertes des charges :**

Coté tube :

$$f_t = 0.0028 + 0.25 R_{et}^{-0.32}$$

$$f_t = 0.0028 + 0.25 * 32608.55^{-0.32} = 0.01148$$

$$\rho_{moy} = 491 \text{ kg/m}^3$$

$$d_t : \text{densité} = 0.491$$

$$\Delta P_t = \frac{4 * 8 * (862818.48)^2}{1.271 * 10^{15} * 0.491} * \left[ \frac{0.01148 * 6.096}{0.01483 * 1} + 2 \right] = 0.25648 \text{ kg/cm}^2$$

Coté calandre :

$$f_{ct} = 1.5 * \left[ \frac{d_0}{(P - d_0) R_{ec}} \right]^{0.2}$$

$$f_{ct} = 1.5 * \left[ \frac{0.01905}{(0.0254 - 0.01905) * 31543.45} \right]^{0.2} = 0.23536$$

$$\rho_{moy} = 603 \text{ kg/m}^3$$

$$d_c : \text{densité} = 0.603$$

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$\Delta P_c = \frac{4 * 0.23536 * (830325.52)^2 * (12 + 1) * 1.194}{1.271 * 10^{15} * 0.603 * 0.02407 * 1} = 0.54613 \text{ kg/cm}^2$$

**H. Calcule de l'efficacité de l'échangeur :**

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$$

$$Q = m * C_{pc}(T_2 - T_1) = 31.67 * 2560 * (252 - 33) = 17.75 * 10^6 \text{ j/s}$$

$$Q_{max} = q_{min} * \Delta T_{max}$$

$$q_t = m * C_{pt} = 31.67 * 2889 = 91494.63 \text{ j/s.}^\circ\text{C}$$

$$q_c = m * C_{pc} = 31.67 * 2560 = 81075.2 \text{ j/s.}^\circ\text{C}$$

Donc :

$$q_{min} = q_c = 81075.2 \text{ j/s.}^\circ\text{C}$$

Alors :

$$Q_{max} = q_{min} * \Delta T_{max} = q_{min} * (t_1 - T_1) = 81075.2 * (290 - 33) = 20.83 * 10^6 \text{ j/s}$$

On aura :

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{17.75 * 10^6}{20.83 * 10^6} = 85.21$$

**IV.5.3 Troisième cas (après nettoyage) :**

Tableau IV-8 : caractéristique des fluides a la température calorifique.

Propriétés	Côté calandre	Côté tube
Température d'entrée (°C)	25.6	290
Température de sortie (°C)	253	119
Viscosité dynamique kg/m.s	$0.181 * 10^{-3}$	$0.112 * 10^{-3}$
Chaleur spécifique (J/kg.°C)	2539	2918
Conductivité thermique (w/m.°C)	0.0935	0.0674
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	605	488

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

### A. Calcul de la quantité de chaleur échangée :

$$Q = m \cdot C_{pc}(\Delta T) = m \cdot C_{pc}(T_2 - T_1) = 31.67 \cdot 2539 \cdot (253 - 25.6)$$

$$Q = 18.28 \cdot 10^6 \text{ j/s}$$

### B. Calcul de la température moyenne logarithmique $\Delta TLM$ :

$$\Delta TLM = \frac{(t_1 - T_2) - (t_2 - T_1)}{\ln \frac{t_1 - T_2}{t_2 - T_1}} = \frac{(290 - 253) - (119 - 25.6)}{\ln \frac{290 - 253}{119 - 25.6}} = 60.9^\circ\text{C}$$

Facteur de correction  $F = f(E, R)$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{25.6 - 253}{119 - 290} = 1.32$$

$$E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{119 - 290}{25.6 - 290} = 0.64$$

Pour  $R=1.32$  et  $E=0.64$  on obtient du graphe  $F=0.9$

$$\Delta TLM_{\text{corrigé}} = \Delta TLM \cdot F = 54.81^\circ\text{C}$$

### C. Détermination de coefficient $U_S$ :

$$U_S = \frac{Q}{A \cdot \Delta TLM_{\text{corrigé}}} = \frac{18.28 \cdot 10^6}{2178.4 \cdot 54.81} = 153.10 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

### D. Calcul de la température calorique $T_c, t_c$ :

$$T_c = 139.3^\circ\text{C}$$

$$t_c = 204.5^\circ\text{C}$$

### E. Calcul du coefficient de transfert propre :

Détermination de  $h_i$  et  $h_o$  :

Coté tube :

Calcul du nombre de Reynolds :

$$R_{et} = \frac{(d_i \cdot G_t)}{\mu_t}$$

$$R_{et} = \frac{0.01483 \cdot 239.6718}{0.112 \cdot 10^{-3}} = 31735.11$$

[60]

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$Re > 10^4$  donc le régime d'écoulement est turbulent.

Calcul du coefficient du film interne  $h_i$  :

$$h_i = \frac{N_u * \lambda_t}{d_i}$$

Calcul du nombre de Prandtl :

$$P_r = \frac{C_{pt} * \mu_t}{\lambda_t}$$

$$P_r = \frac{2918 * 0.112 * 10^{-3}}{0.0674} = 4.8489$$

Calcul du nombre de Nusselt :

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{\frac{1}{3}} * \Phi_t^{0.14}$$

$$N_u = 0.023 * 31735.11^{0.8} * 4.8489^{\frac{1}{3}} = 155.42024$$

$$h_i = \frac{155.42024 * 0.0674}{0.01483} = 706.36 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Calcul du coefficient de film interne rapporté à la surface extérieure :

$$h_{i0} = h_i * \frac{d_i}{d_0}$$

$$h_{i0} = 706.36 * \frac{0.01483}{0.01905} = 549.885 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Coté calandre :

Calcul du nombre de Reynolds :

$$R_{ec} = \frac{(D_e * G_c)}{\mu_c}$$

$$R_{ec} = \frac{0.02407 * 230.64598}{0.181 * 10^{-3}} = 30672.09$$

$R'_e > 10^4$  donc le régime d'écoulement est turbulent.

Coefficient du film externe  $h_0$  :

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

$$h_0 = \frac{N_u * \lambda_c}{D_e}$$

Calcul du nombre de Prandtl :

$$P_r = \frac{C_{pc} * \mu_c}{\lambda_c}$$

$$P_r = \frac{2539 * 0.181 * 10^{-3}}{0.0935} = 4.91506$$

Calcul du nombre de Nusselt :

$$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{\frac{1}{3}} * \phi_t^{0.14}$$

$$N_u = 0.023 * 30672.09^{0.8} * 4.91506^{\frac{1}{3}} = 151.92601$$

$$h_0 = \frac{151.92601 * 0.0935}{0.02407} = 590.157 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Coefficient de transfert global propre  $U_p$  :

$$U_p = \frac{h_0 * h_{i0}}{h_0 + h_{i0}} = \frac{590.157 * 549.885}{590.157 + 549.885} = 284.65 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$$

**F. Calcul de la Résistance d'encrassement :**

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

$$R_s = \frac{284.65 - 153.10}{284.65 * 153.10} = 0.00301 \text{ s.m}^2 \cdot \text{°C/j}$$

**G. Calcul des pertes des charges :**

Coté tube :

$$f_t = 0.0028 + 0.25 R_{et}^{-0.32}$$

$$f_t = 0.0028 + 0.25 * 31735.11^{-0.32} = 0.01186$$

$$\rho_{moy} = 488 \text{ kg/m}^3$$

$$d_t : \text{densité} = 0.488$$

$$\Delta P_t = \frac{4 * 8 * (862818.48)^2}{1.271 * 10^{15} * 0.488} * \left[ \frac{0.01186 * 6.096}{0.01483 * 1} + 2 \right] = 0.26406 \text{ kg/cm}^2$$

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

Coté calandre :

$$f_{ct} = 1.5 * \left[ \frac{d_0}{(P - d_0)R_{ec}} \right]^{0.2}$$

$$f_{ct} = 1.5 * \left[ \frac{0.01905}{(0.0254 - 0.01905) * 30672.09} \right]^{0.2} = 0.23668$$

$$\rho_{moy} = 605 \text{ kg/m}^3$$

$d_c$  : densité = 0.605

$$\Delta P_c = \frac{4 * 0.23668 * (830325.52)^2 * (12 + 1) * 1.194}{1.271 * 10^{15} * 0.605 * 0.02407 * 1} = \boxed{0.54738 \text{ kg/cm}^2}$$

**H. Calcule de l'efficacité de l'échangeur :**

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$$

$$Q = m * C_{pc}(T_2 - T_1) = 31.67 * 2539 * (253 - 25.6) = 18.28 * 10^6 \text{ j/s}$$

$$Q_{max} = q_{min} * \Delta T_{max}$$

$$q_t = m * C_{pt} = 31.67 * 2918 = 92413.06 \text{ j/s.}^\circ\text{C}$$

$$q_c = m * C_{pc} = 31.67 * 2539 = 80410.13 \text{ j/s.}^\circ\text{C}$$

Donc :

$$q_{min} = q_c = \boxed{80410.13 \text{ j/s.}^\circ\text{C}}$$

Alors :

$$Q_{max} = q_{min} * \Delta T_{max} = q_{min} * (t_1 - T_1) = 80410.13 * (290 - 25.6) = \boxed{21.26 * 10^6 \text{ j/s}}$$

On aura :

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{18.28 * 10^6}{21.26 * 10^6} = \boxed{85.88}$$

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

### IV.6 Résultats et Interprétation :

On résume les résultats de calcul dans le tableau suivant :

Tableau IV-9 : résultats de calcul.

Paramètre	1 <sup>ere</sup> cas (Encrassé)	2 <sup>eme</sup> cas (50 jours)	3 <sup>eme</sup> cas (Nettoyage)
Résistance d'encrassement ( $s \cdot m^2 \cdot ^\circ C / j$ )	0.00315	0.003007	0.00300
Coefficient de transfert global ( $w/m^2 \cdot ^\circ C$ )	150.95	152.18	153.41
Perte de charge côté tube ( $kg/cm^2$ )	0.25648	0.25648	0.26406
Perte de charge côté calandre ( $kg/cm^2$ )	0.54289	0.54623	0.54738
Efficacité	82.4	85.21	85.88
$\Delta TLM$ ( $^\circ C$ )	50.37	53.54	54.81

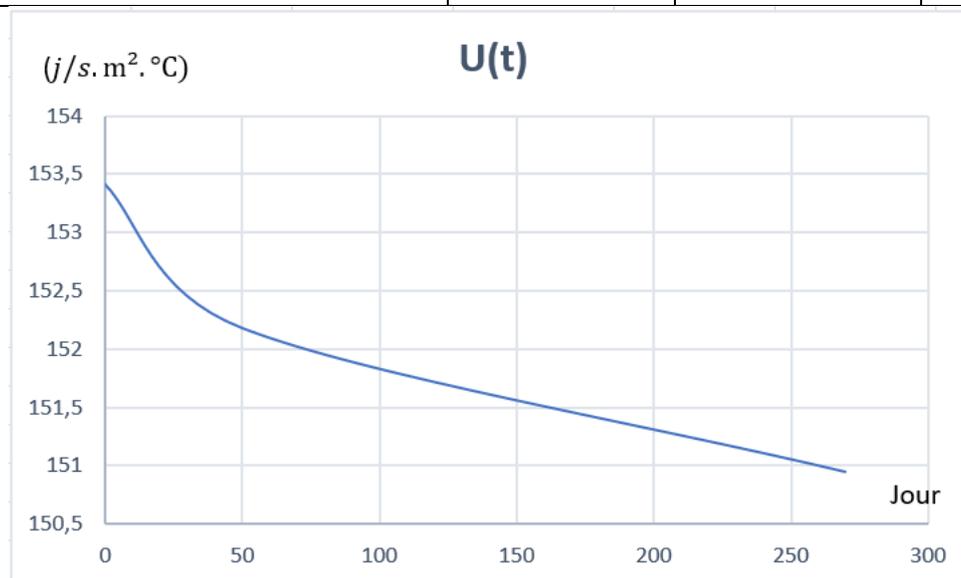


Figure IV-12 : L'évolution du coefficient global de transfert de chaleur en fonction du temps.

La diminution du coefficient global de transfert de chaleur  $U$  au fil du temps suggère que l'efficacité de l'échangeur de chaleur diminue. Cette réduction d'efficacité généralement causée par l'encrassement des surfaces de l'échangeur de chaleur.

## Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement

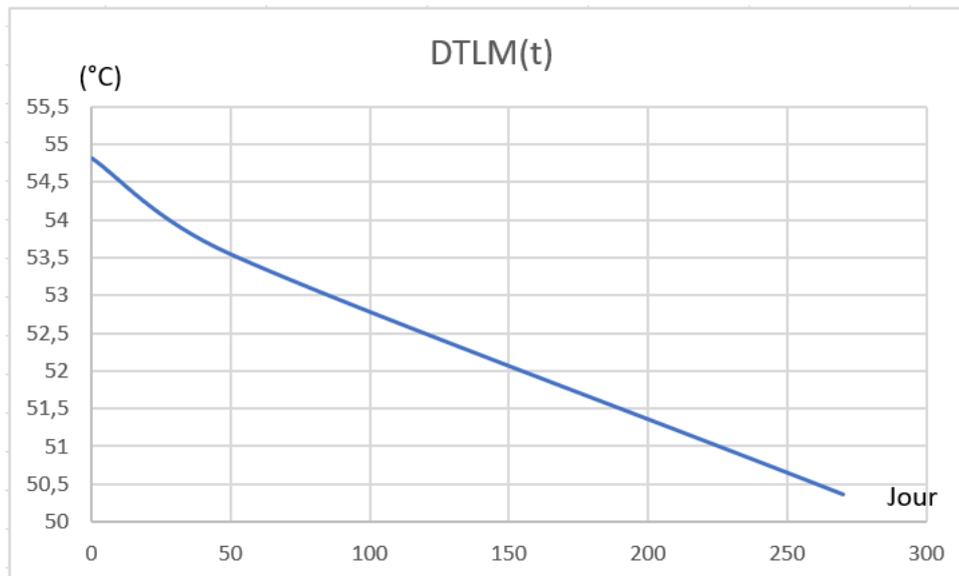


Figure IV-13 : L'évolution de la DTLM en fonction du temps.

La diminution de la DTLM (différence de température logarithmique moyenne) au fil du temps peut effectivement indiquer une diminution de l'efficacité de transfert de chaleur qui à son tour donne une augmentation de la perte de charge. Cette augmentation est souvent causée par l'encrassement des surfaces de l'échangeur de chaleur.

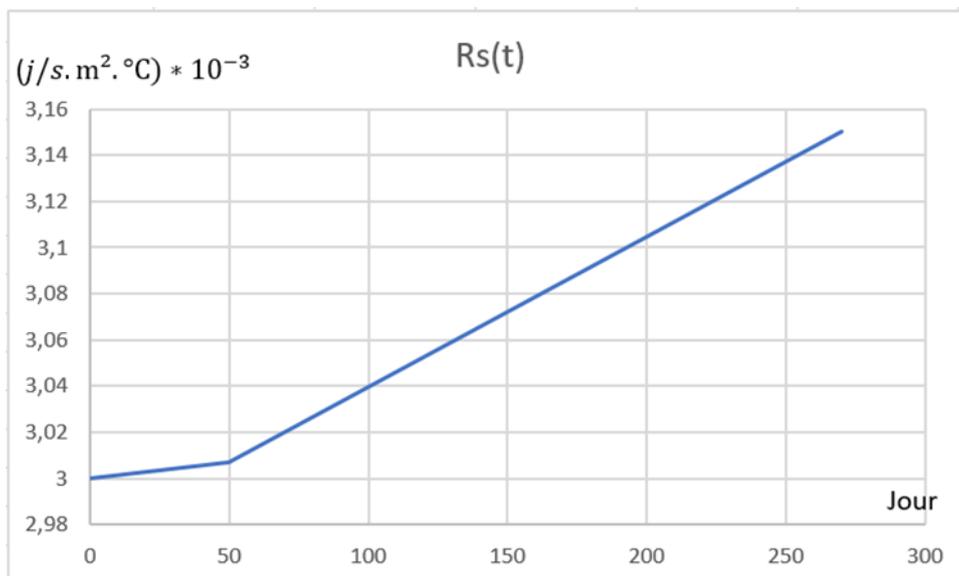


Figure IV-14 : L'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps.

Le graphe montre que l'encrassement suit une tendance linéaire, généralement cette évolution caractérise des dépôts durs et adhérents, et indique que la vitesse de dépôt est constante et qu'il n'y a pas de réentraînement. Cependant, tous les 9 mois, un arrêt est nécessaire

## **Chapitre IV Partie pratique analyse de l'encrassement**

pour effectuer le nettoyage, ce qui entraîne une perte de production d'une valeur de 19600 (ton) dans les 7 jours d'arrêt de l'usine. De plus, le nettoyage répétitif a des conséquences : la résistance des matériaux diminue et réduisent l'efficacité de l'échangeur.

D'après les analyses effectuées au laboratoire CRD, le dépôt noir présent dans les échangeurs 100-E1A/B est constitué de sulfure de fer Pyrrhotite ( $Fe_7S_8$ ). La présence de fer dans ces dépôts noirs indique la présence de corrosion. Selon le rapport des inspecteurs, les calandres et les tubes des échangeurs 100-E1A~D sont en bon état, ce qui implique que la corrosion se produit en amont, avant que la charge n'entre dans l'unité de reforming catalytique 1 (section de prétraitement).



Figure IV-15 : faisceau tubulaire colmaté de l'échangeur 100-E1A.

Pour éviter la formation de ces dépôts, nous proposons l'installation de filtres. Ces filtres permettraient de capturer les particules de sulfure de fer et autres impuretés en amont de l'échangeur de chaleur, réduisant ainsi la corrosion et l'accumulation de dépôts.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, l'analyse de l'encrassement est essentielle pour prévenir le problème et agir à temps pour le remédier. D'après l'analyse l'encrassement entraîne des arrêts de l'unités chaque neufs (09) mois ce qui entraîne des pertes de production et réduire l'efficacité des équipements. Ces données sont insuffisantes pour évaluer l'encrassement, car nous n'avons pas les données d'entrée et de sortie de chaque échangeur, nous disposons que celle de la batterie d'échangeurs, ce qui rend difficile l'identification de celui qui est encrassé et par conséquent de le nettoyer séparément au lieu d'arrêter l'unité.

## Conclusion générale

Les échangeurs de chaleur permettent de maîtriser toute politique d'énergie, le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement afin de permettre un gain de rendement et d'énergie des procédés.

Parmi les problèmes de fonctionnement l'encrassement ou les performances des échangeurs de chaleur seront réduites ainsi que ces installations d'où la nécessité de monitoring de ce phénomène est indispensable pour le remédier en temps réel et planifier des programmes de maintenance adéquate.

Dans notre travail l'encrassement dans la batterie d'échangeur a un impact sur le fonctionnement de l'unité parce que à chaque neuf (09) mois la présence des dépôts entraîne un arrêt pour le nettoyage, cet arrêt provoque une perte de production de 19600 (ton).

L'arrêt de l'unité est planifié lorsque la perte de charge aux bornes de la batterie d'échangeur est de 10 bars, mais nos calculs montrent que l'efficacité de la batterie a changé légèrement ceci explique la méconnaissance de la présence de dépôt à cause de l'absence des instruments de mesure aux bornes de chaque échangeur.

L'arrêt dans cette unité est inévitable à chaque neuf mois, d'où la nécessité de mettre en place des filtres en amont de la batterie d'échangeur ou en amont de chaque échangeur.

A la fin, Notre étude a besoin d'accomplissement dans le but :

- De préciser l'échangeur encrassé afin de le by-pass,
- Dimensionner une autre batterie d'échangeur,
- Calculer le coût engendrer par ce phénomène,

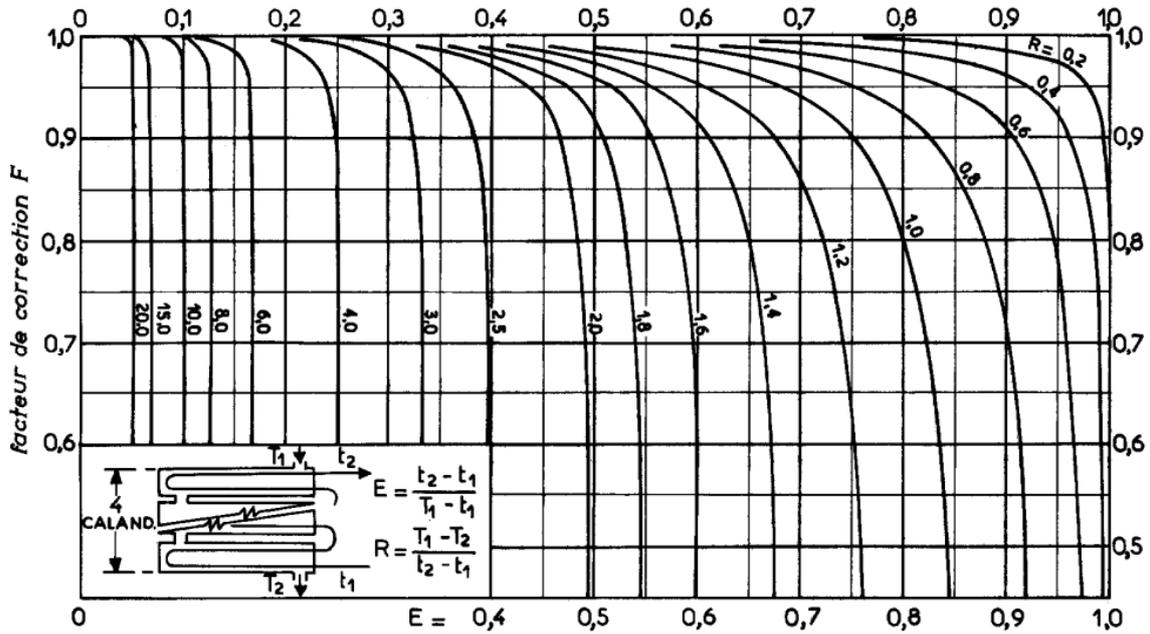
Ces propositions ont pour but de prolonger la durée optimale de fonctionnement des échangeurs et aussi de planifier le temps optimal de leurs arrêts.

## Références bibliographiques

- [1] Aval Naftec spa Raffinerie de Skikda « Présentation de la Raffinerie de Skikda » (Février 2008).
- [2] Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene par M.Y.K.BENKAHLA.
- [3] LICENCE DE MECANIQUE 2 EME ANNEE MODULE 2A101 Université sorbonne par Sophie Mergui
- [4] livre Echangeur chaleur Technologie calcul et design par MOUNIR BENNAJAH.
- [5] Description des appareils d'échange de chaleur sans changement de phase Enseignante A.TRABELSI.
- [6] Zoé Minville, Nasia Caney, Patrice Clement, Philippe Bandelier, Philippe Marty, Jean Antonie Gruss et Claude Roussel. Description des échangeurs de chaleur. Technique de l'ingénieur [BE 9516].
- [7] cours enspm 2005 échangeur chaleur.
- [8] Technique de l'ingénieur, traité mécanique et chaleur [B2344].
- [9] Duffau, C., Grillot, J. M., Navarro, J. M. et Vidil, R., 1991, L'encrassement dans les échangeurs. Description. Prévention. Remèdes, Edition GRET.
- [10] S. N. KAZI, Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces ([www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)).
- [11] Université des sciences et de la technologie Houari Boumédiene à Alger - Ingénieur d'état option : génie chimique 2010.
- [12] Photos trouve à SONATRACH Rhourd Nouss devisions d'exploite CSC- ECHANGEUR DE CHALEUR P10-GA-21-02 en 2016/03/12.
- [13] P.WUITHIER ; « Pétrole : Raffinage et génie chimique »,Tome II.Ed technip, Paris 1972.

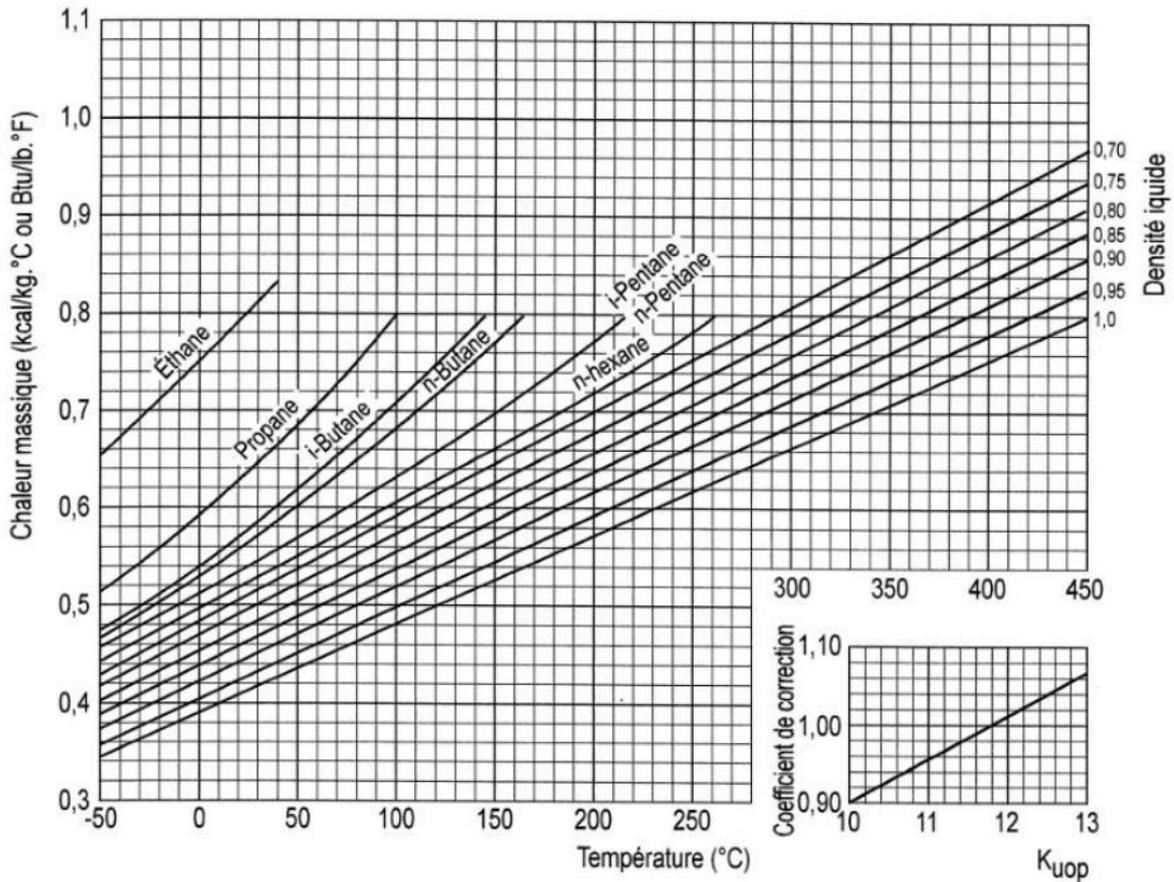
# Annexes

## Annexes 1 :



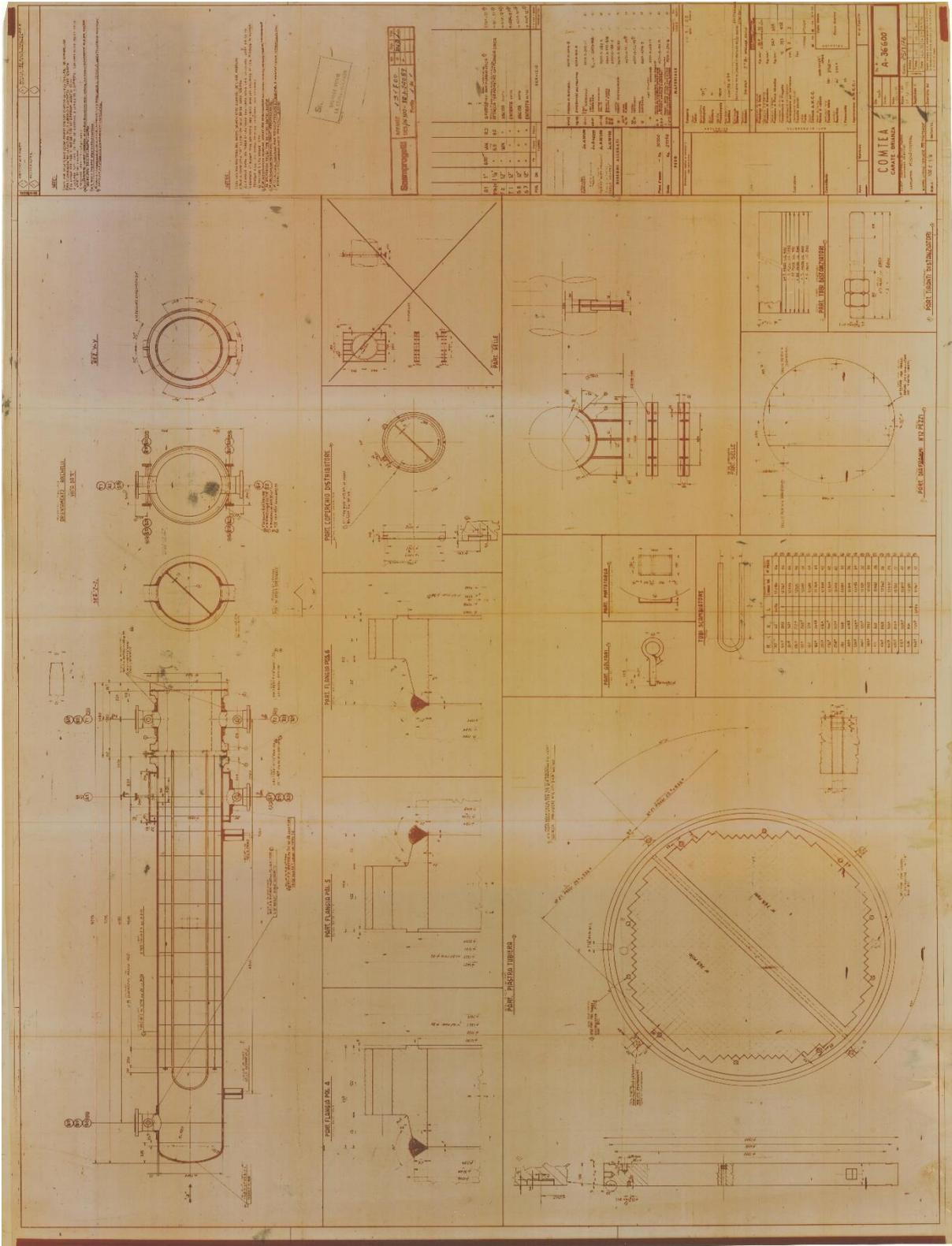
d. quatre passes côté calandre, huit passes (ou plus) côté tubes.

## Annexes 2 : Courbe de détermination de chaleur spécifique $C_p$



# Annexes

## Annexes 3 : Plan 100-E1 A



# Annexes

## Annexes 4 : Composition de naphta B

ENTREPRISE NATIONALE DE RAFFINAGE ET DE DISTRIBUTION DES PRODUITS PETROLIERS

Activité LRP  
 Division Raffinage  
 Raffinerie de Skikda  
 DEPARTEMENT TECHNIQUE  
 SERVICE LABORATOIRE

Date : 01/10/2023.....

UNITE 100 (BACS DE CHARGE)

Echantillon : Naphta B

Densité G/ML .....

Distillation P.I. °C .....

5 % Vol .....

10 % Vol .....

30 % Vol .....

50 % Vol .....

90 % Vol .....

95 % Vol .....

P. Final .....

Heure .....

Date d'échantillonnage le 27/09/20

Couleur Saybolt .....

Docter Test .....

Souffre P.P.M .....

Plomb P.P.B .....

Octane Number .....

Arsenic .....

P. Moléculaire .....

H 20 EN P.P.M .....

COMPOSITION CHROMATOGRAPHIQUE (% Poids)

Parafine	% Pds	
C. 2	IC <sub>2</sub>	6,80
C. 3	IC <sub>3</sub>	6,82
C. 4	IC <sub>4</sub>	5,23
C. 5	IC <sub>5</sub>	4,99
C. 6	IC <sub>6</sub>	1,27
C. 7	IC <sub>7</sub>	
C. 8	IC <sub>8</sub>	
C. 9	IC <sub>9</sub>	
C. 10	IC <sub>10</sub>	
Naphtènes %	% Pds	
C. Pentène		0,24
C. Héxane		3,90
M.C. Pentane		9,06
C. 7		8,91
C. 8		3,49
C. 9		0,90
C. 10		

Olephines %	
C. 5	
C. 6	
C. 7	
Aromatiques %	% Pds
Benzène	1,18
Toluène	2,09
C. 8	3,27
C. 9	3,03
C. 10	0,34

P. %	63,165
O %	
N %	26,50
A %	9,85

Le Chef de service Laboratoire

*[Signature]*

CETTE DEMANDE A ETABLIR POUR TOUTE ANALYSE NON PROGRAMMEE.

## Annexes

### Annexes 4 : Analyse du dépôt solide et caractérisation de la charge Naphta

 <p>سوناطراك sonatrach</p>	<p>DIRECTION CENTRALE RECHERCHE &amp; DEVELOPPEMENT (DC R&amp;D)</p>	<p>Octobre 2023</p>
---	--	-------------------------

#### V. CONCLUSION

A l'issue des analyses DRX et XF réalisées, il a été conclu que l'échantillon de dépôt constaté sur le côté calendre de l'échangeur 100-E-1D est du **sulfure de fer de type Pyrrhotite-3T Fe7S8**, avec une concentration de **52.32% en fer et 46.32% en soufre**.

Par ailleurs, les analyses effectuées sur les différents échantillons des charges Naphta B et Naphta B+C ont révélé la présence du soufre et du fer dans ces charges alimentant les échangeurs du train d'échange. Les masses quantifiées sont énormes vu l'importance du débit qui circule à travers ces échangeurs.

Il a été constaté aussi que la teneur en soufre et en fer diminue entre l'entrée et la sortie des échangeurs ce qui renforce l'hypothèse de formation du sulfure de fer à l'intérieur des échangeurs via une réaction chimique entre le soufre et le fer notamment que les conditions sont favorables à ce genre de réaction (température élevée).

Dans la suite des travaux, nous envisageons réaliser des investigations sur les solutions qui pourrait remédier à ce problème et faire les recommandations nécessaires.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Brons G, Brown LD, Joshi HM, Kennedy RJ, Bruno T, Rudy TM. Method for refinery foulant deposit characterization. US 2006/0014296 A1; 2006.
- [2] Bennett CA, Appleyard S, Gough M, Hohmann RP, Joshi HM, King DC, Industry-recommended procedures for experimental crude oil preheat fouling research. Heat Transf Eng 2006; 27:28–35. <http://dx.doi.org/10.1080/01457630600845788>.
- [3] Lemke, H.K., 1999, Fouling in refinery equipment an overview, Preprint: Int. Conf. on Petroleum Phase Behavior and Fouling- Mechanisms and Mitigation of Fouling in Refinery Units, AIChE Nat'l Spring Meeting, Mar 14-18, pp. 375-382.
- [4] Pragya Singh, Srinivas Krishnaswamy, Krishnaswamy Ponnani, Ankur Verma, Jaya Rawat, Crude Oil Foulant Deposition Studies on a Heated Surface Using a Novel Batch Stirred Coupon Test Rig, International Journal of Chemical Engineering, Volume 2022, Article ID 5443317, 10 pages, <https://doi.org/10.1155/2022/5443317>.
- [5] Slavcheva, E., Shone, B., and Turnbull, A., 1998, Factors Controlling Naphthenic Acid Corrosion. Corrosion, Vol. 54 (11), pp.1-9.
- [6] Panchal, C.B., Halpern, Y., Kuru, W.C., and Miller, G., "Mechanisms of Iron Sulfide Formation", in Refinery Processes, in Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation, ed. T.R.Bott, pp.291-298, Begell House, New York, 1999.
- [7] Evans UR. The corrosion and oxidation of metals. London: Edward Arnold Publishers Ltd,