

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Spécialité : énergétique

**Titre :**  
**Dimensionnement d'un échangeur E502**  
**de la raffinerie d'Alger SONATRACH**

**Promoteur :**  
Mr. LAAFER  
Raounak

**Réalisé par :**  
MOUSSOUNI Chahinez  
  
LARFI Amina

Année universitaire : 2023/2024

## **Remerciement**

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

*Je tiens à remercier vivement tous ceux qui m'ont aidé, directement ou indirectement, volontairement ou involontairement à bien mener ma tâche ; mes plus profonds remerciements à Monsieur LAAFER ABDELKADER pour m'avoir suivi et encadré efficacement pendant*

*Cette période, pour sa patience, sa bonté et sa disponibilité de tous les jours et ses nombreux et fructueux conseils, ont fortement contribués à créer d'excellentes conditions de travail.*

*Nous remercions vont également Monsieur MECHENTAL MOURAD au niveau de la raffinerie d'Alger SIDI ARCINE SONATRACH pour qu'il nous a apporté comme connaissances*

*Nos profonds remerciements pour les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

*Et je remercie nos familles et nos amies pour leur soutien et leur encouragement*

# **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon profond amour et ma passion A ma chère mère « Lamia » En témoignage de ma profonde gratitude et de mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices qu'elle me contente, toute la confiance qu'elles m'accordent et tout l'amour dont elle m'entoure.*

*A mon Cher père « Rachid » Qui est le meilleur père dans ce monde, grâce à son encouragement, sa confiance et son soutien moral et matériel et pour son amour infini en exprimant mes  
gratitudes,*

*A mes chères sœurs « Rihab », « Wafaa » et « Zahraa »*

*A mes meilleures amis Zahraa, Ikram, khadidja, Salma, qui m'ont beaucoup aidé dans les moments difficiles et pour leurs encouragements. et a ma binôme « Amina »*

*Et a toutes mes cousines et toutes ma famille*

## **Chahinez**

### **إهداء**

الحمد لله ربي العالمين تبارك وتعالى له الكمال وحده والصلاة والسلام على سيدنا محمد  
.وعلى سائر الأنبياء والمرسلين

أحمد الله تعالى الذي بارك لي في اتمام بحثي وأتقدم بجزيل الشكر الى أعز الناس وأقربهم  
و لا تزال عوناً وسنداً لي وكان لي دعائها المبارك الى قلبي، الى والدتي العزيزة التي كانت  
أعظم اثر في تيسيري الى من كانت الداعم الأول لتحقيق طموحي الى من ابصرت بها  
طريق حياتي و اعتزازي بذاتي الى امي الغالية أهدي ثمرة جهدي و نجاحي لكي يا أحلى أم  
و أخت و صديقة امي الحبيبة

منه قوتي الى من مهد طريق العلم لي وأنار دروبا علمي الى مصدر الأمان الذي أستمد  
بنور لا ينطفئ العزيز الذي سار في كل دروبي وفي كل طريق حتى وصولي معلمي الأول

أبي العزيز شكرا على صبرك وحبك الذي أستمد قوتي منه

الى سندي في الحياة اخوتي وقرّة عيني الى من وهبني الله نعمت وجودهم في حياتي ومن  
كانوا عون في رحلتي بحثي أخي محمد امين، سيف الدين، عبد الرؤوف، صديق شكرا أجباء  
قلبي

وأخيرا كل من ساعدني في اتمام دراستي والى جميع أساتذتي الكرام وأخص بالذكر المشرف  
"لفري عبد القادر " والى كل عمال شركة سوناطراك و أخص بالذكر مهندسي قسم الميكانيك  
و التسهيلات المقدمة لنا و أخيرا. تحياتي الى كل من ساعدني من قريب على المساعدات  
وبعيد في انجاز هذا البحث شكرا وألف شكر

# Amina

## Résumé

Dans ce travail, nous présentons les principes de dimensionnement d'un échangeur thermique. Pour évaluer les performances d'un échangeur existant.

Et notre objectif est de réaliser et de vérifier le rendement et l'efficacité de l'échangeur E502 (brut et gasoil LGO) avant et après son nettoyage.

Cette étude inclut des calculs effectués à l'aide de deux méthodes : l'analyse analytique et l'analyse numérique (une programmation) à l'aide du logiciel EES. (engineering equation solver) comme un logiciel de dimensionnement

**Mots clés :** échangeur, chaleur, E502, programmation, dimensionnement, EES

## Abstract

In this work, we present the principles of sizing a heat exchanger to evaluate the performance of an existing exchanger. Our objective is to assess and verify the efficiency and effectiveness of the E502 exchanger (crude oil and LGO diesel) before and after cleaning. This study includes calculations performed using two methods: analytical analysis and numerical analysis (programming) using the EES (Engineering Equation Solver) software as a sizing tool.

**Keywords:** exchanger, heat, E502, programming, sizing, EES

## ملخص

في هذا العمل، نقدم مبادئ تحديد حجم المبادلات الحرارية لتقييم أداء المبادلة الحرارية الموجودة. هدفنا هو تقييم والتحقق من كفاءة وفعالية المبادلة الحرارية ( E502النفط الخام و LGO الديزل) قبل وبعد التنظيف. تشمل هذه الدراسة حسابات تُجرى باستخدام طريقتين: التحليل التحليلي والتحليل العددي (البرمجة) باستخدام برنامج EES كأداة لتحديد الحجم.

**الكلمات المفتاحية:** مبادلة حرارية، حرارة، E502، برمجة، تحديد الحجم، EES

## Table des matières

[Introduction générale](#) [1](#)

[Chapitre I : Généralités sur les échangeurs](#)

[I. Echangeurs de chaleur](#) [3](#)

[I.1.Introduction](#) [3](#)

[I.2.Définition](#) [3](#)

[I.3. Principe de fonctionnement](#) [3](#)

[I.3.1. Les échangeurs à surface](#) [3](#)

I.3.2	Les échangeurs à contact direct :	4
I.4.	Principe de réalisation technologique et modes de circulation	4
I.5.	Critères de classement des échangeurs	6
I.5.1.	Classement technologique	6
I.5.2.	Classement suivant le mode de transfert de chaleur	6
I.5.3.	Classement suivant le procédé de transfert de chaleur	6
I.5.4.	Classement fonctionnel	7
I.5.5.	Classement suivant la compacité de l'échangeur	7
I.5.6.	Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange	7
I.6.	Les différents types d'échangeurs de chaleur	7
I.6.1.	Echangeurs tubulaires	7
I.6.2.	Echangeurs à plaques :	10
I.6.3.	Echangeur avec un fluide changeant de phase	12
I.6.4.	Autres types d'échangeurs	12
I.7.	Echangeurs tubulaires à faisceau et calandre	12
I.7.1.	Assemblage faisceau-calandre	12
I.7.2.	Constitution de l'échangeur à faisceau et calandre	14
I.7.3.	Critères de sélection d'un échangeur à faisceau et calandre	18
I.8.	Calcul sur les échangeurs de chaleur	18
I.8.1.	Coefficient global de transfert de chaleur	18
I.8.2.	Moyenne logarithmique de la différence de température	19
I.8.3.	La perte de charge :	20
<b><u>Chapitre II : Présentation de la raffinerie d'Alger</u></b>		
II.1.	Présentation du complexe	26
II.1.1.	Introduction	26
II.1.2.	Situation géographique de la Raffinerie d'Alger	26
II.1.3.	Historique de la raffinerie La Raffinerie d'Alger	27
II.1.4.	Structure de la raffinerie d'Alger	28
II.3.	Nature de la charge, capacité, produits	28
II.2	Description du complexe	30
II.2.1.	Unité de distillation atmosphérique. (Unité 100)	31
2.	Section du four F101 :	34
a.	circuit du brut	36

<a href="#">II.2.2. Unité 200 : Unité de platforming (reforming catalytique)</a>	<a href="#">38</a>
<a href="#">II.2.3. Unité 300 : Unité gaz-plant (traitement et séparation)</a>	<a href="#">42</a>
<a href="#">II.3. Salle de contrôle</a>	<a href="#">44</a>
<a href="#">II.4. Parcs de stockage</a>	<a href="#">44</a>
<a href="#">II.5. Pomperie</a>	<a href="#">44</a>
<a href="#">II.6. Mélanges</a>	<a href="#">45</a>
<a href="#">II.7. Laboratoire</a>	<a href="#">45</a>
<a href="#">II.8. Centrale thermoélectrique</a>	<a href="#">45</a>
<a href="#">II.9. Alimentation en eau</a>	<a href="#">46</a>
<a href="#">II.10. Atelier de maintenance</a>	<a href="#">46</a>
<a href="#">II.11. Nouvelles installation et réhabilitation de la raffinerie d'Alger</a>	<a href="#">46</a>

### **Chapitre III : Dimensionnement dune échangeur**

<a href="#">III.1. Introduction</a>	<a href="#">49</a>
<a href="#">2. La méthodologie</a>	<a href="#">49</a>
<a href="#">3. Les critères performance d'un échangeur</a>	<a href="#">49</a>
<a href="#">III.4. Description d'échangeur de chaleur tube et calandre 1-2</a>	<a href="#">50</a>
<a href="#">III.5. Hypothèses dans les calculs de dimensions</a>	<a href="#">52</a>
<a href="#">III.6. Données utilisés</a>	<a href="#">52</a>
<a href="#">Tableau 1 : Caractéristiques des fluides.</a>	<a href="#">52</a>
<a href="#">Tableau 2 : Caractéristiques des fluides.</a>	<a href="#">52</a>
<a href="#">III.7. Bilan thermique</a>	<a href="#">53</a>
<a href="#">III.8. Dimensionnement avec logiciel EES (ENGINEERING EQUATION SOLVER)</a>	<a href="#">57</a>
<a href="#">1. Apres nettoyage</a>	<a href="#">58</a>
<a href="#">2. Avant nettoyage</a>	<a href="#">63</a>
<a href="#">3. Comparaison</a>	<a href="#">65</a>
<a href="#">III.9. Caractéristiques mécaniques de E502</a>	<a href="#">66</a>
<a href="#">1. Tableau 3 : Dimensionnement des tubes.</a>	<a href="#">66</a>
<a href="#">2. Tableau 4 : dimensionnement des chicanes</a>	<a href="#">68</a>
<a href="#">3. Tableau 5 : les matériaux</a>	<a href="#">69</a>
<a href="#">Conclusion générale</a>	<a href="#">70</a>

### Bibliographie

### ANNEXES



# Introduction générale

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs thermiques essentiels dans les installations thermiques et énergétiques. Ils sont présents dans pratiquement toutes les installations thermiques. Parmi les divers types existants dans l'industrie, les échangeurs tubulaires occupent une place prépondérante.

Les échangeurs tubulaires, bien que constituant une technologie ancienne, demeurent largement utilisés dans le secteur industriel. Ils sont particulièrement indispensables pour le traitement de fluides à haute pression ou très visqueux, malgré la concurrence croissante de nouvelles technologies.

L'objectif principal du calcul des échangeurs de chaleur est de trouver un équilibre entre le transfert de chaleur et la perte de charge. Il s'agit d'optimiser simultanément le transfert thermique et de minimiser les pertes de charge.

L'étude de ces dispositifs est complexe et nécessite une connaissance précise de plusieurs paramètres : la géométrie de l'échangeur (surface d'échange et section de passage des fluides), les caractéristiques des fluides, les vitesses d'écoulement, ainsi que les températures d'entrée et de sortie des fluides.

Notre travail se base sur deux méthodes, une étude analytique et une étude numérique par logiciel EES pour illustrer les résultats.

Ce mémoire est composé en trois chapitres :

- Le premier présente une généralité sur les échangeurs de chaleur
- Le deuxième chapitre présentation de la raffinerie d'Alger
- Le dernier chapitre présente une étude détaillée sur les calculs du dimensionnement

Par deux méthodes analytique et numérique.

A la fin une conclusion générale sur ce travail sera abordé

# Chapitre I :

## **Généralités sur les échangeurs**

## **I. Echangeurs de chaleur**

### **I.1.Introduction**

Dans l'industrie du raffinage pétrolier, le processus de chauffage ou de refroidissement des fluides nécessite souvent l'utilisation d'échangeurs de chaleur. Le choix de ces équipements dépend de divers facteurs tels que les caractéristiques physiques et corrosives des fluides, les conditions de température et de pression, ainsi que les contraintes liées à l'espace et à la maintenance, en plus des considérations économiques.

### **I.2.Définition**

Un échangeur de chaleur permet de réguler la température d'un fluide en le faisant circuler à travers un autre fluide à une température différente, provoquant ainsi un transfert de chaleur du fluide chaud vers le fluide froid. L'optimisation de ces échangeurs est complexe car elle implique la gestion simultanée du transfert de chaleur et de la perte de charge, deux aspects cruciaux de leur efficacité. Ainsi, l'analyse de ces appareils comprend généralement l'évaluation concomitante de ces deux paramètres.

### **I.3. Principe de fonctionnement**

Les échangeurs de chaleur permettent un échange de chaleur entre deux fluides en mouvement. Ils sont en plusieurs catégories comme décrit ci-dessous :

#### **I.3.1. Les échangeurs à surface**

L'échangeur de chaleur entre deux fluides séparés par une paroi est caractérisé localement par plusieurs éléments essentiels :

- Le potentiel thermique, représentant la différence de température entre les deux fluides.
- La surface d'échange utilisée, déterminant la zone où se déroule le transfert de chaleur.
- La résistance de transfert, résultant de diverses résistances en série

- Le transfert de chaleur par convection entre le fluide chaud et la paroi.
- La conduction à travers la paroi.
- Le transfert de chaleur par convection entre la paroi et le fluide froid.
- Le risque éventuel de salissure de chaque côté de la paroi.[1]

### **I.3.2 Les échangeurs à contact direct :**

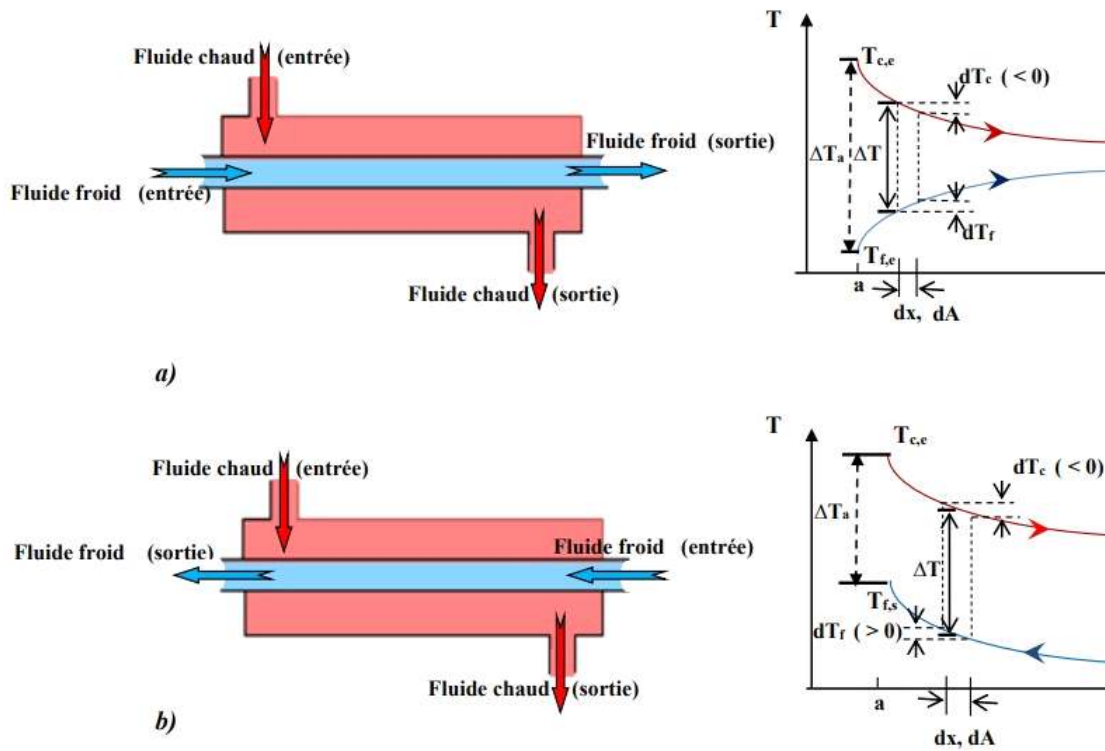
Les échangeurs à contact direct, où les fluides se mélangent sans aucune séparation par une paroi, ont des applications limitées dans le raffinage en raison du lien entre le transfert de chaleur et le transfert de masse entre les phases. Le débit de chaleur échangé dépend de plusieurs facteurs :

- La différence de température entre les deux fluides, appelée potentiel thermique.
- La surface de contact entre les deux phases.
- La résistance au transfert, qui inclut la résistance de la phase liquide et celle de la phase gazeuse.

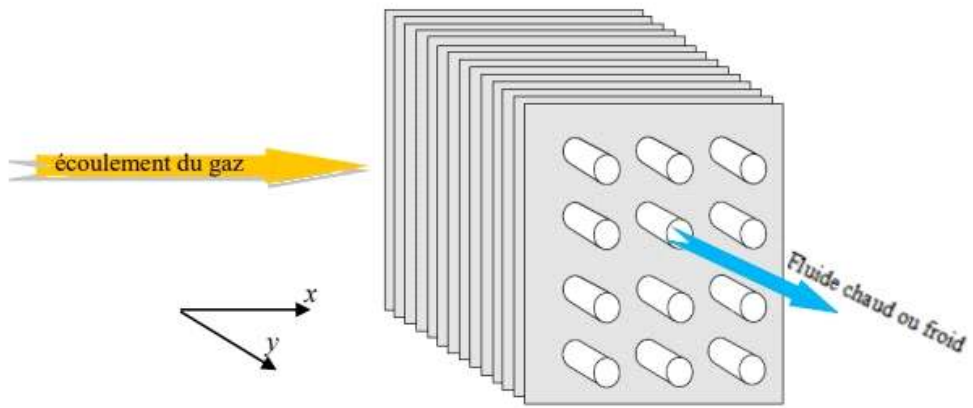
### **I.4.Principe de réalisation technologique et modes de circulation**

La circulation des fluides de chaque côté de la paroi constituant la surface d'échange correspond à différents modes de base :

- Circulation à co-courant : Les deux fluides qui circulent dans l'échangeur sont dans le même sens de chaque côté de la paroi
- Circulation à contre-courant : Les deux fluides circulent en sens opposés dans l'échangeur de chaleur
  - Circulation associant Co-courant et contre-courant :\_Ce type de circulation est réalisé le plus souvent dans les appareils tubulaires à faisceaux et calandre
  - Circulation à courants croisés : L'écoulement des deux fluides circulant dans l'échangeur de chaleur se fait dans deux directions perpendiculaires [1]

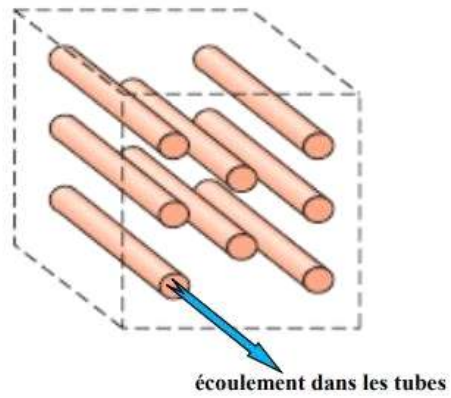


**figure.I.2** principe de fonctionnement des échangeurs à co-courant et contre cou



**Figure.I.3.** Échangeur a courant croises, fluide non mixe

[6]



**Figure.I.4.** Échangeur a courant croises, un seul fluide mixe [6]

## **I.5. Critères de classement des échangeurs [3]**

### **I.5.1. Classement technologique**

Les divers types d'échangeurs peuvent être classés selon différents critères, parmi lesquels le classement technologique revêt une grande importance. Les principaux types d'échangeurs comprennent :

- a- Les échangeurs à tubes : qu'ils soient monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- b- Les échangeurs à plaques : avec une surface primaire ou une surface secondaire.
- c- D'autres types d'échangeurs, tels que les échangeurs à contact direct ou à lit fluidisé.

### **I.5.2. Classement suivant le mode de transfert de chaleur**

Les échangeurs de chaleur sont classés en fonction du mode de transfert de chaleur, qui inclut la conduction, la convection et le rayonnement. Bien que ces modes soient souvent couplés dans de nombreuses applications, un mode prédomine généralement. Dans les échangeurs où le transfert de chaleur se fait à travers une paroi, la conduction est un élément incontournable.

### **I.5.3. Classement suivant le procédé de transfert de chaleur**

Classement suivant le procédé de transfert de chaleur :

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

Transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu.

-Transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique.

### **I.5.4. Classement fonctionnel**

Le passage des fluides dans l'échangeur peut se faire de deux manières : avec

ou sans changement de phase. Cette distinction détermine si l'écoulement est monophasique ou biphasique. Voici les différents scénarios possibles : - Les deux fluides présentent un écoulement monophasique.

- Seul l'un des fluides subit un changement de phase, tel que dans les évaporateurs ou les condenseurs.
- Les deux fluides subissent un changement de phase, comme dans le cas des évapocondenseurs.

### **I.5.5. Classement suivant la compacité de l'échangeur**

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , cette valeur est susceptible de varier de  $500$  à  $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

### **I.5.6. Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange**

On retiendra deux types de paroi :

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

## **I.6. Les différents types d'échangeurs de chaleur [4]**

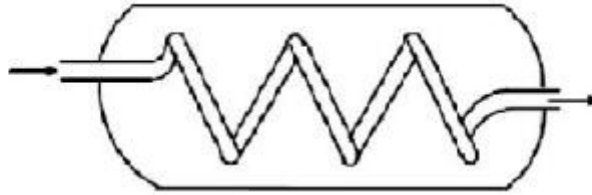
. Les différents types d'échangeurs de chaleur :

### **I.6.1. Echangeurs tubulaires**

Les échangeurs tubulaires sont largement utilisés pour des raisons historiques et économiques, car ils utilisent des tubes comme principaux éléments de la paroi d'échange. Ils sont classés en trois catégories selon le nombre de tubes et leur arrangement, visant à maximiser l'efficacité pour une utilisation spécifique :

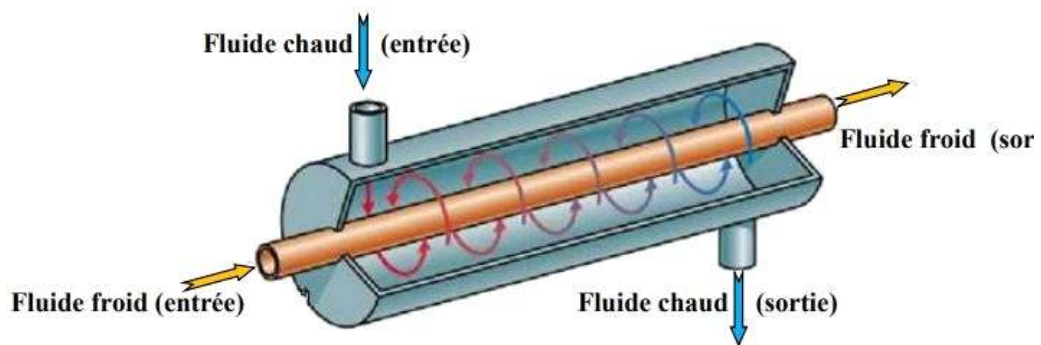
**Échangeur monotube** : Le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et adopte généralement la forme d'un serpent.





**Figure.I.5.** Échangeur monotube [8]

**a. Échangeur coaxial :** Les tubes sont souvent cintrés, avec le fluide chaud ou à haute pression circulant généralement dans le tube intérieur.



**FIGURE.I.6.** Échangeur coaxial [5]

**b. Échangeur multitubulaire :** Il existe quatre variantes :

- **Échangeur à tubes séparés :** Plusieurs tubes de petit diamètre sont disposés à l'intérieur d'un tube de plus grand diamètre, maintenus espacés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

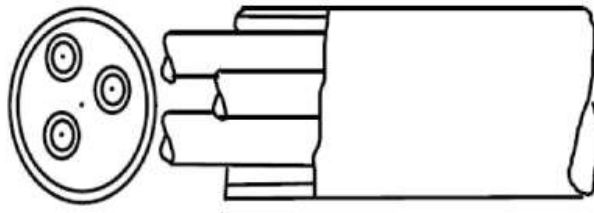


FIGURE.I.7 échangeur a tubes séparés [8]

- **Échangeur à tubes rapprochés** : Des rubans enroulés en spirale sont placés autour de certains tubes pour les maintenir et assurer un passage adéquat pour le fluide extérieur aux tube

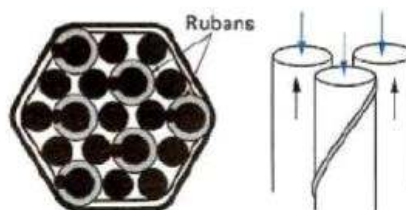
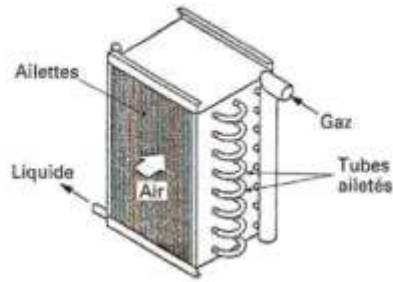


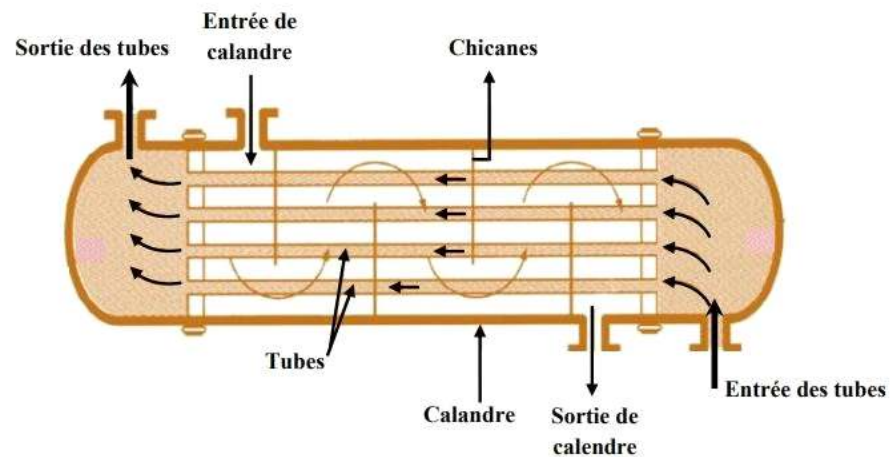
FIGURE.I.8. Échangeur a tubes rapproches [8]

- **Échangeur à tubes ailettes** : Ces tubes sont conçus pour améliorer le coefficient d'échange thermique.



**FIGURE.I.9.** Échangeur a tubes ailettes [8]

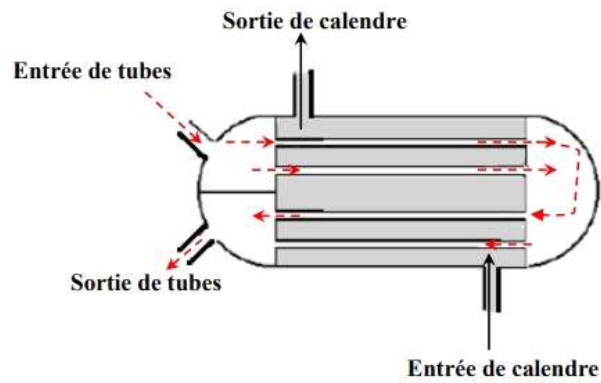
**Échangeur à tubes et calandre** : Ce type est actuellement le plus couramment utilisé.



**FIGURE.I.10.** Échangeur a tubes et calandre [6]

### Échangeur 1-2

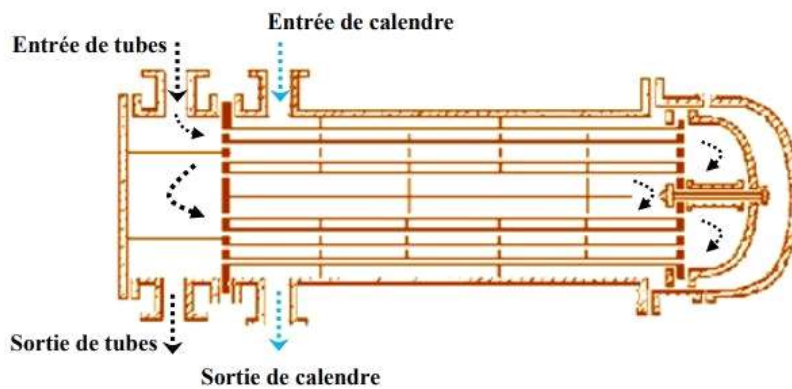
Ce type est le plus simple échangeur à faisceau : le fluide qui circule dans la calandre effectue une seule passe tandis que le fluide côté tubes effectue 2 (ou  $2n$ ) passes. Pour l'échangeur le fluide effectue une seule passe côté calandre et dans les tubes.



**FIGURE.I.11.** Échangeur a une passe cote calandre et deux passes cote tube

### Échangeur 2-4

Lorsque l'échangeur 1-2 ne permet pas d'obtenir une efficacité supérieure à 0.75, on essaie à se rapprocher plus de l'échangeur à contre-courant en effectuant 2 (ou plus) passes en calandre. L'échangeur 2-4 comporte une chicane longitudinale de sorte que le fluide en calandre effectue 2 passes. Le fluide dans le tube effectue 4 (ou 4n) passes.



**FIGURE.I.11.** Échangeur a deux passe cote calandre et quatre passes cote tube

[7]

### I.6.2. Échangeurs à plaques :

Les échangeurs à plaques ont été développés au début du siècle pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, avant d'être largement utilisés dans d'autres secteurs tels que la chimie et le nucléaire. Ils se divisent en deux catégories en fonction de la géométrie du canal utilisé : les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire :

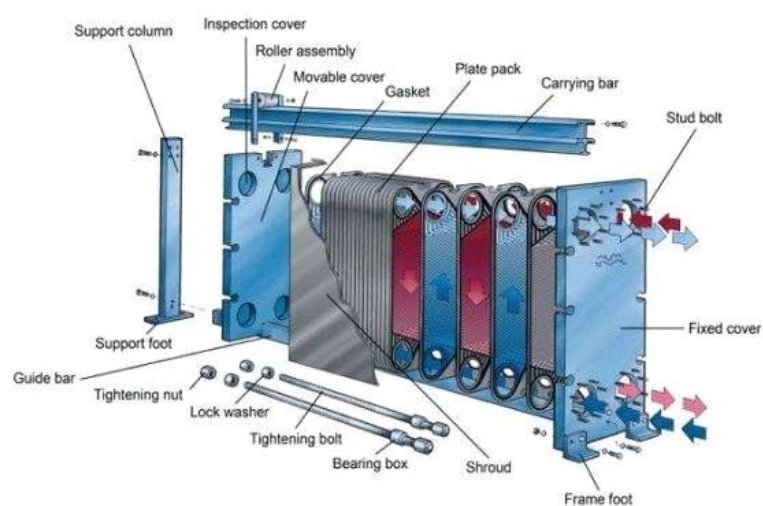
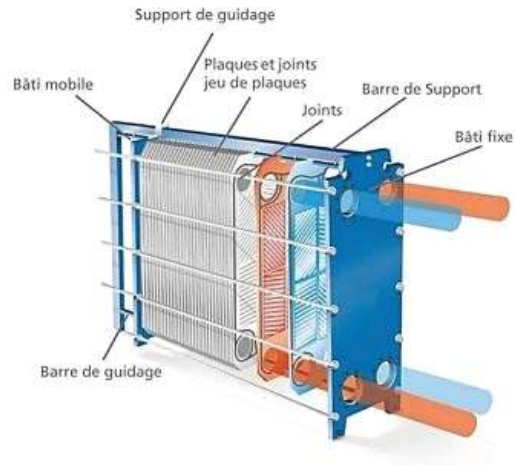


FIGURE.I.12. Échangeur a plaque [8]

#### a. Échangeurs à surface primaire :

- Échangeurs à plaque et joint : Utilisés pour les transferts de chaleur entre un fluide monophasique ou bi phasique, notamment la condensation ou la vaporisation.

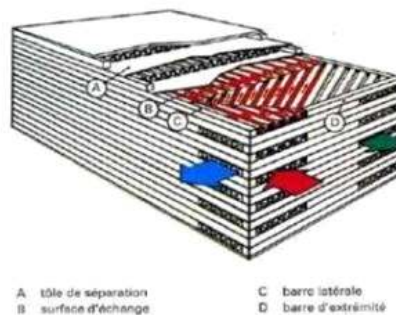


**FIGURE.I.13.** Échangeur a plaque et joint [9]

- Échangeurs à plaque soudée ou brasée : Employés dans la récupération de chaleur dans des secteurs tels que la chimie, la pétrochimie et l'agroalimentaire. Ils peuvent prendre différentes formes, comme les échangeurs lamellaires, à spirale ou brasés.

**b. Échangeurs à surface secondaire :**

- Fabriqués en aluminium ou en acier inoxydable, ils comprennent les échangeurs à plaques serties et les échangeurs à plaques brasées, classés en fonction du mode de fabrication et des matériaux utilisés.



**FIGURE.I.14.** Échangeur a surface secondaire [8]

### **I.6.3. Echangeur avec un fluide changeant de phase**

Echangeur avec un fluide changeant de phase :

Dans les échangeurs où l'un des deux fluides peut changer de phase, cette transition se produit à l'intérieur de l'échangeur. Par exemple, dans les évaporateurs, le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, tandis que dans les condenseurs, le fluide chaud se condense de l'état vapeur à l'état liquide. Ces types d'échangeurs s'inscrivent dans les classifications générales des échangeurs, comprenant les évaporateurs et les condenseurs tubulaires, ainsi que les évaporateurs et les condenseurs à plaques.

### **I.6.4. Autres types d'échangeurs**

a- Echangeurs métalliques : On peut les trouver sous forme d'échangeurs rotatifs et statiques, à caloducs ou à lit fluidisé.

b- Echangeurs non métalliques : Echangeurs à tubes de verre, échangeurs en céramique, échangeurs en graphite ou échangeurs en plastique.

### **I.7. Echangeurs tubulaires à faisceau et calandre**

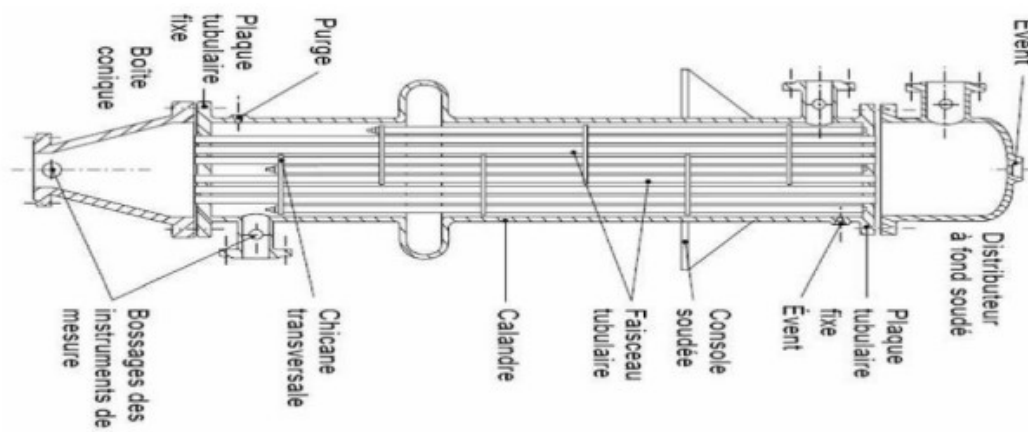
Dans les raffineries, le type d'échangeur le plus répandu est constitué d'un ensemble de tubes montés entre deux plaques tubulaires et équipés de chicanes. Des boîtes de distribution aux extrémités assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en plusieurs passages. Ce faisceau est placé dans une calandre munie de tubulures d'entrée et de sortie. Le fluide secondaire circule à l'extérieur des tubes selon un chemin défini par les chicanes. Ce type d'échangeur est souvent désigné selon les normes du standard américain TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), largement utilisé dans l'industrie.

#### **I.7.1. Assemblage faisceau-calandre**

Les principales technologies d'échangeurs à tube et calandre sont :

**Échangeur à plaque tubulaire fixe** : Dans ce type d'échangeur, la plaque tubulaire peut être directement soudée sur la calandre. Il permet d'optimiser l'espace pour loger un maximum de tubes à l'intérieur de l'enveloppe. Toutefois, son utilisation est limitée aux cas où la différence de température entre les fluides chaud et froid est suffisamment faible pour éviter des problèmes d'expansion ou de contraction du faisceau. Le nettoyage de l'extérieur des tubes ne peut être effectué que par des

méthodes chimiques. [10]

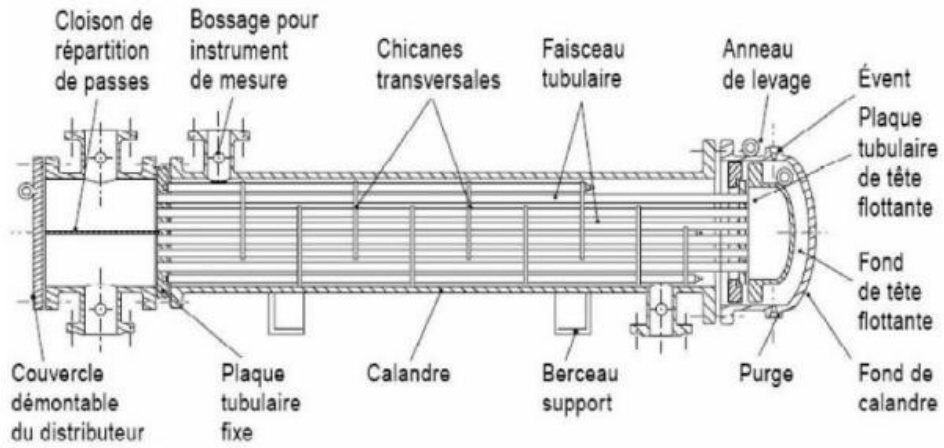


**FIGURE.I.15.** Échangeur à plaque tubulaire fixe

**Échangeur à tête flottante :**

Dans ce modèle, l'une des plaques tubulaires est fixe tandis que l'autre, de diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut se déplacer librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre. Ces échangeurs permettent une expansion thermique du faisceau et peuvent être nettoyés mécaniquement. [10]

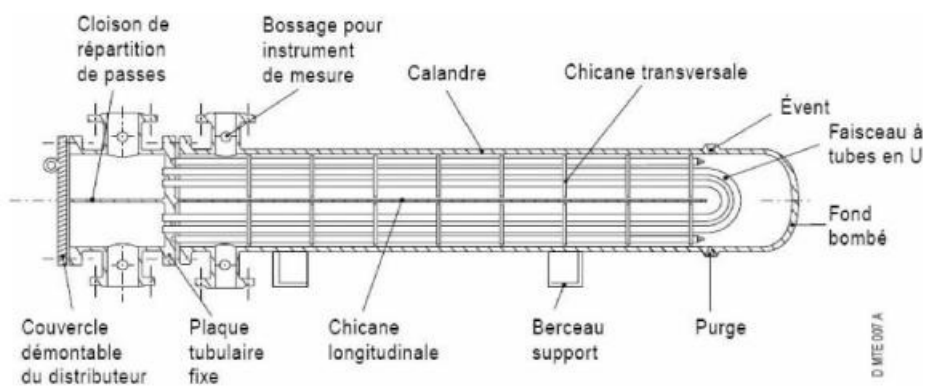




**FIGURE.I.16.** Échangeur à tête flottante

### Échangeur à tube en U :

Cette conception utilise des tubes coudés pour éliminer une des plaques tubulaires tout en conservant les avantages de l'expansion thermique offerts par une tête flottante. Cependant, le nettoyage mécanique à l'intérieur des tubes n'est pas possible, ce qui limite leur utilisation généralement aux rebouilleurs à vapeur. . [10]



## FIGURE.I.17. Échangeur à tube en U

### I.7.2. Constitution de l'échangeur à faisceau et calandre

Un échangeur de chaleur à faisceau et calandre est constitué de :

#### **La boîte d'échangeur :**

C'est l'organe qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités des tubes. Sauf pour le tube en U, il y a une boîte à chaque extrémité de l'échangeur. La disposition des boîtes dépend non seulement du type choisi mais aussi du nombre de passe. La liaison cloison - plaque tubulaire est en générale assurée par un joint. Les boîtes sont le plus souvent réalisées avec un matériel peu différent de celui des tubes.

#### **La calandre:**

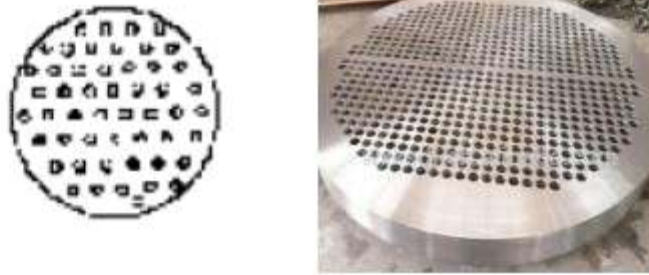
C'est l'enveloppe métallique cylindrique entourant le faisceau tubulaire. Son matériau doit être compatible avec le fluide utilisé. Les matériaux les plus courants sont les aciers ordinaires, les aciers inoxydables, le cuivre ou les matières plastiques. Il semble que la limite technologique des calandres se trouve aux alentours d'un diamètre de deux mètres. Certains très gros condenseurs sous vide sont réalisés avec une calandre parallépipédique (solution d'ailleurs favorable pour limiter les pertes de pression en entrée), ils sortent alors du cadre du code TEMA. [11]

## FIGURE.I.18 calandre et faisceau tubulaire et plaque tubulaire

#### **Plaques tubulaires:**

Ce sont des plaques percées supportant les tubes à leurs extrémités. Leur épaisseur (5 à 10cm) est calculée en fonction de la différence de pression entre le fluide dans la calandre et le fluide dans les boîtes d'une part, des contraintes dues aux différences de dilatation entre les tubes et la calandre d'autre part. Les plaques tubulaires peuvent être en acier ordinaire, en acier spécial massif. Un plaquage en acier inoxydable par exemple, peut se justifier dans le cas de plaques tubulaires déjà assez épais. Les tubes peuvent être fixés à la plaque tubulaire par dudgeonnage ou par soudure. Les plaques

tubulaires sont les parties délicates des échangeurs.

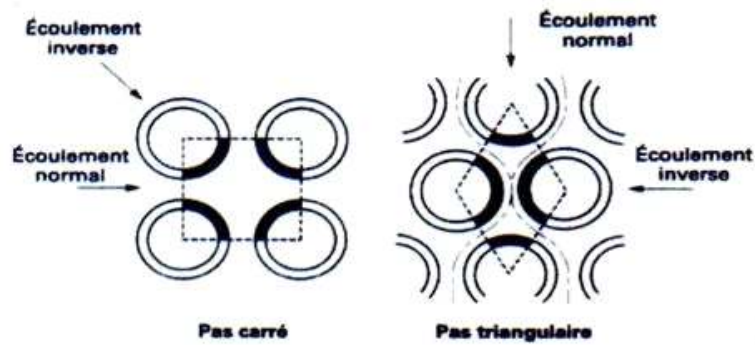


**FIGURE.I.19.** Une plaque tubulaire

**Tubes:**

Ce sont généralement des tubes normalisés dont le diamètre annoncé correspond exactement au diamètre extérieur (à la différence des tubes utilisés en tuyauterie). Ces tubes sont généralement de longueur standard : 2.44 ,3.05, 3.66, 4.88 ou 6.10 m. Le démontage du faisceau de tubes est de plus en plus difficile au fur et à mesure que sa longueur s'accroît (problème de rigidité du faisceau). Pour tous les échangeurs démontables, il convient de laisser un espace libre et suffisant dans l'axe de l'échangeur pour permettre la sortie du faisceau de tubes. Les matériaux utilisés dépendent des fluides choisis, les plus courants sont les aciers ordinaires, les aciers inoxydables, le cuivre, le laiton, les cupronickels, le graphite, le verre ou les matières plastiques.

Deux dispositions de tubes sont possibles : Le pas triangulaire et le pas carré . 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. [12]



**FIGURE.I.20.** Pas des tubes

**Chicanes:**

Elles ont pour rôle d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre et la rigidité du faisceau. Dans le cas d'un transfert de chaleur sans changement de phase, il est intéressant d'augmenter la vitesse du fluide pour améliorer le coefficient d'échange. La vitesse et d'autant plus élevée que les chicanes sont rapprochées pour l'écoulement transversal au faisceau de tubes (entre deux chicanes) et qu'elles ont une ouverture faible pour l'écoulement parallèle au faisceau de tubes (au passage de la chicane). Mais un compromis doit être trouvé pour avoir simultanément un coefficient global d'échange thermique et des pertes de pression acceptables.

Les chicanes sont de même matériau que la calandre. Elles peuvent être de plusieurs types : chicanes classiques ou chicanes à barreaux, dont le développement et l'utilisation sont relativement récents.

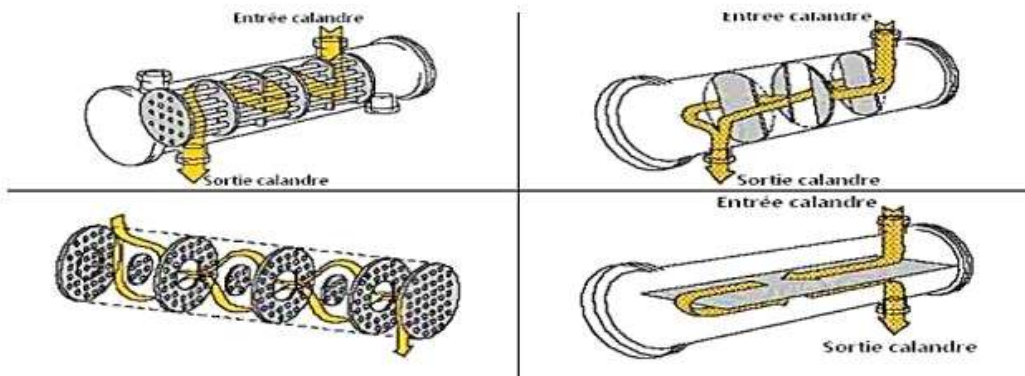


FIGURE.I.21. Les différents types de chicane [13]

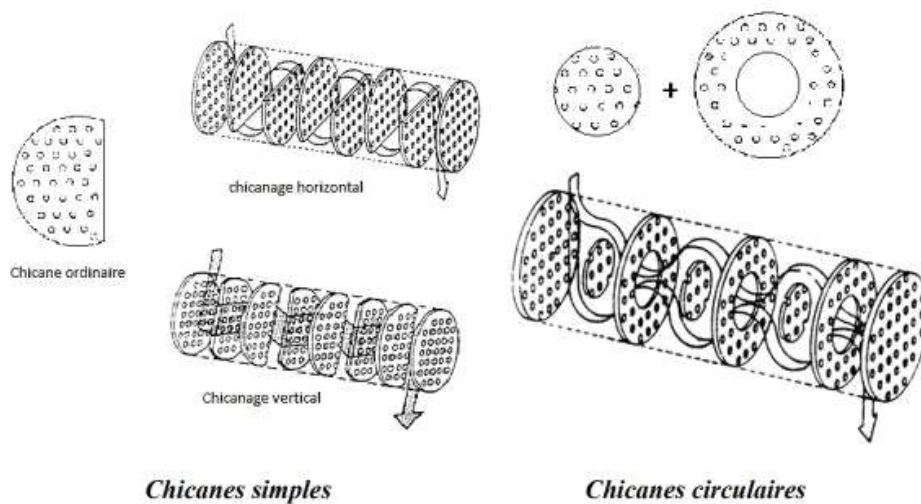
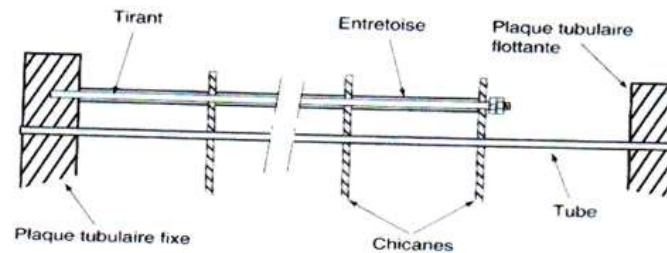


FIGURE.I.22. Les types de chicanage[14]

**Tirants et entretoises :**

Ce sont des dispositifs ou équivalents assurant la liaison du système de chicanes, qui ont pour objet de maintenir les chicanes et les plaques supports solidement en place.

Les tirants et entretoises doivent être du même matériau que la calandre.



**FIGURE.I.23.** Tirants et entretoises

#### **g-Défecteurs longitudinaux :**

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

Ceux-ci peuvent aussi servir au guidage du faisceau lors du montage

#### **I.7.3. Critères de sélection d'un échangeur à faisceau et calandre**

- Pour les fluides sous haute pression ( $> 1$  MPa, par exemple), privilégier la circulation à l'intérieur des tubes pour limiter l'épaisseur de la calandre.
- Éviter les tubes en U pour les fluides susceptibles de provoquer des encrassements (par exemple, les produits pouvant polymériser) en raison de difficultés de nettoyage. - En cas de risque d'encrassement à l'extérieur des tubes, opter pour un pas carré plutôt qu'un pas triangulaire et choisir un faisceau tabulaire démontable pour faciliter le nettoyage.
- Pour des écarts de température importants entre les deux fluides ( $> 50^{\circ}\text{C}$ ), prendre des mesures pour gérer la dilatation différentielle :
- Éviter de souder les deux plaques tubulaires à la calandre.

- Privilégier les tubes en U (si l'encrassement interne est peu probable et si le nombre de passages est pair).
- Envisager l'utilisation de boîtes à tête flottante si nécessaire.
- Éventuellement, recourir à des plaques soudées sur la calandre si aucune autre option n'est réalisable.
- En cas de fuite d'un fluide dans l'autre avec des conséquences graves, éviter les têtes où l'étanchéité n'est pas parfaite et orienter la fuite dans la direction la moins dangereuse (en ajustant les pressions des deux fluides).

Ces critères peuvent parfois entrer en conflit, et il revient au concepteur de trouver le meilleur compromis possible, en prenant en compte notamment le critère du coût minimal en cas d'équivalences techniques départagera. [12]

## **I.8. Calcul sur les échangeurs de chaleur**

### **I.8.1. Coefficient global de transfert de chaleur**

On considère deux fluides (chaud et froid) circulant de part et d'autre d'une paroi propre. Le flux de chaleur, s'écoulera en rencontrant trois diverses résistances en série :

- Résistance au transfert par convection entre le fluide chaud et la paroi.
- Résistance au transfert par conduction à travers la paroi.
- Résistance au transfert par convection entre la paroi et le fluide froid.

On exprime alors la résistance globale au transfert thermique entre les deux fluides par la somme des trois diverses résistances en série :

$$1/U A = 1/h_i A_i + R_{cd} + 1/h_e A_e \dots\dots\dots (I.1)$$

On suppose que U est basé sur la surface extérieure (Ae), on obtient :

$$R = 1/ Ue = Ae / h_i A_i + Ae R_{cd} + 1/h_e \dots\dots\dots (I.2)$$

$h_i$  et  $h_e$  : Coefficients du film intérieur et extérieur, estimés à partir des corrélations empiriques.

Une résistance globale (coefficient d'encrassement) résultant des résistances de salissement éventuel de chaque côté de la paroi s'écrit :

$$1/U_s = R + R_s \dots\dots\dots (I.3) j$$

Cette résistance (Rs) doit s'ajouter à la résistance globale donnée précédemment, d'où le coefficient de transfert global sale (Us) défini par la relation :

$$U_s = 1 / (R + R_s) \dots\dots\dots(I.4)$$

**I.8.2. Moyenne logarithmique de la différence de température**

La puissance échangée entre les deux fluides, obéit pour les deux configurations (co-courant et contre-courant) à la même loi :

$$Q = U \Delta T_{LM} \dots\dots\dots (I.5)$$

Avec :  $\Delta T_{LM} = [(\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 - \Delta T_2)]$

Qui définit la moyenne logarithmique de différence de température entre les deux fluides.

Où :

$\Delta T_1$ : Différence de températures entre les deux fluides à l'extrémité 1 de l'échangeur.

$\Delta T_2$ : Différence de températures entre les deux fluides à l'extrémité 2 de l'échangeur.

Cette relation est très utile pour déterminer expérimentalement le coefficient d'échange de chaleur global d'un échangeur ou le produit (U\*A) si la surface d'échange A est inconnu.

**I.8.3. La perte de charge :**

La perte de charge dans un échangeur de chaleur est déterminée par la différence de pression ( $\Delta P$ ) entre l'entrée et la sortie des deux fluides qui le traversent. Cette perte dépend de la vitesse d'écoulement des fluides ainsi que de leurs caractéristiques physiques telles que la densité et la viscosité.

Pour les tubes lisses d'un échangeur de chaleur à tube calandre, la perte de charge est calculée à l'aide d'une formule spécifique

$$\Delta P = \frac{n_c \cdot n_t \cdot G_t^2}{1,271 \cdot 10^{15} \cdot d} \left[ \frac{f_t \cdot l}{d_i \phi_t} + 2 \right]$$



Ou:

$l$  : Longueur des tubes en m.  $d_i$  : Diamètre interne des tubes en m .

$G_t$  : Vitesse massique du fluide circulant côté tube en kg/h m<sup>2</sup>.

$\Delta P$  : Perte de charge en kg/cm<sup>2</sup>.

$\rho$  : Masse volumique moyenne (calorifique) du fluide kg/m<sup>3</sup>.

$d$  : Densité du fluide circulant côté tube .

$n_c$  et  $n_t$  : Nombre d'appareils et nombre de passes côté tube, respectivement.

$f$  : Facteur de correction de la viscosité.

$f_t$ : Coefficient de friction, sans dimension, fonction du nombre du Reynolds. Pour les tubes lisses :  $f_t = 0.00280 + 0.250Re^{-0.32}$

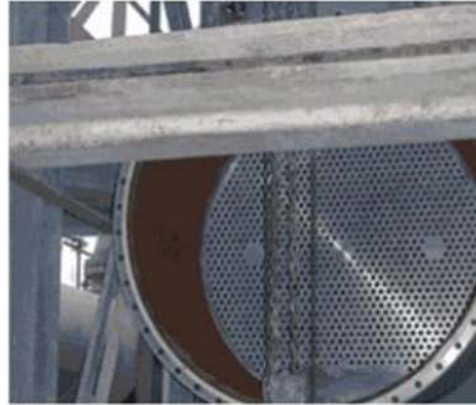
#### **I.8.4. Evaluation par la méthode NUT :**

Cette méthode est utilisée pour simuler un échangeur existant, dont on connaît les températures entrées des deux fluides et on recherche les températures des fluides sortants.

- Calculer  $NUT = US / (C_{min})$
- Déterminer  $C_{min}/C_{max}$  et tirer  $E$  à partir des abaques.
- Calculer  $Q = E C_{min} (T_{ce} - T_{fe})$ .
- Calculer TCS et TFS par  $Q = m_c C_c (T_{ce} - T_{cs}) = m_f C_f (T_{fs} - T_{fe})$ .

#### **I.9. Problèmes de Fonctionnement :**

Les transferts thermiques dans les échangeurs thermiques sont favorables au développement de phénomènes d'encrassement dans les liquides et sur les parois thermiques. Ils se traduisent par l'accumulation d'éléments solides indésirables sur les surfaces d'échange. Il existe différents types d'encrassement, classés en fonction de la vitesse de développement de la résistance.



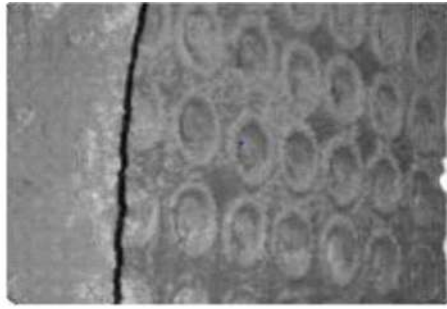
**FIGURE.I.23.** Échangeur sale et propre [15]

### **I.9.1 Type d'encrassement**

#### **Encrassement particulaire :**

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

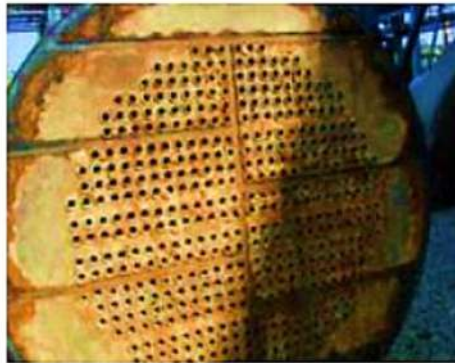
- l'eau des chaudières contenant des produits corrosifs (oxydes et hydroxydes de fer).
- eaux des tours de refroidissement.
- particules transportées par l'air.
- écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- fumées industrielles de résidus solides de combustion.



**FIGURE.I.24.** Encrassement particulaire [15]

### **I.9.2 Encrassement dû à la corrosion :**

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement permettant de produire des particules(oxydes) provoquant l'encrassement particulaire.



**FIGURE.I.25.** Importante de corrosion [15]

### **I.9.3. Entartage :**

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin (tarte) à partir d'une solution liquide. Il est dépendu 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



**FIGURE.I.26.** Entartage d'une chaudière à tube d'un fumé [16]

#### **I.9.4 Encrassement biologique :**

Il est dû au développement de micro-organismes (bactéries, 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 traitements correspondants utilisent des biocides toxiques pour la plupart des micro-organismes, il s'agit dans ce cas, d'une action rapide. 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.

#### **I.9.5 Encrassement par réaction chimique :**

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. 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 et l'industrie agroalimentaire

#### **I.9.6 Encrassement par solidification :**

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous refroidie (formation d'une couche de glace ou de givre à l'intérieur des conduits) 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 paraffinés). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation de givre)

#### **I.10. Conclusion**

Les échangeurs de chaleur sont des équipements essentiels dans de nombreuses applications industrielles, mais leur conception et leur dimensionnement présentent des défis en raison de la complexité des fluides qu'ils traitent. Chaque échangeur doit être conçu de manière spécifique pour répondre aux exigences particulières des processus concernés.

La conception des échangeurs de chaleur repose sur un équilibre entre le transfert thermique et la perte de charge. Il est crucial de maximiser le transfert de chaleur tout en minimisant la perte de charge, ce qui implique souvent un compromis entre efficacité et coûts. L'objectif est d'optimiser le rendement tout en maîtrisant les coûts d'investissement et de fonctionnement.

Les échangeurs de chaleur peuvent rencontrer divers problèmes techniques, comme l'encrassement, la corrosion, les fuites ou les défaillances structurelles. Pour prévenir ces problèmes, une maintenance préventive régulière est indispensable. Elle permet de détecter et de résoudre les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques, évitant ainsi les interventions correctives coûteuses.



# Chapitre II :

## Présentation de la raffinerie d'Alger

### II.1. Présentation du complexe

#### II.1.1. Introduction

Algérie, l'industrie de raffinage est née avec la découverte et la production du pétrole brut de Hassi Messaoud. La première unité fut construite sur les lieux même de la découverte qui a été orientée vers la satisfaction des besoins excessifs des sociétés opérantes dans le cadre de la recherche et l'exploitation de brut.

Aussitôt l'indépendance acquise, l'Algérie s'est attachée à l'idée d'accéder au développement économique en avantageant la mise en place d'une industrie pétrolière par la transformation systématique de ses hydrocarbures. [17]

#### II.1.2. Situation géographique de la Raffinerie d'Alger

se situe à 5 km au sud d'EL Harrach et à 20 km à l'est d'Alger, occupant une surface de 182 hectares (1.82 kilomètre carré). Cet emplacement a été choisi après une étude

du sol et la découverte d'une nappe d'eau nécessaire pour l'alimentation des systèmes de refroidissement.

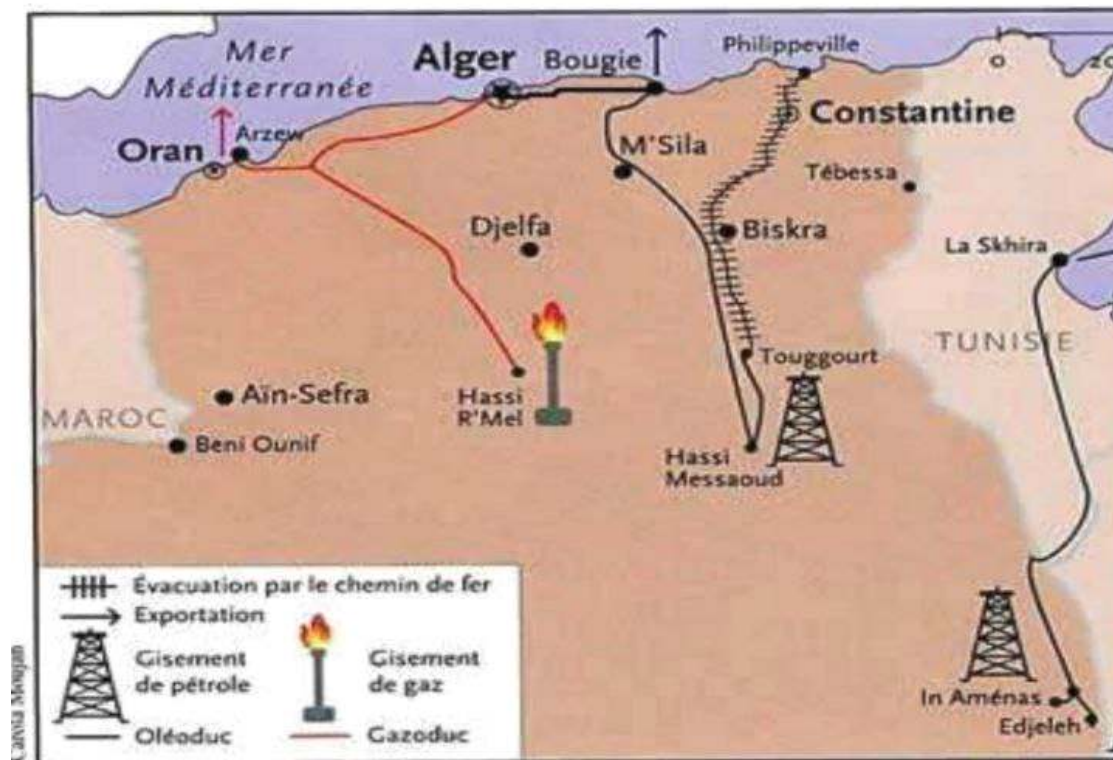


FIG II.1 la carte géographique d'Alger

### II.1.3. Historique de la raffinerie La Raffinerie d'Alger [17]

LA RAFFINERIE D'ALGER « ex NAFTEC » est une filiale de SONATRACH spécialisée

Dans le raffinage et la distribution des produits pétroliers sur le marché algérien. Elle a



été mise en service en février 1964.

A l'origine, le raffinage était une activité intégrée dans SONATRACH. En 1982, le raffinage et la distribution des produits pétroliers sont séparés et érigés en Entreprise nationale de raffinage et de distribution des produits pétroliers (ERDP-NAFTAL). En 1988, le raffinage, est à son tour, séparé de l'activité distribution est érigé en Entreprise nationale de raffinage de pétrole NAFTEC Algérie. En avril 1998, l'Entreprise devient une filiale dont les actions sont détenues à 100% par le Holding raffinage et chimie du Groupe SONATRACH avec un capital social de 12 000 000 000 de DA dénommée Société nationale de raffinage de pétrole NAFTEC Spa. En 2009, la société NAFTEC a été dissoute et a été récupérée par la société mère, sous le nom de SONATRACH Activité Aval Division Raffinage.

Depuis le 10 Janvier 1964 jusqu'à 1971 la raffinerie d'Alger était alimentée par Tankers du port pétrolier de Bejaia au port pétrolier d'Alger, et puis par pipe de diamètre 26" jusqu'au parc de stockage. En 1971, un piquage à été effectué au niveau de Beni-Mansour à partir du pipe de 24" reliant Hassi-Messaoud par un oléoduc de 16" alimentant la raffinerie en pétrole brut ainsi que l'extension du parc de stockage (un bac de brut, divers bacs de produits finis et semi-finis et une sphère de butane).

La raffinerie d'Alger est donc approvisionnée par le pétrole de Hassi- Messaoud qui est caractérisé par une faible teneur en soufre et une grande richesse en hydrocarbures légers.

Hassi-Messaoud par un oléoduc de 16" alimentant la raffinerie en pétrole brut ainsi que l'extension du parc de stockage (un bac de brut, divers bacs de produits finis et semi-finis et une sphère de butane).

La raffinerie d'Alger est donc approvisionnée par le pétrole de Hassi- Messaoud qui est caractérisé par une faible teneur en soufre et une grande richesse en hydrocarbures légers.

La participation de sonatrach, dans cette raffinerie à connu une progression par le temps comme suit :

10% en janvier 1968

44% en janvier 1969

80% en janvier 1970

100% en janvier 1997

#### **II.1.4. Structure de la raffinerie d'Alger. [17]**

Pour assurer le bon fonctionnement et le déroulement du travail ainsi que la continuité de la production, la raffinerie d'Alger est composée de plusieurs départements à savoir

- Production.
- Travaux neufs.
- Hygiène, sécurité, environnement HSE.
- Finances.
- Moyens généraux.
- Technique.
- Maintenance.
- Approvisionnement.
- RH.
- SIG

#### **II.3. Nature de la charge, capacité, produits [17]**

L'unité de distillation a été développée pour traiter le brut de Hassi Messaoud, que ce soit sous sa forme pure ou en mélange avec différentes proportions de condensât de Hassi R'Mel. Cependant, la proportion de condensât ne doit pas dépasser 27% en poids du mélange.

La capacité prévue de l'unité est de :

- 2.700.000 tonnes par an sur brut de Hassi Messaoud pur, soit une allure de 7.700 tonnes par jour de marche, une année comportant 350 jours de marche effective.

La capacité projetée de l'unité est de 2.215.000 tonnes annuelles pour un mélange

composé de 72,5% de brut de Hassi Messaoud et 27,5% de condensât de Hassi R'Mel, avec une production quotidienne de 6.320 tonnes lors des jours opérationnels de l'année.

- 2.500.000 tonnes par an sur un mélange 92,5 % de Hassi Messaoud et 7,5 % de condensât de Hassi R'Mel, soit 7.120 tonnes par jour.

Cependant, après le lancement de l'unité, la production diminuera à 5.840 tonnes par jour pour le brut de Hassi Messaoud pur et à 5.400 tonnes par jour pour le mélange de 92,50-7,50 %. Cela représente respectivement 302 m<sup>3</sup>/heure et 282 m<sup>3</sup>/heure. Le pétrole brut sera expédié à Alger par tanker, à partir du port de Béjaia, qui est le terminal du pipeline transportant le brut de Hassi Messaoud, qu'il soit pur ou mélangé avec du condensât de Hassi R'Mel.

L'unité produira :

- Un mélange d'hydrocarbures légers qui, après traitement à l'unité de Gas-Plant, section 300, donne :
- Des gaz incondensables, brûlés dans les fours de la raffinerie.
- Du propane commercial.
- Du butane commercial.
- De l'essence légère, entrant dans la constitution du carburant auto.
- Un solvant léger, alimentant l'unité de Platforming, section 200.
- Un solvant lourd, alimentant l'unité de Platforming, section 200.
- Un kérosène, fournissant les produits commerciaux, pétrole lampant et carburéacteurs.
- Un gas-oil léger, matière de base du gas-oil moteur commercial- Un gas-oil lourd, entrant dans la constitution du gas-oil moteur et des fuels.
- Un résidu de distillation, matière de base pour la constitution des fuels.



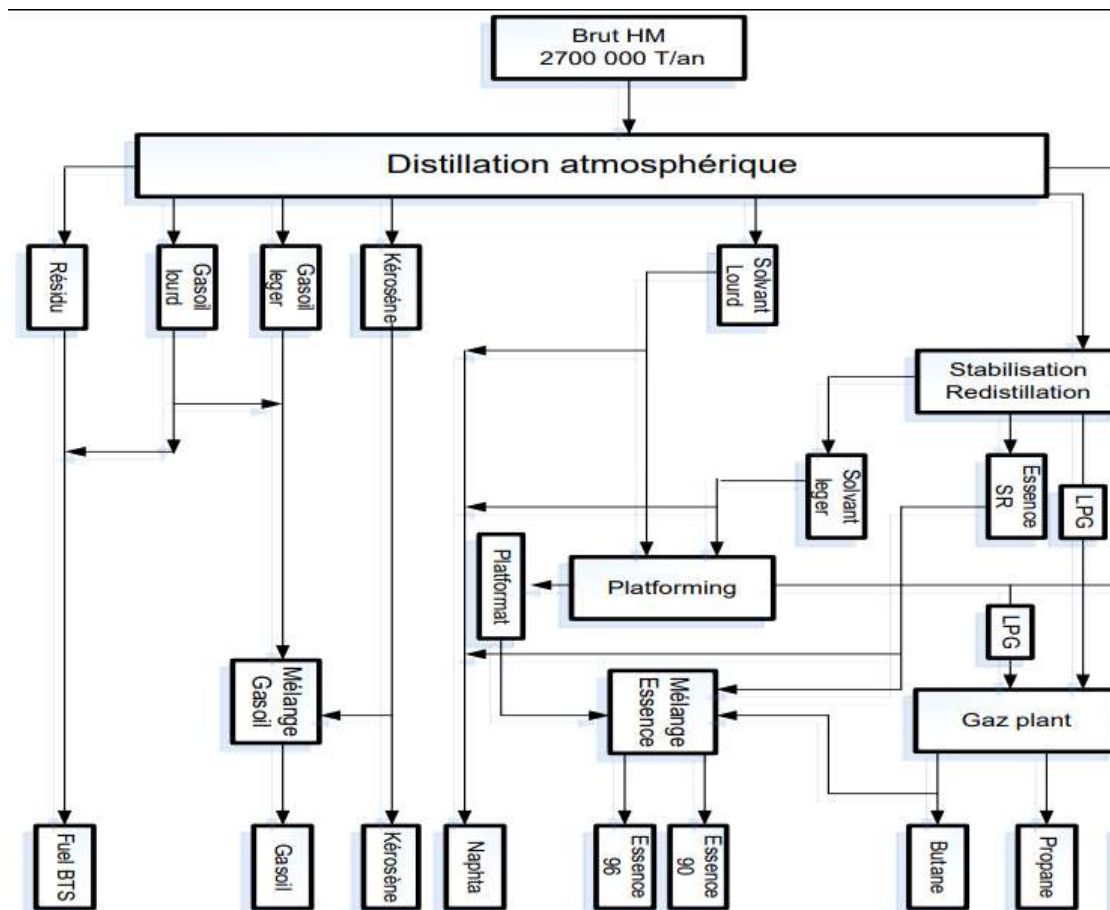


FIG.II.2. Schéma synoptique de la raffinerie d'Alger [19]

## II.2 Description du complexe

Les principales unités sont les suivantes :

- Unité de distillation atmosphérique U100 dont la capacité de traitement est de 2700000 tonnes par an de pétrole. Son rôle est de fractionner le pétrole brut en plusieurs coupes pour obtenir divers produits qui sont : Essence SR, GPL, solvant

léger, solvant lourd, kérosène, gas-oil léger et gas-oil lourd.

- Unité de réforming catalytique U200 dont la capacité de traitement est de 2500 m<sup>3</sup> par jour. Elle nous permet d'avoir du platformat nécessaire pour l'obtention des carburants auto, elle nous permet aussi d'avoir les GPL et du fuel gaz utilisé comme combustible dans les fours.

- Unité de Gas-Plant U300 pour une séparation et traitement des GPL.

- Unité de mélange de CA89 et de SP96.

- Centrale thermoélectrique : Son rôle consiste à la production de la vapeur et de l'électricité à partir du fuel et du gaz. Il reste à rappeler que la raffinerie d'Alger obtient l'électricité à partir du réseau SONELGAZ, mais vu les coupures, la raffinerie ne peut pas se permettre de tels arrêts car ces derniers engendrent des incidents catastrophiques sur certains appareillages.

Aujourd'hui, elle est autonome et n'utilise plus le réseau de SONELGAZ sauf en cas de forces majeures.

- Pomperie d'expédition connectée aux différents dépôts : Chiffa, l'aéroport Houari Boumediene et le port pétrolier d'Alger.

- Un laboratoire de contrôle de la qualité des différents produits pétroliers.

- Un parc de stockage d'une capacité de 290000 m<sup>3</sup> dont 105000 m<sup>3</sup> pour le pétrole brut et 185000 m<sup>3</sup> pour les produits finis et semi-finis :

1- Propane :	2300 m <sup>3</sup>
2- Butane :	6200 m <sup>3</sup>
3- Essence N/SUP :	46000 m <sup>3</sup>
4- Jet/lampant :	15000 m <sup>3</sup>
5- Gas-oil moteur :	52700 m <sup>3</sup>
6- Fuel lourd :	10500 m <sup>3</sup>
7- Essence SR :	16300 m <sup>3</sup>

8- Solvant total : 26000 m<sup>3</sup>

9- Platformat : 4920 m<sup>3</sup>

### **II.2.1. Unité de distillation atmosphérique. (Unité 100)**

L'Unité de distillation atmosphérique vise principalement à séparer le pétrole brut en produits finis tels que le kérosène, le gasoil, le fuel et le GPL (butane et propane), ainsi qu'en produits intermédiaires comme les solvants légers et lourds. Ces derniers servent de charge pour l'Unité 200 de reforming catalytique. Sa capacité de traitement atteint 2 700 000 tonnes par an.

Le processus de distillation atmosphérique passe par les étapes suivantes :

Le brut de Hassi-Messaoud, seul ou mélangé avec un maximum de 28% en poids de condensat Hassi-R Mel, est entreposé dans les réservoirs A301, A302 et A303. Il est ensuite acheminé à une pression atmosphérique et à une température de 27°C à l'aide des pompes verticales P101A, P101B et P101C.

Dans le processus de raffinage, plusieurs trains d'échangeurs thermiques sont utilisés pour chauffer le pétrole brut. Le premier train, équipé des échangeurs E101 A/B/C/D/E/F, utilise le reflux de tête pour chauffer le brut, circulant grâce aux pompes P103 A/B. Ensuite, un dessaleur D110 élimine les impuretés. Un deuxième train d'échangeurs E102 A/B/C chauffe davantage le brut jusqu'à 157°C. Un ballon de pré flash D102, contrôlé par le niveau LRC 101 et le régulateur de pression PRC101, permet au brut de se débarrasser des produits légers et de l'eau restante, les produits légers étant réintégrés avant la colonne de distillation atmosphérique C101.

Un troisième train d'échangeurs E103/E104, alimenté par les pompes P102 A/B, chauffe le brut par échange thermique avec le kérosène et le gasoil lourd.

Un quatrième train d'échangeurs E105/E106/E107 chauffe le brut par échange thermique avec le gasoil léger, le portant à une température de 227°C. Le four F101, avec des zones de convection et de radiation, maintient des températures contrôlées

par les régulateurs TRC106 et TRC107. [17]

#### **a Section de distillation atmosphérique :**

La colonne atmosphérique C101 est la pièce principale de l'unité de distillation atmosphérique, c'est une colonne qui comprend 49 plateaux, dont 6 se trouvent dans la section d'épuisement et sont séparés des autres par la zone d'expansion où vient se détendre le brut partiellement vaporisé. Cette détente provoque la séparation du liquide (brut réduit initial) qui descend vers la section d'épuisement, et de la vapeur qui monte vers la section de rectification [17]

#### **b. Section de stabilisation :**

La colonne de stabilisation ou de débutanisation C104 a pour but de séparer les gaz liquéfiés de l'essence totale, et de permettre ensuite à la colonne de redistillation C105 de séparer l'essence SR débutanisée du solvant léger.

La partie liquide du ballon de recette D101 est pompée par la pompe P 111, envoyée dans l'échangeur E118 dont l'échange thermique se fait avec le solvant léger du fond de la C105, dans l'échangeur E119 avec le fond de la C104 et dans l'échangeur E120 l'échange thermique se fait avec le gas-oil léger sous contrôle de température TRCV102, avant de rentrer dans la tour de débutanisation au niveau de l'un des 3 plateaux 25,24 ou 20 ce qui permet une plus grande souplesse dans la marche de la colonne.

Le rebouillage de la colonne C 104 est assuré par une partie du reflux circulant inférieur de la tour atmosphérique C101 sous contrôle de température TRC 103 réajustant le régulateur de débit FRC 108.

Le produit de tête formé par les gaz liquéfiés est recueilli dans le ballon de recette D103 après condensation à travers l'aéroréfrigérant E122Ar, une partie de la phase liquide est envoyée vers l'unité des gaz plant (U 300) par la pompe P 119 après refroidissement dans l'aéroréfrigérant E 123 Ar. L'autre partie assure l'équilibre thermique par un reflux froid envoyé sous contrôle de débit FRC 109 au sommet de la colonne C 104 par la pompe P 113. Le liquide du fond de la C104 quitte la colonne sous contrôle du régulateur de niveau LRC105, se dirige vers la colonne de



redistillation C105 sous l'effet de la différence de pression.

### **c.Section de redistillation :**

La colonne de redistillation C105 permet de séparer la coupe d'essence débutanisée obtenue comme produit de tête de cette colonne du solvant léger soutiré au fond et qui constitue l'alimentation principale de l'unité de reforming catalytique.

L'alimentation de cette colonne arrive du fond du Débutaniseur C104 suffisamment chaude pour assurer le rebouillage nécessaire à la séparation essence – SR & solvant léger.

La quantité de chaleur nécessaire au rebouilleur E125 est assurée par le jeu d'une vanne à trois voies sous contrôle de température TRC104 placée au 3<sup>ème</sup> plateau. La température de l'alimentation de la colonne de redistillation est contrôlée par la TRCV105 placé sur l'échangeur E119, ce qui permet un abaissement de température suffisant avant l'entrée de l'alimentation au niveau de l'un des plateaux 9, 11,13

L'essence débutanisée quitte le sommet de la tour C105 pour être recueillir dans le ballon de recette D104 après condensation à travers l'aéroréfrigérants E124 Ar elle sera reprise par la pompe P114 vers la limite batterie.

Cette même pompe envoie vers le sommet un reflux froid, sous contrôle de débit FRC 110, réalisant ainsi l'équilibre thermique de la colonne C105.

Le produit de fond, constitue une partie de l'alimentation de l'unité de reforming quitte la colonne sous contrôlée du régulateur LRC106 placé sur le refoulement de la pompe P117, cette pompe envoie le solvant léger vers l'échangeur E118 pour chauffer l'alimentation du Débutaniseur, puis vers l'aéroréfrigérants E127Ar, avant de l'acheminer vers la limite batterie.

<b>Produits</b>	<b>Destinations</b>
<b>GPL</b>	Charge pour l'unité Gas-plant
<b>Essence SR</b>	Base pour les essences Base pour les naphthas export
<b>Solvant léger (97 – 108 °C)</b>	Utilisé comme charge du reforming mélange avec le solvant lourd Base naphta export
<b>Solvant lourd (168 – 178 °C)</b>	Utilise comme charge de l'unité reforming en mélange avec le so léger Base pour naphta export
<b>Kérosène (228 – 238 °C)</b>	Jet-A1 pour aviation
<b>Gas-oil Léger (278 – 289 °C)</b>	Carburant diesel
<b>Distillat (330 – 340 °C)</b>	Utilise comme combustible chaudières et en mélange avec du ré pour la fabrication du fuel-oil BTS

## TAB.II.1. Les produit et leurs destinations

### 2. Section du four F101 :

À la sortie de l'échangeur E107 le brut se trouve porté à une température convenable (de l'ordre de 227°C) pour le cas du brut Hassi Messaoud seul, il entre alors dans la zone de convection du four F101 en deux groupes de quatre passes parallèles sous contrôle de débit FIC 101,102,103,104,105,106,107,108.

Dans chaque cellule après la zone de convection, les quatre passes parallèles s'assemblent deux à deux en pénétrant dans la zone de radiation.

Le brut quitte chaque cellule par deux sorties parallèles de (8 ") qui se réunissent en une seule de (18 ") provenant de chaque cellule se joignent en une seule ligne de transfert de (24") où le brut s'écoule partiellement vaporiser vers la colonne atmosphérique C101. La température du brut est contrôlée pour les cellules A et B respectivement par les enregistreurs et régulateurs de températures TRC 106 ET TRC 107.

Ces régulateurs de température réajustent à leur tour les FRC 125 et FRC 126 qui sont placés sur les lignes de gaz de chauffe alimentant les 44 brûleurs du four.

Le chauffage du four est assuré par la combustion du gaz de chauffe seulement, un réservoir de rétention D107 maintenu à une pression constante par le PIC 104 permet un débit régulier du gaz de chauffe.

Avant son entrée dans la colonne atmosphérique C101, le brut reçoit les vapeurs flashées du ballon D102.

Les six plateaux du fond travaillent à l'épuisement du brut réduit initial par un stripage à la vapeur d'eau surchauffée sous contrôle manuel (HCV-102) ce qui permet de le débarrasser des produits légers et d'obtenir au fond de la colonne un résidu à point de flash correct.

La section au dessus de la zone d'expansion comprend 43 plateaux de rectification, Dans cette section s'opère la séparation des différentes coupes qui seront soutirées de la colonne aux différents niveaux et par ordre de volatilité croissante. Le gasoil lourd est soutiré du plateau 11 pour être envoyé dans la colonne C103C, le gasoil léger des plateaux 17 ou 19 pour être envoyé dans la colonne C102C, le kérosène des plateaux

24 ou 26 pour être envoyé dans la colonne C102A et le solvant lourd est soutiré des plateaux 34 ou 36 pour être envoyé dans la colonne C103 A, enfin la vapeur de tête de la colonne C101 constituée par un mélange (LPG et d'essence totale) quitte la colonne pour se condenser partiellement à travers les aéroréfrigérants E109Ar suivi des deux réfrigérants à eau E109A/B. le produit de la condensation est recueilli dans le ballon de recette D101 avant d'être repris par la pompe P111 et envoyé à la section de stabilisation.

Les soutirages latéraux du gasoil lourd et du gasoil léger subissent un stripage à la vapeur d'eau dans les stripeurs respectives C103 C et C102C avant d'aller chauffer le brut dans les échangeurs E104 et E105 dans la section de préchauffage.

Ces produits une fois refroidis reviennent respectivement dans les sécheurs C103B et C102B où règne un vide de l'ordre de 70 mm Hg. Ce vide permet de débarrasser le gas-oil pollué de l'eau entraînée et ramène ces produits aux spécifications voulues relative à la teneur en eau, à savoir 80 ppm. Une légère quantité des gasoils est cependant vaporisée dans ces deux sécheurs. Cette vapeur est totalement condensée par le condenseur E111, et recueillie ensuite dans le ballon D105, avant d'être reprise par la pompe P116A/B et renvoyée dans le ballon de flash D102, les vapeurs restantes sont aspirées par l'éjecteur de vide

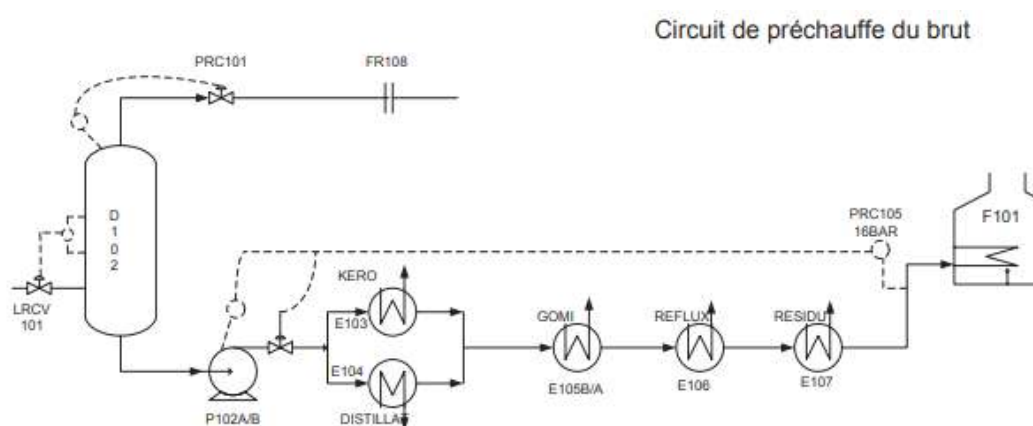
Vu la forte tension de vapeur du kérosène et du solvant lourd le procédé sous vide ne permet pas de les débarrasser de l'eau entraînée sans provoquer des pertes énormes de ces produits pour cette raison on remplace le stripage à la vapeur d'eau par un rebouillage par le résidu au moyen des rebouilleurs E117 et E110 placés verticalement à coté des colonnes de stripage C102A et C103A. La chaleur fournie à ces deux rebouilleurs est assurée par une partie du résidu chaud sous contrôle de débit FRC 107 et FRC 106.

Une fois le kérosène et le solvant lourd sont débarrassés des produits légers dans leur colonne de stripping C102A et C103A, seront repris respectivement par les pompes P107 et P106, le kérosène pour chauffer le brut dans l'échangeur E103 et le solvant lourd refroidis à travers l'aéroréfrigérants E112 Ar ensuite à travers E122 AE.

[17]

#### **a.circuit du brut**

Le brut est repris du fond du ballon (D102) par la pompe (P102) et refoulé dans les échangeurs (E103, E104, E105 A/B, E106, E107 A/B). D'où il sort à (220 ° C) et se divise en huit circuits parallèles pour alimenter le four (F101). Ils rentrent d'abord dans la zone de convection et se réunissent deux par deux pour former quatre circuits, deux circuits dans la zone de radiation nord et deux autres dans la zone de radiation sud. A la sortie du four, les circuits se réunissent en une seule ligne qui reçoit les produits légers venant du ballon (D102) avant l'entrée dans la tour (C101) (Colonne de distillation).



**FIG.II.3** Circuit de préchauffe du brut

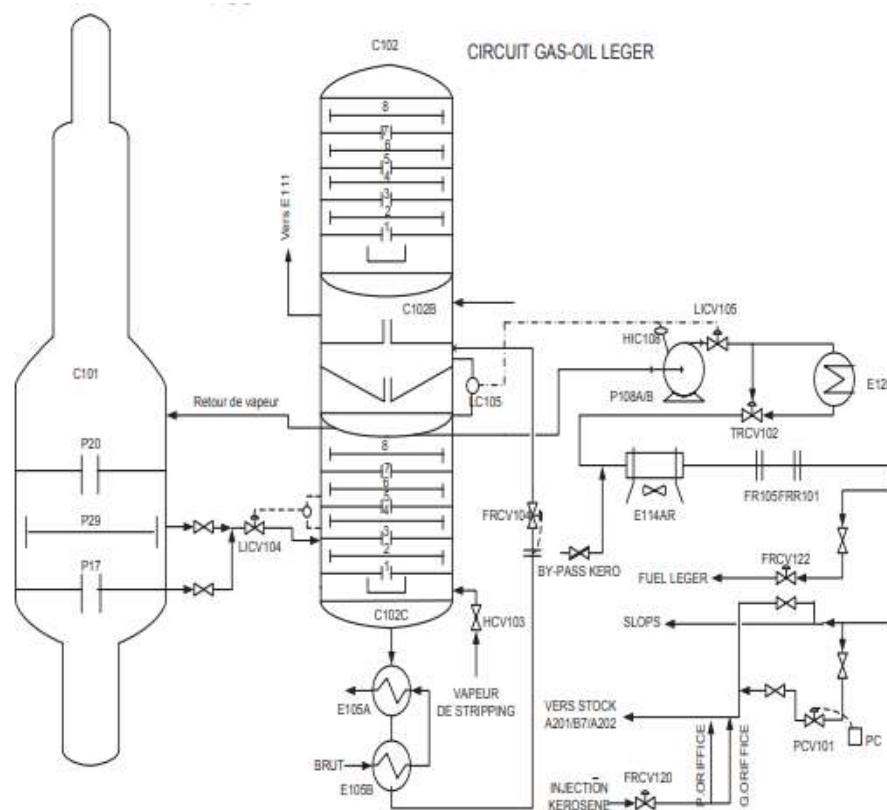
### **b.Circuit du gasoil léger LGO**

Comme le gasoil lourd, le gasoil léger s'écoule par gravité vers le stripper (C102 C).

Les vapeurs sortants de la tête du stripper retournent dans la colonne(C101). Le gasoil léger strippé est refroidi dans les échangeurs (E105 A et B) de (305°C à 195°C) et séché sous vide dans le(C102B). Les vapeurs de tête du sécheur sont envoyées comme celles de (C103B) vers le ballon(D105), après être passées dans l'échangeur(E111). Le séché est repris par la pompe(P108) passe dans l'échangeur(E120) et

l'aéroréfrigérant (E114 AR) à la sortie duquel la température est de (50°C). Une partie du gasoil léger constitue le fuel léger, en mélange avec le gasoil lourd et le résidu, une autre partie peut être utilisée comme huile de rinçage et envoyé dans :

- Le fond de (C101, C103 B, C 103 C).
- Entrée (E110, E117, E107)
- Entrée (E115 AR et E116 AR)
- Entrée (E304, E302) [17]



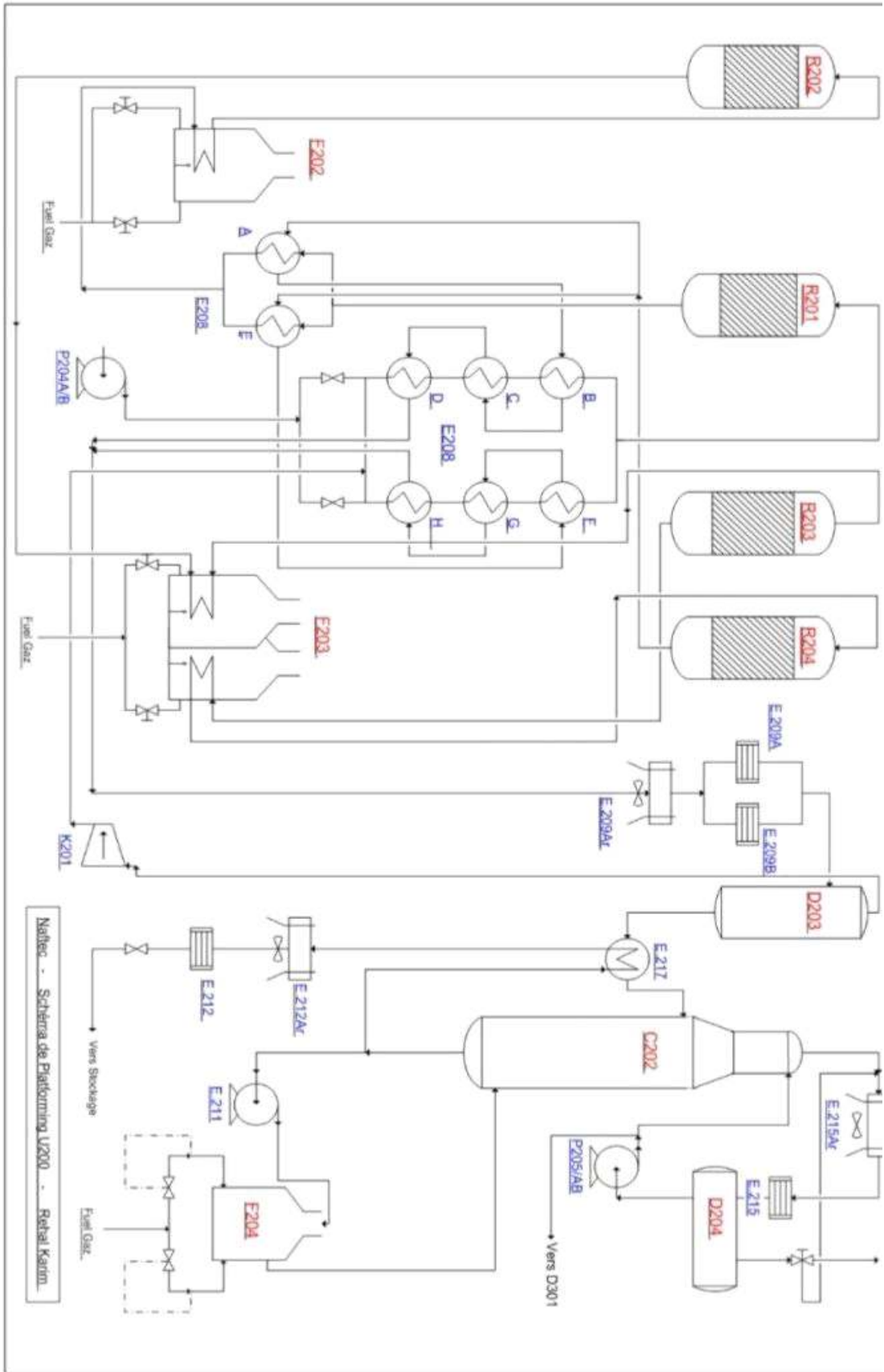
## FIG.II.4. Circuit de LGO

### II.2.2. Unité 200 : Unité de platforming (reforming catalytique)

- L'objectif principal de l'unité de platforming est d'améliorer l'indice d'octane du mélange constitué de solvant léger et solvant lourd par le biais de réactions catalytiques, afin de produire du plat-forming destiné à la fabrication des essences.
- Cette unité a une capacité de traitement de 2500 mètres cubes par jour.
- La charge de solvant peut provenir soit de l'unité 100 de distillation atmosphérique, soit des bacs A102, A103 et A104.
- Cette charge est acheminée par les pompes P204 A ou B avant de passer par les principales installations de l'unité de reforming.
- Les principales installations de l'unité de reforming comprennent :
  - Un train de préchauffage,
  - Un réacteur de garde R201,
  - Une section catalytique avec deux fours de petite et grande taille,
  - Trois réacteurs,
  - Un ballon séparateur d'hydrogène D203.
- De plus, l'unité inclut :
  - Un ballon fuel-gaz D214 pour alimenter les fours,
  - Un turbocompresseur K201,
  - Une section de stabilisation comprenant une colonne et un four F204.
- La section de stabilisation permet de séparer les GPL du plat-forming avant de les envoyer vers l'unité de gaz-plant. [17]







**FIG.II.5.** Schéma de l'unité U200[19]

**a. Four F 202 :**

Il comprend deux circuits parallèles situés à l'intérieur de la chambre de combustion ce four est du type à mur radiant, il est caractérisé par la présence d'un grand nombre de brûleurs à gaz à flamme courte répartis en 2 rampes de chaque côté du mur, ce qui permet d'obtenir la température voulue sans risquer les coups de feu sur les tubes.

La température à la sortie des circuits est réglée par les TRC 207/208 qui agissent sur la pression du gaz alimentant chaque rampe de brûleurs.

Les fumées quittant la chambre de combustion passent dans la zone de convection où se trouvent 264 tubes du générateur de vapeur et 8 tubes, de la surchauffeur de vapeur.

Les deux circuits du F202 se rejoignent à la sortie du four pour entrer dans le premier réacteur de platforming R.202 sous une pression de 33,6 bars et une température, suivant le NO, pouvant atteindre 538°C maximum.

**b. Four F 203 :**

L'effluent qui quitte le réacteur précédent se trouve à une température d'environ 485°C et une pression de 33,4 bars.

Il pénètre ensuite dans le four double F.203 à travers deux circuits contrôlés par les enregistreurs de température TRC203 et TRC 204. à la sortie de ce four, ces deux circuits se rejoignent pour entrer dans le deuxième réacteur R.203, les pressions et températures d'entrée dans ce réacteur sont de l'ordre de 32,2 bars et 532 °C maximum.

Après réaction dans le R.203, elles ne sont plus que de l'ordre de 31,6 bars et 527°C, de là, l'effluent pénètre une deuxième fois dans le four F203 à travers deux circuits sous contrôles des TRC205 et TRC206, à sa sortie l'effluent pénètre dans le 3ème réacteur R.204.

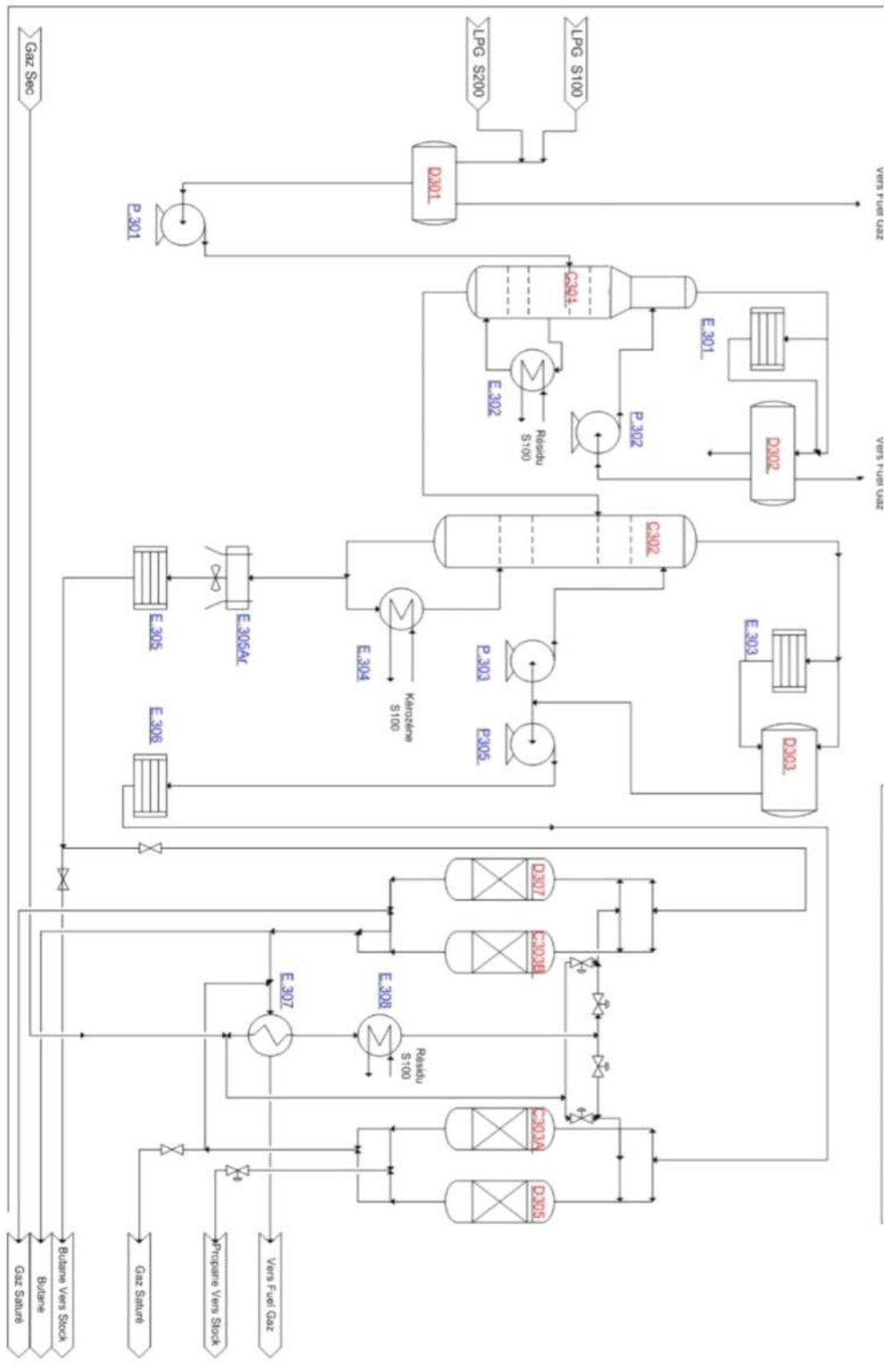
**c. Débutaniseur C202 :**

Le but de cette colonne est de stabiliser le platformat c'est-à-dire le débarrasser des

butanes et plus légers qui seront traités au gaz plant, l'effluent refroidi du 3ème réacteur sort en fond du ballon D203 passe à travers l'échangeur E211 où il est réchauffé par le platformat stabilisé du fond de la C202 pour pénétrer dans le débutaniseur au niveau du 15ème plateau sous une pression de 21 bars et une température de 152°C

### **II.2.3. Unité 300 : Unité gaz-plant (traitement et séparation)**

- L'unité gaz-plant a pour mission de traiter et de séparer les gaz issus des deux unités.
- Elle prend en charge le traitement du produit liquide provenant des accumulateurs situés à la tête des débutaniseurs de l'unité 100 de distillation atmosphérique et de l'unité 200 de reforming.
- L'objectif est de générer du propane et du butane destiné au marché.
- Ces produits subissent ensuite un processus de purification utilisant des tamis moléculaires pour éliminer toute humidité et tout contenu en soufre.
- L'unité gaz-plant comprend plusieurs composants, tels que :
  - Un ballon tampon (D301),
  - Un déméthaniseur (C301),
  - Un ballon séparateur (D302),
  - Un dépropaniseur (C302),
  - Un autre ballon séparateur (D303),
  - Des systèmes de traitement du butane et du propane par des tamis moléculaires :
    - C303A et D305 pour le propane,
    - C303B et D307 pour le butane.



**FIG.II.6.** Schéma de l'unité U300[19]

### **II.3. Salle de contrôle**

Le nombre important des appareils de mesures nécessitent de les contrôler dans une salle de contrôle ou se trouvent toutes les informations nécessaires à la marche des unités températures, pression, débit, niveau, contrôle des vannes.

### **II.4. Parcs de stockage**

Le pétrole brut est stocké dans trois réservoirs à toits flottants de 35.000 m<sup>3</sup> pour chacun A301, A302, A303. Ces réservoirs sont équipés de porte de visite boulonnée, mise à la terre de la cuve et du toit, purge d'eau, purge de toit, indicateur de niveau avec lecture au sommet du bac et transmission à la salle de contrôle, indicateur de température avec lecture au microordinateur de la salle de contrôle, hélicoagitateurs deux par bac situés de part et d'autre de la tuyauterie d'arrivée du pétrole brut.

Les produits finis et intermédiaires sont stockés au niveau de trente réservoirs munis d'une mise à la terre, de purge d'eau, de purge de toit pour réservoirs à toits flottants, indicateurs et des transmetteurs de niveau et de températures.

La capacité globale des parcs de stockage de pétrole et des parcs de stockage des produits finis et intermédiaires est de 322.100 m<sup>3</sup>.

Les gaz liquéfiés sont stockés dans des sphères représentant une capacité de 5500 m<sup>3</sup> pour le butane et 2000 m<sup>3</sup> pour le propane. Pendant le démarrage de l'unité gaz plant les gaz liquéfiés sont dotés de deux réservoirs cylindriques représentant une capacité de 200 m<sup>3</sup> pour le butane et 150 m<sup>3</sup> pour le propane. Ces réservoirs sont équipés de : soupapes de sûreté, jauges à tirette, Indicateur de niveau, Manomètre, Prise d'échantillon, limiteur de débit, dispositif d'arrosage. [17]

### **II.5. Pomperie**

La pomperie comprend un espace maçonné recevant les pompes et les distributeurs pour les buts de l'expédition des produits finis de la raffinerie vers le port pétrolier d'Alger, l'aéroport Houari Boumediene, et les dépôts de carburant de Caroubier, El Harrach et Chiffa. Aussi l'éthylation et la fabrication de l'essence normale CA89 et SP96 à partir d'un mélange composé de : le plat format, le solvant total, l'essence SR, le plomb tétraéthyle PTE et le butane. [17]

## **II.6. Mélanges**

La raffinerie est équipée pour produire, stocker et expédier les dérivés d'hydrocarbures suivants: - Essence est fabriquée par un mélange en ligne de trois constituants produits par l'unité combinés et stockés dans les réservoirs. - Jet A1, le kérosène sortant de la colonne de distillation atmosphérique subie un traitement au niveau de précipitateur électrostatique pour lui enlever les impuretés indésirables tels que les acides naphthéniques et l'eau, après ce traitement il est envoyé aux bacs de stockages. - Gas-oil moteur est obtenu par un mélange en ligne des deux produits le kérosène et le gasoil léger, avec des proportions bien définies pour respecter les spécifications requises. - Fuel BTS est obtenu par un mélange en ligne de résidu et de gas-oil lourd. - Naphta est fabriqué par un mélange en ligne du solvant lourd, solvant léger et d'essence SR, avec des proportions bien définie pour respecter les spécifications requises [17]

## **II.7. Laboratoire**

La raffinerie d'Alger dispose d'un laboratoire dans le but d'analyser les différents produits provenant du processus de raffinage. Pour un bon produit il doit correspondre aux critères et normes nationales et internationales. Le service laboratoire dépend du département technique, le laboratoire de la raffinerie est un laboratoire de contrôle des unités et d'analyse des produits

finis commercialisés soit sur le marché intérieur ou extérieur. [17]

## **II.8. Centrale thermoélectrique**

La raffinerie d'Alger possède une centrale thermoélectrique, pour la production de la vapeur, l'air service à 9 bar, l'air instrument par détente à 4.5 bar, et de l'électricité. La centrale thermoélectrique produit l'électricité à partir de la vapeur d'eau envoyée par deux chaudières avec un débit massique de 47 tonnes/h à une pression de 35 bars et une température de 410 °C, passant dans un turbo alternateur constitué d'une turbine à vapeur et d'un alternateur d'une puissance de 6 MW. [17]

## **II.9. Alimentation en eau**

La raffinerie consomme jusqu'à 25 m<sup>3</sup> d'eau pour 1 m<sup>3</sup> de pétrole brut traité, l'eau est utilisée principalement pour la production de la vapeur, refroidissement des condenseurs, réfrigération des produits pétroliers, et la lutte contre l'incendie.

## **II.10. Atelier de maintenance**

La raffinerie d'Alger dispose un atelier de maintenance, chargé de réparer les équipements des différentes unités tel que : pompes, échangeurs, vannes, moteurs, & etc. En cas de problème, l'opérateur doit le signaler au chef de quart ensuite au service mécanique, et une intervention sur site selon le degré de gravité avec le permis de travail (à froid ou à chaud). La décision est prise après une réunion des responsables de : zone, sécurité et chef de département mécanique.

## **II.11. Nouvelles installation et réhabilitation de la raffinerie d'Alger**

Face à la demande croissante du marché algérien en produits raffinés, le groupe Sonatrach a entrepris un ambitieux programme de réhabilitation, de remise à niveau et de modernisation de ses raffineries. Conscient des défis majeurs et de la stricte évolution des spécifications des carburants ainsi que des exigences en matière de santé, de sécurité et de protection de l'environnement, Sonatrach a lancé ce programme pour répondre efficacement à la demande régionale en dérivés d'hydrocarbures. La capacité de production de la raffinerie sera ainsi augmentée de 35 %, atteignant 3 645 000 tonnes par an.

Les objectifs de ce programme sont :

- Assurer la continuité de la production à moyen et long terme en renouvelant et modernisant les équipements.
- Optimiser le fonctionnement des installations grâce à des améliorations techniques.
- Produire des carburants aux spécifications européennes pour le marché national et l'exportation, tout en préservant l'environnement.

Les principales installations et améliorations prévues sont :

1. Installation d'une unité d'isomérisation et d'un reforming à régénération continue (CCR) pour produire des essences sans plomb à haut indice d'octane.
2. Modernisation de l'instrumentation, en passant d'un système pneumatique à un système de contrôle basé sur le DCS, évolutif vers un contrôle avancé et optimisé.
3. Mise à niveau des équipements électriques de distribution avec des technologies numériques à base de microprocesseurs et informatisation du système de supervision du réseau électrique.
4. Élimination de l'utilisation du plomb dans les essences pour produire des carburants conformes aux normes européennes de 2009.
5. Modernisation et extension des installations de production et de distribution des utilités telles que vapeur, air de service, air instrument, azote, eau de refroidissement, eau de chaudière, gaz naturel, électricité.
6. Amélioration des infrastructures de réception, stockage et distribution des produits raffinés.
7. Réhabilitation des unités de traitement des effluents pour valoriser le fuel-oil et augmenter la production des carburants via l'installation d'une unité RFCC.
8. Installation d'une nouvelle unité d'isomérisation de naphta léger.
9. Mise en place d'une unité de prétraitement et de fractionnement de naphta commune aux unités d'isomérisation et de reforming.
10. Installation d'une unité d'adoucissement et de séparation des GPL.

Ce programme vise non seulement à répondre à la demande croissante en produits raffinés mais également à améliorer la compétitivité de Sonatrach sur le marché international tout en respectant les normes environnementales les plus strictes. [18]



# Chapitre III :

## **Dimensionnement d'un échangeur E502**

### **III.1. Introduction**

Un échangeur de gasoil (LGO) brut est un équipement essentiel dans le processus de

raffinage du pétrole. Son rôle principal est de chauffer le gasoil brut afin de le rendre plus maniable et de faciliter sa séparation des autres fractions du pétrole brut. Cela se fait en transférant la chaleur d'un fluide chauffant, comme de la vapeur d'eau ou de l'huile thermique, au gazole brut à travers un réseau de tubes. Cette opération favorise les réactions chimiques nécessaires pour obtenir des produits finis de qualité. L'efficacité de l'échangeur est cruciale pour le bon déroulement du processus de raffinage, car elle influence directement la qualité et la quantité des produits finis obtenus.

### **1. la problématique**

L'objectif de notre étude est de mener une évaluation approfondie du rendement d'un échangeur de chaleur E502, conçu pour le traitement du gazole brut, installé dans les installations de la raffinerie d'Alger. Notre principale visée est d'examiner en détail l'efficacité opérationnelle de cet échangeur de chaleur avant et après son nettoyage. Cette comparaison permettra de mieux comprendre les performances relatives de l'échangeur et d'identifier les éventuelles améliorations à apporter pour optimiser le fonctionnement de l'échangeur E502.

### **2. La méthodologie**

Notre approche méthodologique repose sur le calcul théorique, complété par une étude réalisée à l'aide du logiciel EES (Engineering Equation Solver). Cette méthode nous permettra de comparer de manière rigoureuse les performances de le même échangeur mais différent type, en analysant les résultats obtenus à travers ces deux approches complémentaires

### **3. Les critères performance d'un échangeur**

Pour comparer deux échangeurs, voici quelques critères couramment utilisés :

1. Efficacité thermique : Comparer l'efficacité thermique de chaque échangeur pour des conditions de fonctionnement similaires.
2. Coût initial : Comparer les coûts initiaux d'achat et d'installation des deux échangeurs.
3. Coût opérationnel : Examiner les coûts de fonctionnement à long terme, y compris la consommation d'énergie, la maintenance et les coûts de remplacement.

4. Taille et encombrement : Évaluer la taille physique de chaque échangeur et son encombrement dans l'installation.
5. Fiabilité et durabilité : Considérer la fiabilité et la durabilité des échangeurs dans des conditions de fonctionnement normales et extrêmes.
6. Flexibilité d'application : Déterminer si l'échangeur convient à une large gamme de conditions de fonctionnement et de fluides.
7. Efficacité énergétique : Évaluer l'efficacité énergétique de chaque échangeur en termes de transfert de chaleur par unité de consommation d'énergie.
8. Compatibilité environnementale : Examiner les effets environnementaux de chaque échangeur, y compris les émissions de gaz à effet de serre et la recyclabilité des matériaux.

En fonction des besoins spécifiques de l'application et des priorités de l'utilisateur, certains critères peuvent être plus importants que d'autres dans le processus de comparaison.

### **3. Le rôle principale de l'échangeur E502**

Le processus de raffinage du pétrole brut implique plusieurs étapes, dont l'une est la distillation. Lors de cette étape, le pétrole brut est chauffé dans un échangeur de chaleur avec le gasoil (LGO), ce qui permet de le séparer en différentes fractions, dont le gasoil, en fonction de leur point d'ébullition. Une fois séparé, le gasoil est souvent soumis à un processus supplémentaire appelé "craquage catalytique" pour améliorer ses propriétés. Ce processus de transformation peut également générer de la chaleur, contribuant ainsi à réchauffer le brut. Ainsi, le gasoil issu du pétrole brut contribue indirectement à chauffer le brut pendant le processus de raffinage.

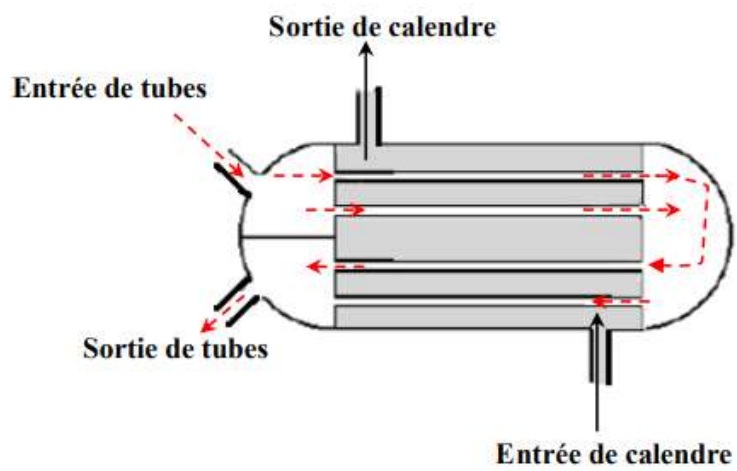
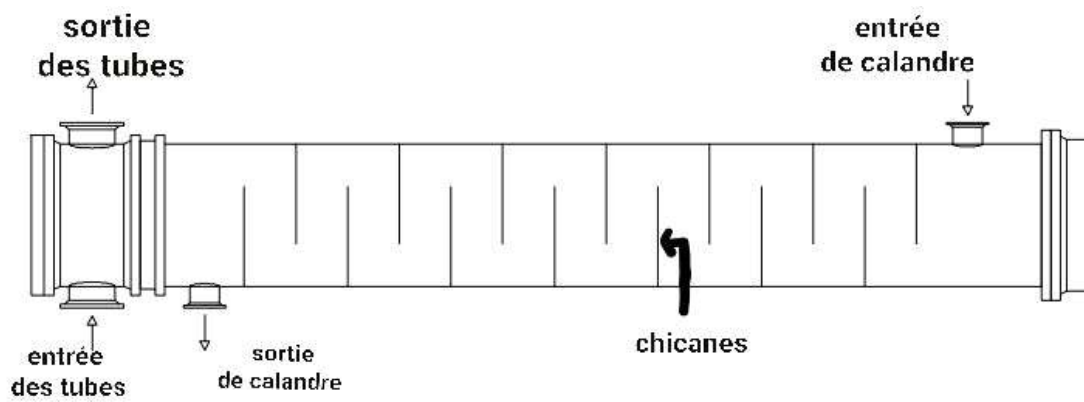
Alors notre objectif c'est augmenter la température de brut

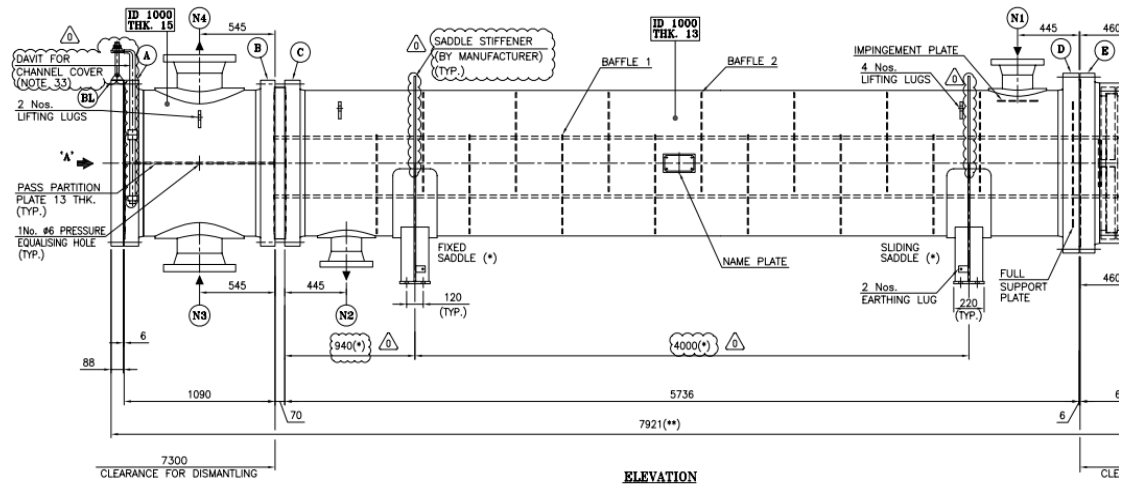
### **III.4. Description d'échangeur de chaleur tube et calandre 1-2**

#### **Échangeur 1-2 (E502)**

Ce type est le plus simple échangeur à faisceau: le fluide qui circule dans la calandre effectue un seul passe tandis que le fluide côté tubes effectue 2 (ou 2n) passes. Pour l'échangeur présenté dans la figure le fluide effectue une seule passe côté calandre et

dans les tubes.





**Figure III.1.** Dessin technique de l'échangeur E502

### III.5. Hypothèses dans les calculs de dimensions

- Pas de changement de phase pour les deux fluides. Échangeur isolées thermiquement avec le milieu extérieur.
- Transfert de chaleur par radiation est négligeable.
- Flux de chaleur uniforme le long de la paroi

### III.6. Données utilisés

**Tableau 1: Caractéristiques des fluides.**

	Fluide chaud (gasoil)	Fluide froid (brut)
Débit (kg/s)	22.22	156.54
Te (K°)	532	436
Ts (K°)	451	448
Cp(J/kg.K)	2200	1900

$\mu$ (Kg/m.s)	$0.2581 \times 10^{-3}$	$0.378 \times 10^{-3}$
P(bar)	12	22.7

Choix d'écoulement des fluides (cote tubes ou calandre) :

Côté tubes : fluide froid (Acier inoxydable)

Côté calandre : fluide chaud (Acier inoxydable)

### III.7. Bilan thermique

La méthode pratique de dimensionnement est essentiellement traitée sur l'exemple des échangeurs multitubulaires.

Les fluides qui y circulent constituent la particularité des échangeurs. A cause de l'importance et la difficulté de dimensionnement de ces équipements, il faut bien vérifier le calcul des coefficients de transfert afin d'obtenir l'échangeur qui correspond exactement.

Le dimensionnement des échangeurs repose principalement sur un calcul de bilan thermique mais également sur la prise en compte des pertes de charges.

#### a. Calcul de la puissance thermique :

Le flux de chaleur doit être déterminé par les relations suivants :

$$Q = m C_p \Delta T$$

Avec  $Q = Q_{\text{cédée}} = Q_{\text{reçue}}$

$$Q_c = m C_p \Delta T = 22.22 * 2200 * (531 - 472) = 2884156 \text{ w}$$

$$m_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) = m_f C_{pf} (T_{fs} - T_{fe})$$

#### b. La méthode de DTLM :

$$DTLM =$$

Avec:

$$\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fs} = 532 - 448 = 84$$

$$\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fe} = 451 - 436 = 15$$

$$DTLM = 40.05 \text{ K}$$

**c. différence de température maximale :**

$$\Delta T_{\max} = T_{ce} - T_{fe} = 532 - 436 = 96 \text{ K}$$

**d. Capacité calorifique :**

$$C = m C_p$$

$$C_c = m_c \cdot C_{pc} = 22.22 \cdot 2200 = 48884$$

$$C_f = m_f \cdot C_{pf} = 156.54 \cdot 1900 = 297426$$

Capacité calorifique	C
Fluide froid (brut) $C_f$ (W/k)	297426
Fluide chaud (gasoil) $C_c$ (W/K)	48884

*On trouve  $C_{\min} = C_c$  et  $C_{\max} = C_f$*

Le flux de chaleur maximal :

$$Q_{\max} = C_{\min} \cdot \Delta T_{\max}$$

$$Q_{\max} = 48884 \cdot 96$$

$$Q_{\max} = 4692864 \text{ W}$$

**e. Coefficient d'échange thermique globale**

Pour un échangeur de ce type (selon la nature des fluides qui circule à l'intérieur de la calandre et des tubes), le coefficient global sera compris entre 300 et 500 W/m<sup>2</sup>. °C, alors un premier calcul sera entamé par une valeur de  $U_0 = 300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ .

**f. La surface d'échange S**

$$S = (\pi D L) \cdot n$$

$$S = 3.14 \cdot 0.0190 \cdot 6.096$$

$$S = 355.32 \text{ m}^2$$

### g. Détermination du coefficient correctif

On détermine le coefficient correctif d'après le graphe de dépendance des paramètres auxiliaires (R, P) Pour ce type d'échangeur de chaleur, nous devons déterminer le coefficient correction (facteur de forme) en utilisant les abaques

**R** : Ratio thermique

$$R =$$

$$R =$$

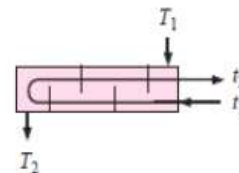
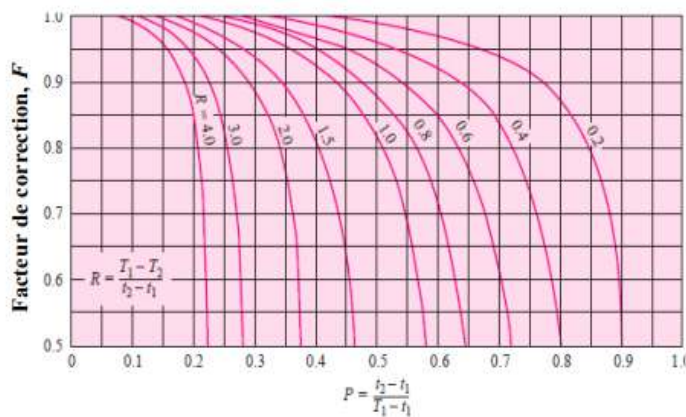
$$R = 0.84$$

**P**

$$P =$$

$$P =$$

$$P = 0.84$$



**Figure III.2** Facteur de correction présenté pour un échangeur 1 passe cote calandre et 2 passes cote tube [20] [21]

Alors dans notre cas et d'après e diagramme le facteur de correction  $F=0.9$

### h. Coefficient globale de transfert de chaleur K

$$K =$$

$$K =$$



$$K=225.19 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

**i. Le nombre adimensionnel C :**

$$C=0.164$$

**J. Le nombre d'unités de transfert Nut :**

$$\text{Nut} =$$

$$\text{Nut} = 1.63$$

**k. Efficacité d'échangeur de chaleur :**

On peut calculer l'efficacité de l'échangeur à l'aide de deux méthodes :

L'une est le rapport du flux de chaleur maximale sur flux de chaleur réel :

$$\epsilon =$$

$$\epsilon =$$

$$\epsilon = 0.61$$

Et l'autre est basé sur l'utilisation de la corrélation de l'efficacité d'échangeur de chaleur pour le cas d'un échangeur tubulaire 1-2 (une passe côté et deux passes côté tubes) en fonction des nombre adimensionnelle R et Nut

$$\epsilon_{1-2} = 2 \left[ 1 + C_r + \frac{1 + e^{-NUT(1+C_r^2)^{1/2}}}{1 - e^{-NUT(1+C_r^2)^{1/2}}} (1 + C_r^2)^{1/2} \right]^{-1}$$

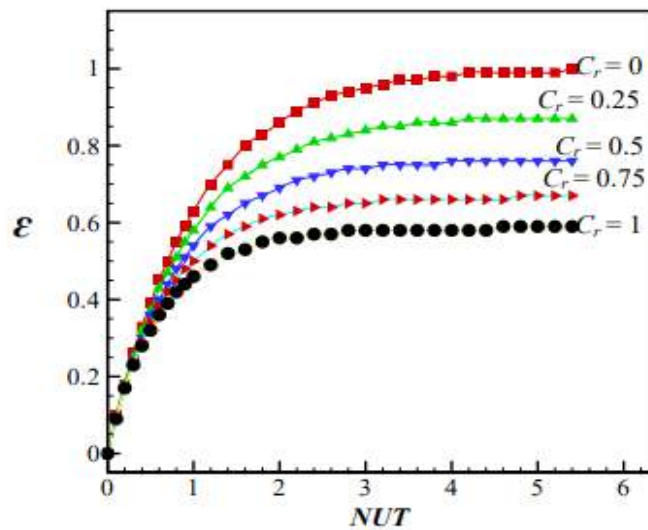
**Et on a une méthode de la relation  $\epsilon$ -NUT**

Pour chaque type d'échangeur, l'expression de la fonction  $\varepsilon = f(\text{NUT}, Cr)$  doit être développée.

- Dans certains cas et pour différentes valeurs du paramètre  $Cr$ ,  $\varepsilon$  est donnée

graphiquement sous la forme d'une série de courbes.

- Les constructeurs fournissent des diagrammes correspondant à leurs appareils.
- Certains programmes sont accessibles et peuvent même effectuer des calculs en ligne



Relation  $\varepsilon - NUT$  pour l'échangeur tubulaire 1 passe côté calandre et 2n passe côté tubes différentes valeurs de  $C_r = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ .

**Figure III.3** relation  $\varepsilon$ -NUT pour l'échangeur tubulaire 1 passe cote calandre et 2n passe cote tubes et différentes valeurs de  $C_r=0,0.25,0.5,0.75,1$ .

$C_r =$

$C_r =$

$C_r = 0.16$

**Et on a la valeur de  $NUT = 1.63$**

Et d'après de diagramme de la relation  $\varepsilon$ -NUT on a la valeur de  $\varepsilon = 0.65$

### III.8. Dimensionnement avec logiciel EES (ENGINEERING EQUATION SOLVER)

Engineering Equation Solver (EES) est un logiciel destiné à résoudre des systèmes d'équations algébriques et différentielles couramment rencontrés en ingénierie. Il permet de modéliser et de résoudre des problèmes complexes impliquant des équations simultanées non linéaires ou linéaires. EES est largement utilisé pour les calculs thermodynamiques, les transferts de chaleur, et les analyses de systèmes énergétiques. Il intègre également des bibliothèques de propriétés thermo physiques et

offre des fonctionnalités de paramétrage et d'optimisation, ce qui en fait un outil puissant pour les ingénieurs. [22]

L'E502 pour qu'il conserve ses atouts chaque 4 ans ils font le nettoyage pour lui

On va faire un dimensionnement de l'échangeur E502 avant et après de faire un nettoyage pour avoir le rendement de chaque cas et faire une comparaison

## 1. Après nettoyage

### Les données et les lois

#### Les lois

$$T_{\text{brut;entree}} = 436$$

$$T_{\text{brut;sortie}} = 448$$

$$T_{\text{gazoil;entree}} = 531$$

$$T_{\text{gazoil;sortie}} = 472$$

$$C_{\text{min}} = 48884$$

$$C_{\text{max}} = 297426$$

$$Cp_{\text{brut}} = 1900$$

$$Cp_{\text{gazoil}} = 2200$$

$$m = 22,22$$

$$L = 6,096$$

$$D = 0,019$$

$$n = 977$$

$$F = 0,9$$

$$\delta_{\text{Tlm}} = \frac{T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{brut;sortie}} - (T_{\text{gazoil;sortie}} - T_{\text{brut;entree}})}{\ln \left[ \frac{T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{brut;sortie}}}{T_{\text{gazoil;sortie}} - T_{\text{brut;entree}}} \right]}$$

$$Q_{\text{max}} = C_{\text{min}} \cdot (T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{brut;entree}})$$

$$Q_{\text{reel}} = m \cdot Cp_{\text{gazoil}} \cdot (T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{gazoil;sortie}})$$

$$C = \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}}$$

$$K = \frac{Q_{reel}}{F \cdot S \cdot \delta T_{lm}}$$

$$S = 3,14 \cdot D \cdot L \cdot n$$

$$Nut = \frac{K \cdot S}{C_{min}}$$

$$R = \frac{T_{brut;entree} - T_{brut;sortie}}{T_{gazoil;sortie} - T_{gazoil;entree}}$$

$$P = \frac{T_{brut;sortie} - T_{gazoil;entree}}{T_{brut;entree} - T_{gazoil;entree}}$$

$$E = \frac{Q_{reel}}{Q_{max}}$$

## Les résultats

### Unit Settings: SI K Pa kJ mass deg

C = 0,1644

C<sub>max</sub> = 297426

δT<sub>lm</sub> = 56,27 [K]

K = 160,3 [W/m<sup>2</sup>-K]

n = 977

Q<sub>max</sub> = 4,644E+06 [W]

S = 355,3 [m<sup>2</sup>]

T<sub>gazoil;entree</sub> = 531 [K]

C<sub>pbrut</sub> = 1900

C<sub>min</sub> = 48884

E = 0,6211

L = 6,096 [m]

Nut = 1,165 [W/K]

Q<sub>reel</sub> = 2,884E+06 [W]

T<sub>brut;entree</sub> = 436 [K]

T<sub>gazoil;sortie</sub> = 472 [K]

C

C

F

n

F

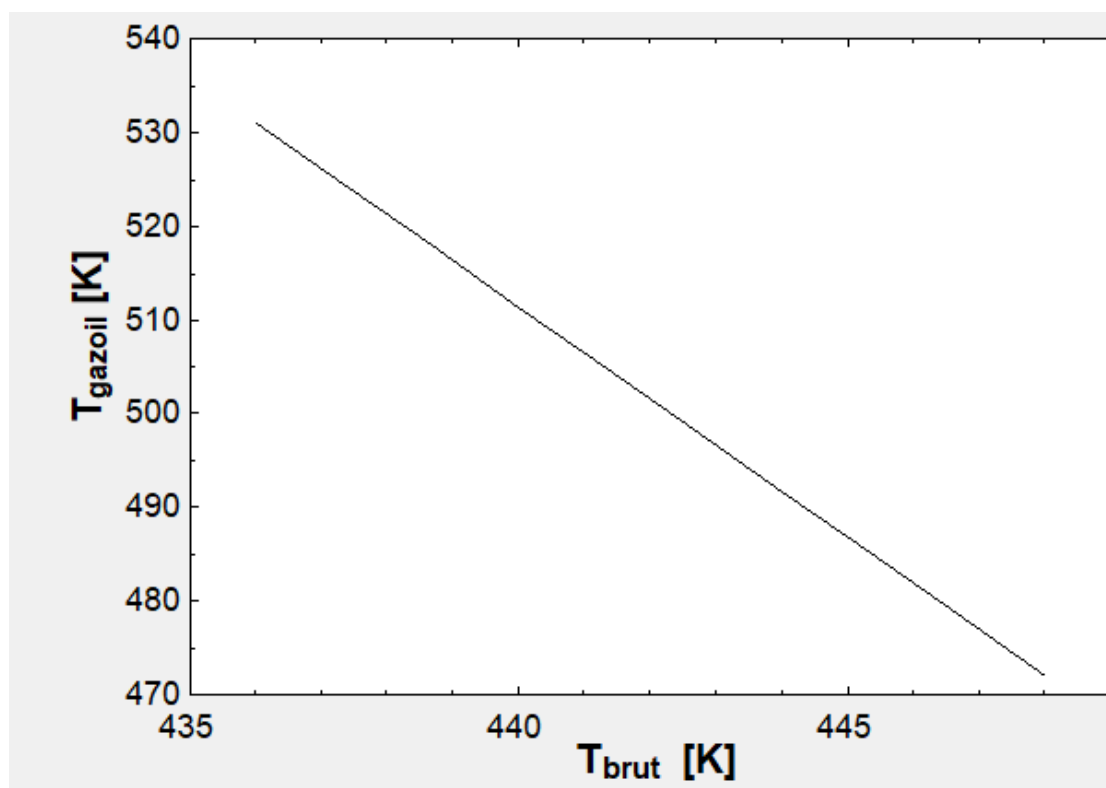
F

T

## Le Tableau

1.10	1 $T_{\text{brut;sortie}}$ [K]	2 $T_{\text{gazoil;entree}}$ [K]
Run 1	436	472
Run 2	437,3	478,6
Run 3	438,7	485,1
Run 4	440	491,7
Run 5	441,3	498,2
Run 6	442,7	504,8
Run 7	444	511,3
Run 8	445,3	517,9
Run 9	446,7	524,4
Run 10	448	531

Le diagramme



La variation de la température de gazoil en fonction de la température de

## **brut**

Le graphe montre une relation linéaire négative entre la température de gazole et la température de brut. Lorsque la température du brut augmente, la température du gazole diminue car le gazoil rechauffe le brut. Les températures sont mesurées en Kelvin, avec variant de 435 K à 450 K et variant de 470 K à 540 K

## **Les lois**

$$T_{\text{brut;entree}} = 450$$

$$T_{\text{brut;sortie}} = 466$$

$$T_{\text{gazoil;entree}} = 512$$

$$T_{\text{gazoil;sortie}} = 476$$

$$Cp_{\text{brut}} = 1900$$

$$Cp_{\text{gazoil}} = 2200$$

$$m_{\text{gazoil}} = 22,22$$

$$m_{\text{brut}} = 156,54$$

$$L = 6,096$$

$$D = 0,019$$

$$n = 977$$

$$F = 0,9$$

$$\delta T_{\text{lm}} = \frac{T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{brut;sortie}} - (T_{\text{gazoil;sortie}} - T_{\text{brut;entree}})}{\ln \left[ \frac{T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{brut;sortie}}}{T_{\text{gazoil;sortie}} - T_{\text{brut;entree}}} \right]}$$

$$C_{\text{min}} = m_{\text{gazoil}} \cdot Cp_{\text{gazoil}}$$

$$C_{\text{max}} = m_{\text{brut}} \cdot Cp_{\text{brut}}$$

$$Q_{\text{max}} = C_{\text{min}} \cdot (T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{brut;entree}})$$

$$Q_{\text{reel}} = m_{\text{gazoil}} \cdot Cp_{\text{gazoil}} \cdot (T_{\text{gazoil;entree}} - T_{\text{gazoil;sortie}})$$

$$C = \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{max}}}$$

$$K = \frac{Q_{\text{reel}}}{F \cdot S \cdot \delta T_{\text{lm}}}$$

$$S = 3,14 \cdot D \cdot L \cdot n$$

$$\text{Nut} = \frac{K \cdot S}{C_{\text{min}}}$$

$$R = \frac{T_{\text{brut;entree}} - T_{\text{brut;sortie}}}{T_{\text{gazoil;sortie}} - T_{\text{gazoil;entree}}}$$

$$P = \frac{T_{\text{brut;sortie}} - T_{\text{gazoil;entree}}}{T_{\text{brut;entree}} - T_{\text{gazoil;entree}}}$$

$$E = \frac{Q_{\text{reel}}}{Q_{\text{max}}}$$

## Les résultats



$$C = 0,1644$$

$$F = 0,9$$

$$Q_{\max} = 3,031E+06 \text{ [W]}$$

$$C_{\min} = 48884$$

$$m_{\text{gazoil}} = 22,22 \text{ [Kg/s]}$$

$$T_{\text{brut,entree}} = 450 \text{ [K]}$$

$$C_{p\text{brut}} = 1900 \text{ [J/Kg.K]}$$

$$K = 157 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$$

$$Q_{\text{reel}} = 1,760E+06 \text{ [W]}$$

$$D = 0,019 \text{ [m]}$$

$$n = 977$$

$$T_{\text{brut,sortie}} = 466 \text{ [K]}$$

$$C_{p\text{gazoil}} = 2200 \text{ [J/kg.K]}$$

$$L = 6,096 \text{ [m]}$$

$$R = 0,4444$$

$$\delta T_{\text{lm}} = 35,05 \text{ [K]}$$

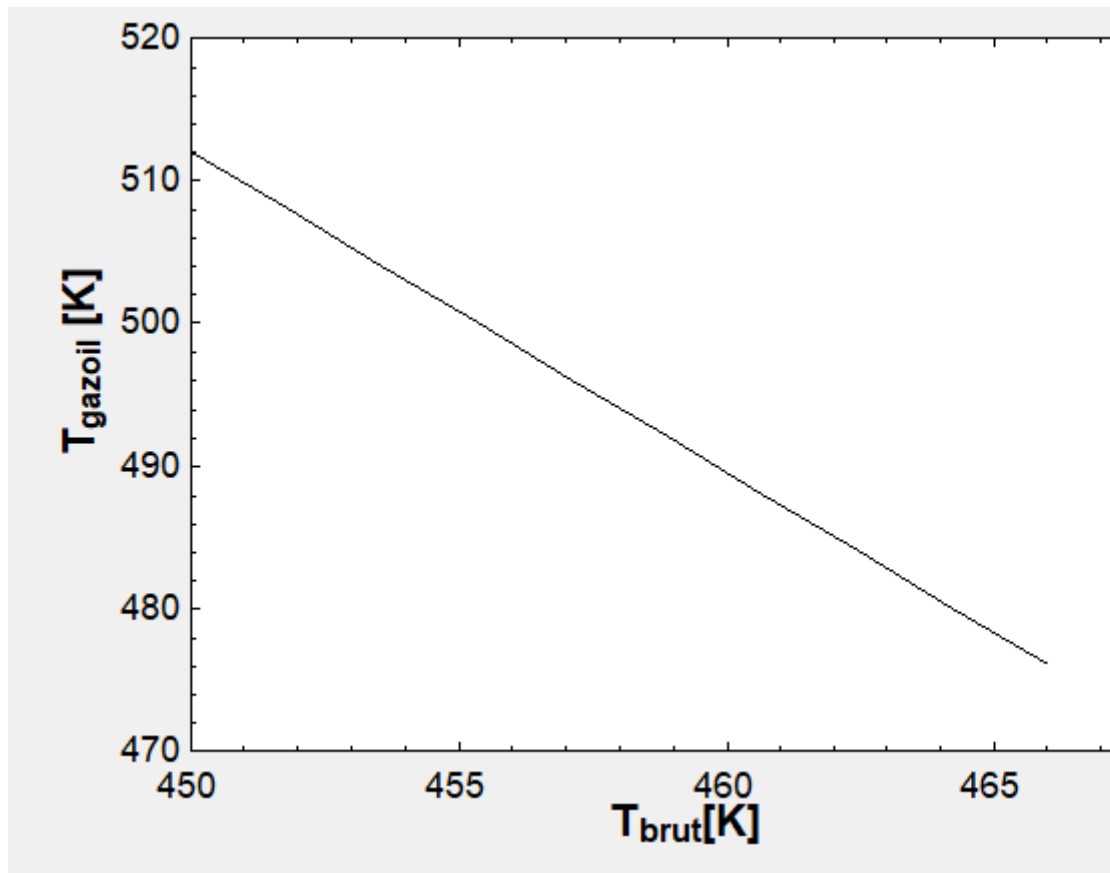
$$\text{Nut} = 1,141$$

$$T_{\text{gazoil,entree}} = 512 \text{ [K]}$$

## Le tableau

1..10	1 T <sub>gazoil,entree</sub>	2 T <sub>brut,sortie</sub>
Run 1	512	450
Run 2	508	451,8
Run 3	504	453,6
Run 4	500	455,3
Run 5	496	457,1
Run 6	492	458,9
Run 7	488	460,7
Run 8	484	462,4
Run 9	480	464,2
Run 10	476	466

## Le graphe



### La variation de la température de brut en fonction de la température de gazoil

Le graphe montre que la température du brut augmente à mesure que celle du gazole diminue, ce qui indique un transfert de chaleur du gazole vers le brut. Ce procédé est couramment utilisé dans les raffineries pour améliorer l'efficacité énergétique en préchauffant le brut avant la distillation. Une analyse plus approfondie nécessiterait des données spécifiques pour évaluer et optimiser ce transfert thermique.

### Comparaison

Pour comparer l'efficacité de l'échangeur avant et après le nettoyage, nous pouvons observer les valeurs d'efficacité et calculer l'augmentation en termes relatifs et

absolus.

1. Efficacité avant nettoyage: 0.56

2. Efficacité après nettoyage: 0.61

Comparaison en termes absolus

La différence absolue d'efficacité est :

$$\left[ 0.61 - 0.56 = 0.05 \right]$$

Comparaison en termes relatifs

Pour calculer l'augmentation relative en pourcentage :

$$\left[ \left( \frac{0.61 - 0.56}{0.56} \right) \times 100 = \left( \frac{0.05}{0.56} \right) \times 100 \approx 8.93\% \right]$$

Interprétation

- Avant nettoyage, l'échangeur avait une efficacité de 56%.
- Après nettoyage, l'efficacité est montée à 61%.
- Cela représente une augmentation absolue de 5 points de pourcentage.
- En termes relatifs, l'efficacité a augmenté d'environ 8.93%.

En conclusion, le nettoyage de l'échangeur a permis d'améliorer son efficacité de manière significative, augmentant l'efficacité relative de près de 9%.

### III.9. Caractéristiques mécaniques de E502

### 1. Tableau 3 : Dimensionnement des tubes.

		tubes
	Matériaux	Acier inoxydable
	Nombre des tubes	977
	Longueur de tube (m)	6.096
	Diamètre (mm)	19.05
	Epaisseur (mm)	2.11
	La longueur entre les tubes (mm)	25.40
Nombre de passes		2

TUBESHEET LAYOUT

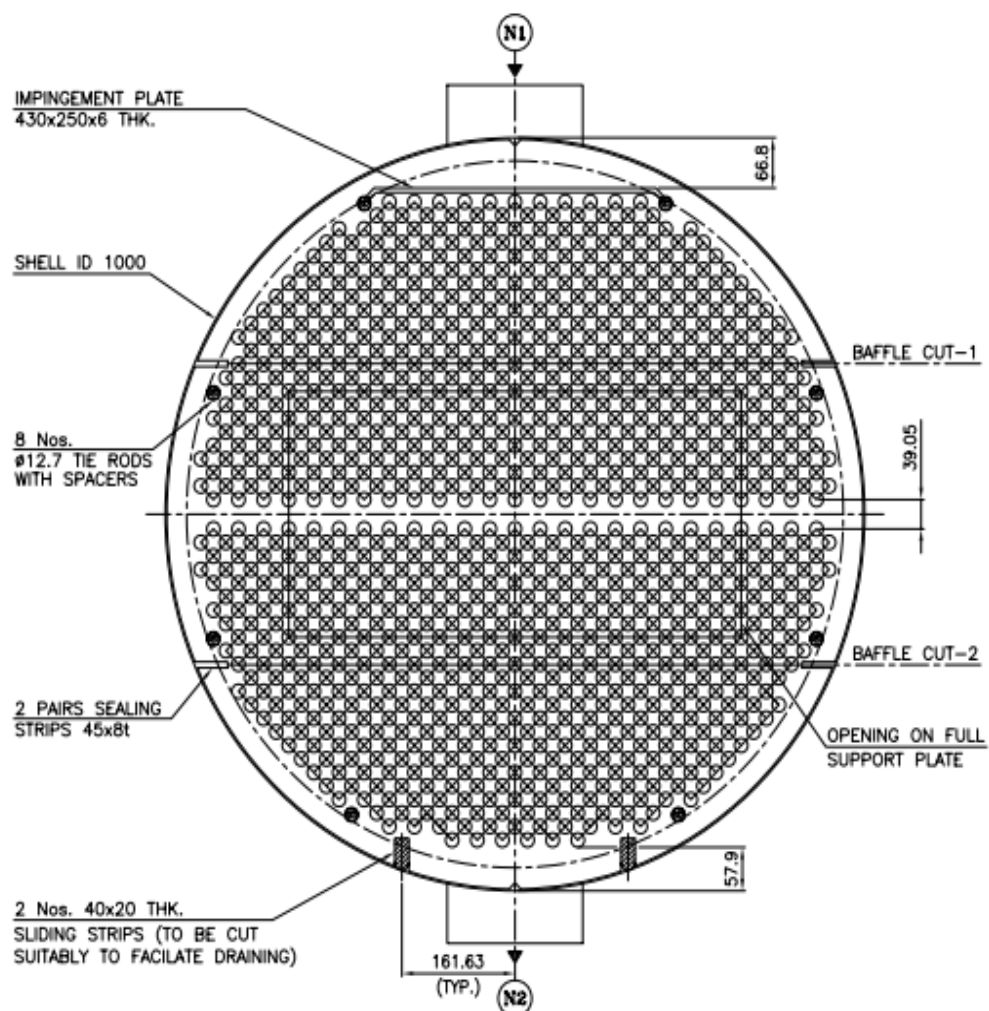


FIG.III.3 Schéma des tubes de E502

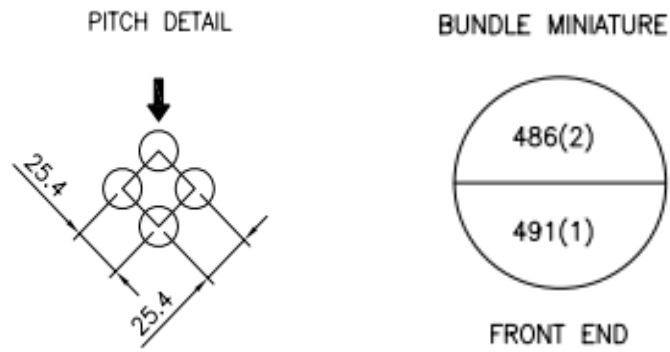


FIG III.4 Schéma sur la longueur entre les tubes

## 2. Tableau 4 : dimensionnement des chicanes

Dans les échangeurs de chaleur, les chicanes sont des structures internes qui perturbent le flux du fluide pour améliorer le transfert de chaleur.

	Les chicanes
Le nombre des chicanes	14
L'épaisseur (mm)	8
L'écoulement dans les chicanes	segment unique horizontale

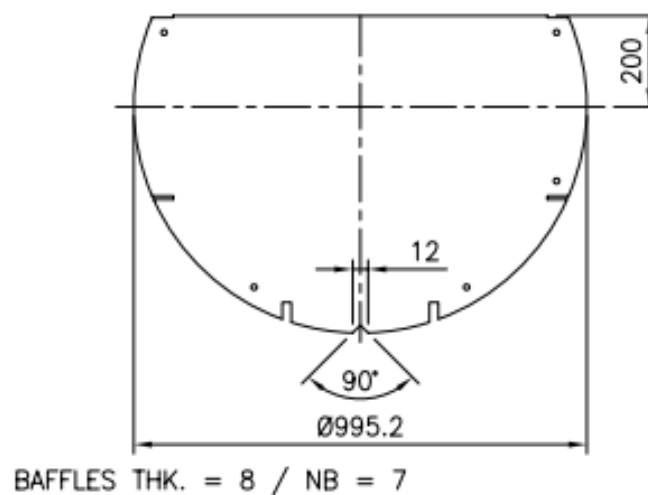
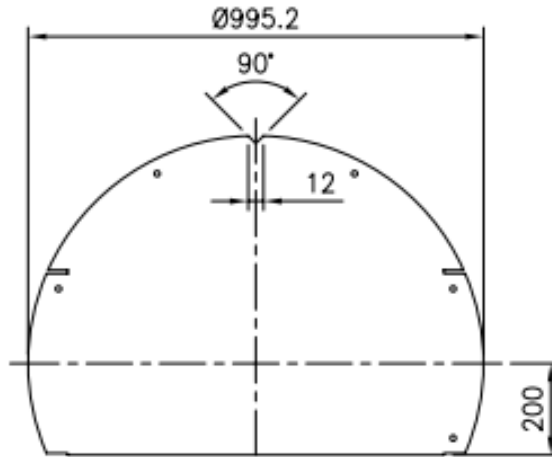
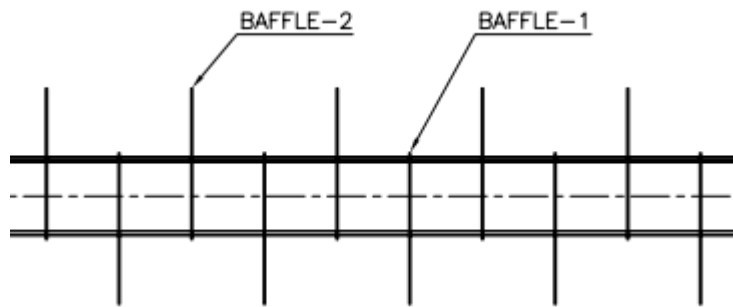


FIG III.5 : Les détails de la chicane 1



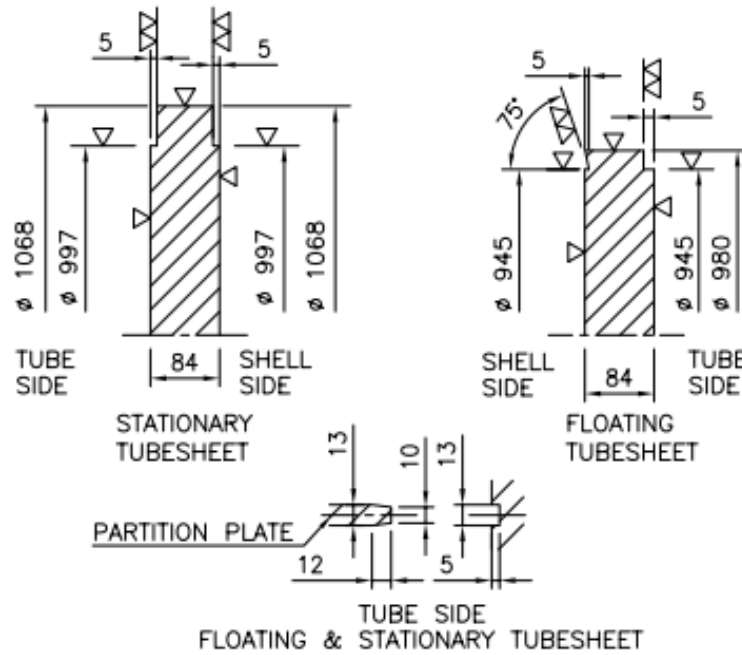
BAFFLES THK. = 8 / NB = 7

FIG III.6 : Les détails de chicane 2



### 3. Tableau 5 : les matériaux

Pieces	Matériaux
Les tubes	Acier inoxydable
La calandre	Acier inoxydable
Couvercle de la calandre	Acier inoxydable
Couvercle du canal	Acier inoxydable
La plaque tubulaire fixe	Acier inoxydable
La plaque tubulaire flottante	Acier inoxydable
Couvercle de la tête flottante	Acier inoxydable



**FIG III.6** Les détails de la plaque tubulair

## Conclusion générale

Ce mémoire a exploré de manière analytique et numérique l'échangeur de chaleur E502, en utilisant le logiciel EES pour modéliser et simuler son comportement avant et après nettoyage. L'analyse a révélé que l'état initial de l'échangeur, marqué par un encrassement significatif, entraînait une réduction notable de l'efficacité thermique et une augmentation des pertes de charge, ce qui se traduisait par une consommation énergétique élevée et un risque accru de défaillance. Les simulations ont montré que, suite au nettoyage, les performances de l'échangeur étaient considérablement améliorées, avec des coefficients de transfert de chaleur restaurés et des pertes de charge minimisées, permettant ainsi une optimisation des coûts opérationnels. Cette étude met en lumière l'importance d'une approche intégrée combinant analyses théoriques et outils numériques pour évaluer et améliorer les systèmes d'échange thermique. Les résultats obtenus soulignent également la nécessité d'un entretien régulier et d'un suivi des performances pour garantir la durabilité et l'efficacité des

équipements industriels.

## **Bibliographie**

[1] <https://pdfcoffee.com/sadik-kakac-heat-exchangers-selection-rating-and-thermal->



[desginpdf-4-pdf-free.html](#)

[2] [https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de chaleurs.html? IDC=8049&IDD=97759](https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html?IDC=8049&IDD=97759)

[3] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/echangeurs-de-chaleur-42376210/echangeurs-de-chaleur-be9516/criteres-de-classement-be9516niv10001.html>

[4] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/echangeurs-de-chaleur-42376210/echangeurs-de-chaleur-be9516/criteres-de-classement-be9516niv10001.html>

[5] <http://me1065.wikidot.com/automotive-heat-exchangers>

[6] Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P. (2011); Fundamentals of Heat and

Mass Transfer, 7<sup>ème</sup> édition: John Wiley & Sons, Inc.

[7] <http://www.utc.fr/~houde/TF11/ch3b.html>

[8] André B, Alain G, Charles G, Jacques H, Christophe M, Pierre M, et al. Échangeurs de chaleur - Description des échangeurs. Techniques de l'ingénieur 1995.

[9] ECHANGEUR À PLAQUES. Société RDM Distribution n.d. <https://www.rdmdistribution.com>.

[10] <http://rpn.univ-lorraine.fr/UL/echangeurs-de-chaleur/co/elementechangeurtubecalandre.html>

[11] <https://www.labbe-france.fr/echangeur-de-chaleur/>

[12] [https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html? IDC=8049&IDD=97759](https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html?IDC=8049&IDD=97759)

[13] Echangeur à tubes et calandre. Process's Guide Des Techniques Des Industries de

Procédé n.d. <http://processs.free.fr>

- [14] - [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/Cours d'échangeur thermique: chicanes côté calandre](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/Cours d'échangeur thermique: chicanes côté calandre)
- [15] Bennajah M, Chaouni N. Échangeurs de chaleur technologie, calcul et design. Paris : Ed. Technip; 2014.
- [16] Detrigne J. Entartrageet corrosion n.d.
- [17] Document de la raffinerie d'Alger (SONATRACH)
- [18] PFE dimensionnent d'un changeur P502
- [19] <https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/c24e8b6a-e209-4eda-aed4-9a05f7155261/content>
- [20] Holman J. P. (2010); Heat transfer, 10th ed. Mc Graw-Hill, series in mechanical engineering, New York.
- [21] Liengme B. V. (1997); A Guide to Microsoft Excel for Scientists and Engineers. New York: John Wiley.
- [22] <https://www.solvusoft.com/fr/file-extensions/software/f-chart-software-llc/ees-engineering-equation-solver/>

# **ANNEXES**