



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic republic of Algeria

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم

Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم هندسة الطرائق

Department of Process Engineering



N° d'ordre : .....M2/GPM/2021

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie des procédés**

**Option: Génie des procédés des matériaux**

### Thème

**Étude de dégradation du refroidisseur MEA/EDM de la section de  
décarbonatation du complexe GL1/Z**

**Présenté par :**

ABDALLAH BEN SALLOUA Boualem.

HAMDANE Abdedlkader.

**Soutenu le ...../...../ 2021 devant le jury composé de :**

Président(e) :	AZIZ Zoubir	Pr.	Université de Mostaganem
Examineur (rice) :	MOHAMED SEGHIR Zahira	MCA	Université de Mostaganem
Examineur (rice) :	SOLTANE Khadidja	MCA	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	Merzouk SAIDJ	MCB	Université de Mostaganem

**Année Universitaire 2020/2021**

## **Dédicace**

Que ce travail témoigne de nos respects à nos parents grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de nos études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer notre respect, notre considération et nos profonds sentiments envers eux. Nous prions le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de nous.

A nos sœurs.

A nos frères.

A nos cousins.

A nos amies.

A toute nos familles.

A notre promotion de 2<sup>ème</sup> année master génie des procédés des matériaux.

A tous nos enseignants de primaire à l'université.

A tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin.

## REMERCIEMENTS

En premier lieu, on tient à remercier DIEU le tout puissant, pour le courage, la patience et a bonne santé qu'il nous a donné a fin de mener ce projet a terme.

Un remerciement spécial à notre encadreur Dr. Merzouk SAIDJ pour son aide, sa patience et ses précieux conseils à fin de réaliser ce mémoire.

On exprime toute notre gratitude au Pr. Zoubir AZIZ, qui nous fait l'honneur de présider le jury.

On tient à remercier tout particulièrement Dr. MOHAMED SEGHIR Zahira, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Ainsi, on tient à remercier tout particulièrement Dr. SOLTANE Khadidja, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos vifs remerciements vont à l'ensemble des enseignements du département génie des procédés.

On adresse avec tout notre respect et nos remerciements au personnel du complexe GL1/Z et particulièrement aux DRH et département de production de GL1/Z.

Des remerciements tous particulières à mes amis et à tout le personnel des équipes de quart des trains qui nous ont toujours soutenu et pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté.

# Résumé

Notre mission consiste à répondre à l'une des principales problématiques des unités de liquéfaction de gaz naturel du département de décarbonation, qui a l'objectif de tenir la concentration en CO<sub>2</sub> en dessous de 90 ppm. L'échangeur a pour fonction de refroidir la solution de Monoéthanolamine contenant CO<sub>2</sub> par l'eau de mer. Au cours du temps, cet échangeur se met face à de nombreux problèmes de corrosion des canalisations, des blocages et des dépôts volumétriques ainsi qu'une contamination de l'échangeur va réduire son efficacité. A cet effet, la consommation de la solution MEA augmente ainsi que sa température à la sortie de l'échangeur. L'objectif de ce travail est d'étudier les causes du mauvais fonctionnement de ce refroidisseur ainsi qu'un dimensionnement de l'échangeur est effectué. A la fin, Le mémoire est clôturé par des recommandations afin d'éviter la dégradation de l'échangeur.

**Mot clé : gaz naturel, échangeur, CO<sub>2</sub>, MEA**

## Abstract:

Our mission is to respond to one of the main problems of the natural gas liquefaction units of the decarbonisation department, which has the objective of keeping the CO<sub>2</sub> concentration below 90 ppm. The function of the exchanger is to cool the Monoethanolamine solution containing CO<sub>2</sub> with sea water. Over the time, this exchanger faces numerous problems of pipe corrosion, blockages and volumetric deposits as well as contamination of the exchanger will reduce its efficiency. The consumption of the MEA solution increases as well as its temperature at the exchanger outlet. The objective of this work is to study the causes of the malfunctioning of this cooler and a dimensioning of the exchanger is performed. At the end, the thesis is closed with recommendations to avoid the degradation of the exchanger.

**Keyword: natural gas, exchanger, CO<sub>2</sub>, MEA**

## الخلاصة:

مهمتنا هي الاستجابة لإحدى المشاكل الرئيسية لوحدة تسبيل الغاز الطبيعي في قسم إزالة ، ثاني أكسيد الكربون ، والتي تهدف إلى الحفاظ على تركيز ثاني أكسيد الكربون أقل من 90 جزء في المليون. تتمثل وظيفة المبادل في تبريد محلول Monoethanolamine المحتوية CO<sub>2</sub> بماء البحر. مع مرور الوقت ، يواجه هذا المبادل العديد من المشاكل من تآكل الأنابيب والانسداد والترسبات الحجمية وكذلك تلوث المبادل سوف يقلل من كفاءته. يزداد استهلاك محلول MEA وكذلك درجة حرارته عند منفذ المبادل. الهدف من هذا العمل هو دراسة أسباب الخلل في هذا المبرد ويتم إجراء أبعاد المبادل في النهاية ، تم إغلاق الرسالة بتوصيات لتجنب تدهور المبادل.

**الكلمة المفتاحية : غاز طبيعي ، مبادل حراري ، ثاني أكسيد الكربون CO<sub>2</sub> ، MEA**

## Liste des figures

Figure 1.1: Vue d'ensemble du complexe GLZ1 .....	6
Figure 1.2: Principales du complexe GL1/Z.....	8
Figure 1.3: Vue générale d'une usine de liquéfaction de gaz naturel .....	9
Figure 1.4: Section de décarbonatation.....	9
Figure 1.5: Section de déshydratation.....	10
Figure 1.6: Section de démercurisation .....	10
Figure 2.1: Schéma de la section de décarbonatation .....	20
Figure 2.2: l'échangeur de chaleur E504 dans la section décarbonatation .....	21
Figure 2.3: Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température.....	23
Figure 2.4: La corrosion électrochimique .....	23
Figure 2.5: La corrosion galvanique .....	24
Figure 2.6: La corrosion uniforme .....	24
Figure 2.7: La corrosion de contact .....	25
Figure 2.8: La corrosion par piqûres.....	25
Figure 2.9: La corrosion par crevasse sous un joint.....	26
Figure 2.10: La corrosion inter-granulaire.....	26
Figure 2.11: La corrosion par érosion.....	27
Figure 3.1: Dépôt de tartre formé sur les faisceaux tubulaires de l'échangeur E504 .....	32
Figure 3.2: Photo d'examen au MEB (piqûres de corrosion) .....	35
Figure 3.3: L'effet de la MEA sur la surface des tubes d'échangeur E504 .....	35
Figure 3.4: La corrosion cavernieuse par ions Cl <sup>-</sup> .....	36
Figure 3.5: Les anodes sacrificielles couvertes par les dépôts.....	37
Figure 3.6 : La corrosion sur la boîte de distribution d'échangeur E504 .....	37

## Liste des tableaux

Tableau 1.1: Composition chimique du GAZ naturel .....	5
Tableau 1.2: Composition du MCR .....	13
Tableau 1.3: Composition molaire du GNL .....	15
Tableau 1.4: Conditions de stockage du GNL .....	15
Tableau 3.1: L'historique du refroidisseur E504 .....	29
Tableau 3.2: Les paramètres de service de l'échangeur E504 (design) .....	30
Tableau 3.3: Les paramètres de service de l'échangeur E504 (actuel) .....	30
Tableau 3.4: les différents paramètres d'eau de mer à travers les tubes E504 (actuel) .....	31
Tableau 3.5: les paramètres d'eau de mer à travers les tubes E-504 .....	31
Tableau 3.6: Analyse chimique de l'eau de mer .....	32
Tableau 3.7: Les résultats des analyses des dépôts .....	33
Tableau 4.1: Les propriétés thermo physique du MEA .....	40
Tableau 4.2: Les propriétés thermo physiques d'EDM .....	40
Tableau 4.3: les paramètres de fonctionnement de l'échangeur E504 (design) .....	41
Tableau 4.4: les caractéristiques mécaniques de l'échangeur E504 (Annexe1) .....	41
Tableau 4.5: Les résultats de dimensionnement du refroidisseur E-504 .....	41

---

# Sommaire

## Table de matières

Résumé.....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux.....	
Sommaire .....	
Introduction.....	1
<b>Chapitre 1 : Gaz naturel et la description du complexe GLZ1.....</b>	<b>3</b>
1.1 Généralités sur le gaz naturel .....	4
1.1.1 Les sources du gaz naturel .....	4
1.1.2 Origine des constituants du gaz naturel .....	5
1.2 Présentation du complexe GLZ1 .....	6
1.3 Organisation du complexe GLZ1 .....	6
1.3.1 Zone des utilities .....	7
1.3.2 Zone de process.....	7
1.3.3 Zone de stockage et expédition .....	8
1.4 Section de traitement.....	8
1.4.1 Section de décarbonatation .....	9
1.4.2 Section de déshydratation .....	10
1.1.3 Section de démercurisation .....	10
1.5 Séparation et liquéfaction.....	11
1.5.1 Section de séparation.....	11
1.5.2 Section de liquéfaction .....	12
1.6 Section de fractionnement.....	13
1.7 Zone de stockage et chargement du GNL .....	14
<b>Chapitre 2 : La section de décarbonatation et le phénomène de corrosion ....</b>	<b>16</b>
2 La section de décarbonatation.....	17
2.1 Description du procédé.....	17
2.2 La réaction chimique de décarbonatation.....	17

2.3	Processus d'absorption du CO <sub>2</sub> par MEA .....	18
2.4	Régénération de la solution MEA .....	18
2.5	Description et le rôle de l'échangeur E504 .....	20
2.6	Les causes du mauvais transfert de chaleur du refroidisseur E504 .....	21
2.7	Notions sur le phénomène de corrosion .....	22
2.7.1	Définition .....	22
2.7.2	Différents processus de la corrosion .....	22
2.7.3	Les types de corrosion.....	24
2.8	La prévision de corrosion.....	27

### **Chapitre 3 : la dégradation du refroidisseur E504 et l'analyse des causes de l'insuffisance de refroidissement..... 28**

3	La dégradation du refroidisseur E-504.....	29
3.1	Historique du refroidisseur E-504 .....	29
3.2	Paramètres de service de l'échangeur E504.....	30
3.3	Analyse des causes.....	30
3.3.1	Débit d'eau de mer insuffisant pour le refroidissement .....	30
3.3.2	Présence des dépôts sur la paroi intérieure des tubes d'échangeur .....	31
3.3.3	Dégradation de la surface externe des tubes d'échangeur .....	34
3.3.4	Les fuites et la corrosion sur les tubes et la boîte de distribution d'échangeur.....	36
3.4	Les conséquences de ces problèmes.....	37

### **Chapitre 4: Dimensionnement du refroidisseur E504 ..... 39**

4	Dimensionnement du refroidisseur E504.....	40
4.1	Introduction .....	40
4.2	Caractéristiques thermo physiques des fluides du refroidisseur E504 .....	40
4.3	Dimensionnement de l'échangeur .....	41
4.3.1	Calcul thermique .....	41
4.4	Interprétation .....	49
4.5	Recommandations .....	50
	Conclusion générale .....	51
	Références bibliographiques .....	52
	Annexes.....	53



# Introduction

La liquéfaction de GN est un procédé de base qui a pour objectif le transport du maximum de GNL vers l'étranger en diminuant son volume d'environ 600 fois et cela pour faciliter son transport.

Le processus de liquéfaction de gaz naturel débute de la section de décarbonatation et termine à la section cryogénique, où le gaz est liquéfié et envoyé vers le stockage. La quantité de gaz liquéfié est parfois inférieure à celle qu'on veut produire, ce manque de production est dû principalement aux problèmes apparaissant dans les différentes sections de l'unité.

Au début des années 90, SONATRACH a entamé une vaste opération de rénovation. L'objectif était une bonne maintenance et une exploitation moderne. Le complexe GL1/Z a renouvelé plusieurs équipements qui assurent la bonne marche du procédé.

Parmi ces équipements de transferts de chaleur, le refroidisseur à eau de mer de la solution de MEA pauvre (E.504) occupe une place importante dans la section de décarbonatation.

Après la rénovation en 1996, une augmentation en matière de production est enregistrée sur la totalité des trains. Le refroidisseur à eau de mer de la solution de MEA pauvre (E.504) a fonctionné correctement jusqu'au mois de novembre 2002 où il a été enregistré une augmentation de la température de la solution de MEA à la sortie de cet échangeur pour atteindre parfois 50 °C. Suite aux différents problèmes rencontrés au niveau du refroidisseur de la solution de MEA pauvre, un mauvais transfert de chaleur a été enregistré.

Parmi les problèmes dont souffrait le refroidisseur à eau de mer de la solution de MEA pauvre, la corrosion, les conséquences les plus importantes étant une perforation qui peut entraîner une fuite du fluide caloporteur. D'autres problèmes peuvent être notamment un transfert de chaleur réduit provoqué par une évolution de la surface, qui se produit lorsque le métal réagit avec l'oxygène, le chlore, ou des inhibiteurs présents dans le fluide caloporteur, et entraîne un dépôt par précipitation à la surface du métal, créant ainsi une couche qui se comporte à la manière d'une

## Introduction générale

---

barrière contre le transfert de chaleur. De plus, les préoccupations concernent également le colmatage des filtres à particules et l'endommagement des joints d'étanchéité mécaniques.

Notre travail consiste à déterminer les principaux problèmes de corrosion rencontrés avec l'échangeur de chaleur **E504**.

Ce mémoire de master comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre résume une généralité sur le gaz naturel, ainsi qu'une description du complexe GLZ1.
- Le deuxième chapitre s'intéresse à la description de la section de décarbonatation et le phénomène de corrosion.
- Le troisième chapitre expose la dégradation du refroidisseur E504 et l'analyse des causes de l'insuffisance du refroidissement.
- Le quatrième chapitre présente l'étude de dimensionnement du refroidisseur E504 ainsi que les interprétations du calcul.

# Chapitre 1 : Gaz naturel et la description du complexe GLZ1

### 1.1 Généralités sur le gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile, c'est un mélange d'hydrocarbures gazeux d'origine naturelle. C'est la deuxième plus grande source d'énergie au monde après le pétrole et son utilisation augmente rapidement.

Pendant des années, le gaz naturel a été considéré comme un sous-produit du pétrole et a été brûlé dans de nombreuses régions.

Grace à sa répartition plus équilibrée que les réserves de pétrole, à l'abondance de ses réserves et à son excellente qualité pour les consommateurs finaux, le gaz naturel a connu un développement très rapide.

Il est principalement composé de méthane  $\text{CH}_4$ , on peut également trouver des hydrocarbures plus lourds que le méthane (de C2 à C8), d'humidité, de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et d'azote  $\text{N}_2$ .

Le gaz naturel est inodore, incolore et insipide, il ne peut donc pas être détecté par les sens humains. Du fait que l'odeur est l'une des mesures de sécurité, il est nécessaire de conférer au gaz naturel une odeur caractéristique qui ne se confond pas avec aucune autre odeur et peut être détectée par tout le monde. Cette odeur varie d'un pays à l'autre. En France, elle provient de l'ajout de THT (Tetra Hydro Tyophene)  $\text{C}_4\text{H}_8\text{S}$ .

Il est célèbre pour son utilisation domestique, pour le chauffage, la cuisson et comme matière première pour l'industrie chimique, en particulier pour la pétrochimie et le raffinage du pétrole, ainsi que pour la production d'électricité et le transport.

#### 1.1.1 Les sources du gaz naturel

Le gaz naturel remplit les pores et les fissures des roches sédimentaires des profondeurs de la terre et des fonds marins. La partie d'une formation sédimentaire qui contient du gaz naturel est souvent appelée « réservoir », « champ » ou « dépôt ». Le gaz naturel existe partout dans le monde, seul ou en combinaison avec du pétrole brut. Il peut être piégé dans différents types de roches sédimentaires, y compris le grès, le carbonate, des filons couches de charbon et des lits de schistes argileux ou "shales" [1].

### 1.1.2 Origine des constituants du gaz naturel

- **Constituants**

Il existe trois modes possibles pour la formation des hydrocarbures gazeux naturels :

- **Gaz bactérien**

Ce mode est dû à l'effet des bactéries sur le flux organique des sédiments accumulés, et le gaz formé est appelé bactérie ou gaz organique.

- **Gaz inorganique**

Les gaz volcaniques ou les cheminées hydrothermales contiennent parfois du méthane, et les inclusions fluides dans les roches métamorphiques ou les roches magmatiques contiennent généralement des hydrocarbures légers, principalement du méthane. Ce modèle est secondaire.

- **Gaz thermique**

Au cours de l'évolution des sédiments, les sédiments sont portés à une température et une pression croissantes et subiront une dégradation thermique, ce qui amènera à la formation des composés non-hydrocarbures à côté des hydrocarbures [1]. Le tableau 1.1 représente la composition chimique du gaz naturel.

**Tableau 2.1.1: Composition chimique du GAZ naturel [1]**

Composant	Nomenclature	% Molaire en moyen
N <sub>2</sub>	Azote	5,80
He	Hélium	0,19
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone	0,21
C <sub>1</sub>	Méthane	83,00
C <sub>2</sub>	Ethane	7,10
C <sub>3</sub>	Propane	2,25
iC <sub>4</sub>	iso Butane	0,40
nC <sub>4</sub>	Butane	0,40
iC <sub>5</sub>	iso Pentane	0,12
nC <sub>5</sub>	Pentane	0,15
C <sub>6+</sub>	les essences	0,18
TOTAL		100,00

### 1.2 Présentation du complexe GLZ1

L'Algérie se trouve dans une situation privilégiée dans le commerce international du GNL avec des réserves d'environ 5000 milliards de m<sup>3</sup> de gaz naturel et une longue expérience dans le domaine de la liquéfaction.

Une partie de gaz extraite des gisements de Hassi R'mel est acheminée vers la zone industrielle d'Arzew, où se trouvent les complexes GL1Z et GL2Z qui forment un grand ensemble de liquéfaction de gaz naturel.

Le complexe GL1Z est situé à 8 km au sud-est d'Arzew et de 2 km de Bethioua. Il s'étend sur une surface de 72 hectares dont 56 sont occupés par les installations.



Figure 1.1 : Vue d'ensemble du complexe GLZ1

### 1.3 Organisation du complexe GLZ1

Le complexe GL1Z se compose de deux sous directions:

- Sous direction personnel : qui comprend le département ressources humaines, département moyens généraux et département personnel.
- Sous direction d'exploitation : qui comprend les départements de production, de maintenance et d'approvisionnements.

Des départements liés directement à la direction, dite structure de contrôle:

- Département technique.
- Département finances.
- Département sécurité.

- Département travaux neuf.

Le complexe GL1Z comprend :

- Une zone d'utilités.
- Une zone de process.
- Une zone de stockage et d'expédition.

### **1.3.1 Zone des utilities**

Il s'agit de la zone centrale de l'usine. Elle doit assurer l'alimentation de toutes les utilités au reste du complexe qui sont nécessaires au fonctionnement normal des trains de procédés en ce qui concerne :

- La production d'eau distillée.
- La production de vapeur.
- La production d'électricité.
- La production d'air instrument.
- La production d'azote.

### **1.3.2 Zone de process**

Le complexe GLZ1 a pour mission de traiter le gaz transporté par gazoduc en provenance des champs gaziers de Hassi R'mel en gaz naturel liquéfié (GNL) avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gazoline, ce gaz est ensuite transporté dans les méthaniers à destination de l'étranger [2]. Le complexe GL1Z comprend six trains de liquéfaction identiques d'une production en parallèle. Chaque train de liquéfaction est composé de huit sections :

- La section de décarbonatation.
- La section déshydratation.
- La section de démercurisation.
- Le pré refroidissement.
- La section de séparation et tour de lavage.
- La section de liquéfaction.
- Le circuit propane.
- Le circuit de réfrigérant mixte (MCR).

### 1.3.3 Zone de stockage et expédition

Cette zone se situe face aux trains, coté mer. Le complexe dispose de deux postes de chargement, qui peuvent accueillir des méthaniers de 50.000 m<sup>3</sup> à 125.000 m<sup>3</sup> avec trois bacs de chargement de GNL chacun de capacité de 100.000 m<sup>3</sup>.

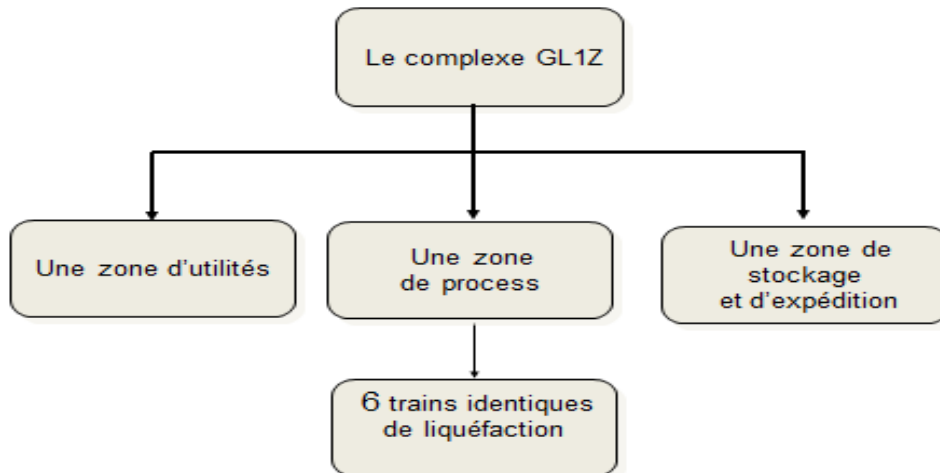


Figure 1.2: Principales du complexe GL1/Z

### 1.4 Section de traitement

L'usine de liquéfaction du gaz naturel (GN) d'Arzew GL1/Z a été conçue pour assurer le transport du GN sous forme liquide. Avant la liquéfaction, le gaz doit être débarrassé de certains composants nuisibles tels que le gaz carbonique et l'eau. La présence de l'eau provoque la formation des bouchons de givre dans les parties froides de l'installation et la présence de dioxyde de carbone provoque la corrosion de certains équipements sensibles, plus la formation d'un dépôt de carbone.





Figure 1.3 : Vue général d'une usine de liquéfaction de gaz naturel

## 1.4.1 Section de décarbonatation

Le rôle de cette partie de procédé est d'éliminer le dioxyde carbone ( $\text{CO}_2$ ) contenu dans le gaz naturel, car le  $\text{CO}_2$  à basse température ramenée à l'ordre de  $(-70^\circ\text{C})$  va se solidifier et former des bouchons de glace, ce qui cause un blocage des canalisations de service. Pour le traitement de la décarbonatation, on fait usage de Monoéthanolamine appelée (MEA :  $\text{C}_2\text{H}_5\text{ONH}_2$ ), qui a la propriété de capter le  $\text{CO}_2$  présent dans le gaz naturel.

Cette section est composée de deux étapes importantes, qui sont présentés par la figure 1.4:

- L'absorption.
- La régénération.

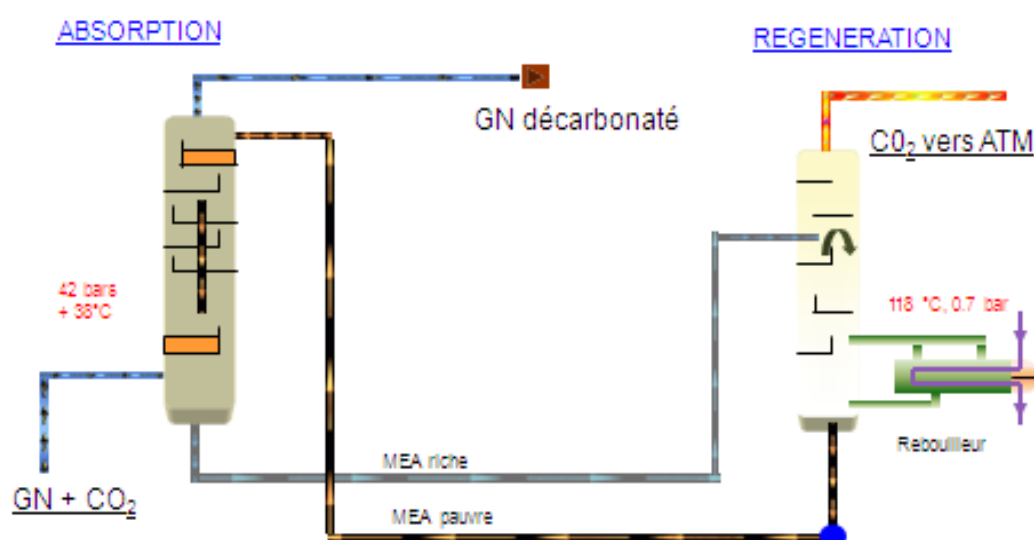


Figure 21.4 : Section de décarbonatation

## 1.4.2 Section de déshydratation

A sa sortie de l'absorbeur, le gaz est saturé en eau car il absorbe l'eau de la solution de MEA. Le système de déshydratation muni des sécheurs permet d'absorber les vapeurs d'eau pour éviter la formation de bouchons de glace qui affectera les équipements de liquéfaction.

Le gaz naturel issu de l'absorbeur de CO<sub>2</sub> pénètre dans les tuyaux du pré-refroidisseur, où il est refroidi par du propane liquide, ce qui entraîne la condensation d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans le gaz naturel et en ressort à une température de 21°C. Il entre ensuite dans un ballon séparateur, où le condensat « eau » est retenu et puis purgé. En quittant le ballon séparateur, le gaz passe alors dans les deux sécheurs (le second est en phase de régénération) et traverse les tamis moléculaires, en perdant progressivement son humidité jusqu'à moins de 1 ppm. À la sortie de chaque sécheur, le gaz passe par des filtres pour objectif de retenir les éléments en suspension [1]. La figure 1.5 illustre le procédé de déshydratation.

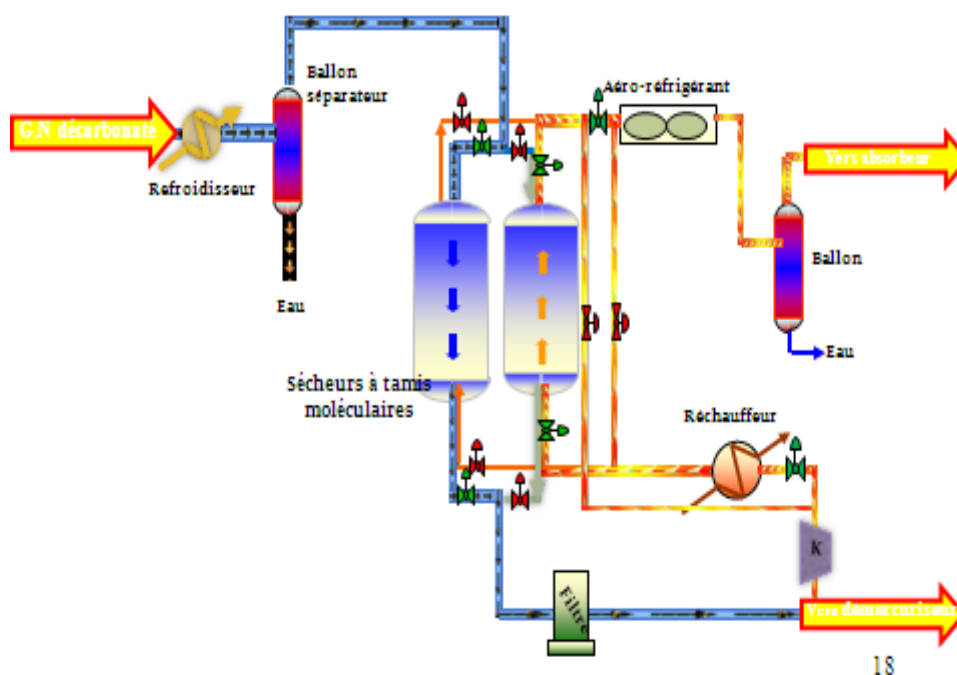


Figure 1.5 : Section de déshydratation

## 1.1.3 Section de démercurisation

La démercurisation est la troisième étape de traitement du gaz naturel. Le procédé permet de capter le mercure (Hg) présent dans le gaz, qui a aussi l'objectif de préserver les

équipements en aluminium de la corrosion tels que l'échangeur principal de la section de liquéfaction.

Le démercuriseur est chargé d'un produit à base de carbone et de soufre pour adsorber le mercure contenu dans le gaz naturel, qui traverse ensuite deux filtres. Il ressort de cette zone avec une concentration en mercure inférieure à 7 nano grammes et est dirigé vers la zone de refroidissement [1]. Le Procédé est illustré sur la figure I.6.

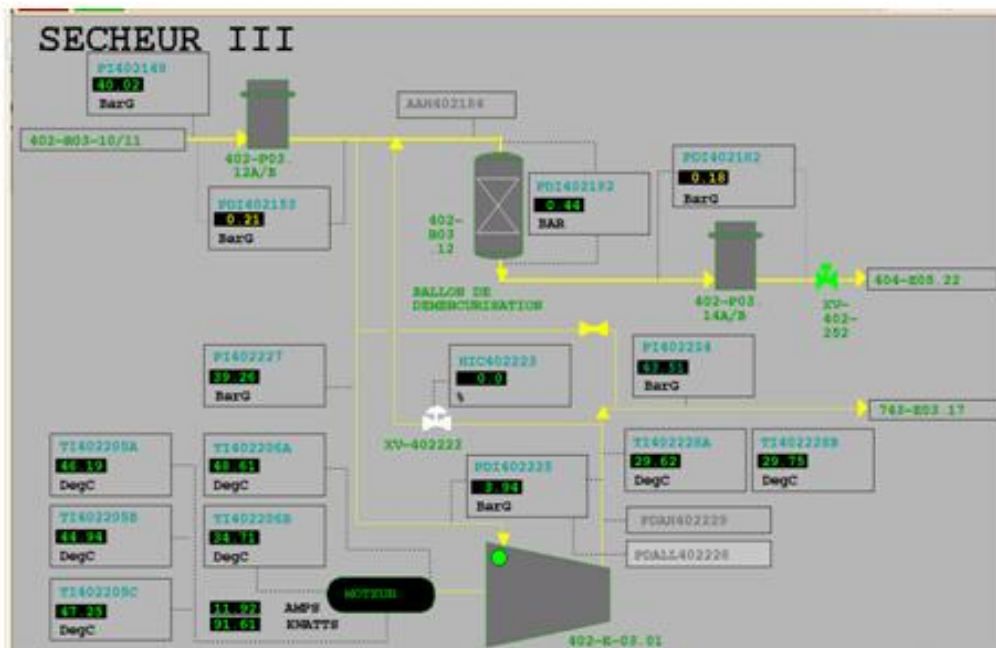


Figure 1.6 : Section de démercurisation

## 1.5 Séparation et liquéfaction

### 1.5.1 Section de séparation

La section de séparation a pour l'objectif de séparer les composants lourds des composants légers. Le gaz d'alimentation déshydraté, qui ressort des sécheurs avec une pression d'environ 40 bars effectifs et une température de (21°C), est refroidi à (-26°C) dans les refroidisseurs au propane à basse pression. Une fraction du gaz d'alimentation, constituée principalement d'hydrocarbures lourds, est condensée. Le mélange de condensat et de gaz d'alimentation allégé rentre ensuite dans la tour de lavage.

Au fur et à mesure que le gaz monte dans la tour à travers le plateau, le liquide de reflux lave le gaz d'alimentation pour éliminer tous les condensats et les composants lourds restants. Le liquide s'écoule vers le plateau inférieur de la tour et entre dans le rebouilleur du laveur, où il est chauffé à environ 50°C par de la vapeur basse pression. Les composants légers dissous sont extraits et renvoyés dans la tour. La phase gazeuse monte, et au passage

du plateau, elle purifie le liquide descendant en le libérant des hydrocarbures légers. Le liquide sortant du rebouilleur du laveur retourne dans le bac de vidange de la tour, d'où il est envoyé vers l'unité de fractionnement. Le gaz de tête sort de la colonne et est combiné au flux liquide composé d'un mélange de butane, propane et éthane issu de l'unité de fractionnement pour assurer le reflux.

Le mélange fluide entre dans le condenseur du laveur, où il est refroidi par du propane basse pression d'environ (- 28 °C) à (- 33 °C), puis envoyé au séparateur pour le laveur. Le gaz léger est séparé du reste du gaz, puis traverse le dispositif anti-entraînement, puis est envoyé vers le dispositif de liquéfaction. Le liquide dans le séparateur est renvoyé au sommet de la tour par la pompe à reflux en tant que liquide de reflux [1].

### 1.5.2 Section de liquéfaction

Le gaz naturel issu du laveur est alors prêt à être liquéfié à une température permettant son transport dans un méthanier à une pression proche de la pression atmosphérique.

Le gaz est envoyé à l'échangeur de chaleur principal, où il circule vers le haut à travers un faisceau de serpentins tubulaires. Le gaz naturel est refroidi et liquéfié à (-148 °C) et 25 bar, et s'écoule vers le bas du côté calandre de l'échangeur à travers le réfrigérant mélangé.

Le gaz naturel liquéfié est détendu à travers une vanne puis envoyé dans un vase d'expansion d'azote avec une pression effective de 0,3 bar. Une partie du GNL forme une vapeur expansée composée d'azote et de méthane, la température chute donc à (-161 °C). Le GNL est envoyé au réservoir de stockage par la pompe à GNL.

La vapeur détendue du vase d'expansion d'azote est utilisée comme réfrigérant. Il traverse l'échangeur de gaz d'échappement et liquéfie un petit échantillon du flux de gaz naturel provenant du laveur. La vapeur chauffée est envoyée à un compresseur de gaz pour être utilisée comme gaz combustible. Le débit réduit du flux de gaz liquéfié est détendu dans un vase d'expansion d'azote.

- **Système de réfrigération mixte (MCR)**

La composition du fluide frigorigène à plusieurs composants (MCR) est indiquée dans le (tableau 1.2). Le réfrigérant mélangé traverse le compresseur MCR pour faire circuler l'étage de compression dans le circuit. Le MCR basse pression du réservoir

d'aspiration du premier étage est comprimé par deux compresseurs fonctionnant en série d'une pression effective de 1,7 bar à une pression effective de 44 bars. Le MCR est refroidi par de l'eau de mer entre les étages et le refoulement. Le MCR est à nouveau refroidi dans du réfrigérant propane, réduisant sa température à environ (-32 °C).

Les composants lourds du MCR sont condensés dans le séparateur à haute pression du MCR et séparés de la vapeur légère du MCR. La vapeur et le liquide traversent l'échangeur principal dans des serpentins séparés. En bout chaud, le liquide subit un sous-refroidissement et une détente à travers la vanne, et est réinjecté dans la partie calandre de l'échangeur principal pour assurer le refroidissement du bout chaud.

La vapeur est liquéfiée à l'extrémité froide de l'échangeur principal, détendu à travers la vanne et réinjectée dans la partie calandre de l'échangeur pour assurer le refroidissement de l'extrémité froide. La vapeur MCR s'écoule vers le bas de l'échangeur et retourne dans le réservoir d'aspiration du compresseur du premier étage pour terminer le cycle.

**Tableau 1.2 : Composition du MCR**

<b>Constituant</b>	<b>Pourcentage moléculaire %</b>
Azote	3-5
Méthane	42-45
Éthane	52-55
Propane	4-5
Butane	traces

### **1.6 Section de fractionnement**

Cette section est constituée essentiellement de quatre colonnes de distillation et chaque colonne à un rebouilleur, un condenseur et un ballon de reflux :

- ❖ Colonne de déméthanisation.
- ❖ Colonne de dé-éthanisation.
- ❖ Colonne de dépropanisation.
- ❖ Colonne de débutanisation.

Le liquide du fond du débutaniseur est envoyé vers le ballon de stockage de la gazoline [1].

L'unité de fractionnement sépare les hydrocarbures les plus lourds éliminés du courant de gaz naturel et prépare les fractions nécessaires à l'alimentation interne des diverses sections du complexe, à savoir :

- Propane d'appoint pour le circuit de propane et le système de réfrigération MCR.
- Ethane d'appoint pour le système de réfrigération MCR.
- Butane, éthane et propane pour l'alimentation de l'échangeur 1 cryogénique.
- Butane, éthane et propane comme "hydrocarbure pauvre" de recyclage à la tour de lavage.
- Essence pour l'alimentation des chaudières de process et/ou des utilités.
- Gaz combustible (vapeurs de tête des colonnes de fractionnement) pour les chaudières de process et des utilités.

### **1.7 Zone de stockage et chargement du GNL**

Cette zone comprend trois bacs de GNL qui assurent le stockage de la totalité de la production de GNL des six trains. Les bacs de stockage à double paroi métallique d'une capacité unitaire de 100 000 m<sup>3</sup> permettent de stocker le GNL à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique et à une température de (-162°C). Lors du remplissage des réservoirs, une certaine quantité du produit se vaporise.

La perte de chaleur due à l'isolation est également la cause de la vaporisation du produit. La vapeur du réservoir est collectée dans un collecteur, qui l'envoie aux compresseurs de gaz de chaque train. Les pompes de transfert de GNL peuvent être utilisées pour transférer le GNL d'un réservoir à un autre dans le cas où le procédé de chargement est arrêté.

Avant de charger du GNL sur le méthanier, les canalisations de la zone de chargement doivent être refroidies. La pompe de refroidissement aspire une petite quantité de GNL du réservoir de stockage et transporte le GNL à travers la hotline dans la zone de chargement. Le GNL gazéifié est aspiré par le ventilateur de gaz résiduel et envoyé vers la conduite de gaz du réservoir de stockage. Le chargement est effectué par cinq pompes de chargement de GNL fonctionnant en parallèle, et le GNL est transféré du réservoir de stockage au navire via le bras de chargement. La vapeur résiduelle du conteneur est renvoyée vers le collecteur de vapeur du réservoir de stockage via le ventilateur de gaz résiduel [1].

**Tableau 1.2.2: Composition molaire du GNL**

	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
<b>N<sub>2</sub></b>	0.60	1.40
<b>CH<sub>4</sub></b>	84.00	92.50
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	6.0	8.50
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	2.20	3.00
<b>iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	0.30	0.50
<b>nC<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	0.30	0.70
<b>iC<sub>5</sub>H<sub>12</sub></b>	0.00	0.02

**Tableau 1.2.3: Conditions de stockage du GNL**

<b>Caractéristiques</b>	<b>Valeurs</b>
Masse moléculaire (g/mole)	18,2
Pression (bar )	1,03
Température (°C)	-162

# Chapitre 2 : La section de décarbonatation et le phénomène de corrosion



## 2 La section de décarbonatation

### 2.1 Description du procédé

L'unité de décarbonatation est l'une des unités de traitements du gaz naturel conçue pour l'élimination d'une grande partie du gaz carbonique contenu dans le gaz d'alimentation et dont la concentration doit être réduite à 90 ppm pour éviter la formation de glace carbonique dans les sections froides de l'installation (bouchage des tubes des échangeurs cryogéniques).

Il y a des plusieurs techniques d'élimination du CO<sub>2</sub> [3], les souvent utilisées sont :

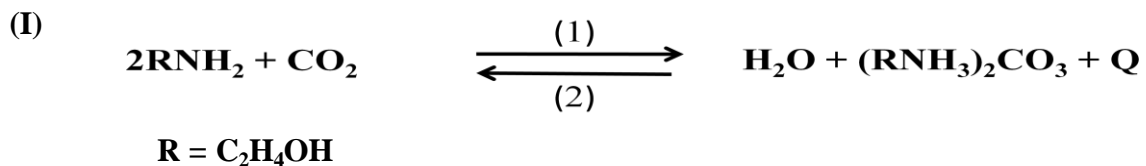
- Élimination par absorption sur solvant chimique tel que : MEA, DEA, TEA, MDEA, carbonate de potassium active.
- Élimination par solvants physiques tel que : l'éther diméthylique glycol, le sulfolane, le méthyle, pyrrolidone, méthanol, carbonate de propylène.
- Autres procédés comme : l'élimination par un lit à matière solide, l'élimination par distillation, séparation par membrane.

Le Complexe utilise le procédé de l'élimination par absorption sur le solvant chimique MEA. Le procédé mise en œuvre par absorption dans une colonne à 27 plateaux à haute pression (42 bars) et basse température (38°C) [1].

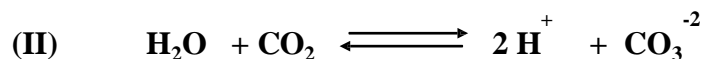
### 2.2 La réaction chimique de décarbonatation

Le gaz carbonique est extrait du gaz naturel par lavage de celui-ci à contre-courant dans une colonne par une solution aqueuse à 15 à 20% de MEA.

Le gaz carbonique est absorbé par la solution MEA peut être caractérisé par la réaction suivante :



Cette étape comporte une étape intermédiaire dans laquelle l'eau et le gaz carbonique donnent l'acide carbonique.



L'équilibre de la réaction (I) se déplace dans le sens (1) à haute pression et basse température (condition de l'absorption), et dans le sens (2) à basse pression et haute

température (condition de désorption, régénération de MEA).

### 2.3 Processus d'absorption du CO<sub>2</sub> par MEA

L'alimentation en gaz naturel entre dans l'unité à une pression contrôlée de 42 bars. Le gaz entre d'abord dans la section de séparation rapide au bas de la section d'absorbeur, où les liquides sont entraînés puis séparés du flux de gaz d'alimentation. Le liquide séparé est envoyé au système de décantation des hydrocarbures et le gaz pénètre par le haut de la tour d'absorption à travers le préchauffeur E-506.

Le gaz naturel circule vers le haut à travers 27 plateaux à clapets, il traverse à 38°C dans l'absorbeur à contre courant par rapport à une solution aqueuse de Monoéthanolamine (MEA) à 15% qui s'écoule vers le bas de la colonne. Cette solution de MEA à faible teneur en CO<sub>2</sub>, pénètre également dans l'absorbeur à 38°C et une pression légèrement supérieur à 42 bars, et son débit est ajusté à 54.000 Kg/h[1].

### 2.4 Régénération de la solution MEA

De grandes quantités de chaleur sont nécessaires à la régénération de la solution riche, cette chaleur sert à:

- Chauffer la solution à une température suffisante pour permettre la désorption des gaz acides.
- Générer des vapeurs d'extraction pour produire une solution ayant une teneur en gaz acide suffisamment basse.

La solution de MEA riche en CO<sub>2</sub> quitte l'absorbeur par le fond de la colonne avec une température de 43°C, elle subit une détente rapide de 42 à 8 bars au niveau de la vanne de détente, après elle est chauffée jusqu'à 93°C par un échange thermique avec les liquides résiduels du régénérateur dans les échangeurs **A** et **B**, ensuite par la vanne de détente. La pression est réduite jusqu'à 0,7 bar et enfin elle rentre dans le régénérateur par le haut, cette alimentation assure le reflux du régénérateur.

La solution riche est mise en cascade à travers les 21 plateaux à clapets du régénérateur et collectée sous forme de solution MEA pauvre au fond du régénérateur.

Après avoir traversé le déversoir, la solution s'écoule vers la section inférieure du régénérateur. La température est maintenue à 118°C par le rebouilleur avec de la vapeur d'eau d'une pression effective de 3,45 bars et une température de 148°C.

La vapeur au sommet du régénérateur qui se compose principalement de CO<sub>2</sub> et de vapeur

d'eau, quitte la colonne à 107°C, puis est refroidie à 50°C avec de l'eau de mer dans le condenseur de tête. La vapeur condensée s'accumule dans le ballon gaz acide, où la partie vapeur constituée essentiellement de CO<sub>2</sub> est rejetée vers l'atmosphère. La phase liquide est envoyée vers le fond du régénérateur par la pompe.

La solution pauvre de MEA pauvre traverse du côté calandre des échangeurs **A** et **B** où sa température est réduite à 70°C, puis par l'une des pompes où sa pression augmente jusqu'à 42 bars. La moto pompe démarre automatiquement en cas de chute de pression de la solution pauvre, tandis que la turbo pompe est en service en cas de fonctionnement normale. La solution rentre dans un échangeur à eau de mer pour atteindre la température d'entrée dans l'absorbeur de 38°C [1].

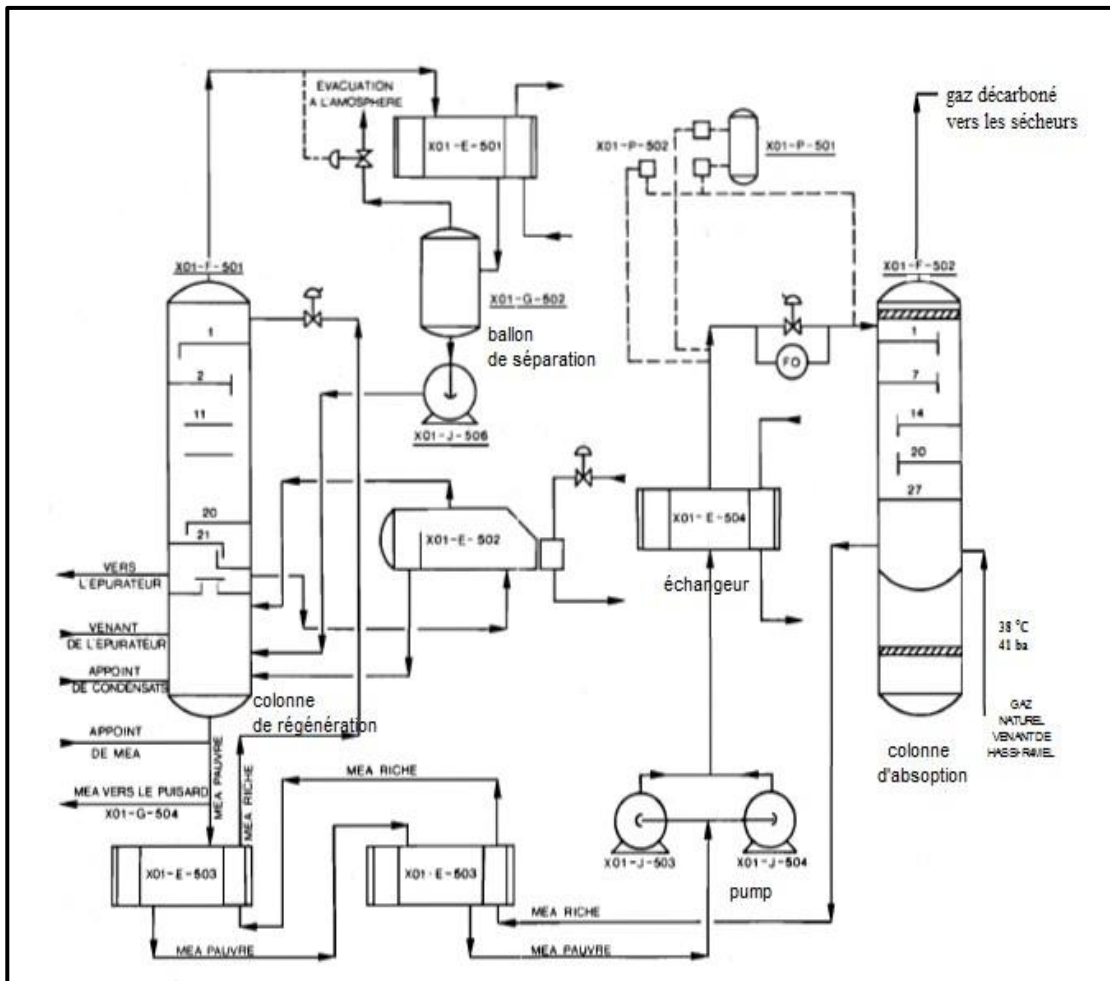


Figure II.1. Schéma de la section de décarbonatation

## 2.5 Description et le rôle de l'échangeur E504

La MEA pauvre sortant du fond de la colonne de régénération F-501, à une température de 116 °C, passe à travers les échangeurs intermédiaires MEA (riche) /MEA (pauvre) (E503A et B), où la température est diminuée à 68 °C. Pour des raisons de transfert de masse dans l'absorbeur, la solution MEA pauvre à 15% est refroidie à l'eau de mer dans le refroidisseur E-504 jusqu'à la température de contact de la colonne d'absorption à 38°C.

L'échangeur E.504 est un échangeur tubulaire (faisceaux calandres) placés horizontalement, la solution MEA pauvre à 15% passant coté calandre et l'eau de mer passant coté tubes, leurs caractéristiques sont comme suit:

### 1. Les tubes:

- 1.1. Nuance: 70-30 Cu Ni.
- 1.2. Nombre de tube 410 tubes.
- 1.3. Diamètre extérieur 3/4 in BWG12.
- 1.4. Longueur 6,096 m.
- 1.5. Nombre de passe 02.

### 2. La calandre : (en acier de carbone)

- 2.1. Diamètre extérieur 63,5cm
- 2.2. Couvercle de la calandre avec tête flottante.
- 2.3. Nombre de passe 01.

### 3. La boîte de distribution : (en acier de carbone)



Figure 2.2: l'échangeur de chaleur E504 dans la section décarbonatation

## 2.6 Les causes du mauvais transfert de chaleur du refroidisseur E504

Le mauvais transfert de chaleur du refroidisseur E.504 est dû aux causes suivantes :

- Débit d'eau de mer insuffisant de refroidissement.

- Présence des dépôts sur la paroi intérieure des tubes d'échangeur.
- Dégradation de la surface externe des tubes d'échangeur.
- Les fuites et la corrosion sur les tubes et la boîte de distribution d'échangeur et ça c'est le phénomène le plus courant au niveau de complexe GL1/Z.

## 2.7 Notions sur le phénomène de corrosion

### 2.7.1 Définition

La corrosion est la réaction d'un matériau métallique avec son environnement qui entraîne une modification mesurable du matériau et peut conduire à une dégradation de la fonction d'un composant métallique ou d'un système entier. Dans la plupart des cas, la réaction est de nature électrochimique, dans certains cas, elle peut être chimique ou métallo-physique.

### 2.7.2 Différents processus de la corrosion

Il existe plusieurs formes de corrosion qui se résultent selon la nature des interactions chimiques ou/et physiques entre le métal et son environnement. Les différentes formes de corrosion ne sont pas toujours indépendantes les uns des autres. Certaines peuvent se développer de façon simultanée [5].

On peut résumer les grandes formes de la corrosion comme suivant :

- **Corrosion chimique (sèche) :** Cette forme de corrosion se définit comme la réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. La réaction d'oxydoréduction se déroule sans présence d'électrolyte. La formation de la couche de produit de corrosion s'effectue par l'action de tous les agents corrosifs existant dans l'air. La réaction se déroule sans intervention du courant électrique, qui nécessite généralement des températures élevées.

La forme générale de la corrosion sèche réaction est représenté par le schéma suivant:

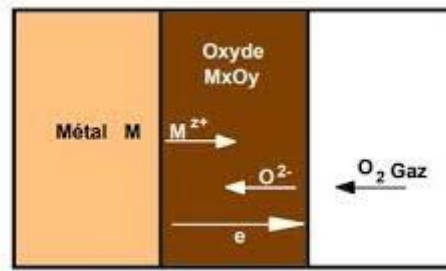


Figure 2.3: Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température

- **Corrosion électrochimique** : La réaction se manifeste avec présence d'électrolyte et cette forme de corrosion est la plus importante. Elle fait appel à la notion de pile électrique, ce qui implique des échanges de charges électriques alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes. Les zones considérées comme anodes sont attaquées (corrodées).

Trois cas sont envisageables pour la corrosion électrochimique :

- Dans la corrosion par l'oxygène, les molécules d'oxygène dissoutes dans la solution électrolytique réagissent avec l'eau pour former des ions hydroxyde, qui peuvent ensuite former des oxydes et des hydroxydes avec le métal. La rouille du fer, par exemple, est une corrosion par l'oxygène.

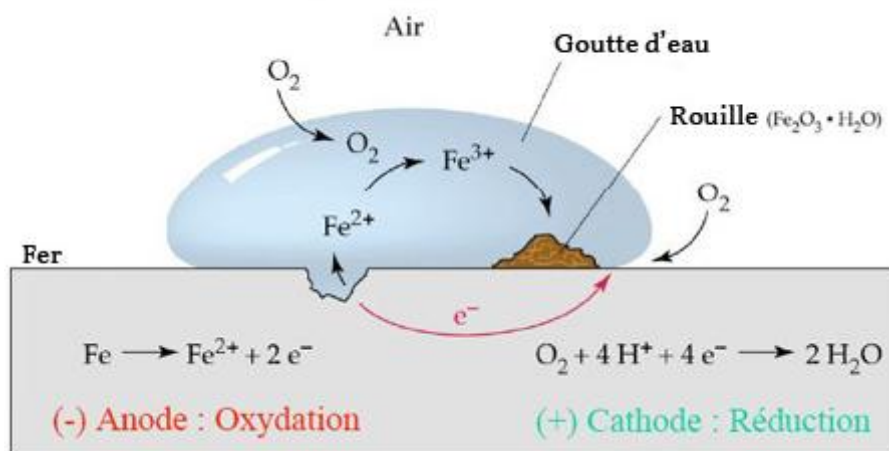
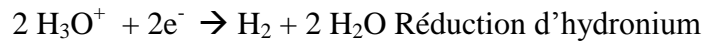
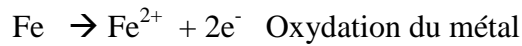


Figure 2.4: La corrosion électrochimique

- Le métal est oxydé et passe en solution sous forme d'ions. Dans un environnement acide, les protons des ions oxonium sont réduits en hydrogène en prenant des électrons et de l'eau est formée. Cette réaction se retrouve souvent dans l'exemple du fer :



- Les électrons sont captés par un métal plus "noble" ; On parlera de corrosion galvanique

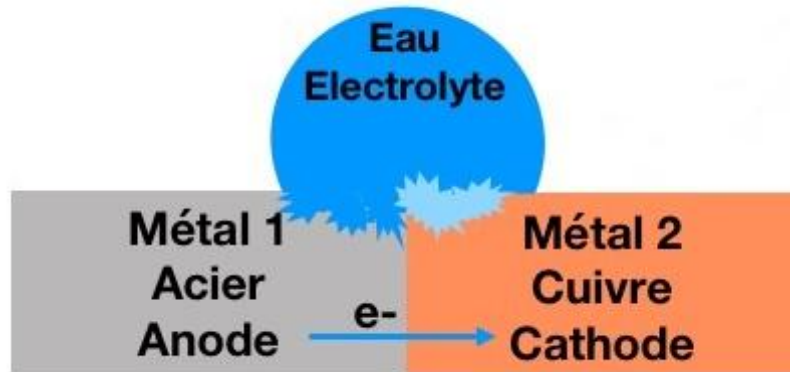


Figure 2.5: Corrosion galvanique

- **Corrosion biochimique** : C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées.

### 2.7.3 Les types de corrosion

- ❖ **Corrosion généralisée ou uniforme** : C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est la forme aussi la moins dangereuse, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion.



Figure 2.6: La corrosion uniforme



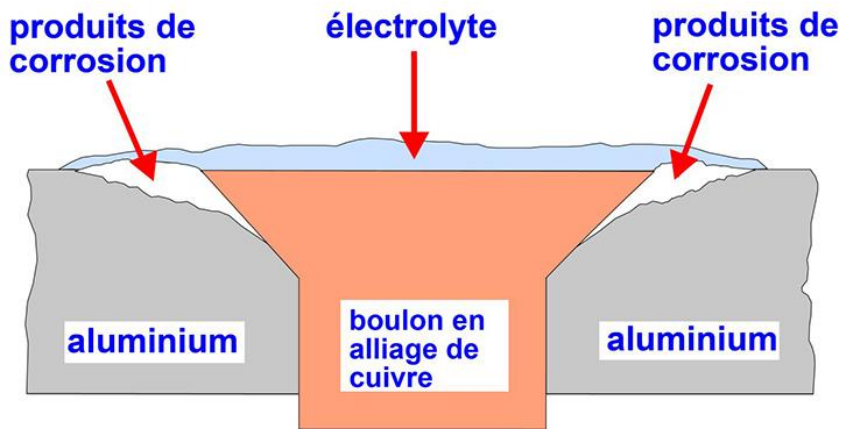


Figure 2.7: Corrosion de contact

- ❖ **Corrosion galvanique ou de contact** : Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux en présence d'un liquide conducteur (électrolytique). Le métal le moins noble est dégradé (voir figure 2.7).
- ❖ **Corrosion par piqures** : C'est un type de corrosion localisée (figure 2.8). Elle affecte les métaux et les alliages passifs tels que les aciers inoxydables ou les alliages légers. Elle est considérée comme « la maladie de la passivation », elle se traduit en formant des trous étroits qui peuvent progresser très rapidement en profondeur. Cette forme de corrosion est très dangereuse car elle peut conduire à la perforation des tôles même épaisses, alors que le reste de la surface reste saine [5].



Figure 2.8: La corrosion par piqures

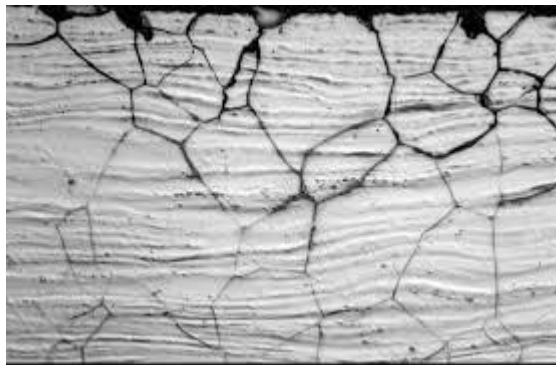
- ❖ **Corrosion par crevasse** : Ce type de corrosion est généralement n'est pas différente de celui de la corrosion par piqures. La morphologie de l'attaque s'étend en largeur à

la surface sous l'interface des brides et joints ou sous les dépôts, et non pas en profondeur comme par les piqûres (figure 2.9).



**Figure 2.9: La Corrosion par crevasse sous un joint**

- ❖ **Corrosion inter-granulaire** : Lors de la cristallisation de métaux, les atomes d'impuretés constituent les joints de grain. Ces joints sont chimiquement plus actifs que le reste du métal et se corrodent facilement en milieu corrosif. L'attaque du métal s'effectue en profondeur, le long des joints de grains, ce qui conduit à une microfissure, alors la surface ne présente aucune altération. Donc le produit de corrosion se trouve aux joints de grains. La perte du métal est insignifiante, mais les caractéristiques sont sensiblement affectées, le métal peut se rompre sous un effort très faible (figure 2.10).



**Figure 2.10: Corrosion inter-granulaire**

- ❖ **Corrosion/ Érosion** : La corrosion / érosion apparaît souvent aux endroits de forte turbulence telle que coudes, les turbine hydrauliques, les pompes etc. La corrosion par érosion est une accélération de la vitesse d'attaque du métal par la corrosion due au mouvement actif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. L'augmentation de la turbulence causée par les piqûres sur les surfaces internes d'un tube peut entraîner une

augmentation rapide des taux d'érosion et éventuellement une fuite. Les étapes de l'érosion sont montrées sur la figure 2.11.

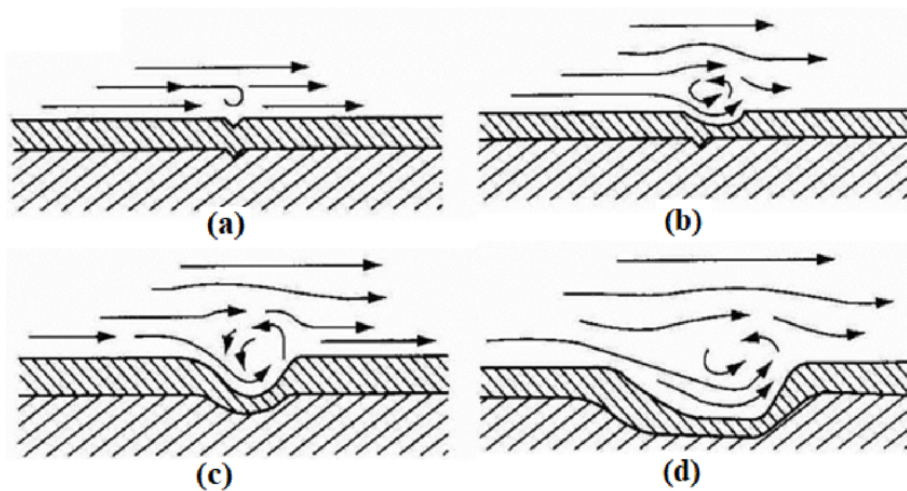


Figure 2.11: La corrosion par érosion

### 2.8 La prévision de corrosion

Prédire une corrosion est difficile, car les phénomènes de corrosion dépendent de nombreux paramètres, qui sont toujours difficile à définir exactement leurs effets. L'apparition de la corrosion dépend de la nature des matériaux utilisés (géométrie, état structurel), de la nature des eaux circulants et des conditions de service. Par conséquent, la prédiction de la corrosion d'un équipement donné sera basée sur les trois éléments suivants :

- Analyse des effluents.
- Les conditions de fonctionnement (temps, pression, température, débit, schéma d'écoulement)
- Essais en laboratoire et éventuels sur le terrain.

# Chapitre 3 : la dégradation du refroidisseur E504 et l'analyse des causes de l'insuffisance de refroidissement

### 3 La dégradation du refroidisseur E-504

#### 3.1 Historique du refroidisseur E-504

Avant de procéder aux endommagements enregistrés au niveau du refroidisseur E-504, on cite un historique, qui rassemble une liste des contrôles réalisés sur cet équipement.

**Tableau 3.1: L'historique du refroidisseur E504**

Date	Problèmes	Remèdes
12/04/2012	Bouchage important des tubes par les dépôts	Nettoyage à l'eau HP Nettoyage chimique
11/10/2013	Présence de dépôt sur les anodes sacrificielles.	Grattage d'anodes sacrificielles
	Un (1) tube fuyard sur 1 <sup>ère</sup> passe	Fixation de tube fuyard par soudure
25/03/2014	Dégradation de la peinture coté calandre et couvercle de la tête flottante	Application de la peinture sakafen
	Corrosion des boulons de fixation, ligne sortie EDM.	Changement des boulons de fixation, ligne sortie EDM
27/05/2015	La ligne d'entrée d'eau de mer est complètement corrodée	Changement la ligne d'entrée de eau de mer
03/04/2016	La paroi de la boîte est couverte d'une solution gélatineuse (mélange eau de mer et solution MEA)	Nettoyage la paroi de la boîte couverte avec un chiffon
15/08/2017	La température de sortie de MEA est élevée	Augmentation de débit d'EDM
	Tube fuyards au niveau de l'entrée d'eau de mer	Fixation les tubes fuyards par la soudure
23/08/2018	Consommation excessive de MEA L'analyse de l'eau de mer du refroidisseur au laboratoire confirme la présence du MEA	Réparation des tubes perforés pour éviter la fuite du MEA

17/11/2019	Présence de crevasses de corrosion au niveau de la boîte distribution	Sablage des boîtes de distribution et application de la peinture protectrice
23/09/2020	Importantes fuites des tubes à intérieur d'E.504	Réparation des tubes fuités

### 3.2 Paramètres de service de l'échangeur E504

**Tableau 3.2: Les paramètres de service de l'échangeur E504 (design)**

	<b>MEA (coté calandre)</b>	<b>EDM (coté tube)</b>
Température entrée (°C)	72,2	25,0
Température sortie (°C)	37,7	38,4
Débit (kg/h)	54.964	147.871
pression entrée (bar)	63	3,5

- La perte de charge à travers les tubes de l'échangeur est de **0,689 bar**

**Tableau 3.3: Les paramètres de service de l'échangeur E504 (actuel)**

	<b>MEA (coté calandre)</b>	<b>EDM (coté tube)</b>
Température entrée (°C)	72,9	25,0
Température sortie (°C)	47	38
Débit (kg/h)	42.780	103.079,6
pression entrée (bar)	63	3,5

- La perte de charge à travers les tubes de l'échangeur est de **0,35 bar**

### 3.3 Analyse des causes

L'analyse des causes fait ressortir ce qui suit :

#### 3.3.1 Débit d'eau de mer insuffisant pour le refroidissement

Le débit d'eau de mer de refroidisseur de la solution MEA dans le tableau (3.3) précédent a été calculé selon les paramètres de fonctionnement actuel.

La perte de charge à travers les tubes de l'échangeur E504 de l'ordre de **0,35 bar** est considérée comparable avec le design **0,68 bar**.

**Tableau 3.4: les différents paramètres d'eau de mer à travers les tubes E504 (actuel)**

Désignation	Unité						
Perte de charge	bar	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Vitesse	m/s	0,810631	0,7428	0,73634	0,7357	0,735635	0,735629
Débit massique	kg/h	113589,5	104085	103181,1	103089,6	103080,6	103079,7

### En résumé:

**Tableau 3.5: Les paramètres d'eau de mer à travers les tubes E-504**

Désignation	Paramètre
La perte de charge (design)	0,689 bar
La perte de charge (actuelle)	0,35 bar
Le débit massique EDM (design)	147.871 kg/h
Le débit massique EDM (actuel)	103.080 kg/h

### ❖ **Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus ont montré que le débit d'eau de mer à travers les tubes du refroidisseur E-504 est de l'ordre de **103 080 kg/h** est insuffisant, comparé à celui du design qui est de l'ordre de **147 871 kg/h**.

Un faible débit de l'eau de mer de refroidissement dû à :

- Le bouchage de l'un des quatre trous des plaques à orifice installées à la sortie de la ligne d'eau de mer du refroidisseur E-504 fait réduire le débit d'écoulement à travers les tubes.
- Le fonctionnement de cet échangeur avec un débit d'eau de mer insuffisant, favorise l'augmentation de la température de la MEA.

### **3.3.2 Présence des dépôts sur la paroi intérieure des tubes d'échangeur**

L'eau de mer contient des particules solides et organiques qui peuvent altérer l'état des équipements, elle subit certains traitements avant son utilisation dans les unités notamment (voir figure 3.1).

- 1) **Dégrillage:** Cette opération permet de protéger la station de traitement contre l'arrivée intempestive de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages

dans des différents tubes de l'installation ou de détériorer des coups en pompe.

2) **Électro chloration** : L'unité d'électro chloration installée lors de la rénovation a pour objet la production de chlore destiné à désinfecter les micro-organismes qui sont responsables de bouchages de tuyauteries et de corrosions de type bactérien, son principe est basé sur l'électrolyse de l'eau de mer ; avec production de chlore ou d'hypochlorite de sodium et injection dans le bassin d'eau de mer .

3) **Constituants chimiques de l'eau de mer:**

L'analyse chimique de l'eau de mer effectuée au GL1/Z à donner une composition chimique moyenne présentée dans le tableau, ci-dessous (Tableau 3.6).

**Tableau 3.6: Analyse chimique de l'eau de mer**

Constituants	Teneur en ppm
Chlorure (Cl <sup>-</sup> )	18.980
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	2.646
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	13.970
Fluorure (F <sup>-</sup> )	64,80
Bromure (Br <sup>-</sup> )	1,3
Sodium (Na <sup>+</sup> )	10.556,1
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	1.272
Calcium (Ca <sup>+2</sup> )	400,1
Potassium (K <sup>+</sup> )	380
Strontium (Sr <sup>+</sup> )	13,3



**Figure 3.1: Dépôt de tartre formé sur les faisceaux tubulaires de l'échangeur**



### ❖ Interprétation des résultats

L'analyse exécutée selon un protocole classique, ne révèle pas des impuretés chimiques et biochimiques qui peuvent contenir cette eau.

Cependant, la température de la solution pauvre de MEA à la sortie du refroidisseur E-504 n'a pas atteint le seuil d'alarme tant que la paroi interne du tube n'a pas été bouchée.

Après avoir ouvert l'échangeur, nous avons remarqué ce qui suit :

- Il y a des dépôts de tartre important sur le boîtier de distribution d'eau de mer, la plaque tubulaire et la paroi interne du tube.
- Peinture protectrice anti corrosif est dans un état dégradé.
- L'encrassement de la surface d'échange est généralement lié à la génération de solides cristallins à partir de la solution liquide. Par conséquent, cela dépend en grande partie de la composition de l'eau de mer. L'encrassement est obtenu en formant une croûte adhérente sur la surface d'échange, qui est généralement métallique. Pour évoluer, deux conditions doivent être remplies :
  - La limite de solubilité du sel dans l'eau doit être dépassée.
  - La vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.

Les résultats d'analyse des dépôts du faisceau de tubes de l'échangeur de chaleur E-504 fournis par le laboratoire du complexe de GNL ont montré la présence d'une grande quantité de sel de calcium et de sel de magnésium et une petite quantité de cuivre, de nickel et de fer.

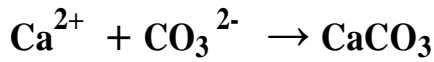
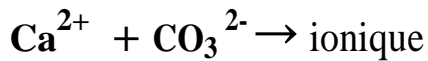
**Tableau 3.7: Les résultats des analyses des dépôts**

Dépôts	Calcium	Magnésium	Cuivre	Fer	Nickel
Masse %	49,22	30,88	3,99	0,89	1,94

### ❖ Interprétation des résultats

Le résultat de l'analyse de la qualité de la composition des sédiments du faisceau de tubes de l'échangeur de chaleur E504 montre que le sédiment est carbonaté et se compose de 50 % de carbonate de calcium.

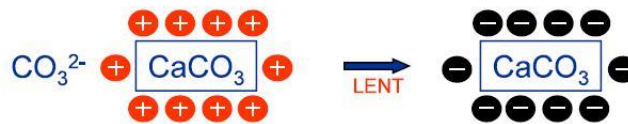
4) Mécanisme de formation du tartre



a) Adsorption des ions  $\text{Ca}^{2+}$  sur  $\text{CaCO}_3$  :



b) Début de précipitation :

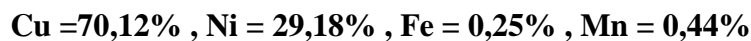


3.3.3 Dégradation de la surface externe des tubes d'échangeur

Afin d'analyser la dégradation (corrosion et fissuration) de la surface externe des tubes de l'échangeur de chaleur E504, nous avons considéré les points suivants :

1) **Analyse du milieu de fissuration** : Le problème de fissuration n'est rien d'autre que la nuance (alliage cuivre-nickel) qui constitue les tuyaux. Ils sont soumis en permanence à l'action conjuguée de la solution MEA (milieu externe) et de l'eau de mer (milieu interne). L'analyse du tube comprendra les éléments suivants :

a) **Analyse chimique** : L'analyse chimique a confirmé que le tube est en alliage cuivre-nickel 70-30 et que son contenu est le suivant :



En théorie, les alliages de cuivre peuvent bien résister à l'eau de mer et au MEA sans agents corrosifs.

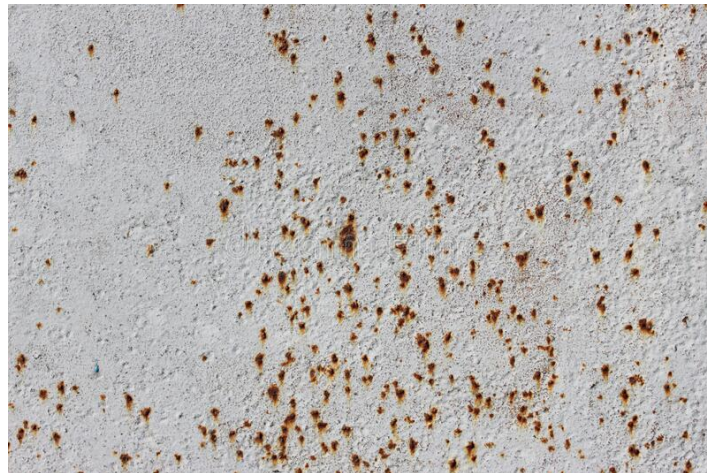
b) **Examen visuel** : L'analyse visuelle montre que le tube est corrodé, notamment au niveau de la paroi externe du tube de l'échangeur de chaleur E504. La corrosion des tubes par fois présente des fissurations débouchant est sans aucune restriction visible.

c) **Examen microscopique**: On utilise un microscope optique à balayage pour inspecter la surface des tubes d'échangeur E-504 (voir figure 3.2). On constate qu'il y a des taches de corrosion sur la surface extérieure. Ces taches se combinent pour former des microfissures, qui deviennent alors des fissures visibles à l'œil. Nous avons également détecté des dépôts de corrosion sur les bords des fissures

principales, ces dépôts sont continus à certains endroits et discontinus à d'autres.

### **d) Analyse du milieu extérieur du faisceau des tubes :**

Dans les résultats de l'inspection visuelle et microscopique, nous avons remarqué que la paroi externe des tubes de l'échangeur de chaleur E504 présente une corrosion par piqûres lorsqu'elle entre en contact avec un fluide corrosif (MEA). Nous avons aussi observé, que la surface des tubes est sévèrement corrodée, ce qui confirme l'agressivité du milieu extérieur.



**Figure 3.2: Photo d'examen au MEB (piqûres de corrosion)**

D'après les résultats des examens sur les tubes, montre que la solution MEA est le responsable de la corrosion la paroi externe des tubes d'échangeur E504, C'est pour cela qu'on va directement vers l'amine qui reste le seul élément agressif contenu dans le MEA, la vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la concentration en MEA entraînée.



**Figure 3.3: L'effet de la MEA sur la surface des tubes d'échangeur E504**

### 3.3.4 Les fuites et la corrosion sur les tubes et la boîte de distribution d'échangeur

L'eau de mer est la plus corrosive des eaux de refroidissement utilisée dans les usines de traitement. Sa nature corrosive est aggravée par la présence des sels corrosifs, tel que chlorure, sulfates, bromure, bicarbonates, bicarbonates, nitrates et phosphates ainsi que l'oxygène dissous (voir tableau 3.6).

L'action destructive de l'eau de mer sur un matériau est la dégradation mécanique, physique, chimique, électrochimique ou biologique.

On peut expliquer le problème des fuites sur les tubes d'échangeur E504 causé par différents types de corrosion. Le premier type est nommé « caverneuse », qui est un résultat d'une attaque électrochimique, elle peut apparaître même pour des faibles concentrations en ions chlorures (contenant dans l'eau de mer) à une température ambiante. Elle est accélérée par l'élévation de la température (voir figure 3.4).

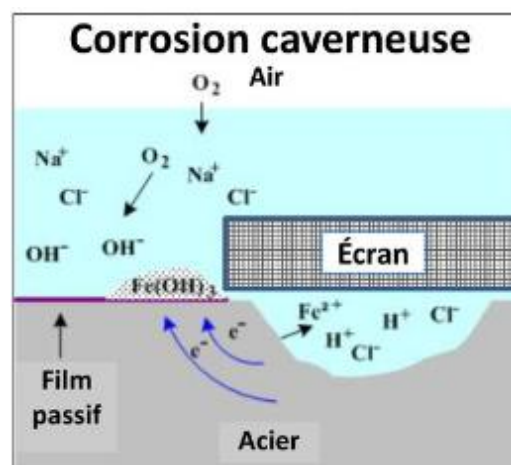


Figure 3.4: La corrosion caverneuse par ions  $Cl^-$



**Figure 3.5: Les anodes sacrificielles couvertes par les dépôts**

Les tubes de l'échangeur E504 ont une structure en cupronickel. La boîte de distribution a une structure en acier de carbone. Les deux structures sont en contact direct avec l'eau de mer, ces derniers sont protégés cathodiquement par les anodes sacrificielles en zinc.

Les anodes sacrificielles en zinc possèdent un potentiel standard de (-0,91 à -1,10 Volt), le zinc est moins noble que l'acier, le cuivre et le nickel, cela veut dire que l'anode sacrificielle est attaquée en premier en protégeant l'acier au carbone et le cupronickel.

Du fait que, les anodes sacrificielles n'ont pas bien réagi ou sont complètement consommées, l'eau de mer commence à attaquer les matériaux de la boîte de distribution et les tubes (voir figures 3.5 & 3.6).



**Figure 3.6 : La corrosion sur la boîte de distribution d'échangeur E504**

### 3.4 Les conséquences de ces problèmes

L'endommagement de l'échangeur E504 se traduit par de nombreux problèmes, c'est qui fait un impact sur l'arrêt des installations pour cause de maintenance. Ces arrêts

fréquents entraînent des frais économiques supplémentaires important pour cause de :

- Arrêt de production.
- Arrêt des installations.
- Remplacement des équipements corrodés.
- La perte en matière (MEA).

On a aussi noté un impact écologique causé par le déversement de la solution MEA vers les égouts de lamer ainsi que dans l'environnement.

### **Conclusion**

Les différents constats enregistrés au niveau des tubes de l'échangeur E.504 lors de l'ouverture de cet équipement ont révélé que la paroi interne est colmatée par des dépôts de tartre et par conséquent la diminution du débit de l'eau de mer.

Un autre phénomène a été constaté, c'est la présence de corrosion sur la surface des tubes de l'échangeur.

Ces différents constats ont pour conséquences :

- La transmission de chaleur entre les parois des tubes et le fluide diminue, d'où elle cause le risque d'un échauffement local du métal, ce qui provoque une possible baisse des caractéristiques mécaniques, qui peut être dangereux pour la durée de vie de l'appareil.
- Diminution du rendement thermique de l'appareil.
- Apparition d'une vibration des tubes causée par la turbulence d'un fluide portant des objets ou bien des particules solides détachées des dépôts formés sur les parois intérieures des tubes.
- La grande différence de pression entre la solution de la MEA et l'EDM favorisent la perforation des tubes des échangeurs.
- L'insuffisance de refroidissement de MEA par l'eau de mer une dilatation des tubes engendrée par l'élévation de la température.
- La vitesse de corrosion dépend de la concentration de MEA et son augmentation influe négativement sur l'état du métal.

# Chapitre 4: Dimensionnement du refroidisseur E504

## 4 Dimensionnement du refroidisseur E504

### 4.1 Introduction

Dans tout calcul d'échangeur de chaleur, le but est d'obtenir la récupération d'une certaine quantité de chaleur dans des conditions économiques optimales qui sont un compromis entre les frais d'investissement et les frais opératoires. Le calcul de tout appareil comportera donc toujours deux études parallèles : transfert de chaleur et perte de charge [6], [7].

Pour réaliser le dimensionnement de l'échangeur, l'identification des données physiques des flux est indispensable.

### 4.2 Caractéristiques thermo physiques des fluides du refroidisseur E504

Dans les tableaux (4.1), (4.2) et (4.4) nous avons exposé les données de base recueillies sur site et la documentation disponible.

**Tableau 4.1: Les propriétés thermo physique du MEA**

Propriétés thermo physiques	Valeur utilisée par le service technique
Capacité calorifique ( $C_p$ )	4,199 kJ/kg. °C
Masse volumique ( $\rho$ )	981,4 kg/m <sup>3</sup>
Viscosité ( $\mu$ )	0,4505*10 <sup>-2</sup> pa.s
Conductivité ( $\lambda$ )	0,5844W/m. °C

**Tableau 4.2: Les propriétés thermo physiques d'EDM**

Propriétés thermo physiques	Valeur utilisée par le service technique
Capacité calorifique( $C_p$ )	4,004 kJ/kg. °C
Masse volumique ( $\rho$ )	1,020 kg/m <sup>3</sup>
Viscosité( $\mu$ )	0,847*10 <sup>-3</sup> Pa.s
Conductivité ( $\lambda$ )	0,612 W/m. °C



**Tableau 4.3: les paramètres de fonctionnement de l'échangeur E504 (design)**

Fluide	MEA (coté calandre)	EDM (coté tube)
Débit (kg/hr)	54 964	148 404
Température d'entrée (°C)	T <sub>1</sub> =72,2	t <sub>1</sub> =25
Température de sortie (°C)	T <sub>2</sub> =37,7	t <sub>2</sub> =38,4

**Tableau 4.4: les caractéristiques mécaniques de l'échangeur E504 (Annexe1)**

Caractéristiques mécaniques	Paramètres
Longueur du faisceau	L= 6,096m
Nombre de passe:	
Calandre	n <sub>c</sub> = 1
Faisceau	n <sub>t</sub> = 2
Diamètre extérieur des tubes	d <sub>o</sub> = 0,01905m
Diamètre intérieur des tubes	d <sub>i</sub> = 0,01351m
Diamètre extérieur calandre	d <sub>c</sub> = 0,635m
Disposition des tubes	Pas carré
Le pas	p = 0,0254 m

### 4.3 Dimensionnement de l'échangeur

Pour le dimensionnement de l'échangeur thermique, nous utilisons la méthode proposée par Kern.

#### 4.3.1 Calcul thermique

##### 1. Quantité de chaleur

On établit un bilan thermique global de l'échangeur, en négligeant les pertes thermiques, donc la puissance thermique  $\dot{Q}$  perdue par le fluide chaud est égale à celle reçue par le fluide froid.

La conservation du flux thermique  $\dot{Q}$  après échange thermique entre les deux fluides est calculée par utilisation de l'équation suivante:

$$\dot{Q} = M \cdot C_p \cdot (\Delta t) = M \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1)$$

Avec:

$\dot{Q}$ : La quantité de chaleur horaire (kJ/h).

M: Débit massique circulant à l'intérieur des tubes (kg/h).

Cp : Chaleur spécifique moyenne du fluide froid (kJ /kg °C).

t<sub>1</sub>: Température d'entrée côté tube (°C).

t<sub>2</sub>: Température de sortie côté tube (°C).

- 2. Calcul du rendement de l'échangeur :** A cause de la formation des dépôts important sur les parois des tubes, l'échange thermique entre l'eau de mer et la solution MEA a baissé. Ceci est déterminé par le calcul du rendement ( $\eta$ ) de l'échangeur.

$$\eta = \frac{M' * Cp' * (T_2 - T_1)}{M * Cp * (t_2 - t_1)}$$

Où :

M': Débit massique circulant coté calandre (kg/h).

Cp' : Chaleur spécifique moyenne du fluide chaud (kJ /kg °C).

T<sub>1</sub>: Température d'entrée côté calandre (°C).

T<sub>2</sub>: Température de sortie côté calandre (°C).

### 3. Calcul de l'écart logarithmique moyen de température ( $\Delta T_{LM}$ ):

Dans un échangeur de chaleur, les températures des deux fluides ne sont pas constantes. L'étude de l'écart logarithmique moyen de température dans un appareil s'effectue en supposant que le coefficient global et les chaleurs spécifiques sont constants en tout point et qu'il n'y a pas une perte thermique.

L'écart thermique  $\Delta T_{LM}$  est déterminé par l'équation suivante :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right)}$$

Où  $\Delta T_{max}$  ,  $\Delta T_{min}$  sont les variations de températures des deux fluides à chaque extrémité.

$\Delta T_{max} = T_1 - t_2$  à l'extrémité chaude.

$\Delta T_{\min} = T_2 - t_1$  à l'extrémité froide.

$T_1$  = Température d'entrée du fluide chaud (MEA).

$T_2$  = Température de sortie du fluide chaud (MEA).

$t_1$  = Température d'entrée du fluide froid (EDM).

$t_2$  = Température de sortie du fluide froid (EDM).

### 4. Calcul du facteur de correction (F)

Le facteur (F) varie suivant le nombre de passe de chaque côté, il prend dans le cas idéal la valeur de 1. On a choisi pour le coté calandre la valeur 1 et pour le coté tube la valeur 2. On détermine le facteur de correction (F) suivant les valeurs des paramètres R et E à partir de l'abaque (Annexe 2).

Les rapports R et E sont définis comme suivant :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{et} \quad E = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

### 5. Calcul de la surface disponible ( $A_d$ )

Nous estimons le coefficient sale  $U_s'$  à partir des tables de l'annexe 3.

$$1250 \text{ Kcal} / (\text{hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) < U_s' < 2500 \text{ Kcal} / (\text{hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

La valeur estimée est :  $U_s' = 1300 \text{ Kcal} / (\text{hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Estimation de la surface d'échange:

$$A' = \frac{Q}{U_s' * F * \Delta TLM}$$

Q: Quantité de chaleur du fluide froid (kJ/h)

F : Facteur de correction

$\Delta TLM$ : Ecart de température

### 6. Calcul du nombre des tubes ( $N'_t$ )

Calcul de la surface d'échange d'un tube :

$$a = \pi * d_o * l$$

Estimation du nombre de tubes par calandre :

$$N_t = \frac{A'}{a \cdot n_c} = \frac{86,3}{0,364 \cdot 1}$$

$d_o$  : Diamètre extérieur de tubes

$l$  : Longueur de tubes

$N_t$  : Nombre de tubes

D'après le tableau (Annexe 4), le diamètre de calandre correspondant à ce choix est  $d_c = 54$  cm .

### 7. Calcul du coefficient de transfert sale $U_S$

$$U_S = U'_S * \frac{N_t}{Nt}$$

### 8. Calcul du coefficient de transfert propre $U_P$

Pour calculer le coefficient de transfert propre ( $U_P$ ), il est nécessaire de passer par les étapes suivantes:

#### Coté faisceau (EDM):

- Section de passage est réalisé à partir l'équation:

$$a_t = \frac{N_t * \pi * d_i^2}{n_t * 4}$$

Où :  $a_t$  est la section de passage coté tube ( $m^2$ ).

$d_i$  est le diamètre intérieur du tube.

$N_t$  est le nombre total des tubes.

$n_t$  est le nombre de passe coté tube.

- Vitesse massique:

La vitesse massique est exprimé par :

$$G_t = Q_m / a_t$$

Où :  $Q_m$  est le débit massique horaire du fluide froid (EDM) (kg/hr).

- Nombre de Reynolds:

Le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel. Il représente pour un fluide en écoulement le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Il est défini par l'expression suivante :

$$Re_t = d_i * G_t / \mu$$

Où :  $G_t$  est la vitesse massique à l'intérieur des tubes ( $\text{kg}/(\text{hr}.\text{m}^2)$ ).

$\mu$  est la viscosité dynamique du fluide utilisé ( $\text{kg}/\text{m}.\text{hr}$ ).

$d_i$  est le diamètre intérieur du tube.

Le facteur  $h_i$ , appelé coefficient du film interne, représente la conductance thermique par unité de surface de la paroi interne du tube. Il s'écrit :

$$h_i = j_h * \frac{\lambda}{d_i} * (C_p * \frac{\mu}{\lambda})^{1/3}$$

On calcule le facteur de transfert thermique à l'aide de l'équation suivante :

$$j_h = 0,027 * (\text{Re}_t)^{0,8}$$

Les valeurs du coefficient du film interne doivent être corrigées en tenant compte du rapport des diamètres intérieure et extérieure.

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

### **Coté calandre (MEA):**

- La Section de passage par calandre est exprimée par la relation suivante :

$$a_{cT} = \frac{D_c}{p} * (P - d_o) * B$$

- Vitesse massique:

$$G_t = Q_m / a_t$$

- Diamètre équivalent:

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

- Nombre de Reynolds:

$$\text{Re}_{cT} = \frac{D_e * G_c T}{\mu'}$$

On estime le facteur de transfert thermique à l'aide de l'expression suivante :

$$j'_h = 0,36 * (\text{Re}_c)^{0,55}$$

- **Calcul du coefficient de film externe :**

$$h_o = j_h' * \frac{\lambda'}{d_i} * (C_p * \frac{\mu'}{\lambda'})^{1/3}$$

Avec,  $\Phi_t$ : Facteur de correction

$$\Phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t}\right)^{0,14} = 1$$

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

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

➤ **Coefficient du transfert propre :**  $U_P = \frac{h_o * h_{io}}{h_o + h_{io}}$

➤ **Vérification de la résistance d'encrassement :**

$$R_s = \frac{U_P - U_S}{U_P * U_S}$$

## 9. Calcul des pertes de charge

**Coté faisceau :** l'étude fondamentale de l'écoulement des fluides a permis d'établir la formule de Fanning en régime isotherme pour une longueur droite de tuyauterie de diamètre uniforme. Dans le cas d'un faisceau d'échange, Kern propose la perte de charge totale à l'intérieur des tubes qui s'écrira donc:

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

Avec :

$f_t$ : Facteur de friction.

$G_t$  : Vitesse massique de fluide froid (kg/hr.m<sup>2</sup>).

$l$  : Longueur de tube (m).

$d_i$  : Diamètre intérieure de tube(m).

$n_c$  : Nombre de passes côté calandre.

$n_t$  : Nombre de passes côté tubes.

$d$  : Densité du fluide froid (l'eau).

**Coté calandre:**

$$\Delta P_c = \frac{n_c * f_c * G_{tc}^2 * (N_c + 1) * D_c}{1.271 * 10^{15} * \Phi_c * d' * D_e}$$

Avec :

$G_c$  : Vitesse massique de fluide chaud (kg/m<sup>2</sup>hr).

$N_c$  : Nombre de chicanes.

$D_e$  : Diamètre équivalent (m).

$\Phi_c = (\mu/\mu_c)^{0,14} = 1$  en régime turbulent.

Les résultats du calcul de dimensionnement de l'échangeur obtenus dans ce cas sont donnés dans le tableau 4.5.

**Tableau 4.5 Les résultats de dimensionnement du refroidisseur E-504**

Paramètre	Calcul numérique
Quantité de taux de chaleur	$\dot{Q} = 148\,404 * 4,004 * (38,4 - 25) = 7962\,408,85 \text{ kJ/h}$
Rendement de l'échangeur (design, actuel)	$\eta_d = \frac{54\,964 * (72,2 - 37,7)}{148\,404 * (38,4 - 25)} = 0,953 \text{ (95,3 \%)}$ $\eta_a = \frac{42\,780 * (72,9 - 47)}{103\,079,6 * (38 - 25)} = 0,826 \text{ (82,6 \%)}$
l'écart logarithmique moyen de température	$\Delta T_{LM} = \frac{(72,2 - 38,4) - (37,7 - 25)}{\ln\left(\frac{72,2 - 38,4}{37,7 - 25}\right)} = 21,56 \text{ }^\circ\text{C}$
facteur de correction (F)	$R = \frac{72,2 - 37,7}{38,5 - 25} = 2,57 \text{ et } E = \frac{38,5 - 25}{72,2 - 25} = 0,283$ <p>Facteur de correction = 0,79 (annexe 2)</p>
surface disponible ( $A_d$ )	$A' = \frac{7962408,9}{5434 * 0,79 * 21,56} = 86,3 \text{ m}^2$
Coefficient de transfert sale	La valeur estimée $U'_s = 1300 * 4,18 = 5434$ (Annexe 3)
Surface d'échange d'un tube	$a = 3,14 * 0,01905 \text{ m} * 6,096 \text{ m} = 0,364 \text{ m}^2$

Nombre de tubes	$N'_t = \frac{86,3}{0,364*1} = 238 \text{ tubes}$
Coefficient de transfert propre	$U_s = 5434 \text{ (kJ/hr.m}^2 \cdot \text{°C)} * \frac{238}{410} = 3154,37 \text{ kJ / (hr. m}^2 \cdot \text{°C)}$
<b>Coefficient de transfert propre coté tubes (EDM)</b>	
Section de passage	$a_t = \frac{410 * 3,14 * (1,351 * 10^{-2})^2}{2 * 4} = 0,0293 \text{ m}^2$
Vitesse massique	$G_t = 148404 \text{ (kg / h)} / 0,0293 \text{ (m}^2) = 5\,064\,982,93 \text{ kg/(hr.m}^2)$
Nombre de Reynolds	$Re_t = 1,351 * 10^{-2} \text{ (m)} * 5\,064\,982,93 \text{ (kg/hr.m}^2) / 3600 \text{ (s.hr}^{-1}) * (0,847 * 10^{-3} \text{ Pa.s)} = 22\,440,68$
Coefficient du film interne	$h_i = 81 * \frac{2,2032 \text{ (kJ.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})}{0,01351 \text{ (m)}} * \left( \frac{(4,004 \text{ kJ.Kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) * 3,0492 \text{ (kg.m}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1})}{2,2032 \text{ (kJ.m}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})} \right)^{1/3}$ $= 23375,394 \frac{\text{kJ}}{\text{hr.m}^2 \cdot \text{°C}}$
Correction du Coefficient du film interne	$h_{io} = 23375,394 \text{ (Kj. m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{°K}^{-1}) * \frac{1,351 * 10^{-2} \text{ (m)}}{1,905 * 10^{-2} \text{ (m)}}$ $h_{io} = 16\,577,51 \text{ kJ/(hr. m}^2 \cdot \text{°K)}$
<b>Coefficient de transfert propre coté calandre (MEA)</b>	
Section de passage	$a_{cT} = \frac{6,35 * 10^{-2} \text{ (m)}}{2,54 * 10^{-2} \text{ (m)}} * (2,54 - 1,905) \cdot 10^{-2} \text{ (m)} * 1 \text{ (m)}$ $a_{cT} = 0,0158 \text{ m}^2$
Vitesse massique	$G_t = Q_m / a_t = 54964 \text{ (kg / h)} / 0,0158 \text{ (m}^2) = 347\,8734,17 \text{ kg/(hr.m}^2)$
Diamètre équivalent	$D_e = \frac{4 * (0,0254)^2}{3,14 * 0,01905} - 0,01905 = 0,02409$
Nombre de Reynolds	$Re_{cT} = \frac{2,409 \cdot 10^{-2} \text{ (m)} * 347873,17 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{hr.m}^2} \right)}{3600 \left( \frac{\text{s}}{\text{hr}} \right) \cdot (0,4505 * 10^{-2} \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr.m}} \right))} = 5167,26$
Coefficient du film interne	$h_i = 39 * \frac{2,1038 \text{ (kJ.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})}{2409 * 10^{-2} \text{ (m)}} * \left( \frac{(4,199 \text{ kJ.Kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) * 16,218 \text{ (kg.m}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1})}{2,1038 \text{ (kJ.m}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})} \right)^{1/3}$
Correction du Coefficient du film interne	$h_{io} = 16366,86 \text{ (kJ/ hr. m}^2 \cdot \text{°C)}$



<b>Coefficient du transfert propre</b>	$U_P = \frac{10723 (kJ.hr^{-1}.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}) \times 16366,86 (kJ.hr^{-1}.m^{-2}.^{\circ}C^{-1})}{(10723+16366,86)(kJ.hr^{-1}.m^{-2}.^{\circ}C^{-1})}$ $U_P = 6\,478,506 \text{ KJ/ (hr.m}^2. ^{\circ}\text{C)}$
<b>Résistance d'encrassement</b>	$\frac{6478,506 (kJ.hr^{-1}.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}) - 3154,37 (kJ.hr^{-1}.m^{-2}.^{\circ}C^{-1})}{(6478,506 \times 3154,37)(kJ.hr^{-1}.m^{-2}.^{\circ}C^{-1})^2}$ $R_S = 0,000162 \text{ hr. m}^2. ^{\circ}\text{C/kJ}$
<b>Perte de charge coté tubes</b>	
<b>Facteur de friction</b>	$f_t = 0,005 * (2240,68)^{-0,33} = 0,000183$
<b>Perte de charge</b>	$\Delta P_t = \frac{1 * 2 * (5064982,93 (kg.hr^{-1}.m^{-2}))^2}{1,271 * 10^{15} * 0,8559}$ $* \left[ \frac{0,000183 * 6,096 (m)}{1,351 * 10^{-2} (m) * 1} + 2 \right]$ $\Delta P_t = 0,098 * 10^{-4} \text{ kg/cm}^2$
<b>Perte de charge coté calandre</b>	
<b>Facteur de friction</b>	$f_c = 1,87 * (Re_c)^{-0,2} = 0,338$
<b>Perte de charge</b>	$\Delta P_c = \frac{1 * 0,338 * (3478734,17 (kg.hr^{-1}.m^{-2}))^2 * (9+1) * 63,5 * 10^{-2} m}{1,271 * 10^{15} * 0,995 * 1 * 2,41 * 10^{-2}}$ $\Delta P_c = 0,0252 * 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$

#### 4.4 Interprétation

Plus le nombre de Reynolds est élevé plus les échanges thermiques sont élevés mais aussi les pertes de charge sont aussi élevés par conséquent il faudra chercher un compromis entre ces deux phénomènes.

### 4.5 Recommendations

L'échangeur de chaleur E-504 à un rôle très important dans le procédé de traitement de gaz, pour résoudre les problèmes qui ont été cités, il y a lieu de réaliser les actions suivantes :

- Installer les débitmètres d'hypochlorite de sodium sur les lignes d'injection au niveau des baies d'aspiration des pompes principale d'eau de mer.
- Respecter les fréquences de vidange des bouchages de piège à moules.
- Déboucher mécaniquement les tubes totalement obturés (actuellement), par la méthode hydro-blaste à l'aide jet cleaner.
- Procéder au lessivage chimique des faisceaux tubulaires dans le cas ou l'inspection révèle un bouchage partiel des tubes par le tartre.
- Faire une inspection systématique des faisceaux tubulaires de cet échangeur chaque six mois.
- Inspection régulières des anodes sacrificielles
- Respecter les conditions d'exploitation de l'échangeur.
- Injecter dans le circuit de refroidissement de l'eau de mer des inhibiteurs contre la corrosion.
- Respecter la dose de la MEA pour éviter la dégradation des surfaces extérieures des tubes.

---

## Conclusion générale

Pendant la période de stage d'une durée d'un mois, notre objectif était l'étude des problèmes de dégradation du refroidisseur E504 EDM/MEA de la section de décarbonatation du complexe GL1/Z.

Suite aux différents problèmes vécus au niveau de refroidissement de la solution MEA pauvre, une insuffisance de transfert de chaleur a été enregistrée.

Les résultats d'analyse des dépôts des faisceaux tubulaires de l'échangeur E504, donnés par le laboratoire du complexe GL1/Z, montrent la présence d'une grande quantité de sels de calcium et magnésium. Ces dépôts formés peuvent boucher les tubes qui induisent une diminution du transfert de chaleur entre l'eau de mer et la solution de MEA, ce qui provoque un échauffement local du métal, ayant pour conséquence une baisse des caractéristiques mécaniques de l'échangeur.

L'analyse chimique du métal puis l'analyse des parois interne et externe des tubes de l'échangeur E504, nous a permis de conclure que la cause principale de la fissuration des tubes est due aux :

- une corrosion sous contrainte due aux forces mécaniques de vibration des faisceaux tubulaires.
- le MEA est le responsable de la corrosion de la paroi externe des tubes.
- l'eau de mer qui reste la plus corrosive.

Les conséquences de ces problèmes sont :

- Une diminution de la production.
- Une diminution du rendement thermique de l'appareil.
- Arrêt des installations.
- Impact écologique sur l'environnement, déversement de la MEA vers les égouts.

Alors, vue l'importance du problème, il est à noter qu'il faut prendre en charge cette préoccupation qui risque de s'aggraver dans le futur car il s'avère que ces problèmes sont évolutifs sur le refroidisseur E-504 de ce fait nous prévoyons ces recommandations.

---

# Références bibliographiques

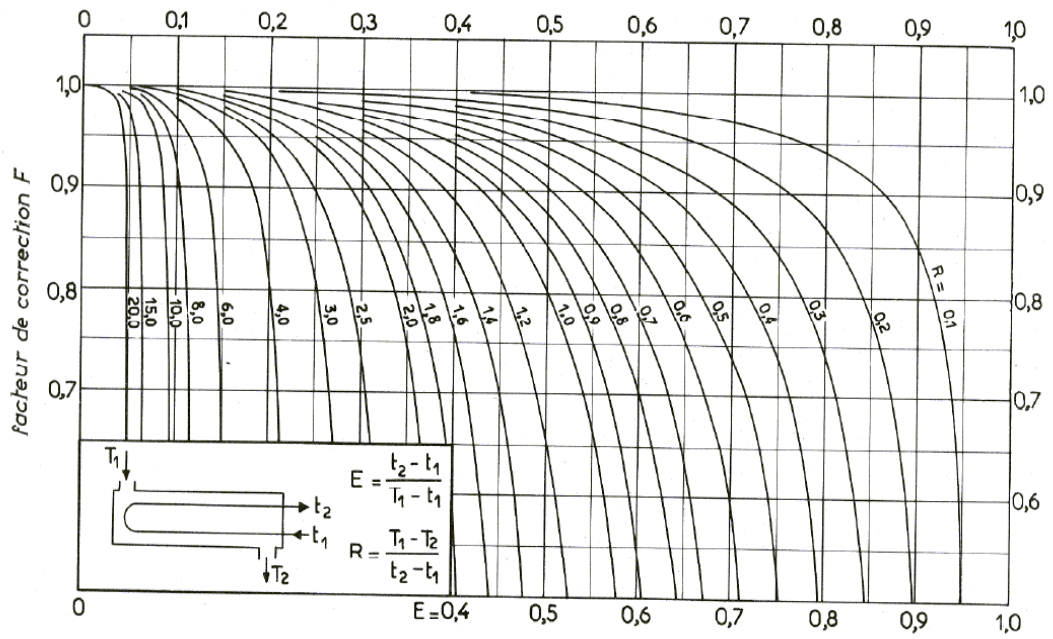
- [1] MW. PULLMAN KELLOGG COMPANY “Manuel opératoire” Volume I, II, III  
USA 1994.
- [2] TABELAIDET Boussad, Senior Ingénieur Process, Récupération de la  
monoethanolamine et préservation des sécheurs, document réaliser à SONATRACH,  
Activité AVAL, Division GNL, Complexe GL1/Z, 2003.
- [3] A. Khohl, R. Nielson, Gas Purification, Gulf Publishing Co., 5th edition, 1985.
- [4] HADAD Samira, Magister, Etude de l'endommagement des clapets de la colonne  
d'absorption de CO<sub>2</sub> F-502 au niveau de la section de décarbonatation des trains  
300 500 et 600 du Complexe GL1Z, université des Sciences et de la Technologie  
d'Oran
- [5] Corrosion et protection, H.Uhlig, édition Dunod Paris, 1970.
- [6] MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C (2014). TOME 1:  
Echangeurs Thermiques -: Technologies, Conception et dimensionnement, GRETh.
- [7] AMOKRANE Samira, Thèse de doctorat, Analyse et valorisation des gaz naturel  
et gaz torches par les complexes de liquéfaction, Université de Alger, 2007.

---

# Annexes

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

Annexe 1 : Caractéristiques des tubes d'échangeur



a. une passe côté calandre, deux passes (ou plus) côté tubes.

## Annexe 2 : Facteur de correction

TABLEAU V.1.8  
COEFFICIENTS DE TRANSFERT SALE  $U_s^{(1)}$

ÉCHANGEURS		$U_s$	
FLUIDE CHAUD	FLUIDE FROID	kcal/h.m <sup>2</sup> .°C	BTU/hr. ft <sup>2</sup> .°F
Eau .....	Eau .....	1 250 - 2 500	250 - 500
Solutions aqueuses .....	Solutions aqueuses .....	1 250 - 2 500	250 - 500
Hydrocarbures légers <sup>(2)</sup> .....	Hydrocarbures légers .....	200 - 370	40 - 75
Hydrocarbures moyens <sup>(2)</sup> .....	Hydrocarbures moyens .....	100 - 300	20 - 60
Hydrocarbures lourds <sup>(2)</sup> .....	Hydrocarbures lourds .....	50 - 200	10 - 40
Hydrocarbures lourds .....	Hydrocarbures légers .....	150 - 300	30 - 60
Hydrocarbures légers .....	Hydrocarbures lourds .....	50 - 200	10 - 40
RÉFRIGÉRANTS			
Eau, méthanol, ammoniacque et solutions aqueuses .....	Eau .....	1 250 - 2 500	250 - 500
Hydrocarbures légers .....	Eau .....	370 - 730	75 - 150
Hydrocarbures moyens .....	Eau .....	250 - 610	50 - 125
Hydrocarbures lourds .....	Eau .....	25 - 730	5 - 75
Gaz .....	Eau .....	10 - 250	2 - 50
Eau .....	Saumure .....	500 - 1 000	100 - 200
Hydrocarbures légers .....	Saumure .....	200 - 500	40 - 100
RÉCHAUFFEURS			
Vapeur d'eau .....	Eau, méthanol, ammoniacque .....	1 000 - 3 400	200 - 700
Vapeur d'eau .....	Solutions aqueuses : $\mu < 2$ cPo ...	1 000 - 3 400	200 - 700
	$\mu > 2$ cPo ...	500 - 2 500	100 - 500
Vapeur d'eau .....	Hydrocarbures légers .....	500 - 1 000	100 - 200
Vapeur d'eau .....	Hydrocarbures moyens .....	250 - 500	50 - 100
Vapeur d'eau .....	Hydrocarbures lourds .....	30 - 300	6 - 60
Vapeur d'eau .....	Gaz .....	25 - 250	5 - 50
Dowtherm .....	Gaz .....	20 - 200	4 - 40
Dowtherm .....	Hydrocarbures lourds .....	30 - 300	6 - 60

Annexe 3 : Détermination du Coefficient de transfert global  $U_s$



DISPOSITION DES TUBES EN CARRÉ

D <sub>c</sub> calandre		Tubes : 3/4'' P = 1''				Tubes : 1'' P = 1 1/4''				Tubes : 1 1/4'' P = 1 9/16''			
		nombre de passes : n <sub>t</sub>				nombre de passes : n <sub>t</sub>				nombre de passes : n <sub>t</sub>			
(in)	(cm)	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
8	20,3	26	20	20		16	14						
10	25,4	52	40	36		32	26			12	10		
12	30,5	76	68	68	60	45	40	38	36	24	22	16	16
13 1/4	33,7	90	82	76	70	56	52	48	44	30	30	22	22
15 1/4	38,7	124	116	108	108	76	68	68	64	40	37	35	31
17 1/4	43,9	166	158	150	142	112	96	90	82	53	51	48	44
19 1/4	48,9	220	204	192	188	132	128	122	116	73	71	64	56
21 1/4	54,0	270	246	240	234	166	158	152	148	90	86	82	78
23 1/4	59,1	324	308	302	292	208	192	184	184	112	106	102	96
25	63,5	394	370	356	346	252	238	226	222	135	127	123	115
27	68,6	460	432	420	408	288	278	268	260	160	151	146	140
29	73,7	526	480	468	456	326	300	294	286	188	178	174	166
31	78,8	640	600	580	560	398	380	368	358	220	209	202	193
33	83,8	718	688	676	648	460	432	420	414	252	244	238	226
35	88,9	824	780	766	748	518	488	484	472	287	275	268	258
37	94,0	914	886	866	838	574	562	544	532	322	311	304	293
39	99,0	1024	982	968	948	644	624	612	600	362	348	342	336

Annexe 4 : Disposition des tubes en carré