



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCÉDES

Option: GENIE CHIMIQUE

Par

Nom et Prénom : Laid Nor El houda

Merine Leyla

**Etude du problème d'encrassement au niveau du refroidisseur de
MEA E-504**

Soutenue le 13/06/ 2019 devant le jury composé de :

Président :	S. BENDENIA	Pro.	Université de Mostaganem
Examineur :	H. DIB	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	C. BENDENIA	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2018/2019

SOMMAIRE

Introduction générale	1
CHAPITRE I	Description du complexe GL1/Z
I.1. Introduction	2
I.2. Historique du complexe GL1/Z	2
I.3. Description et mission du complexe GL1/Z	2
I.3.1. Zone utilités	3
I.3.2. Zone process	4
I.3.3. Stockage et chargement du GNL	10
I.4. Conclusion	11
CHAPITRE II	La décarbonatation et les échangeurs de chaleur
II.1. Introduction	12
II.2. La section de décarbonatation	12
II.2.1. Caractéristiques de la réaction chimique	12
II.2.2. Différents équipements de la section	13
II.2.3. Procédés d'absorption du CO ₂	14
II.2.4. Régénération de la solution	14
II.2.5. Epuration de la solution MEA	16
II.2.6. Stockage de la solution	16
II.3. Les échangeurs	18
II.3.1. Définitions et applications	18
II.3.2. Différents types d'appareils d'échange de chaleur	18
II.3.3. Différents types d'échangeurs	19
II.3.4. Autres types d'échangeurs	21
II.4. Notion sur l'encrassement des échangeurs	22
II.4.1. La corrosion	22
II.4.2. L'encrassement biologique	23
II.4.3. L'encrassement par réaction chimique	23
II.4.4. L'entartrage	24
II.4.5. L'encrassement particulaire	24
II.5. Effets de l'encrassement sur les performances thermiques d'un échangeurs de chaleur	24
II.6. Conclusion	25

SOMMAIRE

CHAPITRE III problématique

III.1. Introduction	26
III.2. Description et rôle de l'échangeur E.504	26
III.2.1. Des tubes	26
III.2.2. La calandre	26
III.2.3. Boîte de distribution	27
III.3. Problématique	28
III.4. Historique de l'échangeur E.504	28
III.5. Des causes de mauvais de transfert de chaleur du refroidisseur E.504	30
III.6. Analyse des causes	31
III.6.1. Débit d'eau de mer insuffisant de refroidissement	31
III.6.2. Encrassement de la boîte de distribution de l'eau de mer	34
III.6.3. Encrassement de la paroi interne des tubes	34
III.6.4. Dégradation de la surface externe des tubes	37
III.7. Interprétation des résultats	38
III.8. Les conséquences de ces problèmes	39
III.9. Conclusion	40

Conclusion et recommandations

Conclusion	39
Recommandation	40

REMERCIEMENTS

En premier lieu, Nous remercions Dieu tout puissant qui nous a donné la force de mener à terme ce travail.

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au niveau du complexe GNL1/Z, sous la direction de Mr. KHALFA, Mr. MACHEMOUM et Mr. KHALDI que nous exprimons nos profonds gratitude de nous avoir accepté et de nous apporter de l'aide. Egalement, nous tenons à remercier Mr. KRIM et leur équipe du train 300/400 et l'ensemble du personnel du complexe.

Nous remercions sincèrement Notre encadreur Mme C. BENDENIA, Maitre de conférences à l'Université de Mostaganem, de nous avoir encadrés et dirigés.

Un grand remerciement tout particulier au professeur S. BENDENIA d'avoir accepté de présider notre jury.

Nos vifs remerciements s'adressent également Mme H. DIB, Maitre de conférences à l'Université de Mostaganem, d'avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.

Beaucoup de personnes ont contribué à la réalisation de ce travail, par leur amabilité leur soutien, leurs encouragements, leur disponibilité et leur aide, que ces personnes nous pardonnent...

Merci à Nos amis(es) qui nous ont soutenues depuis toujours...

Nos sincères remerciements iront à tous ceux que Nous n'ont pas cités et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, nos plus grand merci pour notre grand dieu tout puissant.

Dédicace

Avant tout c'est grâce à dieu que je suis arrivée là.

A mes très chers parents, la lumière de ma vie

*A mon père BEN OUDA qui a été un apport très
appréciable durant toute ma vie et en particulier durant
toutes mes années estudiantines.*

A mes très chers frères et sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes enseignants.

A mes chers amis.

A tous ceux qui m'ont aidé.

A ma promotion GC (2018/2019)

Merine Leyla.

Dédicace

Avant tout c'est grâce à dieu que je suis arrivée là.

Je dédie ce simple travail à mes chers parents qui m'ont

Encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont fourni

Les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui, surtout une pieuse pensée à

mon père défunt.

Je le dédie aussi à ma sœur et mes frères. Une carrière pleine de succès.

Que dieu les garde tous.

A mes très chère amies.

A tous mes enseignants.

A tous ceux qui m'ont aidé.

A tous les êtres chers à mon cœur.

Laid Nor El Houda.

INTRODUCTION GENERALE

La liquéfaction du gaz naturel est un impératif lié au transport du gaz naturel. La liquéfaction ne peut s'effectuer qu'à la suite d'un certain nombre de traitements préliminaires destinés à purifier le gaz naturel de composants qui peuvent être source de graves problèmes dans le train de liquéfaction, tels que le dioxyde de carbone, l'eau, et le mercure [1].

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 «CO₂» contenu dans le gaz d'alimentation. Le passage des températures ambiantes aux températures cryogéniques (-162°C) pour sa liquéfaction impose la nécessité d'éliminer ce gaz carbonique de la composition initiale afin d'éviter la formation de glace carbonique dans l'extrémité froide des sections cryogéniques de l'installation. Pour cela, une solution chimique appelée Monoéthanolamine (MEA) à 15% en poids est utilisée comme solvant dans une colonne d'absorption [1].

Parmi les problèmes vécus au niveau des unités de liquéfaction du gaz naturel (GL1/Z); nous citons le problème d'encrassement de l'échangeur E-504. Ce dernier permet de régler la température finale de la MEA pauvre qui vient d'être régénérée à 38°C, c'est-à-dire la refroidir, la MEA pauvre à 15% passant coté calandre et l'eau de mer passant du coté tubes.

Ce travail est présenté, outre l'introduction générale, sous forme de quatre parties.

- ❖ La première partie traite des généralités sur le gaz naturel et une description du procédé de gaz liquéfié au niveau du complexe GL1/Z.
- ❖ La seconde partie comporte la description de la section de décarbonatation, les différents d'échangeurs de chaleurs et le phénomène d'encrassement.
- ❖ La troisième partie est consacrée à la problématique, nous étudions les causes possibles qui peuvent mener à l'apparition le problème d'encrassement pour proposer des solutions.

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU COMPLEXE GL1/Z

I.1. INTRODUCTION

Le gaz naturel est un combustible fossile, il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures trouvé naturellement sous forme gazeuse. C'est la deuxième source d'énergie la plus utilisée dans le monde après le pétrole et son usage s'est développé rapidement.

Il est constitué essentiellement de méthane CH_4 , et aussi des hydrocarbures plus lourds que le méthane (de C_2 à C_8), de l'humidité, du dioxyde de carbone CO_2 , et de l'azote N_2 [2].

Le gaz naturel est inodore, incolore et sans saveur donc indétectable par les sens humains. L'odorat est une mesure de sécurité qui consiste à communiquer au gaz naturel une odeur caractéristique qui ne puisse être confondue avec aucune autre et qui soit détectable par tous.

Il est connu surtout pour son usage domestique, le chauffage, cuisson et comme matière première dans l'industrie chimique, notamment pour la pétrochimie et le raffinage. Il sert à la production d'électricité et le transport.

I.2. HISTORIQUE DU COMPLEXE GL1/Z

Le premier contrat, signé avec la société américaine El Paso en 1969, portant sur une quantité de 10 milliards de m^3 de GNL par an pendant 25 ans, avait amené la Sonatrach à entreprendre à Béthioua la construction d'une importante usine de liquéfaction de gaz naturel, à savoir le complexe GL1/Z. Celui-ci a été finalement réalisé sur une superficie de 72 hectares, par la société américaine Chemico. La première pierre a été posée le 16 juin 1973 par le défunt président Houari Boumedienne. Suite à la résiliation du contrat avec la dite société, Sonatrach avait alors fait appel à une autre entreprise d'engineering, Bechtel, pour poursuivre les travaux des constructions le 18 février 1976. La première production de cette usine a débuté au mois de février 1978.

I.3. DESCRIPTION ET MISSION DU COMPLEXE GL1/Z

Le complexe GL1/Z un des fleurons de la technologie gazière, il s'étend sur une superficie de 72 hectares, situé à Bethioua à 8 Km à l'est de la ville d'Arzew, il comprend 06 trains de liquéfaction identiques fonctionnant en parallèle, une capacité de stockage de 300000 m^3 (03 bacs de 100000 m^3 chacun) stocké à la température -162°C et à la pression atmosphérique.

Le complexe GL1/Z a pour mission de traiter le gaz naturel transporté par gazoduc en provenance des champs gaziers de Hassi R'mel en gaz naturel liquéfié (GNL) avec possibilité d'extraction de la gazoline, ce GNL est ensuite transporté dans des méthaniers vers l'étranger.

Il englobe trois zones essentielles à savoir :

I.3.1. Zone utilités

Le complexe est doté d'installations auxiliaires pour fournir dont le procédé à besoin et lui assurer une autonomie de fonctionnement :

I.3.1.1 Source d'énergie

a) Vapeur haute pression HP

La vapeur HP est utilisée pour l'entraînement des turbines des compresseurs, elle est produite par les chaudières process qui sont au nombre de 17 dont 05 reformées et 12 peuvent être mise en service de capacité chacune 115 t. h^{-1} de vapeurs à 62 bars et 442°C et par 06 chaudières de 400 t. h^{-1} et trois chaudières de 91 t. h^{-1} pour utilité.

b) Vapeur basse pression BP

Elle est obtenue après détente par des vannes PV et désurchauffée par des TV pour obtenir successivement 16.5 bars, 10.3 bars et 3.45 bars utilisés pour l'entraînement des turbo-pompes MEA, turbo-pompes d'huile et fuel gaz, des éjecteurs pour la création du vide au niveau des condenseurs à surface, épurateur MEA et rebouilleurs, ainsi qu'une chaudière de 51 t. h^{-1} à 27 bars.

I.3.1.2 Source de refroidissement

L'eau est la source de refroidissement transportée par un ensemble de six (06) pompes de grande puissance de $35\,000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

I.3.1.3 Production d'électricité

La production d'électricité est assurée par trois (03) alternateurs entraînés par des turbines à vapeurs. Les turbo-alternateurs fournissent l'énergie de 18 MW par générateur plus un (01) branchement Sonalgaz.

I.3.1.4 Unités de dessalement

L'eau distillée est utilisé essentiellement pour générer de la vapeur, ou comme réfrigérant dans les échangeurs et les condenseurs sensibles à la corrosion.

La production de l'eau distillée est assurée par six dessaleurs dont cinq (05) utilisent le procédé MSF et un utilise la compression de vapeur.

I.3.1.5 Production d'air comprimé

L'air instrument est utilisé pour l'alimentation des instruments de contrôle et les machines de régulation pneumatique, l'air de service est utilisé pour le nettoyage. Une fois comprimé l'air instrument subit un séchage en préalable cela pour éviter la corrosion des organes d'instrumentation, le besoin du complexe est $4600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, Cet air comprimé est assurée par un ensemble de cinq compresseurs centrifuges avec une pression de refoulement de 10 bars.

I.3.1.6 Azote

L'azote est utilisé sous forme de vapeur pour purger les circuits et pour certaines opérations de liquéfaction. Il est obtenu sous forme gazeuse ou liquide dans l'unité d'azote à partir du fractionnement de l'air, il est liquéfié et stocké sous forme liquide.

I.3.2. Zone process [3]

Le principe de la liquéfaction du GN consiste à abaisser son enthalpie par réfrigération jusqu'à une température de stockage de -162°C . Basé sur ce principe, l'usine de liquéfaction du gaz naturel GL1/Z a été conçue pour assurer le transport du gaz naturel provenant de Hassi R'mel sous forme liquide.

L'usine comprend six trains de process indépendants, fonctionnant en parallèle, le gaz naturel entrant dans chaque train doit être traité avant d'être liquéfié. Les composants du GN tels que le gaz carbonique, la vapeur d'eau et les hydrocarbures lourds ont tendance à se solidifier aux zones froides de l'usine à provoquant l'obstruction au niveau des tuyauteries de service, c'est pourquoi ces composants condensables sont d'abord éliminés dans une série d'unités de traitement avant que le GN ne puisse être liquéfié.

La liquéfaction d'un gaz n'est possible que si le gaz naturel traité, riche en constituants légers, est refroidi à une température inférieure à son point de rosée qui est fonction de sa pression.

En général pour liquéfier ce gaz, il faudrait le pré-refroidir, le refroidir et le condenser utilisant des réfrigérants vaporisables afin d'éliminer toute la chaleur.

Le procédé de liquéfaction est de type APCI (Air Product Chemical Incorporation) à fluide réfrigérant à composants multiples (MCR) pré-refroidi au propane. Chaque train est prévu pour produire l'équivalent de 8870 m^3 de GNL par jour.

Le gaz naturel arrive à une pression de 42 bars et à une température de 38°C et subit différents traitement à savoir :

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU COMPLEXE GL1/Z

I.3.2.1. Section de décarbonatation

Le gaz d'alimentation à son entrée dans le train passe par un ballon séparateur où tous les hydrocarbures lourds en suspension sont récupérés et éliminés, et sous une pression de 42 bars et une température de 38°C. Le GN circule dans une colonne à 27 plateaux vers le haut en contre courant avec la solution du mono-éthanol-amine (MEA) solution aqueuse à 15%, pour être débarrasser du CO₂ à une teneur inférieure à 90 ppm en tête de colonne, il sera acheminé ensuite vers la section de déshydratation.

Cette section comporte deux étapes importantes à savoir :

- L'absorption ;
- La régénération.

La figure I.1 représente la section de décarbonatation.

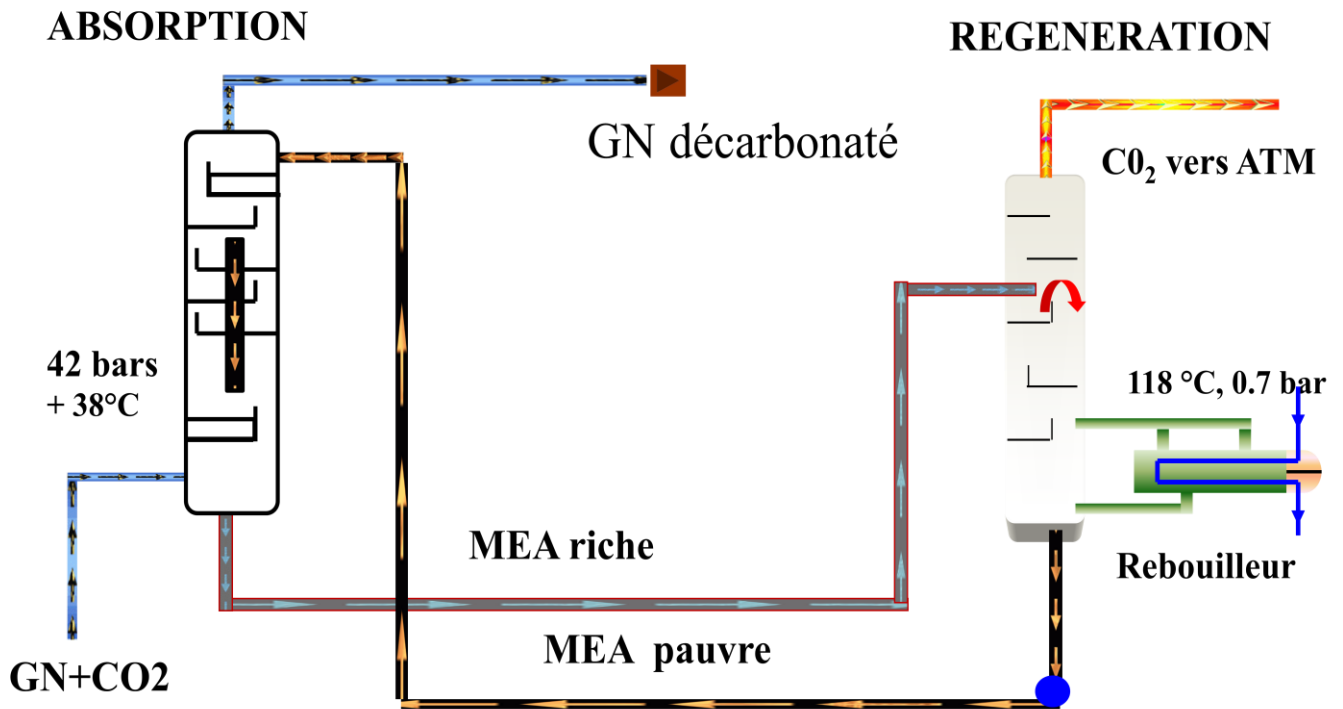


Figure I.1: Section de décarbonatation

I.3.2.2. Section de déshydratation

A sa sortie de l'absorbeur, le gaz est humide le fait qu'il a absorbé de l'eau de la solution de MEA. Le système de déshydratation sert à éliminer les vapeurs d'eau par adsorption en utilisant des sécheurs pour éviter la formation de bouchons de glace qui affectera les équipements de liquéfaction.

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU COMPLEXE GL1/Z

Le gaz naturel venant de l'absorbeur de CO₂ pénètre dans les tubes du pré-refroidissement où il sera refroidi à l'aide du propane liquide, ce qui provoque la condensation d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans le gaz naturel, il passe ensuite dans le ballon séparateur où l'eau de condensation est retenue puis purgée. Le gaz pénètre ensuite dans les deux sécheurs (le second étant en régénération) et traverse les tamis moléculaires en perdant progressivement son humidité jusqu'à une teneur moins de 1 ppm. A la sortie de chaque sécheur, le gaz passe à travers des filtres afin de retenir les particules en suspension.

La figure I.2 représente la section de déshydratation.

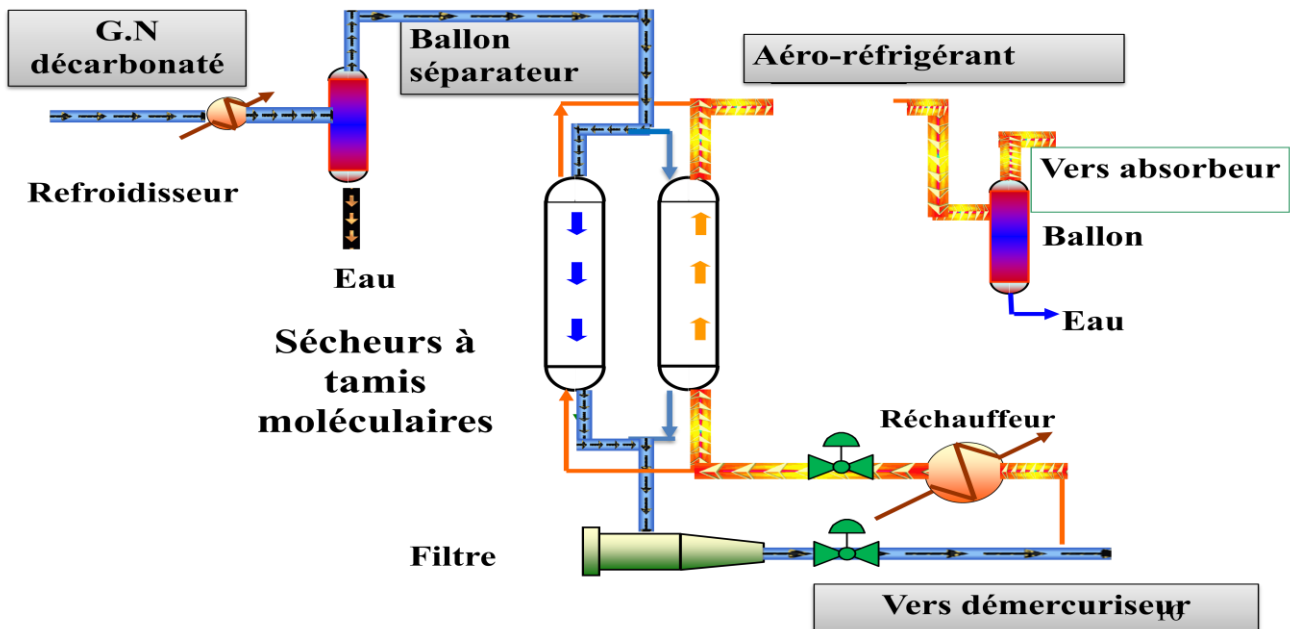


Figure I.2 : Section de déshydratation

I.3.2.3. Section de démercurisation

La démercurisation est une opération importante dans le traitement du gaz naturel, Cette installation consiste à piéger le mercure (Hg) contenu dans le gaz et cela pour éviter que le mercure attaque particulièrement les équipements en aluminium (Al) comme le cas de l'échangeur principal de la section de liquéfaction. Le gaz sortant de cette section ne doit pas dépasser une concentration de 7 nanogrammes de mercure.

I.3.2.4. Section de refroidissement

Le GNT pénètre dans la section de séparation à une température de 21°C et une pression effective de 40 bars où il doit subir un refroidissement par deux échangeurs au propane, le premier pour ramener la température du gaz à -1°C, le second à -26°C, qui est la température à laquelle il doit pénétrer dans la tour de lavage.

I.3.2.5. Section de séparation et tour de lavage

La section de séparation a pour objectif de séparer les composants lourds des composants légers du gaz.

Le gaz refroidi est flashé dans la tour de lavage F-711 au niveau du 9^{ème} plateau. La phase vapeur riche en méthane et éthane s'élève à travers huit plateaux supérieurs de la colonne, les vapeurs de tête subissent une condensation dans l'échangeur à propane jusqu'à une température de -40°C où les vapeurs sont partiellement condensées pour être séparées dans le ballon de flash. Le liquide est refoulé vers la tour de lavage comme un reflux et les vapeurs de tête s'écoulent vers la section de liquéfaction, et le liquide de fond de la tour de lavage s'écoule vers la section de fractionnement.

I.3.2.6. Section de fractionnement

Cette section a pour but de fractionner le produit de fond de la tour de lavage afin d'alimenter le circuit de réfrigération et d'appoint dans les différentes sections du process. Cette section est constituée de quatre colonnes de distillation, et chaque colonne à un rebouilleur, un condenseur et un ballon de reflux.

a) Déméthanisation

Les composés légers (C_1 et des traces de C_2) sont séparés des hydrocarbures lourds passent vers le haut de la colonne à contre courant par rapport à un débit de reflux continu qui s'écoule vers le fond.

Les vapeurs de tête sont partiellement condensées dans un condenseur sous l'effet réfrigérant puis séparées dans le ballon de reflux. Les vapeurs non condensées constituent un appoint dans le circuit MCR.

b) Dééthanisation

Le produit de fond du déméthaniseur est à son tour fractionné dans le dééthaniseur, afin de produire de l'éthane comme produit de tête. L'éthane obtenu sert comme appoint au réfrigérant mixte (MCR), à la tour de lavage et pour le contrôle de qualité de GNL

particulièrement à l'amélioration de son pouvoir calorifique. Le produit de fond sert à alimenter la colonne de dépropanisation.

c) Dépropanisation

La section de dépropanisation a pour but de produire du propane afin de répondre aux besoins respectifs du circuit de réfrigération au propane, de l'appoint de la tour de lavage et du contrôle de qualité du GNL. Les produits de fond sont dirigés comme alimentation vers la colonne du débutaniseur.

d) Débutanisation

Le flux d'hydrocarbures pénètre dans la colonne de débutanisation où le butane s'élève vers le sommet. Ce dernier peut être utilisé comme appoint dans le réseau de gaz combustible ou bien envoyé vers le ballon de reflux de la tour de lavage. Les C_5^+ s'écoulent vers le fond où ils sont refroidis, puis envoyés vers le stockage dans une sphère de gazoline.

I.3.2.7. Boucle propane

La boucle propane comprend trois étages de compression. Le propane est refoulé par le troisième étage du compresseur K-110, refroidi dans un échangeur à eau de mer jusqu'à 43°C, et condensé dans un échangeur à 37°C.

Il est enfin accumulé dans un ballon qui alimente le ballon séparateur HP-791 et l'échangeur de propane E-521. Le propane liquide subit des détentes successives dans trois ballons de séparation G-791, G-790 et G-785 respectivement à haut, moyenne et à basse pression. Les vapeurs obtenues après chaque flash sont aspirées par le corps du compresseur, à la pression correspondante. Le propane moyenne pression alimente le condenseur de tête de la tour de lavage E-523, le premier échangeur E-522 et le E-525 A et B.

I.3.2.8. Boucle MCR

La boucle MCR comprend deux étages de compression, un refroidissement à l'eau de mer après chaque refoulement et une séparation avant chaque aspiration. Les vapeurs MCR sont aspirées par un compresseur basse pression et refroidies jusqu'à 38°C dans l'échangeur à eau de mer pour être ensuite séparées dans le ballon séparateur basse pression. Le compresseur haute pression aspire les vapeurs du ballon haute pression et les refoulent vers un échangeur à eau de mer où sa température de sortie est de 32°C. Après ce refroidissement, le MCR est amené à sa température de rosée -37°C à la sortie de deux batteries d'échangeurs propane. Le MCR partiellement liquéfié, est séparé dans un ballon haut pression pour alimenter les

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU COMPLEXE GL1/Z

condenseurs de tête du déméthaniseur et de la tour de lavage, et l'échangeur principal. Tableau I.1 représente les compositions chimiques du réfrigérant Multi-Composant MCR.

Tableau I.1 : Composition chimique du réfrigérant Multi-Composant MCR

Composants		% Molaire
N ₂	Azote	3
CH ₄	Méthane	40
C ₂ H ₆	Ethane	54
C ₃ H ₈	Propane	3

I.3.2.9. Section de liquéfaction

La liquéfaction du GN est réalisée dans l'échangeur principal au moyen d'un réfrigérant mixte MCR.

Le gaz naturel d'alimentation quitte le séparateur de la tour de lavage avec une pression effective de 39 bars et une température de -34°C pour pénétrer dans l'échangeur principal. Il est rejoint par un appoint d'éthane, propane et butane afin d'assurer les contrôles de la qualité du GNL à produire.

Le gaz est subdivisé en deux flux dont le plus important (90%) pénètre par le fond de l'échangeur à l'intérieur d'un faisceau de tubes, où il circule en flux parallèle avec MCR (vapeur et liquide). Le flux MCR liquide est détendu dans la partie médiane par une vanne de détente Joule-Thomson et redescend sous forme de douche dans la calandre pour refroidir les faisceaux MCR (liquide et vapeur) et le faisceau GN. Le flux MCR vapeur traverse lui aussi l'échangeur principal de bas en haut pour être détendu en tête et redescend côté calandre. Les deux flux se remélangent en bas de l'échangeur afin d'être aspiré et ainsi le cycle est reproduit.

Le GNT progresse vers le haut de l'échangeur en passant par des zones de plus en plus froides, ainsi le GNL produit sort à l'état liquide à une température de -150°C et une pression effective de 25 bars, il pénètre alors dans le déazoteur en passant par une vanne de détente qui permet de réduire sa pression effective à 0,3 bar et sa température à -162°C. Le deuxième flux de gaz d'alimentation (10%) by-passe l'échangeur principal pour passer dans un échangeur de gaz et de rejet où il est totalement condensé par la vapeur issue du ballon de flash d'azote. Il quitte alors l'échangeur à -159°C afin de rejoindre le flux de GNL produit par l'échangeur principal. Le gaz de réfrigération issu de l'échangeur de gaz et de rejet est envoyé vers le

CHAPITRE I : DESCRIPTION DU COMPLEXE GL1/Z

réseau de gaz combustible ou vers le réseau de torche. Le GNL produit s'écoule du ballon de flash d'azote et est refoulé vers trois réservoirs de stockage de GNL par des pompes spécialement adaptées. Tableau I.2 représente les compositions chimiques du GNL.

Tableau I.2 : Composition chimique de GNL

Composants		% Molaire
N ₂	Azote	0,60
CH ₄	Méthane	84,0
C ₂ H ₆	Ethane	6,00
C ₃ H ₈	Propane	2,20
iC ₄ H ₁₀	Isobutane	0,30
nC ₄ H ₁₀	n-Butane	0,30
C ₅ H ₁₂ (+)	Pentane (+)	0,00

I.3.3. Stockage et chargement du GNL

Trois bacs de GNL assurent le stockage de la totalité de la production de GNL des six trains. Les bacs de stockage à double paroi métallique ayant une capacité unitaire de 100 000 m³, permettent de stocker le GNL à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique. Ils sont dotés de doubles parois. Lors du remplissage des réservoirs, une certaine quantité du produit se vaporise. Les pertes de chaleur dues à l'isolation sont aussi la cause de vaporisation du produit. La vapeur du réservoir est recueillie dans un collecteur qui l'envoie au compresseur de gaz combustible de chaque train. Lorsqu'on ne charge pas, le GNL peut être transféré d'un réservoir à l'autre à l'aide de la pompe de transfert de GNL.

Le chargement du GNL à bord du méthanier est précédé par le refroidissement de la canalisation de la zone de chargement. La pompe de refroidissement aspire une petite quantité de GNL au réservoir de stockage et envoie ce GNL dans la canalisation chaude de la zone de chargement. Le GNL vaporisé est repris par la soufflante des gaz résiduels et envoyé dans le collecteur de gaz des réservoirs. Le chargement s'effectue au moyen de cinq pompes de chargement de GNL fonctionnant en parallèle et transférant le GNL des réservoirs de stockage au navire en passant par les bras de chargement. Les vapeurs résiduelles du navire sont renvoyées au collecteur de vapeur des réservoirs par la soufflante des gaz résiduels [4].

I.4. CONCLUSION

Finalement, l'idée principale de ce chapitre est le transport du gaz naturel à l'état liquide pour sa commercialisation.

La liquéfaction a pour but de réduire le volume d'environ 600 fois pour faciliter le transport de gaz par des moyennes marines.

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.1. INTRODUCTION

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 «CO₂» 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).

L'absorption consiste en un transfert de matière entre une phase gazeuse et une phase liquide; cette dernière étant constituée d'un corps pur ou d'un mélange de plusieurs substances (SOLVANT). Par ailleurs; on admet que la phase gazeuse est formée uniquement par deux composants : ce lui qui est en transfert ou soluté, et le gaz porteur inerte ou diluant.

La récupération souvent nécessaire de la substance qui s'est dissoute dans le liquide est appelée « DESORPTION ». Ce phénomène se réalise en mettant en contact le contenant le soluté et le solvant pendant tout le temps nécessaire au transfert ; c'est-à-dire jusqu'à ce que l'équilibre de concentration entre les deux phases soit atteint.

L'absorption consiste à laver un mélange gazeux par un liquide ; dans le but de dissoudre l'un des constituant gazeux dans le liquide ; elle est utilisée pour la purification des gaz (LAVAGE) ; ou pour la séparation des mélanges gazeux.

II.2. LA SECTION DE DECARBONATATION

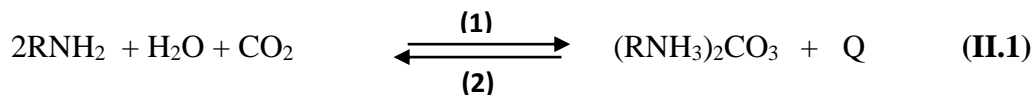
Cette épuration se fait dans le but d'éviter le colmatage du système par la solidification du CO₂ dans les sections froides situées en aval du procédé de liquéfaction.

Le principe d'élimination du gaz carbonique à une teneur maximale de 90 ppm est mis en œuvre par un procédé d'absorption conduit dans une colonne d'absorption F-502 à 27 plateaux à haute pression (42 bars) et basse température (38°C).

II.2.1. Caractéristiques de la réaction chimique

Le gaz carbonique est extrait du gaz naturel par lavage de celui-ci à contre courant dans une colonne par une solution aqueuse de 15 à 20% de MEA. La principale réaction par laquelle le CO₂ est absorbé par la solution de MEA peut être représentée comme suite :

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR



Avec RNH_2 : la solution MEA et $\text{R} = \text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$.

Cette étape comporte une étape intermédiaire dans laquelle l'eau et le CO_2 donnent l'acide carbonique.



L'équilibre de la réaction (II.1) 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).

II.2.2. Différents équipements de la section[3]

- La colonne d'absorption, appelée absorbeur F-502 ;
- La colonne de régénération F-501 ;
- Système de lavage incorporé dans la partie supérieure de l'absorbeur ;
- Ballon de détente de MEA G-507 ;
- Epurateur de MEA E-505 ;
- Echangeurs en série de solution de MEA E-503/A et B ;
- Filtre à cartouche actif P-501 ;
- Filtre à cartouche P-502 ;
- Condenseur de tête E-501 ;
- Rebouilleur de MEA E-502 ;
- Ballon de gaz acide G-502 ;
- Pompe de lavage J-510/511 ;
- Turbo pompe MEA J-503 ;
- Pompe MEA J-504 ;
- Puisard G-504 ;
- Pompe du puisard J-505 ;
- Bac d'anti mousse R-502.

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.2.3. Procédés d'absorption du CO₂

Le gaz naturel d'alimentation pénètre dans l'unité avec une pression contrôlée à 42 bars. Le gaz et tout d'abord admis dans une section de séparation rapide située au fond de l'absorbeur F-502, section dans laquelle les liquides sont entraînés puis séparés du débit du gaz d'alimentation.

Après séparation, le liquide est envoyé vers le système de décantation des hydrocarbures, tandis que le gaz est acheminé vers le haut de l'absorbeur par le préchauffeur E-506.

Le gaz naturel pénètre dans l'absorbeur à 38°C et circule vers le haut à travers 27 plateaux à clapets, circule 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 pauvre en CO₂, pénètre elle aussi dans l'absorbeur à 38°C et une pression légèrement supérieure à 42 bars, et son débit est réglé à 54.000 Kg. h⁻¹[5].

II.2.4. Régénération de la solution

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 quitte l'absorbeur F-502 par le fond avec une température de 43°C, elle subit une détente rapide de 42 à 8 bars au niveau du ballon de détente G-507, elle est ensuite chauffée jusqu'à 93°C par échange thermique avec les liquides résiduels du régénérateur dans les échangeurs E-503 A et B. Puis par la vanne de détente, la pression est réduite à 0,7 bar, enfin entre dans le régénérateur F-501 par le haut, cette alimentation assure le reflux du régénérateur.

La solution riche passe en cascade dans les 21 plateaux à clapets du régénérateur pour être recueillie sous forme de solution de MEA pauvre au fond de ce dernier.

Après son passage sur le déversoir, la solution coule vers la section inférieure du régénérateur où la température est maintenue à 118°C par le rebouilleur E-502 avec de la vapeur d'eau d'une pression effective de 3,45 bars et une température de

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

148°C. La vapeur présente au sommet du régénérateur qui se compose principalement de CO₂ et de vapeur d'eau, quitte la colonne à 107°C puis elle est refroidie à l'eau de mer jusqu'à 50°C dans le condenseur de tête E-501, la vapeur ainsi condensée s'accumule dans le ballon gaz acide G-502, où la partie vapeur constituée essentiellement de CO₂ est rejetée vers l'atmosphère. La phase liquide est envoyée vers le fond du régénérateur par la pompe J-506. La solution de MEA pauvre passe du côté calandre des échangeurs E-503 A et B où sa température est réduite à 70°C, puis par l'une des pompes J-503 ou J-504 où sa pression augmente jusqu'à 42 bars. En exploitation normale la pompe J-503 est en service tandis que la J-504 est réglée à démarrer automatiquement en cas de chute de pression de la solution pauvre, puis elle passe par un échangeur à eau de mer E-504 pour amener sa température à 38°C. C'est la température d'entrée dans l'absorbeur.

Un système de filtrage double est prévu pour éviter l'accumulation des impuretés solides dans la solution de MEA qui risquerait de provoquer le moussage dans l'absorbeur et le régénérateur. Environ 84 % de la solution de MEA pauvre refroidie est continuellement filtrée par le filtre Charbon P-501 renfermant du charbon actif et protégé de part et d'autre part des filtres à cartouche. La figure II.1 présente l'absorbeur ainsi que le régénérateur (F-501) [5].

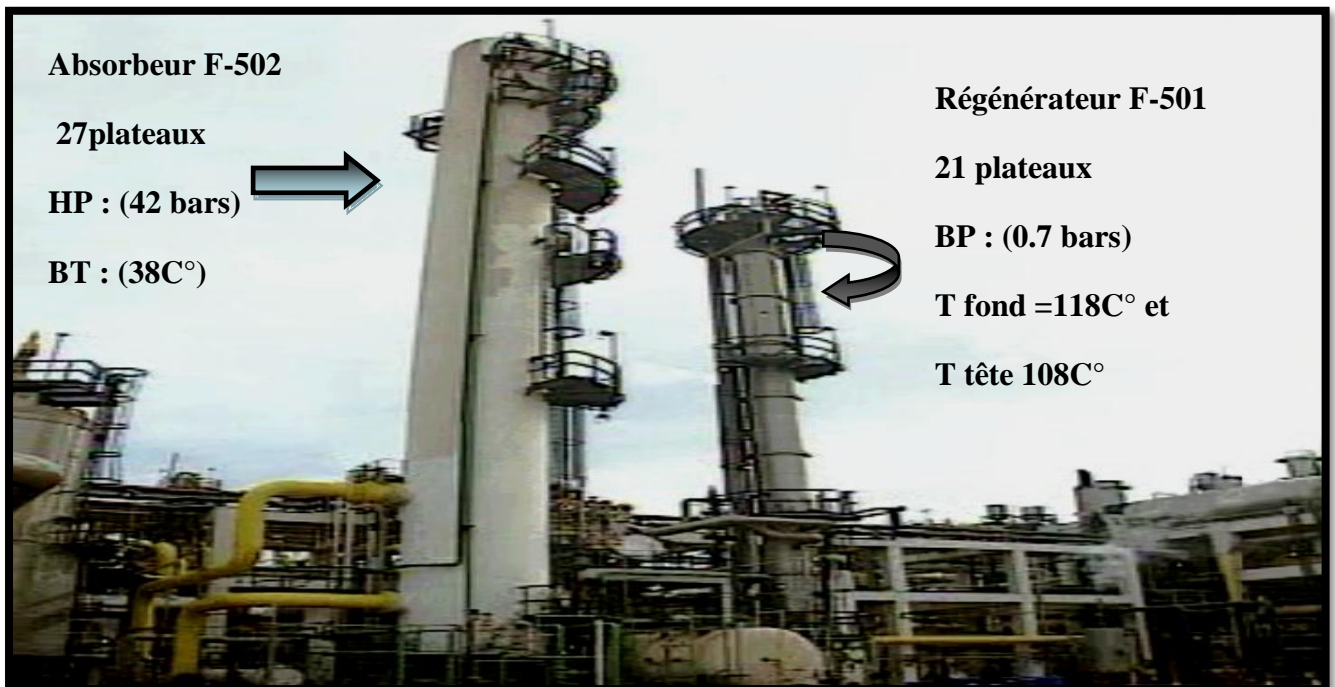


Figure II.1 : Absorbeur et Régénérateur

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.2.5. Epuration de la solution MEA

L'épurateur de MEA E-505 est installé pour assurer la récupération de la MEA et l'extraction des impuretés contenue dans la solution.

À la suite d'une période d'utilisation prolongée, la solution de MEA se détériore à cause de l'accumulation progressive des produits de nature acide, et formeraient des dépôts bitumineux ou boueux s'il n'était pas éliminés. Ces contaminants sont des substances non volatiles et forment des sels par réaction chimique avec le carbonate de sodium anhydre. Au fur et à mesure du développement du cycle de récupération de MEA, les sels s'accumulent dans l'épurateur, ce qui fait monter la température d'ébullition de la solution de MEA, une fois que la température atteint 150°C, l'épurateur cesse de fonctionner et doit être nettoyé avant le cycle suivant.

II.2.6. Stockage de la solution

On stocke la solution de MEA de concentration de 15 % à 20 % dans deux réservoirs G-501 et G-505, le réservoir G-501 fournit la solution de base et d'appoint des trains 100, 200, 300, tandis que le G-505 dessert les trains 400, 500, 600. Des puisards et des pompes sont associés aux réservoirs pour le transfert de la solution, et la dilution de MEA pour le cas échéant[5].

Nous présentons ci-dessous (figure II.2) l'ensemble des équipements de la section de décarbonatation.

CHAPITRE II : LA DECARBONATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

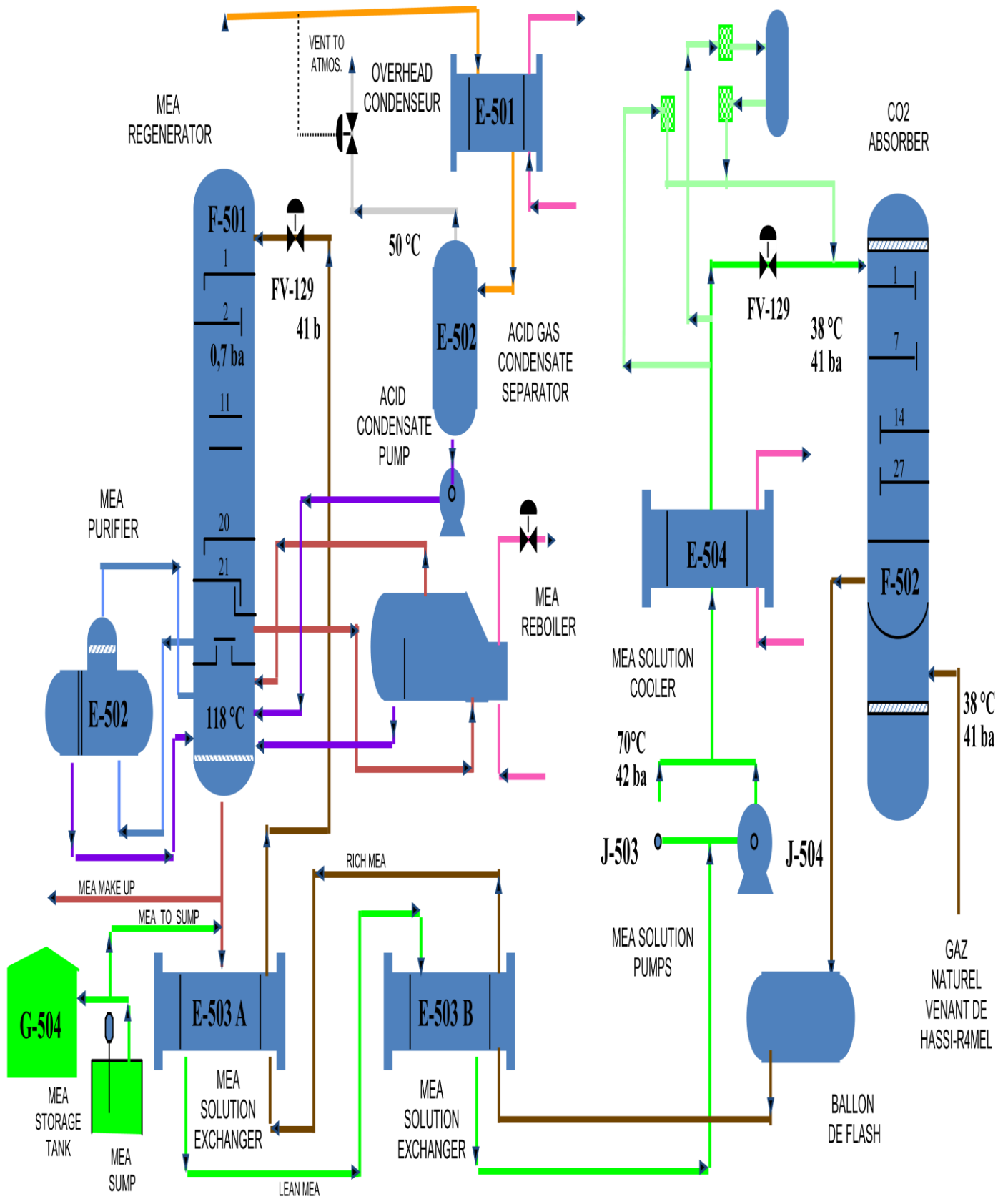


Figure II.2 : Section de décarbonation

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.3. LES ECHANGEURS

II.3.1. Définitions et applications

On désigne sous le terme « Echangeur de chaleur » tout appareil permettant exclusivement le transfert de chaleur d'un fluide à un autre au travers d'une paroi.

Un échangeur a pour fonction de permettre un transfert d'énergie thermique d'un fluide à un autre fluide sans que ces deux fluides se mélangent. Cette définition, très générale, recouvre en fait des utilisations très différentes.

L'application des différents modes de transfert de chaleur dans le design des appareils industriels d'échange de chaleur est d'une grande importance. Les dépenses thermiques au niveau d'une unité industrielle sont énormes et il est indispensable de récupérer cette énergie pour l'utiliser au mieux dans la chaîne de fabrication. Donc, l'économie joue un rôle important dans l'élaboration des appareils pouvant réaliser les transferts de chaleur entre phases.

Les applications des échangeurs de chaleur sont très nombreuses, qu'il s'agisse de réchauffer ou de refroidir de l'eau, de l'huile, du pétrole ou tout autre liquide ou gaz.

Le choix d'un échangeur dépend de nombreux paramètres : domaine de température et pression, des fluides et propriétés physiques et chimiques [6].

II.3.2. Différents types d'appareils d'échange de chaleurs

En pratique, on utilise le plus fréquemment des appareils tubulaires donc on distingue trois types en fonction de leurs utilisations :

1. Les échangeurs :

Proprement dits dans lesquels ne se produit aucun changement d'état physique des phases.

2. Les condenseurs :

Où le transfert de chaleur est accompagné de la condensation partielle ou totale de l'une des phases.

3. Les rebouilleurs :

Où le transfert est accompagné de la vaporisation partielle ou totale de l'une des phases [7].

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.3.3. Différents types d'échangeurs

La plupart des échangeurs de chaleur offrant une surface d'échange de séparation entre fluide chaud et fluide froid peuvent être classés selon les familles technologiques suivantes :

- Les échangeurs tubulaires ;
- Les échangeurs à plaques.

II.3.3.a. Les échangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires représentent encore près de la moitié des échangeurs thermiques vendus en France et en Europe. Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contrebalancent leur encombrement. On distingue, le plus souvent :

- les échangeurs monotubes pour lesquels le tube est placé dans un réservoir ;
- les échangeurs coaxiaux pour lesquels les tubes sont le plus souvent cintrés ;
- les échangeurs multitubulaires.

✓ **les échangeurs multitubulaires subdivisent à :**

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

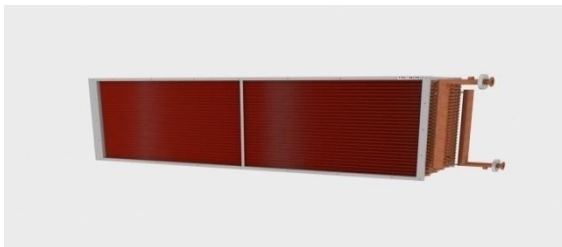


Figure II.3 : Echangeurs à tube ailetés.

- b) les échangeurs à tubes et calandre où la calandre (figure II.4) est une enveloppe métallique cylindrique entourant un faisceau de tubes : ils possèdent une boîte de distribution c'est à dire un dispositif qui distribue ou recueille le fluide aux extrémités

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

des tubes. Ils peuvent être à boîte fixe, à boîte flottante, ou à tubes en U avec une boîte à chaque extrémité de l'échangeur. Les tubes peuvent être supportés par des chicanes.



Figure II.4: Echangeurs à tubes et calandre

II.3.3.b. Les échangeurs à plaques

De création plus récente que les échangeurs tubulaires, les échangeurs à plaques (figure II.5) ont subi depuis leur création, il y a environ 60 ans, des améliorations substantielles. Ils sont formés par l'empilement d'un ensemble de plaques métalliques embouties, au travers desquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. S'ils ne peuvent pas toujours être utilisés pour les températures élevées et les fortes pressions, les échangeurs à plaques bénéficient d'avantages tenant notamment à leur meilleur rendement et à leur compacité. Plusieurs technologies sont en concurrence. La principale, et la plus ancienne, est celle des échangeurs à plaques avec joints. Un joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques. Ces échangeurs ne peuvent être utilisés que pour des pressions maximales de 30 bars et des températures maximales de 200 degrés Celsius.

D'autres technologies plus récentes permettent de remédier aux inconvénients de l'existence de joints, comme les échangeurs à plaques soudées. Les échangeurs à plaques soudées sont adaptés à l'utilisation de fluides encrassant corrosifs, chauds,

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

sous pression, présentant des débits très différents de part et d'autre de la surface d'échange.

Il existe d'autres échangeurs à plaques dont la diffusion est moins importante tels que les échangeurs à spirales et les échangeurs à plaques brasées. Les échangeurs à plaques brasées sont formés de plaques embouties, mais sans joints, qui forment ainsi un appareil compact et résistant à hautes pressions. Les échangeurs à spirale sont constitués de deux rubans de tôle gauffrée, enroulés et maintenus parallèles et où la circulation du fluide est de type monocanal à courants parallèles ou croisés.



Figure II.5 : Echangeurs à plaque.

II.3.4. Autres types d'échangeurs

Parmi les échangeurs thermiques, il convient également de citer les échangeurs où l'un des deux fluides change de phase. Il s'agit du cas particulier des évaporateurs tubulaires ou à plaques où le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, et des condenseurs tubulaires ou à plaques où le fluide chaud passe de l'état gazeux à l'état liquide. Ils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide ou produire de la vapeur.

Pour résoudre ses problèmes d'échanges thermiques, l'utilisateur se trouve devant une grande variété de produits, dont les principales catégories sont, rappelons le, les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques. Toutefois, la technologie de ces types d'échangeurs porte surtout sur l'utilisation de nouveaux matériaux ainsi que sur les conditions d'amenée des fluides. Les matériaux les plus utilisés dans les échangeurs sont les aciers inoxydables et le titane, mais d'autres matériaux sont également employés, notamment pour limiter l'effet des phénomènes de corrosion,

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

comme le graphite, la céramique, le verre et les plastiques. L'objectif est d'améliorer la résistance des échangeurs afin de les rendre plus fiables lorsqu'ils sont utilisés dans des cycles thermiques[6] .

II.4. NOTION SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles. Selon la classification établie en 1978 par Epstein [8], il existe cinq grands types d'encrassement différents :

- ❖ La corrosion ;
- ❖ l'encrassement biologique ;
- ❖ l'encrassement par réaction chimique ;
- ❖ l'entartrage ;
- ❖ l'encrassement particulaire.

Quel que soit le phénomène d'encrassement considéré, il est plus ou moins critique selon la nature des fluides employés et/ou la conception des échangeurs. Dans les situations réelles d'encrassement, il est bien évident que ces différents mécanismes interagissent ou se superposent de manière plus ou moins complexe.

II.4.1. 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 [9]. Les produits qui se forment et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement. Il s'agit là d'un mécanisme de corrosion in situ. Lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générés, l'encrassement correspondant est de type particulaire. Il existe différents types de corrosion :

- la corrosion uniforme caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitesse n'est pas forcément proportionnelle au temps ;
- la corrosion par piqûres où l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces ;
- la corrosion fissurante à l'échelle microscopique intergranulaire ou transgranulaire ;

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

- la corrosion sélective où seul un élément d'un alliage subit une attaque sélective.

II.4.2. L'encrassement biologique

L'encrassement biologique est dû au développement de micro-organismes qui créent un film encrassant au contact de la surface d'échange [10]. Il peut être causé par trois grands types de micro-organismes :

- les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif de type hydrocarbures ;
- les algues dont le développement est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse ;
- les champignons dont le développement est dû aux changements des conditions ambiantes telles que l'humidité, la température ou le pH.

Dans certains cas extrêmes, il peut même être caractérisé par l'apparition de coquillages.

II.4.3. L'encrassement par réaction chimique

L'encrassement par réaction chimique est dû à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange [11]. Les produits solides ainsi formés s'y déposent. Il s'agit le plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire. Les vitesses de telles réactions chimiques dépendent fortement de la température, de la pression, de la concentration et de la présence d'éléments catalyseurs. Toutefois, la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes de surface et de transfert.

II.4.4. L'entartrage

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide [12]. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

- la limite de solubilité du sel contenu dans l'eau doit être dépassée ;
- la vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.4.5. L'encrassement particulaire

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation, sur les surfaces d'échange, de particules transportées par l'écoulement de fluides industriels tels que :

- l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion ;
- l'eau des tours de refroidissement ;
- Les écoulements gazeux chargés de particules tels les résidus solides de combustion, ou les poussières résultant de l'incinération de déchets ménagers.

Toutefois, les types d'encrassement les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie sont l'encrassement particulaire et l'entartrage [13].

II.5. EFFETS DE L'ENCRASSEMENT SUR LES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR

Phénoménologiquement, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. Epstein [13] a décomposé les mécanismes d'encrassement selon 4 événements séquentiels :

- L'initiation comme étant le temps nécessaire avant la formation du dépôt sur une surface propre. Il faut signaler que, dans la grande majorité des études expérimentales traitant de l'encrassement particulaire sur des tubes d'échangeurs [14, 15, 16], la phase d'initiation du processus d'encrassement n'est pas détectée ;
- L'adhésion des particules sous l'effet des forces de Van der Waals, des forces électrostatiques ou capillaires ;
- Le réentraînement des particules déposées dû aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt, à l'érosion ou à l'écaillage ;
- Le vieillissement du dépôt caractérisé par un changement de texture et une usure dudit dépôt.

CHAPITRE II : LA DECARBONATATION ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.6. CONCLUSION

L'absorption du CO₂ par la MEA est influencée par :

- La variation de la concentration du MEA et son débit ;
- La variation du débit du GN ;
- La température d'entrée du GN et celle de la solution de MEA.

Dans cette partie, on se limitera à l'application des différents modes de transfert de chaleur au design des échangeurs de chaleur.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

III.1. INTRODUCTION

Parmi les 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.

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. 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.

III.2. DESCRIPTION ET LE ROLE DE L'ECHANGEUR E.504 [17]

La MEA pauvre sortant du fond de la colonne de régénération X01-F-501, à une température de 116°C, passe à travers les échangeurs intermédiaires MEA riche/MEA pauvre (X01-E503 A 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.

Le 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 :

III.2.1. Les Tubes

- Nuance : 70-10 CuNi ;
- Nombre de tube 410 tubes ;
- Diamètre extérieur 3/4 in BWG2 ;
- Longueur 6096 mm ;
- Nombre de passe 02.

III.2.2. La calandre (en acier de carbone)

- Diamètre extérieur 76 in ;
- Couvercle de la calandre avec tête flottante ;
- Nombre de passe 01.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

III.2.3. Boite de distribution (en acier de carbone)

La figure III.1 représente la position de l'échangeur de chaleur E.504 dans la section de décarbonatation.



Figure III.1 : Position de l'échangeur de chaleur E.504 dans la section de décarbonatation.

Le tableau III.1 représente les paramètres de service de l'échangeur E.504 (design).

Tableau III.1 : Paramètres de service de l'échangeur E.504 (design).

	MEA (coté calandre)	EDM (coté tube)
Température entrée (°C)	72,2	25
Température sortie (°C)	37,7	38,4
Débit (Kg. h ⁻¹)	54964	147871
pression entrée (bar)	53	1,7

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

Le tableau III.2 représente les paramètres de service de l'échangeur E.504.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

Tableau III.2 : Paramètres de service de l'échangeur E.504 (actuels).

	MEA (coté calandre)	EDM (coté tube)
Température entrée (°C)	56	16
Température sortie (°C)	36	38
Débit (Kg. h ⁻¹)	35170	103079,6
pression entrée	53	1,7

La perte de charge à travers le faisceau tubulaire est de 0,35 bar.

III.3. PROBLEMATIQUE

Depuis le démarrage du train 400 en mars 1996, après sa rénovation, 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 de transfert de chaleur à été enregistrée.

III.4. HISTORIQUE DE L'ECHANGEUR E.504

Le tableau III.3 représente l'historique de l'échangeur E.504 de 1998 jusqu'à 2008.

Tableau III.3 : Historique de l'échangeur E.504.

Date	Anomalie
03/08/1998	tubes légèrement obtures. cratère de corrosion au niveau de la tête flottante.
28/06/1999	Crevasses au niveau du tampon et de la boite de distribution de profondeur.
15/08/1999	Dépôt de tartre important dans la boite à eau ainsi que sur les plaques tubulaire
30/01/2000	- Dégradation de la peinture coté calandre et couvercle de la tête flottante. - Corrosion des boulons de fixation, ligne sortie d'eau de mer.
22/05/2000	- Boite entrée/sortie EDM : Grillage colmaté par les débris de déchet marin à 80%. - Anode sacrificielle consommé.
24/06/2000	-Boite entrée/sortie EDM : Grillage colmaté par les débris de déchet marins à 70%. - Anodes sacrificielles sont usées à 90%. - Plaque tubulaire colmaté.
07/03/2001	- La paroi de la boite est couverte d'une solution gélatineuse (mélange eau de mer et solution MEA).

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

	- Faisceau tubulaire : est complètement corrodé.
04/07/2001	La bride pleine de la boîte de distribution présente des cratères de corrosion avec perte de métal.
28/07/2002	- Usure avancée des anodes sacrificielles. - Détérioration du revêtement interne de la boîte.
20/11/2002	-La température de sortie de MEA est élevée. -Boîte de distribution eau de mer : la paroi de la boîte est couverte d'une solution gélatineuse (mélange eau de mer et la solution de MEA). - Faisceau tubulaire est corrodé.
02/06/2003	une consommation excessive de MEA du train 400 et après des analyses de l'eau de mer du refroidisseur au laboratoire qui a confirmé la présence du MEA.
04/08/2003	Bouchage important des tubes par les dépôts.
24/04/2004	Plaque tubulaire : dépôt de calcaire et de coquillage sur la plaque.
24/08/2005	- Colmatage partiel du faisceau tubulaire. - Endommagement de deux manchons de la boîte. - Présence des traces de corrosion.
20/06/2006	-Présence d'un dépôt important de la boue. -Présence d'un arrachement de métal sur la tête flottante.
18/03/2008	Coté supérieur du faisceau 19 tubes fuyards, coté inférieur faisceau 2 tube fuyards.
28/10/2008	La ligne d'entrée eau de mer de 8 "WC-X0050-1993 est complètement corrodée et présente des fuites d'eau de mer.

III.5. LES CAUSES DE MAUVAIS DE TRANSFERT DE CHALEUR DU REFROIDISSEUR E.504

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

- Débit d'eau de mer insuffisant de refroidissement ;
- Encrassement de la boîte de distribution de l'eau de mer ;
- Encrassement la paroi interne ;
- Dégradation de la surface externe des tubes.

III.6. ANALYSE DES CAUSES

L'analyse des causes fait ressortir ce qui suit :

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

III.6.1. L'insuffisance du débit d'eau de mer de refroidissement

Le débit d'eau de mer de refroidisseur de la solution MEA du train 400 a été calculé selon les paramètres de fonctionnement actuels.

Une comparaison a été faite entre les paramètres de fonctionnement du E.504 du train 400 et ceux du design.

La perte de charge à travers les tubes du train 400 de l'ordre de 0,35 bar est basse, comparée avec le design 0,68 bar.

Le tableau III. 4 représente le débit d'eau de mer à travers les tubes du refroidisseur E.504 de la solution de MEA du train 400.

Tableau III.4 : Débit d'eau de mer à travers les tubes du refroidisseur E.504.

Désignation	Par-actuel							
Perte de charge (bar)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Longueur (m)	6,096	6,096	6,096	6,096	6,096	6,096	6,096	6,096
Diamètre (m)	0,015749	0,01575	0,01575	0,01575	0,01575	0,01575	0,01575	0,01575
Longueur/diamètre	387,071	387,071	387,07	387,072	387,071	387,071	387,071	387,071
Masse volumique (kg/m ³)	999,55	999,55	999,55	999,55	999,55	999,55	999,55	999,55
Nombre de passe	2	2	2	2	2	2	2	2
Viscosité dynamique (kg/m. s)	0,000709	0,000709	0,000709	0,000709	0,000709	0,000709	0,000709	0,000709
Vitesse (m/s)	1,942247	0,810631	0,7428	0,73634	0,7357	0,735635	0,735629	0,735626
Nombre de Reynolds	43152,31	18010,39	16503	16359,9	16345,59	16344,14	16344	16346,17
Surface (m ²)	0,038926	0,038926	0,038926	0,038926	0,038926	0,038926	0,038926	0,038926
Débit massique EDM (kg/h)	172156,7	113589,5	104085	103181,1	103059,6	103080,6	103079,7	103079,6

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

En résumé, d'après les paramètres de fonctionnement actuels de l'échangeur E.504 on calcul le débit massique d'eau de mer de refroidisseur de la solution de MEA présenté au tableau (III.5) suivant :

Tableau III.5 : Débit massique d'eau de mer de refroidisseur E.504.

Désignation	unité	
La perte de charge (design)	bar	0,689
La perte de charge (actuelle)	bar	0,35
Débit massique EDM (design)	Kg. h ⁻¹	147871
Débit massique EDM (actuelle)	Kg. h ⁻¹	103079,6

La figure III.2 représente l'évolution de la vitesse de l'écoulement d'eau de mer en fonction de débit d'eau de mer.

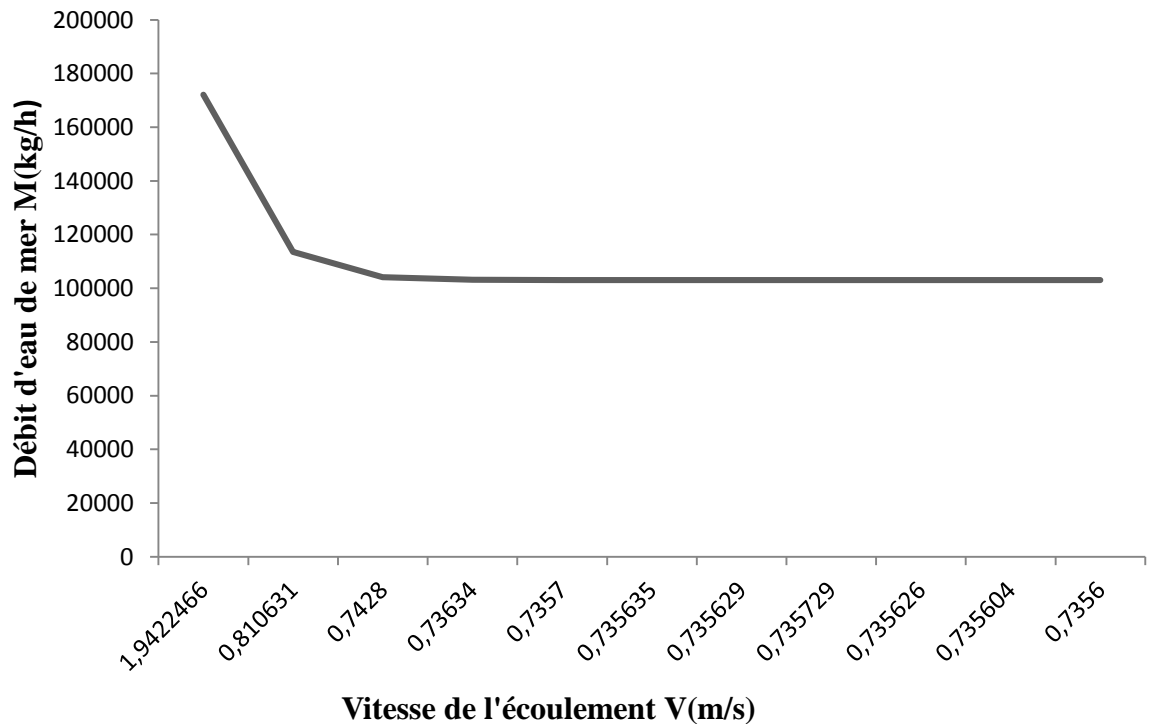


Figure III.2 : Evolution de la vitesse de l'écoulement en fonction de débit d'eau de mer.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

Les résultats obtenus montrent que le débit d'eau de mer à travers les tubes du refroidisseur E-504 est de l'ordre de $103079,6 \text{ kg. h}^{-1}$. Ce débit est insuffisant comparé à celui du design qui est de l'ordre de $147\ 870 \text{ kg. h}^{-1}$.

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

- Réduction de la section de passage à travers les plaques à orifice RO13.1/13.2 ;
- 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.

Toutefois, la température de la solution MEA pauvre à la sortie du refroidisseur E-504 n'atteint le seuil alarmant qu'après l'encrassement des parois internes des tubes.

Le fonctionnement de cet échangeur avec un débit d'eau de mer insuffisant, favorise l'augmentation de la température de la MEA pauvre au moins d'encrassement des tubes de l'échangeur.

III.6.2. Encrassement de la boîte de distribution de l'eau de mer [18]

Suite à l'inspection et après l'ouverture de l'échangeur, nous avons remarqué :

- Dépôt de tartre important dans la boîte de l'eau de mer ainsi que sur les plaques tubulaire ;
- Peinture dans un état dégradé.

La figure III.3 montre les tartres formés sur la boîte de distribution.



Figure III.3 : Les tartres formés sur la boîte de distribution.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

III.6.3. Encrassement de la paroi interne des tubes

Nous donnons ci-dessous une brève présentation du traitement requis pour l'eau de refroidissement.

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.

III.6.3.a. Dégrillage

Cette opération permet de protéger la station de traitement contre l'arrivée intempestive de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans des déférents tubes de l'installation ou de détériorer des coups en pompe.

Le dégrillage retient des matières volumineuses chargées par l'eau de mer et qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements ultérieurs. Cette opération est assurée par des grilles fixes ; qui doivent être nettoyées périodiquement.

Ainsi l'eau de mer est filtrée et aspirée à partir d'un bassin de rétention puis refoulée vers l'utilisation grâce aux six pompes d'eau de mer.

III.6.3.b. Electro 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 .

❖ Constituants chimiques de l'eau de mer

L'analyse chimique de l'eau de mer effectuée au GL1/Z a donné dans le tableau III.6.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ÉCHANGEUR E.504

Tableau III.6: Analyse chimique de l'eau de mer.

Anions	ppm	Cations	ppm
Chlorure (Cl^-)	18980	Sodium (Na^+)	10556,1
Sulfate (SO_4^{2-})	2646	Magnesium (Mg^{2+})	1272
Bicarbonate (HCO_3^-)	13970	Calcium (Ca^{2+})	400,1
Fluorure (F^-)	64,8	Potassium (K^+)	380
Bromure (Br^-)	1,3	Strontium (Sr^+)	13,3

Cependant, cette analyse exécutée selon un protocole classique, ne révèle pas les impuretés chimiques et biochimiques que peut contenir cette eau.

Examen visuel révèle que la paroi interne de l'échangeur E.504 est bouchée par un dépôt de tartre, ce dépôt formé à un faible débit de l'eau de mer et la température de sortir de la solution de MEA.

La figure III.4 montre le bouchage du faisceau tubulaire de l'échangeur E.504.



Figure III.4 : Bouchage des tubes de l'échangeur E.504.

Les résultats d'analyse du dépôt des faisceaux tubulaires de l'échangeur E-504 donnés par le laboratoire du complexe du GNL mettent en évidence la présence d'une quantité importante de sels de calcium, de magnésium et d'une quantité moins importante de cuivre, de nickel et de fer.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

Les résultats des analyses des dépôts sont donnés dans le tableau III.7.

Tableau III.7: Résultats des analyses des dépôts.

	Calcium	Magnésium	cuivre	Fer	Nickel
masse (kg)	49,22	30,88	3,99	0,89	1,94

Les résultats des analyses de la masse des composants du dépôt montrent que le dépôt est carbonaté, formé de 50% de carbonate de calcium.

III.6.3.c. Mécanisme de formation du tartre

La formation du tartre se fait sous deux principales étapes : l'adsorption des ions Ca^{2+} sur CaCO_3 ainsi que la précipitation.



✓ Adsorption des ions Ca^{2+} sur CaCO_3



✓ Début de précipitation



CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

III.6.4. Dégradation de la surface externe des tubes

La paroi extérieure des tubes de l'échangeur est en contact avec un fluide corrosif (MEA), nous avons observé que la surface des tubes est sévèrement corrodée.

La figure III.5 montre l'effet de la solution de MEA sur les tubes de l'échangeur E.504



Figure III.5 : Effet de la MEA sur la surface des tubes.

D'après une expérience faite sur des échantillons des tubes en cupronickel, il a été démontré que la solution MEA est responsable de la corrosion des tubes. La vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la concentration de la solution de MEA.

Le tableau III.8 montre l'influence de la concentration de la solution de MEA sur la vitesse de corrosion.

Tableau III.8: Influence de la concentration sur la vitesse de corrosion.

% MEA	Vitesse de corrosion (mm.an ⁻¹)	Rapport de vitesse
		V(MEA) / V (MEA=0) (mm.an ⁻¹)
0	0,012	1
5	0,047	4
10	0,14	11,66
20	0,21	17,5
25	0,74	61,66

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

Les résultats du tableau montrent que la solution de MEA n'est pas seule responsable de la corrosion, car à un pourcentage 0% de MEA, la vitesse de corrosion n'est pas nulle. Alors il existe une corrosion à des faibles vitesses.

III.7. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les différents constats enregistrés au niveau des tubes de l'échangeur E.504 lors des ouvertures de ces équipements ont révélé que la paroi interne est colmatée par des dépôts de tartre. La cause principale de ces tartres est le faible débit de l'eau de mer ainsi que la température de sortie de la solution MEA.

Un autre phénomène a été relevé : la présence de corrosion sur la surface des tubes de l'échangeur, cette dernière peut être provoquée par la concentration élevée du MEA. La corrosion est la cause principale de la détérioration de la surface externe des tubes et par la suite la fissuration et le perçage des tubes.

L'érosion contribue aussi au perçage des tubes, en effet la solution de MEA entre du côté calandre avec une grande pression et vitesse de circulation provoquant l'érosion de la surface des tubes.

Ces différents constats ont pour conséquences :

- La diminution de la transmission de chaleur du métal vers le fluide d'où le risque d'un échauffement local du métal, par conséquent un affaiblissement des caractéristiques mécaniques. Ce qui est considéré comme danger pour la durée de vie de l'appareil ;
- Le rendement thermique de l'appareil baisse ;
- L'entraînement des grosses particules provoquant la turbulence qui fait accentuer la vibration des tubes ;
- La grande différence de pression entre la solution de la MEA et l'eau de mer favorisent la pénétration des tubes des échangeurs à l'intérieur ;

III.8. LES CONSEQUENCES DE CES PROBLEMES

L'encrassement chronique de cet échangeur se traduit par de nombreux problèmes et un impact sur l'arrêt des installations pour cause de maintenance. Les causes des arrêts fréquents sont :

- Arrêt des installations ;
- Remplacement du matériel corrodé ;

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ÉCHANGEUR E.504

- Les pertes d'amine.

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

a) Problème de perte de la MEA

Suite aux arrêts impératifs de l'unité, pour effectuer les travaux d'entretien des équipements y compris le réfrigérant d'amine, il devient nécessaire de faire des appoints de la solution de MEA qui est rejetée à l'ouverture des appareils.

b) Coût de la maintenance

L'entretien des échangeurs E.504 est très coûteux. Le tableau III.9 ci-dessous résume le nombre d'intervention.

Tableau III.9: l'entretien des échangeurs E.504 pour six trains pendant 3ans

nombre d'intervention	heurs réalisés	cout p .d .R
35	4003	962913

P. d. R: Pièces de rechange.

Coût total de maintenance de l'échangeur : 6157451 DA.

c) Manque à produire du à l'arrêt de l'unité

Les arrêts impératifs et fréquents de l'unité de traitement du GN à cause des différents problèmes, particulièrement les réfrigérants d'amine (E.504), engendrent un manque à produire très important.

Exemple:

Le 26/06/2007.....arrêt du train 400 (arrêt de 5 jours).

Le 30/06/2007.....Démarrage de l'unité.

Sachant que chaque train a une capacité de production de GNL de 8870 m³ par jour et 1m³ de GNL coute 12960 DA donc :

Manque à produire de 5 jours ➡ 44350 m³ GNL ➡ 574776000 DA

Opération de dégivrage ➡ Impact sur le cout de production ➡ Impact sur l'environnement.

CHAPITRE III : L'ENCRASSEMENT AU NIVEAU DE L'ECHANGEUR E.504

d) Impact écologique

L'entraînement accidentel de la mono-éthanol-amine MEA vers la mer est dû aux facteurs suivants:

- Perforation des tubes des différents échangeurs de chaleur à cause de la corrosion due à l'eau de mer.
- Fuite de la MEA sur différents équipements (ligne corrodée, brides, vannes...etc.).
- Evacuation de la MEA accidentelle vers les égouts.

III.9. CONCLUSION

Dans cette partie, notre objectif est étudié les problèmes de l'encrassement de l'échangeur E.504 de la section de décarbonatation du complexe GL1/Z. L'analyse chimique et microscopique du métal, et l'analyse des parois interne/ externe des tubes des échangeurs E504 nous a permis de conclure que la cause principale de la fissuration des tubes est due :

- ❖ 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 solutions de ces problèmes sont :
- ❖ Une diminution de production de GNL ;
- ❖ ainsi qu'une diminution du rendement thermique de l'appareil ;
- ❖ Arrêt des installations.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail de master II, en effectuât un stage professionnel est l'étude de phénomène d'encrassement de l'échangeur E.504 dans la section de décarbonatation du complexe GL1/Z.

Suite aux différents problèmes vécus au niveau du refroidisseur de la solution MEA pauvre, un mauvais de transfert de chaleur à été enregistrée.

Le mauvais de transfert de chaleur du refroidisseur E.504 due aux :

- 1- Débit d'eau de mer insuffisant de refroidissement ;
- 2- Encrassement de la boîte de distribution de l'eau de mer ;
- 3- Encrassement la paroi interne ;
- 4- Dégradation de la surface externe des tubes.

Les résultats d'analyse des dépôts des faisceaux tubulaires de l'échangeur E.504, 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 de boucher les tubes ainsi une diminution le transfert de chaleur de l'eau de mer d'où un échauffement local du métal, ayant pour conséquence une baisse des caractéristiques mécaniques de l'échangeur.

Du fait d'un encrassement important, les performances de ces réfrigérants s'en trouvent régulièrement fortement affectées. La section de décarbonatation dépendant de cette échangeur et par suite pénalisée du fait du mauvais fonctionnement de ces appareils.

Les solutions de ces problèmes sont :

- Une diminution de production ;
- L'abaissement le rendement thermique de l'appareil ;
- Arrêt les installations ;
- Impact écologique sur l'environnement, déversement de la MEA vers les égouts et la mer.

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 ce phénomène d'encrassement est évolutif sur le refroidisseur E.504, de ce fait nous prévoyons les recommandations suivantes :

RECOMMANDATIONS

L'échangeur de chaleur E.504 a 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 :

- Stopper les débris marins à l'aide de l'unité l'électrochloration et vu les problèmes d'exploitation de cette dernière, l'instabilité de fonctionnement de l'unité suite aux déclenchement fréquent par bas débit d'eau de mer, non fonctionnement du système de dosage de choc, l'endommagement des parties internes des vannes d'injection continue et choc et la mauvaise répartition de la teneur hypochlorite de sodium dans le système de refroidissement d'eau de mer :
 - Pour permettre au dosage de choc d'avoir lieu, installer des transmetteurs qui résistent au champ magnétique.
 - Remplacer les parties endommagées des vannes de dosage continu et de choc par des matériaux conforme à l'utilisation d'hypochlorite de sodium.
 - 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.
- A fin d'empêcher l'obturation totale des tubes de cette échangeur avec des tartres, on recommande ce qui suite :
 - Respecter les fréquences de vidange des encrassements 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.
 - Respecter les conditions d'exploitation de l'échangeur.
 - Injecter dans le circuit de refroidissement de l'eau de mer des inhibiteurs antitartres pour retarder la formation des tartres.
 - Respecter la dose de la MEA pour éviter la dégradation des surfaces extérieures des tubes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Département technique du complexe, étude de l'augmentation cyclique de CO₂ au niveau de la section de décarbonatation, 2009/2010.
- [2] www.techno-science.net.
- [3] Manuel opératoire du procédé de liquéfaction du complexe GL1 /Z.
- [4] Manuel d'information et de sensibilisation, Elaboré par le service prévention Avril 1998, révisé en janvier 2003.
- [5] Formation d'ingénieur, module 11: décarbonatation, volume 26, 1994.
- [6] www.google.fr.
- [7] Microsoft Encarta 2007.
- [8] N, Epstein; Fouling in heat exchangers, Heat Transfer : 6th International Heat Transfer Conference, 6, p 235-253, 1978.
- [9] F.L, Laque, H.R, Copson ; Corrosion resistance of metals and alloys, Reinhold Publishing Corporation, 1963.
- [10] C, Duffau, J.M, Grillot, J.M, Navarro, R, Vidil; L'encrassement dans les échangeurs : description, prévention, remèdes, GRETh Technique et Documentation, Diffusion Lavoisier, 1991.
- [11] D, Lund, C, Sandhu Chemical reaction fouling due to foodstuffs, Editions Summerscales, Hemisphere Washington DC, p 437, 1981.
- [12] J, Rodier ; L'analyse chimique et physicochimique de l'eau, Editions Dunod, 1971.
- [13] N, Epstein; Thinking about heat transfer fouling: a5x5 matrix, Heat Transfer Engineering, 4 (1), p 43-56, 1983.
- [14] N.F, Glen; S. F, Flynn; J.M, Grillot; P, Mercier; Measurement and modelling of fouling on finned tubes. Fouling mechanisms: Theoretical and Practical aspects, Eurotherm Seminar 23, Grenoble, p 181-188, 1992.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[15] J.M, Grillot ; Etude du dépôt de particules en phase gazeuse dans des canaux d'échangeurs thermiques à plaques, Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 1989.

[16] J.M, Grillot; G, Icart; Fouling of a cylindrical probe and a finned tube bundle in a diesel exhaust environment, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14, p 442-454, 1997.

[17] F, Finkbeiner ; T, Gonard ; B, Filiol ; Echangeurs thermiques: Enjeux, marchés, technologie et politique d'innovation. Editions européennes Thermiques et Industries (EETI), France, 1993.

[18] M, Goyhenetche ; Diagnostic technique et économique de l'encrassement des équipements de transfert thermique dans l'industrie française, France, 1991.

Les mots clés :

L'échangeur E504

La section de décarbonatation

Phénomène d'encrassement

Régénérateur

L'absorbeur

Solution MEA