

Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2024

قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : INDUSTRIES PÉTROCHIMIQUES

Option: GÉNIE PÉTROCHIMIQUE

THÈME

**ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT
DU REFROIDISSEUR DE GAZOLINE (E758) DU COMPLEXE GL1/Z**

Présenté par

- 1- Mr BOUADJADJ Mejdoub Mohamed Rechad
- 2- M^{elle} HAMMOU Ismahane

Soutenu le 23/06 /2024 devant le jury composé de :

Président :	KHELLADI Malika	MCB	Université de Mostaganem
Examineur :	MOHAMED SEGUIRZahira	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	MEZOUAGH Amina	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024



Remerciement

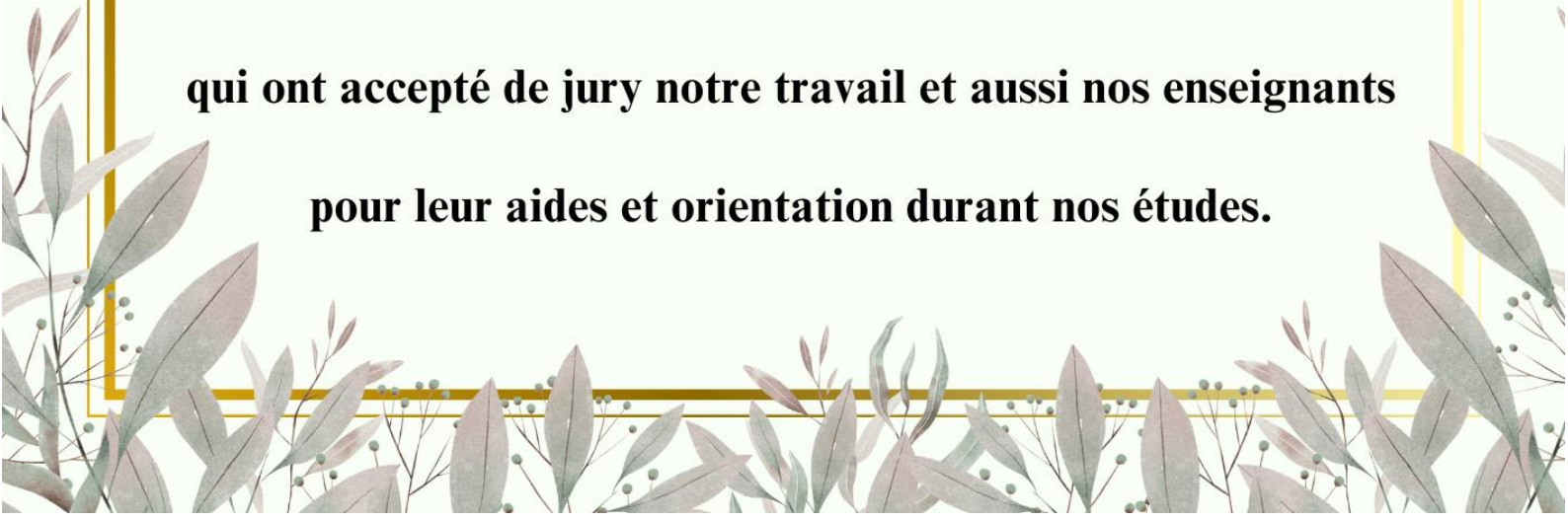


En premier lieu, nous tenons à remercier notre Dieu, qui nous a donné la force pour accomplir ce travail.

Mes remerciements vont en premier lieu, à Dr mezouagh Amina qui a guidé nos pas tout au long de ce travail

Je la remercie pour ses remarques et ses conseils précieux.

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux membres de jury Mme Mohamed Seghir Zahira et Mme Khelladi Malika qui ont accepté de jury notre travail et aussi nos enseignants pour leur aides et orientation durant nos études.





Dédicace :

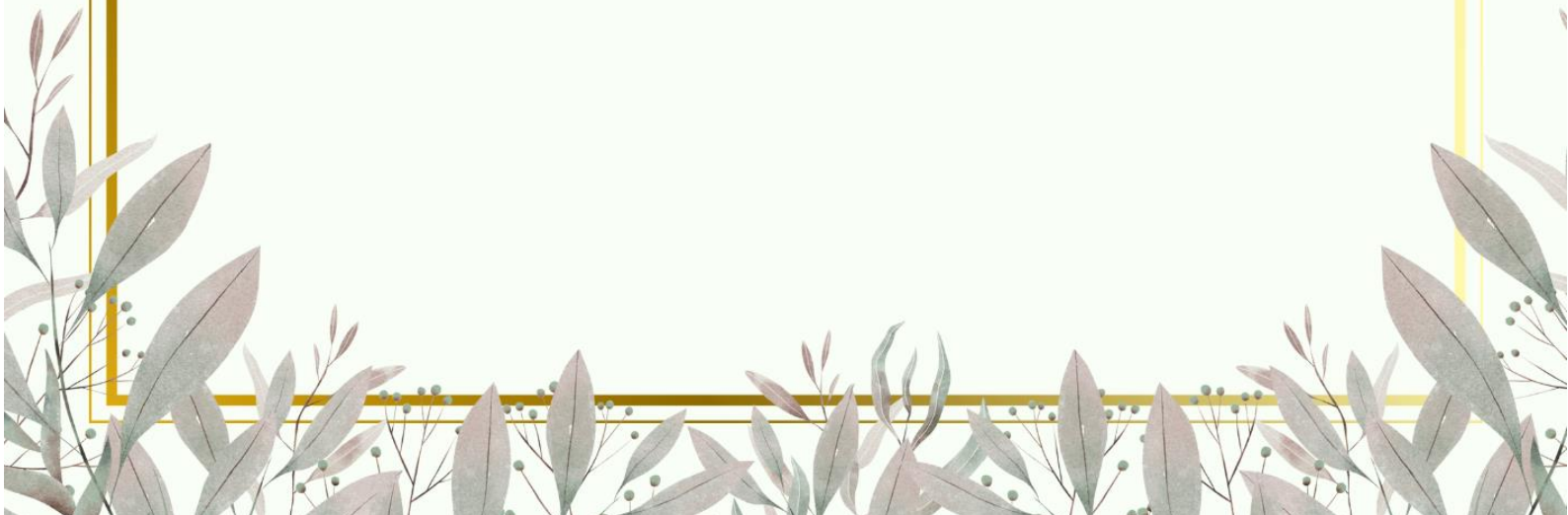


Nous dédions ce travail à :

Nos chers parents

Nos collègues et Nos camarades

A tous nos enseignants de l'université



Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I:Présentation du Complexe GL1/Z	
I.1 La mission de complexe GL1/Z	2
I.2 Situation géographique de complexe GL1/Z.....	2
I.3 Fiche technique	2
I.4 Description générale du complexe GL1/Z	3
Chapitre II :Généralités sur les échangeurs de chaleur	
II.1 Définition d'un échangeur de chaleur	19
II.2 Classification des échangeurs de chaleur	19
II.3 Les différents types d'échangeurs	20
II.4 Les problèmes d'un échangeur de chaleur	24
Chapitre III : Analyse du problème rencontré au niveau du Refroidisseur de Gazoline (E758)	
III.1 Présentation du problème	25
III.2 Methodologies de travail	26
III.2.1 Description du refroidisseur de gazoline E 758	27
III.2.2 Emplacement du problème de corrosion.....	28
III.2.3 Agressivité de l'eau de mer	29
III.3 Le choix du matériau	30
III.3.1 Acier au carbone.....	30
III.3.2 Les alliages de cuivre	32
III.3.3 Assemblage de deux matériaux différents	34
III.3.4 Conclusion.....	34
III.4 Attaque galvanique	34
III.5 Solutions du problème	35
III.5.1 La 1 ^{ière} Solution proposée	35
III.5.2 La 2 ^{ème} Solution proposée	38
III.5.2.1 Calcul d'un nouvel échangeur.....	38
III.5.2.2Interprétation des résultats.....	44
Conclusion générale.....	45
Références bibliographiques	

Liste des figures

Chapitre I:Présentation du Complexe GL1/Z

Figure I.1: Localisation du complexeGL1/Z.....	2
Figure I.2: Organisme du complexe.....	3
Figure I.3 : La zone de process.....	5
Figure I.4 : La section du démethanisation.....	11
Figure I.5 : La section du déthanisation.....	13
Figure I.6 : La section du dépropanitation.....	16
Figure I.7 : La section du débutanisattion.....	17
Figure I.8 : Zone du stockage et d'expédition.....	18

Chapitre II :Généralités sur les échangeurs de chaleur

Figure II.1 : Echangeur de chaleur tube double enveloppe.....	20
Figure II.2 : Echangeurs tubulaires.....	21
Figure II.3 : Echangeur de chaleur à plaques.....	21
Figure II.4 : Echangeursserpentins.....	22
Figure II.5 : Echangeur à tête flottante.....	23
Figure II.6 : Echangeur de chaleur à tube en U.....	23

Chapitre III: Analyse du problème rencontré au niveau du Refroidisseur de Gazoline (E758)

Figure III.1 : L'emplacement du refroidisseur de la gazoline (E-758) dans le train.....	27
Figure III.2 : Schéma d'explication de refroidisseur (E-758).....	27
Figure III.3 : Le tube intérieur refroidisseur de la gazoline (E-758).....	28
Figure III.4 : La manchette.....	28
Figure III.5 : Schéma de circuit de l'eau de refroidissement.....	30
Figure III.6 : Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint.....	33
Figure III.7 : Corrosion inter granulaire.....	34
Figure III.8 : Corrosion Galvanique.....	34
Figure III.9 : Première étape.....	36
Figure III.10 : Deuxième étape.....	37
Figure III.11 : Troisième étape.....	37
Figure III.12 : Schéma d'un échangeur tube calandre.....	38

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Composition du produit GNL.....	8
Tableau I.2 : Composition du MCR.....	9
Tableau III.1 : Résultat des rapports effectués par le service d'inscription concernant les refroidisseurs.....	26
Tableau III.2 : Composition chimique de l'eau de mer.....	29
Tableau III.3 : Composition chimique de l'acier au carbone.....	32
Tableau III.4 : Composition de bronze-Aluminium.....	32
Tableau III.5: Données nécessaires pour le calcul de refroidisseur E-758.....	39
Tableau III.6 : Le résultat de calcul.....	44

Introduction

Sonatrach est la plus importante compagnie d'hydrocarbures en Algérie et en Afrique. Elle intervient dans l'exploration, la production, le transport par canalisations, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés.

Adoptant une stratégie de diversification, Sonatrach se développe dans les activités de génération électrique, d'énergies nouvelles et renouvelables, de dessalement d'eau de mer, de recherche et d'exploitation minière.

Le procédé de liquéfaction du gaz naturel exige plusieurs refroidisseurs qui véhiculent des fluides réfrigérant.

L'eau de mer est un fluide nécessaire au besoin de refroidissement des trains de process qui provient de la station de pompage d'eau de mer, elle comprend six pompes à eau de mer, une pour chaque train de process et dispose d'un excédent de capacité suffisant pour fournir l'eau de refroidissement nécessaire aux équipements de la section des utilités.

Les refroidisseurs de la gazoline sont sujets à la corrosion au niveau des manchettes, il a été constaté que le phénomène de corrosion des refroidisseurs E758 est généralisé sur tous les trains des unités de fractionnement d'où l'importance du rôle des refroidisseurs. Pour notre cas il est impératif d'étudier et remédier à l'endommagement du refroidisseur de gazoline qui assure le refroidissement par l'eau de mer qui est de caractère corrosif.

On débute notre travail par une présentation du complexe GL1/Z suivie de la description du process dans le premier chapitre, et nous présentons ensuite des généralités sur les échangeurs de chaleur dans le 2^{ème} chapitre.

Le 3^{ème} chapitre du document porté sur l'analyse du problème rencontré au niveau du refroidisseur de Gazoline (E758), on commence par la description de notre refroidisseur de gazoline, ensuite la présentation du problème qui incite à l'analyse de l'eau de mer et le choix des matériaux utilisés, et des notions sur la corrosion. À ce stade de l'étude, on cherche à remédier au problème rencontré par la proposition de solutions concrètes (pratique) et théorique.

En fin nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I
Présentation
du Complexe
 GL_1/\mathbb{Z}

I.1 La mission de complexe GL1/Z

Le complexe GL1/Z a pour mission de liquéfier le gaz naturel provenant des champs gaziers de HassiR'mel pour faciliter le transport dans des méthaniers vers l'étranger.

I.2 Situation géographique de complexe GL1/Z

Le complexe GL1/Z se situe dans la zone industrielle d'Arzew à 8 Km environ de la ville d'Arzew et à 1 Km de la ville de Bethioua. Il s'étend sur une superficie de 72 Hectares dont 56 Hectares occupés par les installations. [1]



Figure I.1: Localisation du complexe GL1/Z

I.3 Fiche technique

- Alimentation en Gaz Naturel : à partir de HassiR'mel.
- Procédé : APCI (Air Product Chemical Incorporation)
- Construction par: Chemical Construction Incorporation et Bechtel Int.
- Début de construction: Le 16 juin 1973.
- Date de démarrage : Le 20 Février 1978.
- Superficie : 72 Hectares.
- Nombre de trains : 06 trains identiques.
- Capacité de production : 17.8 millions m³ de GNL par ans (design)
- Capacité de stockage d'un bac : 100.000 m³ de GNL.
- Température de stockage du produit GNL : -162 °C.

I.4 Description générale du complexe GL1/Z

Le complexe GL1/Z est une usine de liquéfaction de gaz naturel, qui consiste à une transformation d'un état gazeux du gaz naturel “ GN ” à un état liquide “ GNL ” (réduction de volume 600 fois) en utilisant le procédé A.P.C.I développé par la société américaine : Air Product Chemical Incorporation. Le complexe GNL1/Z est composé de trois zones :

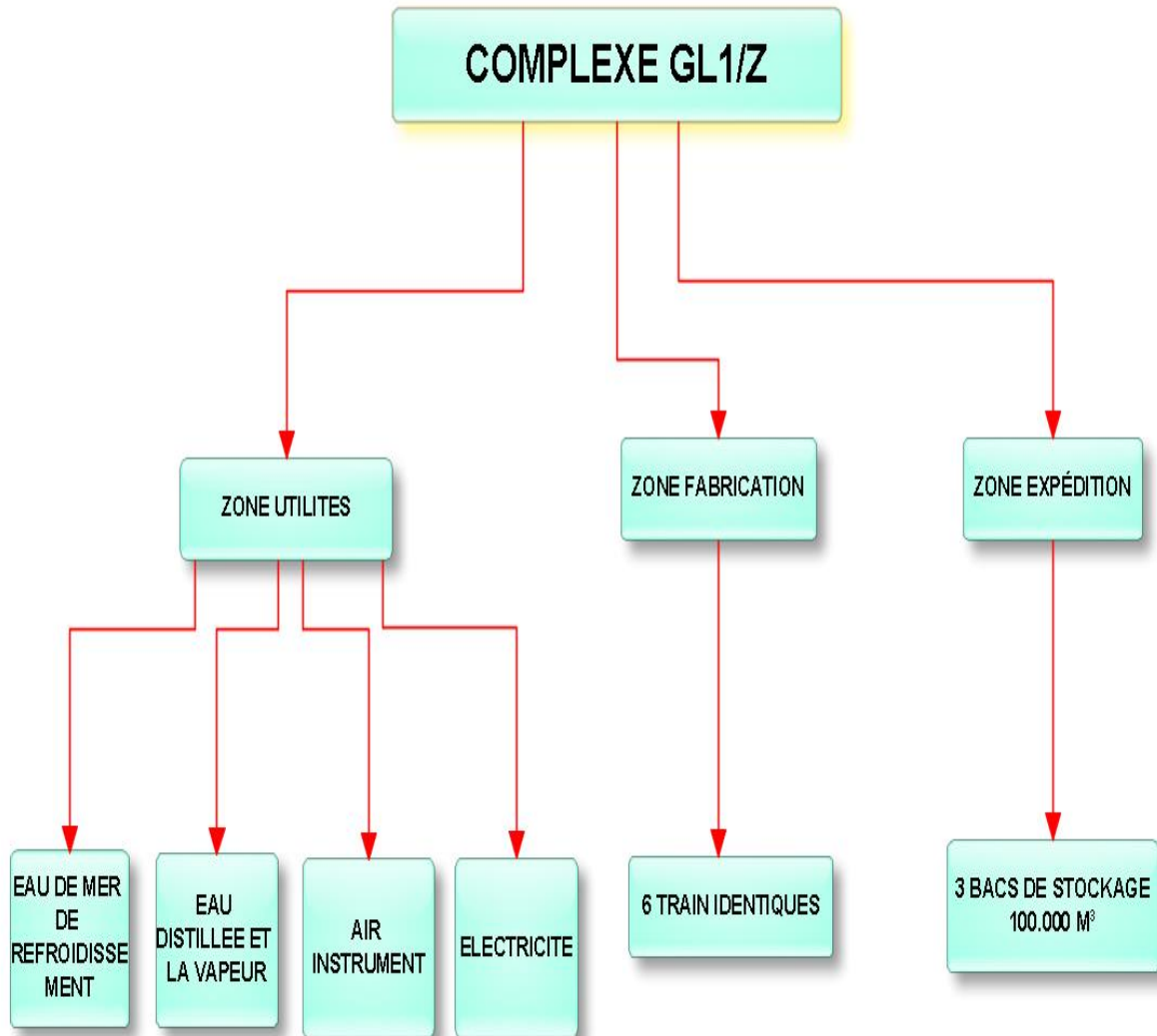


Figure I.2: Organigramme du Complexe

I.4.1 Zone utilité

Cette zone assure la fourniture de toutes les utilités en ce qui concerne la production d'électricité, d'air instrument, eau distillée et azote.

Au niveau de cette zone on rencontre essentiellement :

- Les chaudières.
- Les unités de dessalements.
- Les installations servant pour le stockage d'azote.
- Les installations servant pour la production d'air.

I.4.1.1 Production de vapeur

La production de la vapeur joue un rôle important en tant que source d'énergie pour le fonctionnement de diverses installations. Cette vapeur est produite par un ensemble de:

- 17 chaudières de 136 tonnes de vapeur/heure chacune à 62 bars et 442 °C.
- 04 chaudières de 400 tonnes de vapeur/heure chacune à 62 bars et 442 °C.
- 03 chaudières de 91 tonnes/heure chacune à 62 bars et 442 °C.
- 01 chaudière basse pression de 51 tonnes de vapeur/heure à 27 bars.

I.4.1.2 Production d'électricité

La production d'électricité est assurée par trois (TG) turbo générateur de puissance de 18 MW chacun.

Les besoins du complexe sont de l'ordre de 36 Mwatts, en plus de la production des TG nous disposons d'une source complémentaire (réseau SONELGAZ), Pour une éventuelle compensation de l'énergie en cas de nécessité.

I.4.1.3 Circuit eau de mer

L'eau de mer est utilisée dans le complexe comme réfrigérant dans les différentes unités du complexe particulièrement comme source chaude des cycles frigorifiques et comme source froide des cycles de vapeur et par ailleurs l'eau de mer sert aussi pour la production d'eau dessalée.

L'eau de mer est pompée à partir du grand bassin par les six pompes de repéré J601/J602/J603/J604/J605/606 avec deux et 1/2 boites de distributions l'une servant à alimenter les trains de process 100/200/300/utilités et l'autre pour les trains de production 400/500/600.

I.4.1.4 Production d'eau dessalée

L'eau dessalée est produite à partir des unités de dessalement, cette aire comprend six unités de dessalements en parallèle produisant 45m³/h d'eau dessalée chacune, à noter que le complexe s'est doté récemment d'un nouveau type de dessaleur soit l'ejecto- compresseur.

Cette eau sert à alimenter les chaudières pour la production de vapeur, entre autre cette eau dessalée est utilisée aussi comme fluide de refroidissement pour certain équipement mécanique tels que les pompes...etc.

I.4.1.5 Electro-Chloration

La chloration des eaux de mer a pour but d'empêcher le développement des substances marines vivantes telles que les moules pouvant se proliférer et causant un bouchage ou une obstruction au niveau des condenseurs à eau de mer.

I.4.1.6 Production d'azote

L'azote est utilisé dans le complexe comme fluide de sécurité pour les opérations d'inertage lors des démarrages des unités d'exploitation. L'azote est produit à partir de l'air ambiant, faisant l'objet d'un traitement de séparation à noter que cette installation est à l'arrêt à cause de défaillances mécaniques des compresseurs. [2]

I.4.1.7 Production d'air comprimé

Les organes d'instrumentation tels que les régulateurs et les différentes vannes sont à commande pneumatiques. L'air instrument subit au préalable un séchage pour éviter une corrosion ou une dégradation des organes d'instrumentation.

Les besoins du complexe sont estimés à 4600 mètres cubes d'air, cet air est fourni par cinq compresseurs centrifuges avec une pression de refoulement de 8 bars stockés au niveau des ballons récepteur d'air instrument

I.4.2 Zone de process

La zone de process est constituée de six unités parallèles et indépendantes appelées trains.

Chaque train de liquéfaction est composé des sections suivantes :

I.4.2.1 Section de traitement du gaz

Dans cette section, trois opérations sont réalisées :

- Décarbonatation.
- Déshydratation.
- Démercurisation.



Figure I.3 : La zone de Process

I.4.2.2 Décarbonatation

L'élimination de l'anhydride carbonique (CO₂) du gaz naturel est nécessaire afin d'éviter sa congélation et le bouchage dans la partie froide du train. Ceci peut entraîner l'arrêt du train pour le dégivrage des circuits.

Cette section consiste à piéger le CO₂ par une méthode d'absorption à contre-courant avec une solution de MEA où la concentration du CO₂ est réduite à moins de 90 ppm dans le gaz. La colonne d'absorption est équipée d'une section d'épuration en bas de colonne pour l'élimination des hydrocarbures lourds et les impuretés. La solution de MEA riche en CO₂ passe ensuite dans une colonne de régénération pour être réutilisée de nouveau dans le circuit.

I.4.2.3 Déshydratation

L'élimination du H₂O s'effectue par le passage du gaz d'alimentation saturé et débarrasser de son CO₂ par un refroidisseur à propane E -521 jusqu'à 21°C, ensuite dans le séparateur des sécheurs G-787 qui permet de condenser une grande partie de l'eau contenue dans le gaz. Après être refroidit une grande quantité d'eau est éliminée par condensation, deux sécheurs à tamis moléculaire R-310 ou R-311 sont prévus pour l'élimination des vapeurs d'eau et réduire l'humidité à une concentration inférieure à 1 ppm.

Les sécheurs travaillent en intermittence quand l'un est en séchage le deuxième est en régénération. L'élimination est basée sur la fixation des molécules d'eau contenues dans le gaz naturel par le phénomène d'adsorption.

Le gaz déshydraté est ensuite filtré dans les filtres P-312 A & B pour éliminer les particules solides entraînées.

I.4.2.4 Démercurisation

Les traces de mercure contenues dans le gaz d'alimentation sont piégées dans les parties froides du train. Les gouttelettes de mercure ainsi formées attaquent les métaux une fois ceux-ci réchauffés. Pour éviter ces détériorations un démercuriseur R-312 à base de charbon actif imprégné de soufre a été installé en amont de la tour de lavage.

La teneur en mercure est réduite à 0.01 µg/Nm³ dans le gaz qui est ensuite filtré dans l'un des deux filtres à poussières P13 A&B afin d'éviter l'entraînement des solides dans les circuits en aval.

I.4.2.5 Section séparation

Après avoir enduré une série d'opérations de traitement, le GN est refroidit à l'aide de propane de stage moyenne et basse pression pour condenser les hydrocarbures lourds.

Le gaz d'alimentation entre dans la tour de lavage où une distillation est prévue pour éliminer les hydrocarbures lourds du gaz d'entrée qui peuvent boucher les lignes froides en aval.

Le gaz de tête appelé gaz naturel traité (GNT) quitte la tour de lavage où il sera acheminé vers la liquéfaction.

La phase liquide récupérée est renvoyée dans l'unité de fractionnement.

Le rôle de cette section est de:

- Récupérer les composants lourds du GN d'alimentation, lesquels seront utilisés dans le fractionnement, pour ajuster les compositions des fluides réfrigérants (MCR et propane) dans leurs boucles respectives.

- Récupérer les condensats en vue de leur valorisation.

I.4.2.6 Section liquéfaction

L'élément principal de cette section est l'échangeur E520 de type bobine à serpentins enroulés. Il est conçu de façon à optimiser la surface d'échange évaluée à 140.000 ft². L'échangeur cryogénique comprend six faisceaux de tubes qui accueillent le MCR vapeur, le MCR liquide et le GNT (deux faisceaux pour chaque fluide).

La conception de E520 permet d'optimiser la quantité de frigories cédée par les réfrigérants pour s'auto refroidir et assurer le refroidissement du GNT.

En effet l'effluent MCR liquide traverse la partie chaude du E520 pour être d'étendue à 40 bars et - 110°C à ce niveau le GNT est refroidi jusqu'à - 120°C.

L'effluent MCR vapeur se condense dans la partie chaude, et arrive à la limite de la partie froide pour subir une détente. A la sortie sa température est égale à - 158°C.

Le liquide obtenu après chaque détente est distribué sous forme de douche pour homogénéiser le transfert de chaleur.

A la limite de la partie froide le GNT quitte le E520 à $T = - 148^{\circ}\text{C}$ et 25 bars effectifs puis subit une détente isenthalpique qui fait baisser sa température jusqu'à $T = - 158^{\circ}\text{C}$ et 0.3 bars effectif.

Après une seconde détente dans le ballon déazoteur G783, le liquide est envoyé vers la conduite d'alimentation des bacs par deux pompes J1020 & J1030.

Les vapeurs de flash riches en N₂, cédant leurs frigories dans l'échangeur E530 ou une quantité de GNT qui a bien passée l'échangeur principal est liquéfiée par contact avec les vapeurs froides, pour être ensuite aspirés par le compresseur fuel gaz [2].

Le tableau I.2, met en évidence les pourcentages molaires de la composition du GNL.

Tableau I.1: Composition du produit 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.4.3 Cycle de réfrigération

I.4.3.1 Boucle propane

La boucle propane comprend trois étages de compression. Après avoir été comprimé, le propane est refoulé par le troisième étage du compresseur (K.110), refroidi dans un échangeur à eau de mer (E.513) jusqu'à 43°C puis condensé dans le (E.514 A et B) à eau de mer jusqu'à 37°C. Il est enfin récupéré dans le ballon (G.786). L'accumulateur alimente le ballon séparateur haute pression (G.791) et l'échangeur à propane E.521.

Le propane liquide à haute pression subit des détente successives dans trois ballons de séparation (G.791), (G.790) et (G.785) fonctionnant respectivement à haute, moyenne et basse pression. Les vapeurs obtenues à l'issue de chaque flash, sont aspirées à la pression correspondante.

Le propane à moyenne pression alimente le condenseur de tête de la tour de lavage (E.523) (Utilisé lors du démarrage des trains), les deux refroidisseurs à l'entrée de la tour de lavage (E.522) et (E.524) et l'échangeur à propane de la boucle MCR, (E.525A et B).

I.4.3.2 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 de compresseur. Les vapeurs MCR sont aspirées par le compresseur premier étage (MCR I) puis sont refroidies jusqu'à 38°C dans un échangeur de chaleur à eau de mer pour être ensuite séparées dans le ballon séparateur premier étage.

Le compresseur deuxième étage (MCR II) aspire les vapeurs du séparateur premier étage et les refoule vers l'échangeur de chaleur à eau de mer à une température de 32°C.

Après refroidissement, le MCR est amené à sa température de rosée soit -37°C à la sortie des deux batteries d'échangeurs au propane (E.525 A/B) et (E.526 A/B).

Le MCR partiellement liquéfié, est aspiré dans le ballon (G.789) pour alimenter les échangeurs (E.520), (E.540) et (E.724).

La composition du MCR est indiquée dans le tableau suivant, ce mélange provient des appoints de l'unité de fractionnement et du ballon déazoteur. Il est introduit dans le circuit au niveau du ballon d'aspiration premier étage.

Table I.2:Composition du MCR

Composants		% Molaire
N_2	Azote	3
CH_4	Méthane	40
C_2H_6	Ethane	54
C_3H_8	Propane	3

I.4.4 Section fractionnement

Cette section a pour but de séparer les hydrocarbures issus du fond de la tour de lavage pour les besoins de l'alimentation interne des diverses sections du complexe. Elle est basée sur une distillation en cascade constituée de:

- Déméthanisation.
- Dééthanisation.
- Dépropanisation.
- Débutanisation.

Le résidu de la tour de lavage passe successivement par quatre colonnes pour produire respectivement le méthane, éthane, propane, butane et de la gazoline. Le méthane, l'éthane et le propane liquides sont envoyés respectivement par les pompes vers le ballon accumulateur pour assurer l'appoint du réfrigérant mixte MCR, l'alimentation de la boucle propane, le recyclage des C_3 et C_4 et la réinjection au niveau de l'échangeur principal (E520). Le liquide sortant du fond du débutaniseur riche en C_5^+ est envoyé vers le ballon de stockage de gazoline.

I.4.4.1 Déméthaniseur

Le flux d'hydrocarbures lourds provenant du fond de la tour de lavage est dirigé sur le neuvième plateau de la colonne de déméthanisation F-07.21. Cette colonne fonctionne à une pression d'environ 30 bars effectifs.

Les composants légers, principalement du méthane, sont séparés des hydrocarbures lourds de l'alimentation et ils s'élèvent jusqu'au sommet de la colonne, à contre-courant d'un débit de reflux continuels s'écoulant de plateau en plateau jusqu'au bas de la colonne.

Les vapeurs de tête de la colonne sont partiellement condensées dans le condenseur de la colonne de déméthanisation **E-07.22**, à l'aide de réfrigérant mixte, et séparées dans le ballon de reflux du déméthaniseur **G-07.24**. Les vapeurs non condensées fournissent une source de méthane d'appoint pour le circuit de compression du réfrigérant mixte. Les vapeurs en excès sont envoyées au vaporiseur du mélangeur de gaz combustible **G-304**. Les liquides condensés dans le ballon de reflux viennent compléter les besoins en liquide de reflux de la colonne de déméthanisation.

La solution de reflux avec le reste des hydrocarbures lourds d'alimentation se rassemble dans le plateau inférieur (n°17) et passe dans le rebouilleur du déméthaniseur **E-07.23**. Le rebouilleur est réchauffé par de la vapeur à 3,45 bars et les gaz quittant le rebouilleur sont renvoyés à la colonne de déméthanisation, sous le plateau inférieur. La solution liquide provenant du rebouilleur est renvoyée à la section inférieure de la colonne. Les produits de fond passent dans le refroidisseur à eau de mer (**E-730**), avant d'être dirigés vers la colonne de dééthanisation.

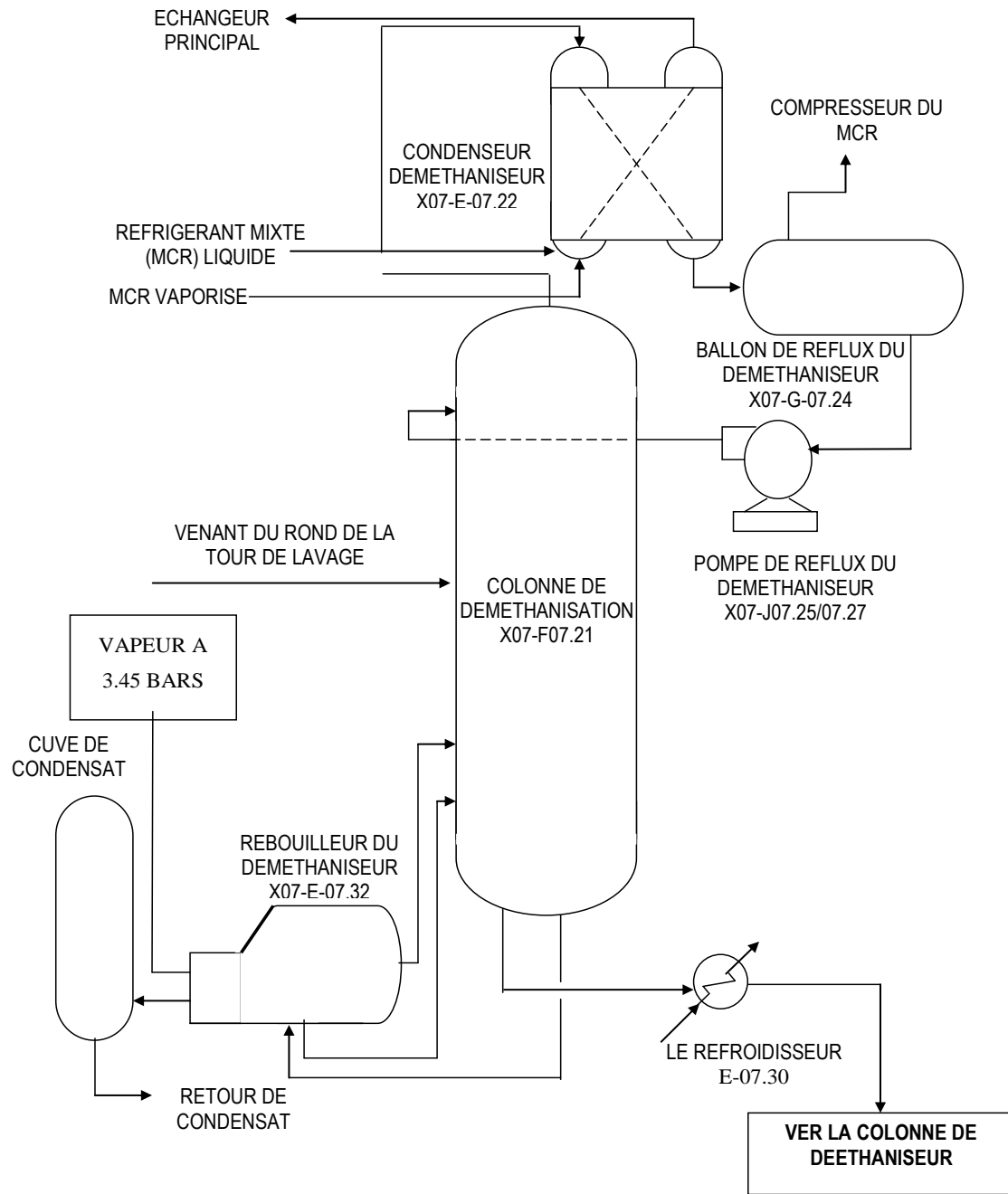


Figure I.4: La section du déméthanisation

I.4.4.2 Dééthaniseur

Le flux d'hydrocarbures lourds issu du fond de la colonne du déméthaniseur alimente le dixième plateau de la colonne du dééthaniseur (**F-07.31**). Cette colonne fonctionne à une pression d'environ **20 bars** effectifs. Dans cette colonne, l'éthane, composant léger, se sépare du flux d'hydrocarbures lourds d'alimentation et monte au sommet de la colonne à contre-courant du reflux continu d'éthane, qui descend en cascade d'un plateau à l'autre de la colonne dééthaniseur.

Les vapeurs de tête de la colonne sont condensées en totalité dans le condenseur du dééthaniseur (**E-07.32**) par du réfrigérant au propane et se rassemblent dans le ballon de reflux de dééthaniseur (**G-07.34**). Les vapeurs non condensées peuvent être envoyées du ballon de reflux au vaporisateur/mélangeur de gaz combustible (**G-304**).

Le liquide issu du ballon de reflux est séparé en deux flux. L'un est renvoyé par pompage au dééthaniseur sous régulation de débit comme liquide de reflux tandis que l'autre est distribué à la tour de lavage et à l'échangeur principal. Ce dernier flux quitte le ballon de reflux du dééthaniseur et il est refroidi à **-33 °C** dans le sous-refroidisseur des retours d'éthane (**E-07.39**).

La pression de la colonne du dééthaniseur est réglée en renvoyant les vapeurs du ballon de reflux dans le réseau de gaz combustible. Il est aussi prévu d'envoyer les vapeurs de tête dans le gaz combustible directement par la canalisation des vapeurs de tête quand il y a une production d'éthane en excès dans l'usine. Toutefois, cette dernière solution n'est pas à recommander pour des raisons économiques.

Une partie du liquide du fond de la colonne du dééthaniseur entre dans le rebouilleur du dééthaniseur (**E-07.33**) où elle se vaporise, tandis que le reste du liquide du fond de la colonne est envoyé dans la colonne du dépropaniseur par une vanne de régulation de niveau. Les vapeurs issues du rebouilleur retournent à la colonne du dééthaniseur au-dessous du dernier plateau inférieur ou vingt-sixième plateau.

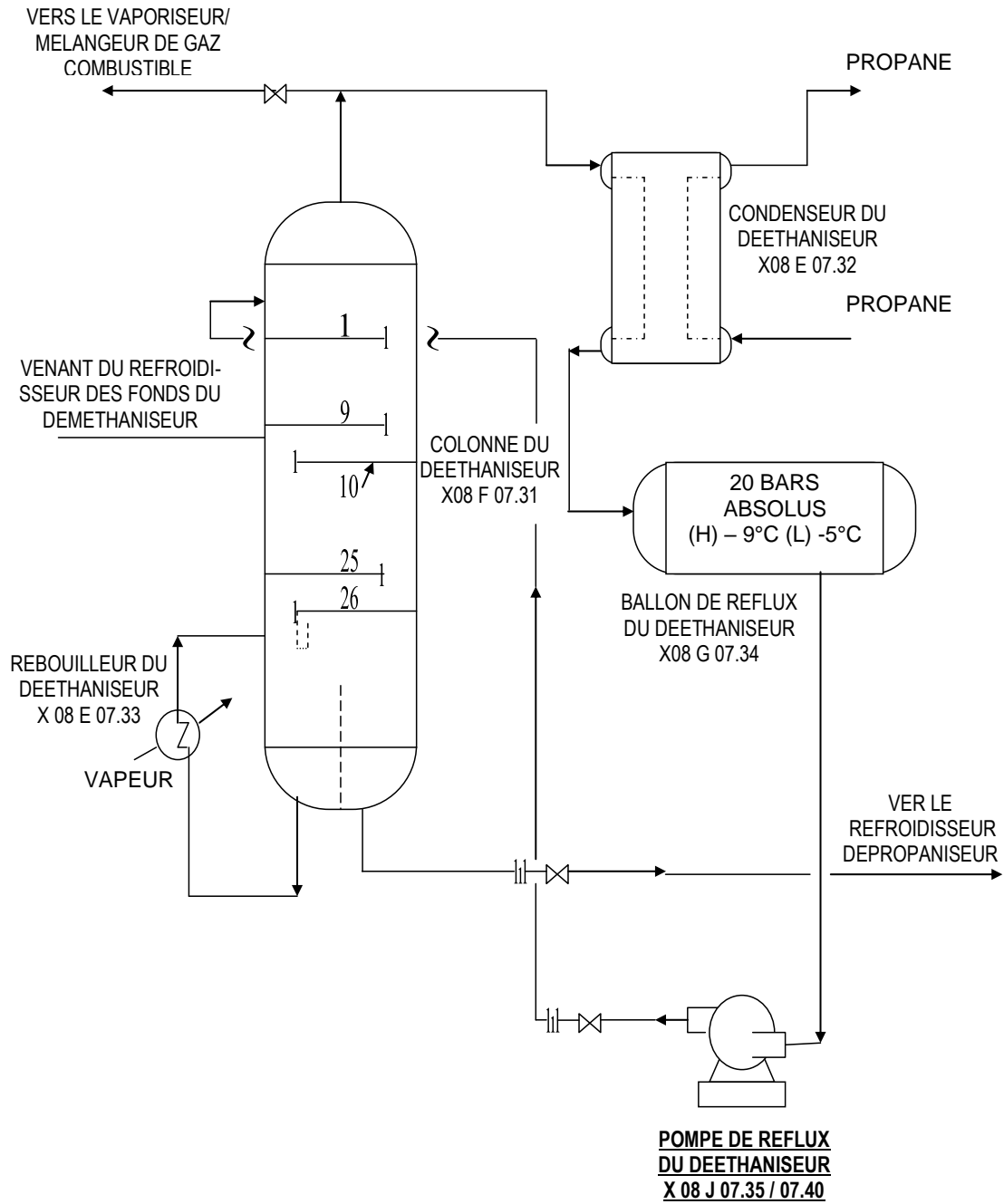


Figure I.5: La section dedéthanisation

I.4.4.3 Depropaniseur

L'alimentation de la colonne dépropanisation X09-F-07.41 provient du fond de la colonne du dééthaniseur X07-F-07.3. Elle est alimentée sous le contrôle de débit FIC-809 par la vanne de régulation de débit FV-809. La charge d'alimentation d'hydrocarbure circule dans un écoulement bi-phasique dans la conduite d'entrée de la colonne dépropaniseur.

Les produits du système dépropaniseur sont les suivantes :

Les vapeurs de tête de colonne du produit propane sont condensées et récupérées dans le ballon de reflux et utilisées comme produit de recyclage ou appoint vers E-520 comme PCS et constituent l'inventaire du réfrigérant de propane liquide.

Le propane à l'état vapeur peut être acheminé comme un make-up du composant vers le système de réfrigération MCR.

La colonne dépropaniseur est une colonne de distillation qui comporte **31 plateaux**. L'alimentation dans la colonne dépropaniseur pénètre dans le plateau 18 et après le transfert de chaleur et de masse dans la colonne, les hydrocarbures sont séparés du courant d'alimentation et passent vers le haut de la colonne circulant à contre-courant à l'écoulement de reflux à et descende vers le bas des plateaux de distillation dans la colonne.

Le fond de la colonne est dirigé vers le rebouilleur **E-07.43** où il est chauffé et partiellement vaporisé avec la vapeur basse pression circulant dans le côté tube. Les vapeurs des composants légers à partir du liquide circulant en bas de la colonne remontent vers de tête la colonne pour d'extraction.

Le produit liquide de fond rebouilleur sort en bas de la colonne sous une régulation de débit **FIC-0908** vers le débutaniseur pour l'extraction du butane.

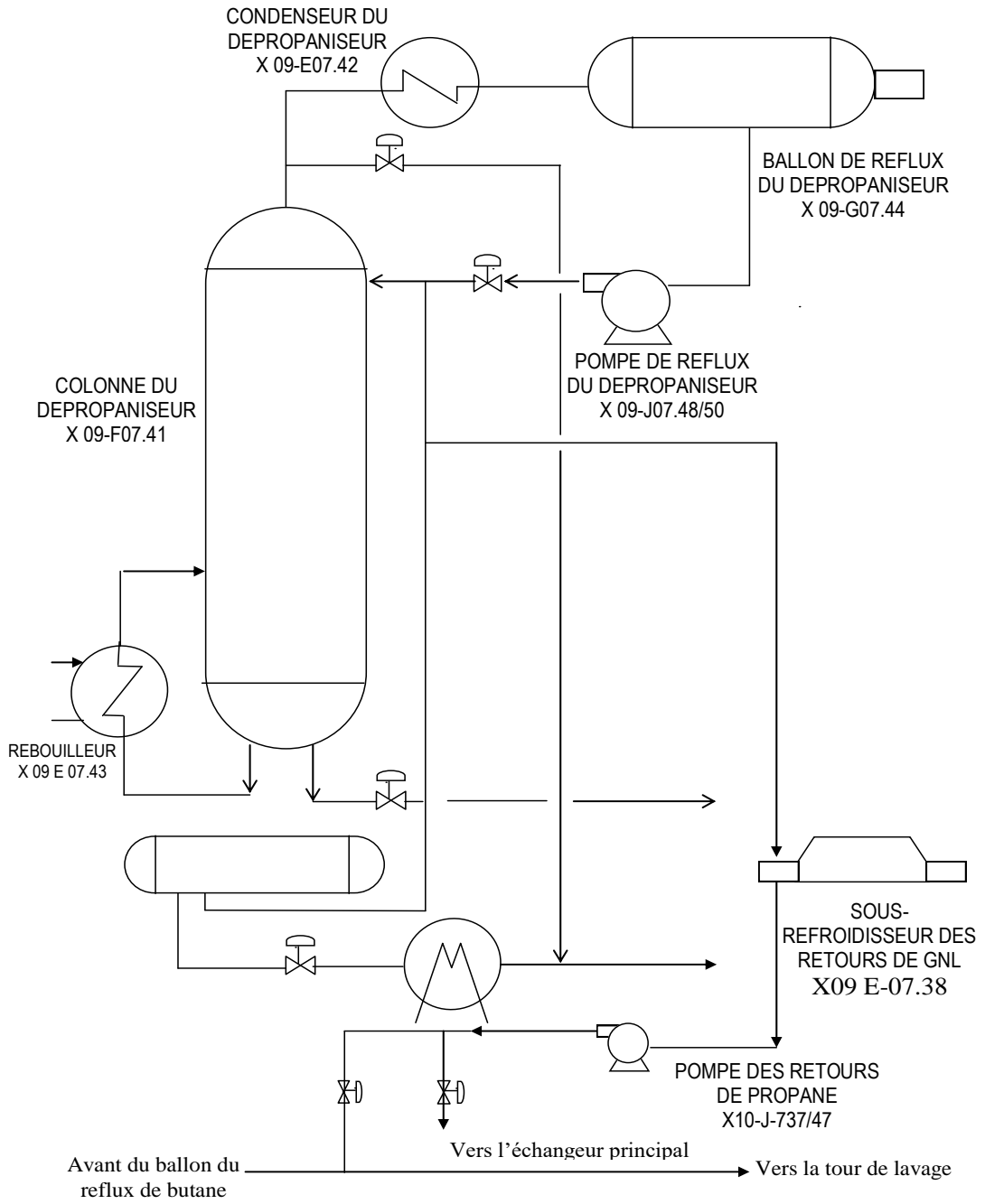


Figure I.6: La section du dépropanisation

I.4.4.4 Débutaniseur

Le Débutaniseur (F-751) comporte **26 plateaux** et fonctionne à une pression de **4,5 bars**. Il est alimenté à partir du liquide de fond du dépropaniseur au niveau du **16^{ème} plateau**. La température d'entrée est de **60 °C**. L'alimentation est sous forme liquide/ vapeur contrôlée par la vanne de débit (FV-908).

Le fond de la colonne est chauffé dans le rebouilleur (E-753) qui est un échangeur de type tube/calandre dont la vapeur **3,45 bars** qui circule dans le côté calandre et les hydrocarbures circulent dans le côté tube. Le rebouillage du fond va condenser la vapeur d'eau qui s'accumule dans la calandre et crée un niveau, la température du fond est réglée en fonction du niveau de condensat dans le rebouilleur par la boucle **TIC-1001/LIC-1025** à environ **110 °C**.

La vapeur de tête quitte la colonne à 52 °C puis elle est condensée dans un échangeur à eau de mer (E-752) à 45 °C. Ce condenseur est un échangeur de type tube/calandre où les vapeurs traversent le côté calandre à contre -courant avec l'eau de mer qui circule dans le faisceau tubulaire. La vapeur condensée s'accumule dans le ballon de reflux (G-754) qui est doté d'une régulation afin de stabiliser la pression à 3,45 bars par PIC-1012A/B en envoyant les incondensables produits dans le système vers la torche chaude. Le butane liquide s'écoule vers l'aspiration des pompes de reflux J-755/J-762 et vers le sous refroidisseur au propane E-738. Les pompe de reflux aspire le liquide du ballon de reflux et refoule dans le 1^{er} plateau de la colonne de débutanisation sous la régulation de débit FIC-X10-10. Pendant le fonctionnement normal, seulement une des pompes de reflux est en service alors que la deuxième pompe est en standby.

Le butane est sous-refroidi dans le sous-refroidisseur E-738 qui est un échangeur à calandre et double faisceaux tubulaires distincts dont le butane venant du ballon de reflux circule dans le faisceau B et le propane venant du dépropaniseur circule dans le faisceau A. Ces deux faisceaux sont immergés dans un niveau du propane liquide.

Le butane sous refroidi est livré par les pompes J-757/J-761 vers la tour de lavage et vers l'échangeur principal afin d'ajuster le PCS du GNL.

Un soutirage de butane vapeur du 9^{ème} plateau de la colonne est dirigé vers le système fuel gaz selon le cas d'alimentation.

Le produit du fond de la colonne est refroidit dans le refroidisseur de gazoline E-758 puis envoyé vers la sphère du stockage en passant par la vanne de régulation de niveau dans le débutaniseur LV-1005.

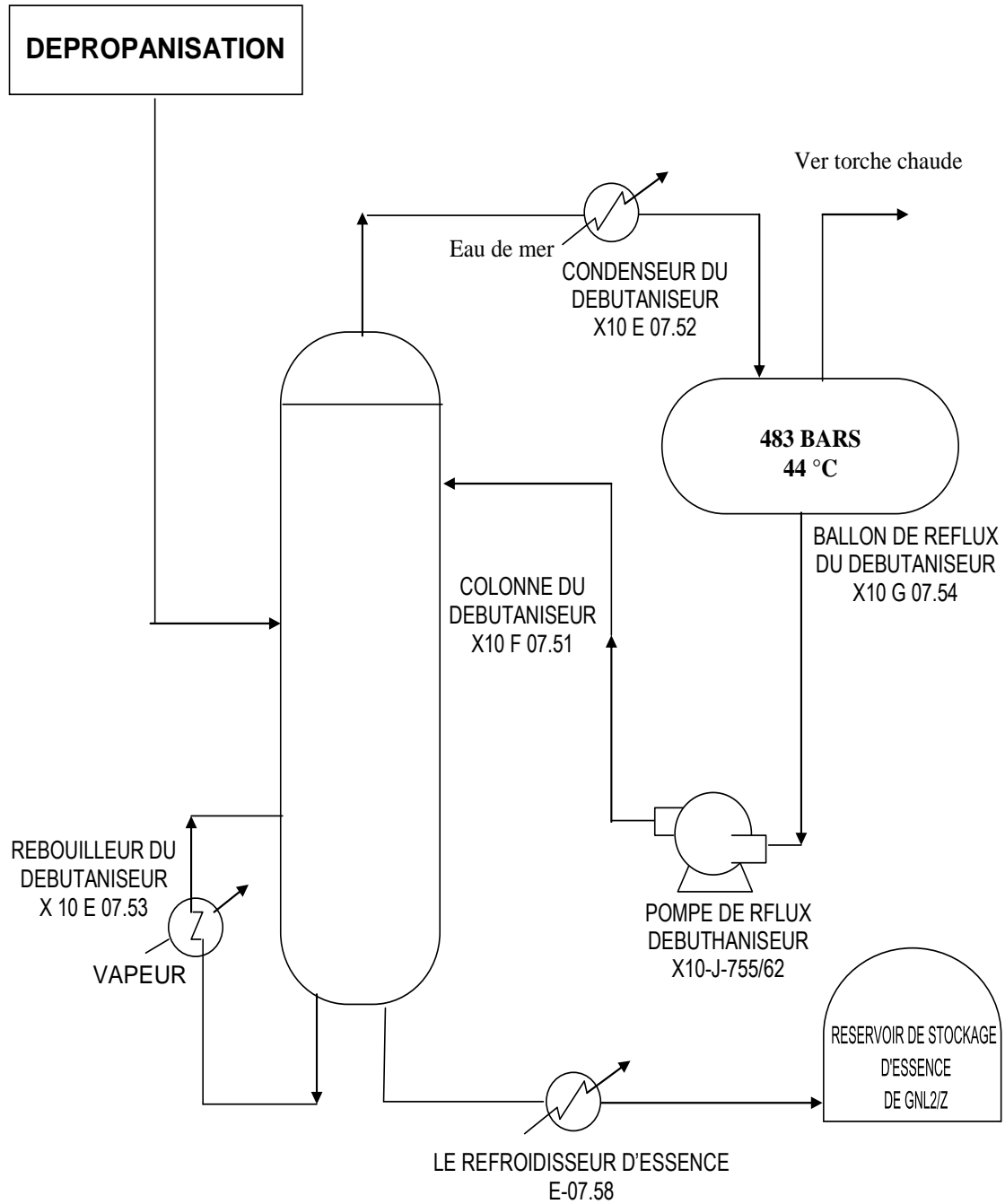


Figure I.7: La section de débutanisation

I.4.5 Zone de Stockage et d'expédition

Le GNL produit par les six trains de process doit être stocké dans trois bacs de stockage d'une capacité de 100.000 m³ chacun.

Le stockage d'un produit tel que le GNL ayant des conditions cryogéniques sévères (température de stockage de -162 C°, et la pression de stockage de 1.03 bar effective) doit faire appel à des caractéristiques d'isolement particulières afin d'éviter les pertes des frigories. [2]



Figure I.8: Zone de stockage et d'expédition

Chapitre II :

Généralités sur les échangeurs de chaleur

II.1 Définition d'un échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur, comme son nom l'indique, est un appareil destiné à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre. Dans les échangeurs les plus courants, les deux fluides sont séparés par une paroi au travers de laquelle les échanges se font par conduction, la transmission de chaleur fluides-paroi relevant essentiellement de la convection. Le rayonnement n'intervient de manière sensible que s'il existe des différences de température très importantes entre un fluide semi-transparent et la paroi. Dans certains appareils, l'échange de chaleur est associé à un changement de phase de l'un des fluides. C'est le cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs ; tours de refroidissement, etc.

II.2 Classification des échangeurs de chaleur

II.2.1 Refroidisseur : Refroidit un fluide à une température inférieure à celle que l'on pourrait obtenir si uniquement de l'eau était utilisée en tant que fluide de refroidissement. Il utilise un réfrigérant comme de l'ammoniac ou du Fréon.

II.2.2 Condenseur : Condense une vapeur ou un mélange de vapeurs, soit seule soit en présence d'un gaz non condensable.

II.2.3 Réchauffeur : Transmet une chaleur suffisante à un liquide ou à un gaz au moyen d'une vapeur de condensation ou d'un autre fluide quelconque.

II.2.4 Rebouilleur : il fournit la chaleur de "rebouillage" nécessaire à la distillation. Le véhicule thermique peut être soit de la vapeur soit un fluide de soutirage.

II.2.5 Générateur de vapeur : introduit de la vapeur destinée à titre utilisé de ailleurs dans l'installation en appliquant une chaleur extrêmement élevée. Réchauffe une vapeur au-delà de la température de saturation.

II.2.6 Surchauffeur : Echauffe une vapeur au-delà de la température de saturation.

II.2.7 Vaporisateur : Un réchauffeur qui vaporise une partie du liquide.

II.3 Les différents type d'échangeurs

On peut les classer de la façon suivante :

II.3.1 Echangeur GAZ – GAZ

En général, ils sont en batterie et construit de tubes lisses ou à ailettes. Ils travaillent à basse pression. Ils ne posent guère de problème constructif et ne sont pas soumis à un règlement particulier. Les plaques tubulaires sont généralement minces ainsi que les parois extérieures pour la ventilation.

II.3.2 Echangeur GAZ - LIQUIDE ou LIQUIDE - LIQUIDE

Ces échangeurs sont les plus courant et existent sous toutes formes.

II.3.2.1 Tubes à double enveloppe

Destinés à un faible débit et surtout utilisés pour le chauffage de tubulures. [3]

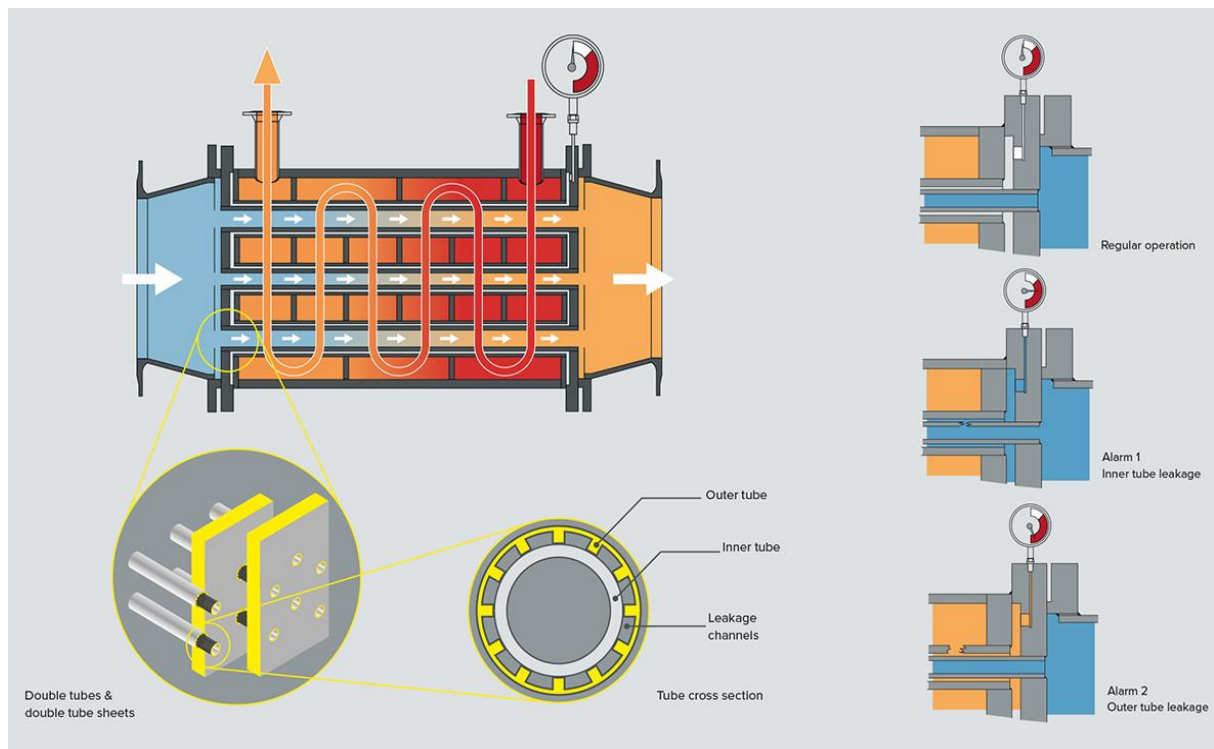
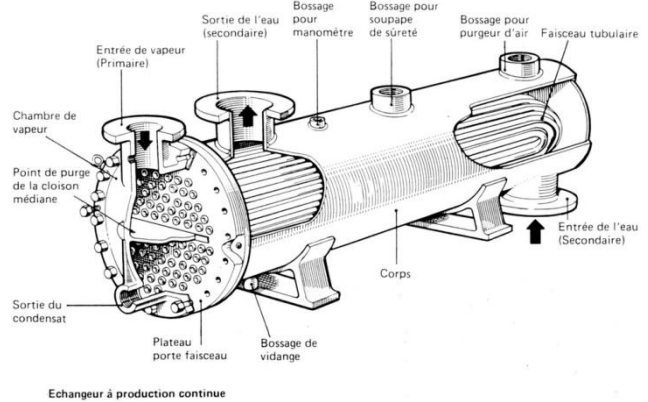


Figure II.1: Echangeur de chaleur tube double enveloppe

II.3.2.2 Echangeurs tubulaires

On les trouve sous toutes les formes. Ils sont généralement destinés à de faible pression et des hautes pressions. Ils sont généralement constitués de :

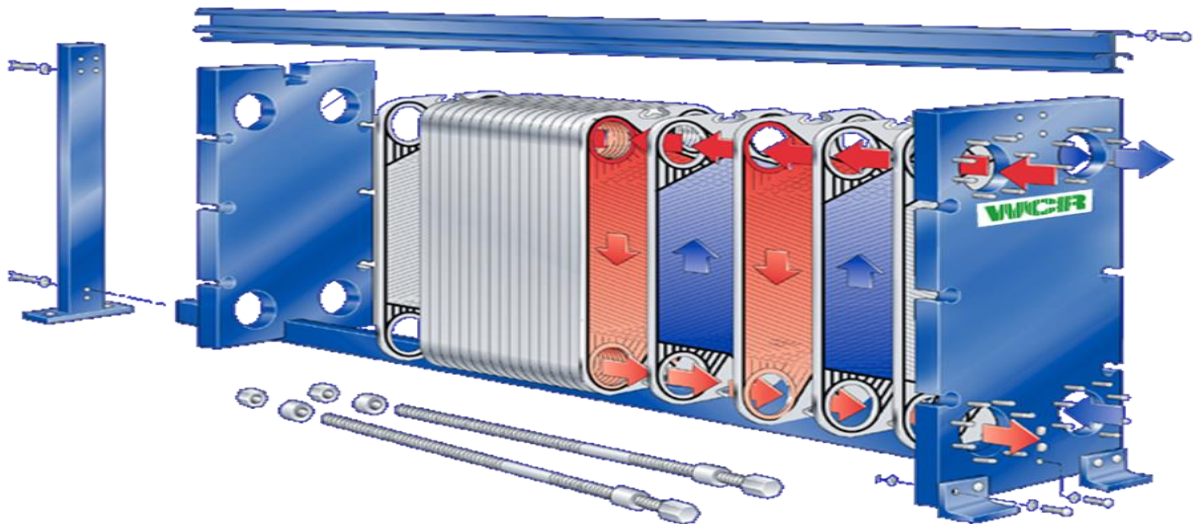
- faisceau tubulaire
- une ou deux plaques
- un corps cylindrique
- une ou deux têtes d'alimentation
- de pieds support
- de tubes pouvant titre lisses ou à ailettes



FigureII.2 : Echangeur tubulaire

II.3.2.3 Echangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques sont constitués par un assemblage de plaques métalliques équipées de joints d'étanchéité à leur périmètre; les fluides s'écoulent entre ces plaques dans des canaux plats où la circulation peut être soit diagonale ou latérale.



FigureII.3: Echangeur de chaleur à plaques

II.3.2.4 Serpentins

Un simple tube de forme adaptée qui trempe dans un liquide ou dans un gaz généralement utilisés pour le chauffage et le refroidissement de bain liquide. Le fluide interne au serpentín peut être un gaz (ou vapeur condensé) ou un liquide. Ne présente pas de difficulté majeure de fabrication.

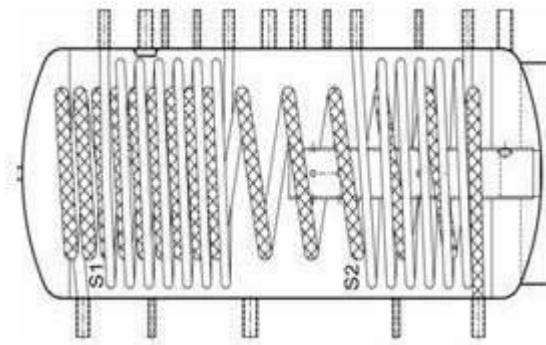


Figure II.4: Echangeur Serpentins

II.3.3 Echangeurs à calandre

Également appelés échangeurs de chaleur à calandre, sont des dispositifs utilisés dans les processus industriels, pour transférer la chaleur d'un fluide à un autre. Ils sont couramment utilisés dans les chaudières, les réfrigérateurs, les condenseurs.

Trois types d'échangeurs à calandre sont présentés et d'écrits ci-après :

- Tête mobile ou flottante - TEMA Type AES
- Chaudière ou Tube en U –TEMA type CPU
- Plaque tubulaire fixe –TEMA type BEM

II.3.3.1 Echangeurs de type à tête flottante

L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La seconde plaque, mettant l'expansion thermique du faisceau ainsi que son nettoyage mécanique, constituent la presque totalité des échangeurs utilisés en raffinerie.

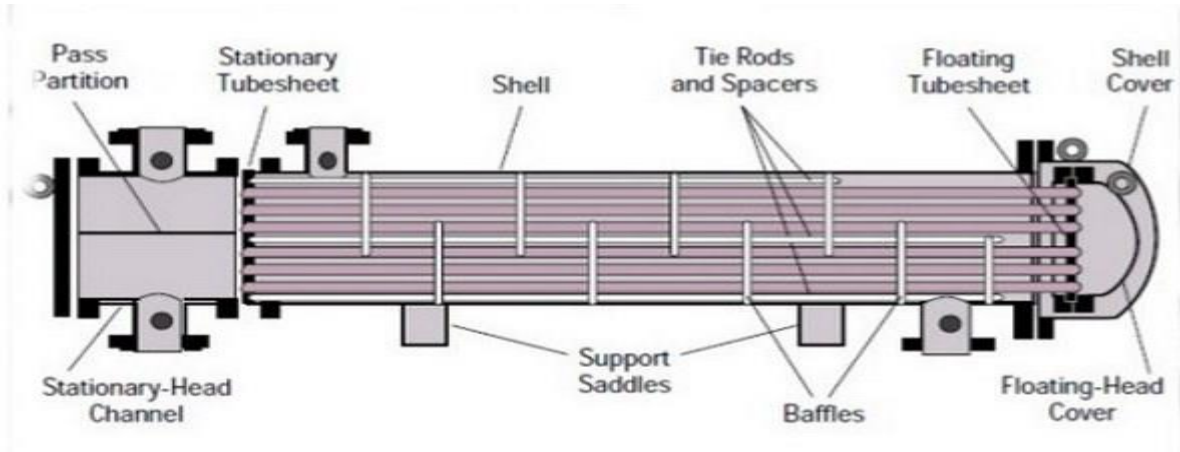


Figure II.5: Échangeur à tête flottante

II.3.3.2 Echangeurs de chaleur à tube en U

Dans un échangeur de cette nature, une seule plaque tubulaire suffit. Chaque tube est courbé pour former un coude de 180°. L'intégralité de l'ensemble faisceau de tubes se met librement au sein de la calandre.

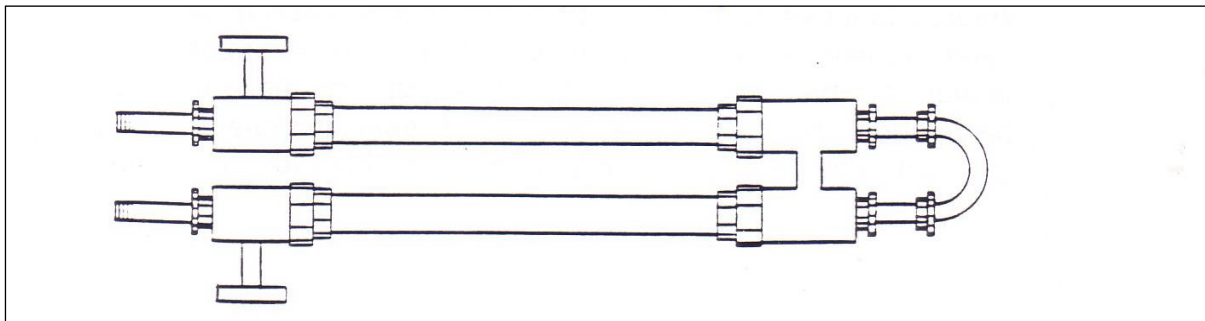


Figure II.6: Échangeurs de chaleur à tube en U

II.3.3.3 Echangeurs à plaque tubulaire fixe

Dans ce type d'appareil, la calandre est soudée à la plaque tubulaire aux deux extrémités. Ceci a pour effet d'assujettir les tubes par rapport à la calandre, ce qui limite l'utilisation de cet agencement à des applications si les températures du métal de la calandre et des tubes n'affichent pas de différences notables. Parfois, ce type d'échangeur incorpore dans la calandre un joint de dilatation, ce qui permet d'absorber une plus grande dilatation différentielle calandre/tube.

II.3.3.4 Echangeur de chaleur à plaque-ailette brasée

Les échangeurs à plaque-ailette en aluminium sont utilisés dans les industries de transformation particulièrement pour des tâches en deçà de -50°C .

II.4 Les problèmes d'un échangeur de chaleur

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

II.4.1 L'encrassement

L'encrassement, qui sous sa forme la plus générale peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface. Il affecte une grande variété d'opérations industrielles. Dans le cas des échangeurs, la présence d'un fort gradient thermique près de la surface peut perturber les mécanismes d'encrassement isotherme rencontrés, par exemple lors de l'utilisation de membrane ou de filtre.

II.4.2 Les vibrations

Les vibrations constituent un paramètre essentiel à prendre en compte dans la conception d'un échangeur, au même titre que les transferts de chaleur ou les pertes de charge. Outre les aspects classiques (chocs, spectre de vibrations) issus du milieu extérieur, les échangeurs induisent leurs propres vibrations sous l'effet du fluide qui les parcourt. Suivant la vitesse d'écoulement du fluide côté calandre, les tubes qui vibrent à leurs fréquences propres peuvent se déplacer suffisamment pour entrer en collision. Il s'ensuit un phénomène de fatigue pouvant aller jusqu'à la fuite ou la rupture.

II.4.3 La corrosion

Dans le langage courant la corrosion est généralement synonyme d'un phénomène réactionnel entre le fer et l'air humide provoquant la formation d'une couche de rouille non compacte et peu adhésive. La corrosion est définie comme étant la destruction des métaux qui se produit sous l'effet de réactions chimiques ou électrochimiques avec le milieu ambiant et la perte des qualités spécifiques du matériau qui en résulte.

Chapitre III :

Analyse du problème
rencontré au niveau du
Refroidisseur de
Gazoline (E758)

III.1 Présentation du problème

L'eau de mer a une grande importance dans l'industrie GL1/Z pour le maintien en service des six trains du complexe, disant qu'elle est la deuxième matière première après le GN puisqu'elle est utilisée dans les différentes sections de traitement du GN pour refroidir les machines et les différents fluides tels que les huiles de graissage, et la production de vapeur (après dessalement) et l'eau distillée.

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, tels que chlorure sulfates, bromure, bicarbonates, nitrates et phosphates ainsi que l'oxygène dissous.

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

A titre indicatif, les nombreux déficits de l'utilisation d'eau de mer (eau agressive) n'ont pu permettre au complexe de réaliser ou même d'assurer pendant longtemps la bonne marche des six trains en service.

Parmi les équipements de transferts de chaleur, les refroidisseurs occupent une place importante dans le complexe GL1/Z. La défaillance de ces échangeurs présente donc un impact négatif sur la production du GNL.

Au début des années 90, SONATRACH s'est lancée dans 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. Cette rénovation a apporté le plus espéré pour les trains de production, mais il reste actuellement encore quelques problèmes tels que celui du refroidisseur de gazoline (E.758).

La cause principale de problème qui touche les refroidisseurs de gazoline est la perforation de la manchette par effet de corrosion causée par l'agressivité de l'eau de mer, qui a un impact négatif sur l'environnement marin. Pour montrer l'importance du problème et sa gravité nous avons commencé par donner les résultats des rapports d'inspection concernant les refroidisseurs de gazoline des 3 trains de production qui sont faits par le département technique du complexe GL1/Z.

Table III.1: Résultats des rapports effectués par le service d'inspection concernant les refroidisseurs

Train	Date	Note et observation
T200	31/03/2021	présence de gaz côté EDM
	25/01/2022	présence de gaz côté EDM
	30/04/2023	présence de percement au niveau de la manchette connexion sortie EDM
	31/02/2024	légère fuite gazoline au niveau des brides de retour
T300	16/06/2019	fuite EDM au niveau ligne E758
	26/02/2020	inspecter ligne sortie EDM du E758/E742
	25/06/2022	fuite EDM au niveau ligne E758
T500	26/01/2024	Echangeur gazoline E-758 suspecté fuite

Dans ce chapitre, nous allons établir un plan de travail pour déterminer les causes du phénomène de corrosion du refroidisseur de gazoline (E-758) et trouver des solutions à ce problème.

III.2 Methodologies de travail

Le plan de travail est comme suit :

- Description du refroidisseur E758.
- Positionner les sites de corrosion.
- étudier l'analyse de l'eau de mer circulante dans E758.
- Aperçu sur le circuit de l'eau de refroidissement.
- Etude de corrosion sur le matériau (acier au carbone).
- Etude de corrosion sur le matériau (bronze-aluminium).
- Etude de corrosion d'un assemblage.
- Détermination de type de corrosion sur E758.
- Solutions du problème.

III.2.1 Description du refroidisseur de gazoline E 758

C'est un échangeur à double tubes concentriques (tube entre tube). Le tube intérieur en U et ailette est en Aluminium-Bronze, l'autre tube en acier carbone. L'utilisation de cet échangeur est de refroidir la gazoline par l'eau de mer.

🌿 Tube intérieur : l'eau de mer.

🌿 Tube extérieur : gazoline.

-Boite de distribution : acier-carbone. Longueur : 7.62 m

- Epaisseur : 10.0325cm

Le tube en U est assemblé avec une manchette en acier au carbone.



Figure III.1 : l'emplacement du refroidisseur de la gazoline (E.758) dans le train

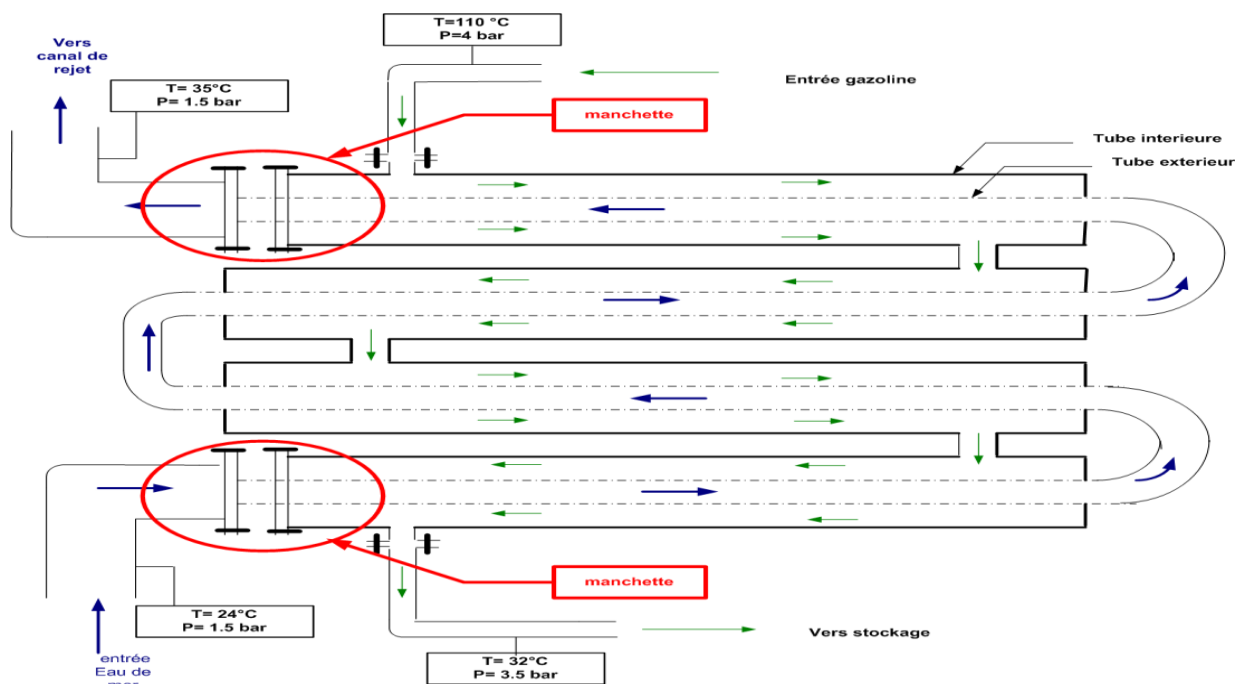


Figure III.2 : Schéma explicatif du refroidisseur E758

III.2.2 Emplacement du problème de corrosion

Afin de déterminer les points de fuite au niveau du E758, on a procédé à une opération utilisée pratiquement au niveau du complexe. La méthode est :

1. faire circuler de l'air comprimé (4 bar) dans le tube intérieur.
2. étaler le type par une mousse
3. positionner sur les points de fuite

L'endommagement de l'échangeur de gazoline est lié à la corrosion engendrée dans le tube intérieur entre la manchette et le tube en U.

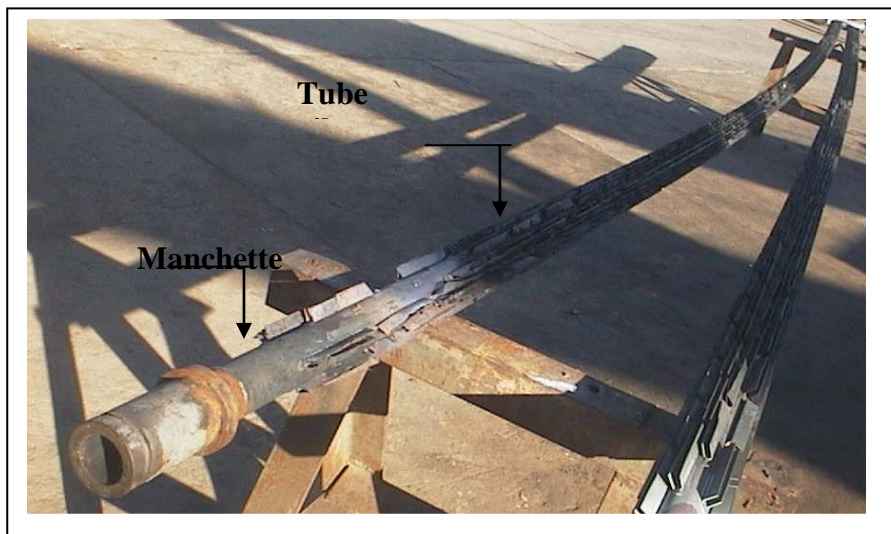


Figure III.3 : Le tube intérieur du refroidisseur de la gazoline (E.758).



Figure III.4: La manchette

Nous allons étudier ce problème et voir est ce que cette corrosion est due paa l'eau de mer, le choix des matériaux où l'assemblage de l'acier avec Aluminium-Bronze.

III.2.3 Agressivité de l'eau de mer

III.2.3.1 Constituants chimiques de l'eau de mer

L'analyse chimique de l'eau de mer effectuée au GL1/Z adonné une composition chimique moyenne présentée dans le tableau ci-dessous.

Table III.2 : Composition chimique de l'eau de mer [4]

Constituants	Teneur en ppm
Chlorure (Cl ⁻)	18980
Sulfate (So ₄ ⁻²)	2646
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	13970
Fluorure (F ⁻)	64.80
Bromure (Br ⁻)	1.3
Sodium (Na ⁺)	10556.1
Magnésium (Mg ²⁺)	1272
Calcium (Ca ⁺²)	400.1
Pothassium (K ⁺)	380
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.

Une analyse plus poussée, permettrait d'avoir une appréciation de ces éléments. Les moyens de contrôle disponible, au GL1/Z ne permettent nullement de contrôler ces éléments.

III.2.3.2 Circuit de l'eau de refroidissement

L'eau de mer est un fluide couramment utilisé dans les circuits de refroidissement des installations côtières. Un circuit de refroidissement à l'eau de mer est composé de la manière suivante :

- ✚ Une prise d'eau
- ✚ Une pomperie
- ✚ Un système de traitement
- ✚ Un réseau de distribution
- ✚ Des échangeurs de chaleur
- ✚ Un réseau de rejet

III.2.3.3 Schéma de circuit

La figure 19 montre les schémas de circuit de refroidissement :

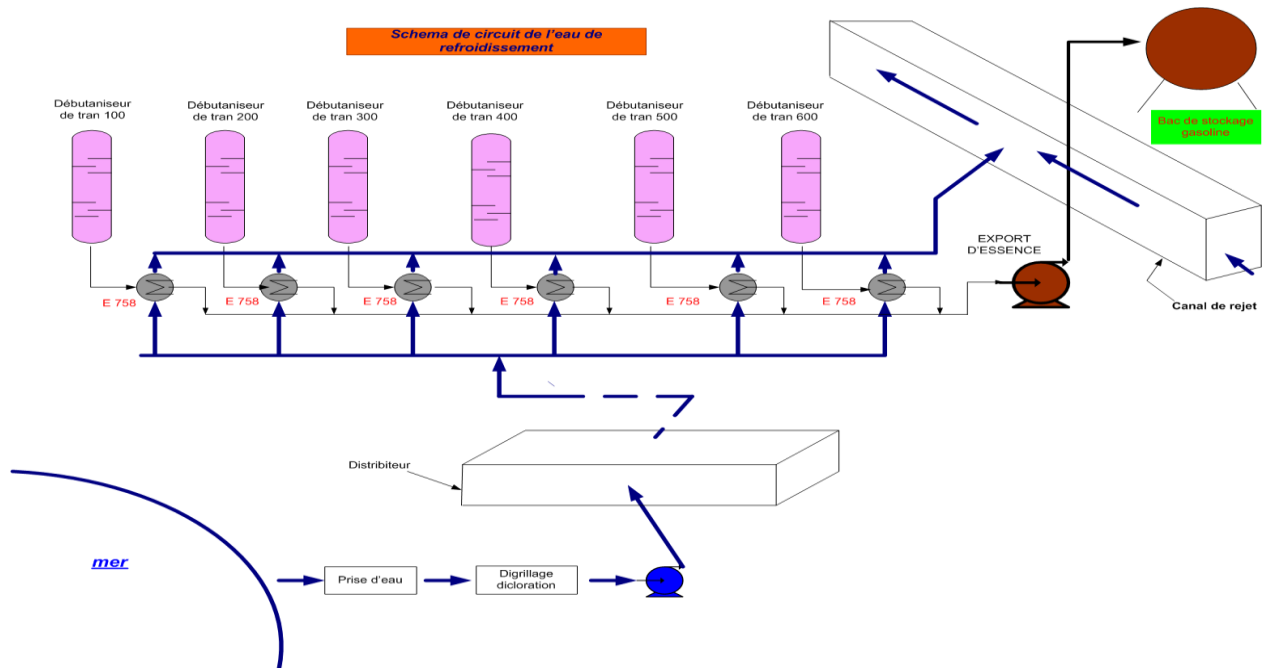


Figure III.5 :Schéma de circuit de l'eau de refroidissement

III.3 Les matériaux de construction

III.3.1 Acier au carbone

C'est le matériau de construction le plus utilisé pour les structures en contact avec eau de mer car ses propriétés mécaniques sont bonnes, il est d'emploi facile et son coût initial est bas. L'acier au carbone non protégé subit en eau de mer une corrosion généralisée, son comportement varie suivant son exposition; généralement l'acier au carbone est protégé contre la corrosion marine par un revêtement.

III.3.1.1 Principaux facteurs de corrosion de l'acier au carbone

III.3.1.1.a Oxygène dissous et la vitesse de circulation

Le premier facteur est l'oxygène dont la teneur est fonction en particulier de la température. Il est le plus important facteur qui régit la corrosion de l'acier au carbone en eau de mer. Le second facteur est la vitesse de circulation dont dépend directement le renouvellement de l'oxygène à la surface du métal. L'oxygène favorise l'attaque de l'acier par dépolarisation cathodique.

III.3.1.1.b Température

L'augmentation de température, augmente la vitesse de corrosion de l'acier au carbone.

III.3.1.2 Autre facteurs

III.3.1.2.apH

La vitesse de corrosion dépend très peu du pH dans les domaines $\text{pH} < 4$ l'acier au carbone subit une corrosion acide.

III.3.1.2.b Ions chlorure

L'acier au carbone est très sensible à la corrosion par les ions chlorure.

III.3.1.2.c CO₂ dissous

Le CO₂ dissous est très corrosif.

III.3.1.2.d Conductivité électrique

La forte conductivité électrique de l'eau de mer joue un rôle important dans la corrosion galvanique de l'acier au carbone.

III.3.1.2.e Salissures organiques

Les salissures marines (Coquillages) tendent à diminuer la corrosion par réduction de l'arrivée de l'oxygène. Par contre, les bactéries, contenues dans les eaux portuaires peuvent aggraver la corrosion de l'acier au carbone.

III.3.1.2.f Pollution

La diminution de la teneur en oxygène dans l'eau tendrait normalement à relire la corrosion de l'acier au carbone, la présence de sulfures acides dans les eaux de mer polluée accélère fortement cette corrosion.

III.3.1.2.g Formation de dépôts

Peut aggraver la corrosion localisée au point de rupture de dépôt.

III.3.1.2.h Tension

Les tensions cycliques peuvent accélérer les ruptures des éléments en acier.

III.3.1.3 Structure de l'acier au carbone (SA 106)

La composition chimique de l'acier au carbone est représentée dans le tableau III.3

Table III.3 : La composition chimique de l'acier au carbone

Matériaux	C	Si	S	Mn	Fe	P
%	25	10	2.5	27	35	2.5

III.3.2 Les alliages de cuivre

Le cuivre et ses alliages sont des matériaux traditionnels dans les installations utilisant l'eau de mer. Ce type de matériaux a une bonne conductivité thermique et électrique, et bonne résistance à la corrosion marine.

III.3.2.1 Nuance de Bronze-Aluminium

La composition chimique de Bronze-Aluminium est représentée dans le tableau III.4.

Table III.4 : La composition chimique de Bronze-Aluminium

Matériaux	Al	Zn	Fe	Mn	Sn	Pb	P	Cu
%	6-8	≤ 0.2	1.5-3.5	≤ 1	0.15-0.5	≤ 0.01	≤ 0.015	Le reste

Les caractéristiques physiques et mécaniques moyenne de l'alliage Bronze-Aluminium :

$$\rho: 7.9 \text{ kg /dm}^3$$

$$\lambda : 65 \text{ w/m}^\circ\text{C à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_p: 419 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Bonne soudabilité.

III.3.2.2 Différentes formes de corrosions des cuivreux

III.3.2.2.a Corrosion généralisée

La bonne résistance à la corrosion des alliages cuivreux est due à la formation d'un film protecteur de produits de corrosion constitué principalement de Cu_2O . Deux facteurs peuvent modifier de façon importante ces taux de corrosion.

- ✚ La présence d'une pollution chimique (l'ammoniaque et sulfures).
- ✚ La vitesse de circulation de l'eau de mer

- ✚ La vitesse de corrosion généralisée en eau de mer naturelle pour les cupro-aluminiums (Bronze-Aluminium) est de 20-30 μm /an. [5]

III.3.2.2.b Corrosion localisée

III.3.2.2.b.1 Corrosion galvanique

Le cuivre et ses alliages sont situés au milieu de la série galvanique des métaux en eau de mer. Ils sont plus nobles que le zinc, le fer et les aciers au carbone.

III.3.2.2.b.2 Corrosion caverneuse

Cette corrosion se manifeste en général sous forme de piqûres au voisinage ou sous des crevasses due, par exemple, à des corps étrangers (dépôts, sables,.....). Ce type d'attaque est favorisé par une faible vitesse de circulation. [5]

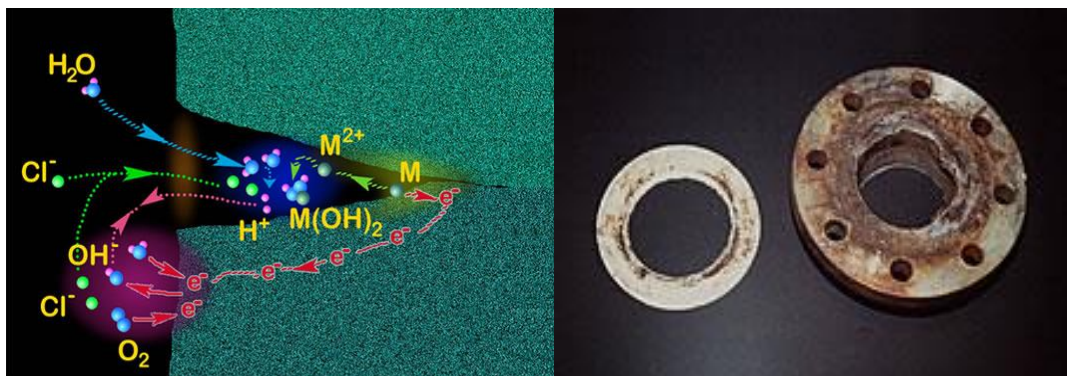


Figure III.6 : Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint

III.3.2.2.b.3 Corrosion sélective

Les alliages cuivreux peuvent souffrir de corrosion sélective, un des éléments constitutifs de l'alliage (le zinc ou l'aluminium) est préférentiellement attaqué, ce qui conduit à une perte totale de résistance mécanique, sans perte apparente de matière.

Les alliages monophasés ne présentent pas ce phénomène de corrosion par contre les biphasés sont affectés par cette corrosion.

Les alliages biphasés moins nobles que les alliages monophasés.

III.3.2.2.b.4 Corrosion inter granulaire

A ce genre d'attaque les alliages cuivreux peuvent y être sensibles dans le milieu bien spécifique.

Pour les cupro-aluminiums, les milieux spécifiques sont la vapeur d'eau surchauffée, l'eau de mer chaude. [5]

III.3.2.2.b.5 Corrosion contrainte

Comme dans le cas de la corrosion inter granulaire.

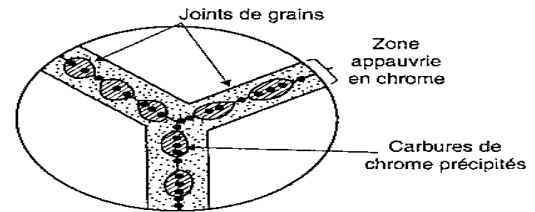


Figure III.7 : Corrosion inter granulaire

III.3.2.2.c Autre forme de corrosion

De nombreuses autres formes de corrosion sont associées à des effets mécaniques provoquant la destruction du film protecteur des alliages cuivreux.

III.3.3 Assemblage de deux matériaux différents

L'assemblage se fait généralement à l'aide de soudure qui est assez dangereuse car les soudures et leurs voisinages sont souvent sujets à la corrosion. Lors d'un couplage entre deux matériaux différents, mis en contact avec le même électrolyte, le matériau le moins noble se corrode au profit du matériau le plus noble. Ce qui représente notre cas, la manchette en acier au carbone assemblée avec tube en Bronze-Aluminium.

III.3.4 Conclusion

Les matériaux mis en contact avec l'eau de mer doivent être sélectionnés avec soin en vue de résister à ses produits chimiques hostiles.

Un assemblage de deux différents matériaux, ayant des potentiels différents provoque une corrosion par effet galvanique.

III.4 Attaque galvanique

Tous les métaux et leurs alliages ont leurs propres forces électromotrices. Si deux métaux dissemblables en milieu électrolytique (agent corrosif) sont assemblés directement ou indirectement, formant une cellule galvanique.

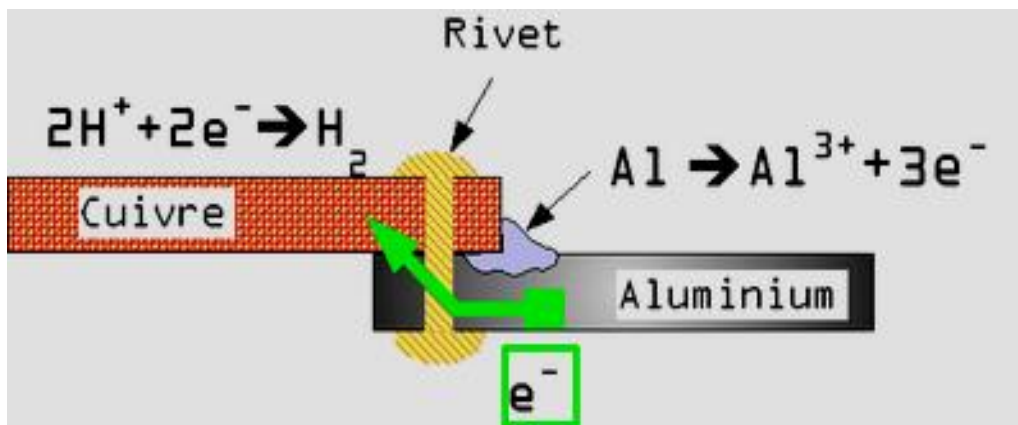


Figure III.8 : Corrosion galvanique

La corrosion due au couplage galvanique de matériaux va dépendre de nombreux paramètres qui sont regroupés dans les quatre catégories suivantes :

III.4.1 Les paramètres liés aux matériaux

- ✱ Nature et composition des alliages
- ✱ Impuretés
- ✱ Présence de produits de corrosion ou de film superficiel

III.4.2 Les paramètres au milieu

- ✱ Composition, pH
- ✱ Résistivité, température, volume
- ✱ Débit et agitation

III.4.3 Les paramètres liés à l'interface matériau-milieu

- ✱ Potentiels d'électrode
- ✱ Cinétiques de réaction

III.4.4 Les paramètres liés à la géométrie

- ✱ Du couple : rapport de surfaces anode/cathode et distribution spéciale
- ✱ De la fonction : écartement, résistance de contact

III.5 Solutions du problème

III.5.1 La 1^{ère} Solution proposée

Dans notre cas la corrosion galvanique est au niveau de la manchette qui est construite en acier au carbone. Elle joue le rôle d'une anode, et le tube ailette joue le rôle d'une cathode qui est fait de bronze-aluminium. Tous les deux sont en contact avec une solution aqueuse (eau de mer). Les électrons qui sont libérés dans la masse métallique de la manchette (anode) peuvent migrer à travers un conducteur métallique vers le tube d'ailette (cathode) où ils sont absorbés en continu.

D'après notre étude nous avons réfléchi à un remède possible pour éviter la corrosion galvanique (au niveau de la soudure), puisque toutes les méthodes de soudage par brasage ont échoué.

Au sujet des fuites fréquentes au niveau du refroidisseur de gazoline (E758), une inspection a été effectuée sur un échangeur démonté du train et a mis en évidence ce qui suit :

La présence d'une fissuration à proximité du joint de la soudure hétérogène de la manchette et le tube à ailettes.

Cette altération est le résultat de la corrosion galvanique au niveau du joint de soudure entre la manchette, qui est en acier au carbone (SA106) et le tube à ailettes en bronze-aluminium (SB-150).

La description du faisceau tubulaire en U de l'échangeur E758 selon le schéma fait pour la conception envoyée pour la commande.

La manchette en acier au carbone est assemblée au tube Bronze-Aluminium par un joint de soudure bout à bout.

L'acier au carbone et Bronze –Aluminium sont des matériaux différents, ayant des potentiels différents, leur assemblage provoque une corrosion galvanique.

$E(\text{bronze-aluminium}) = +0.5 \text{ mv}$

$E(\text{acier au carbone}) = -400 \text{ mv}$

Pour éviter ce problème la solution proposée est d'utiliser une collerette en Bronze-Aluminium insérée dans la manchette acier au carbone et assemblée au tube en aluminium par un joint de soudure par les étapes suivant :

Première étape

- Enlever la manchette au niveau de la soudure (figure III.23)
- Couper sur les anciens faisceaux des tronçons de tube de même longueur que les collerettes existantes
- Confectionner une bride collerettes sur le tronçon de tube
- Couper longitudinalement le tronçon de tube

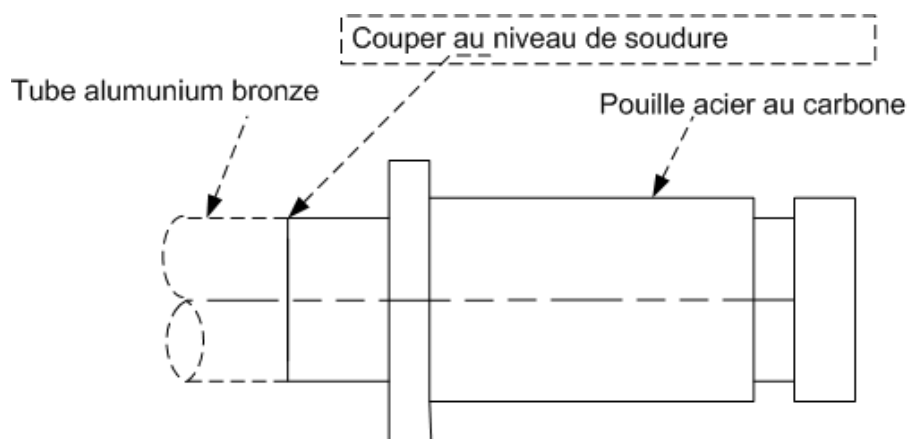


Figure III.9 : Première étape

Deuxième étape

- Ajuster le tronçon de tube en l'introduisant dans la manchette par meulage
- Une fois le tronçon de tube est ajusté, souder longitudinalement et meuler l'endroit du la soudure
- Introduire le tronçon de tube dans la manchette et gronder l'extrémité avec un outil approprié afin d'obtenir le même diamètre que le tube de faisceau voir (figure 24)

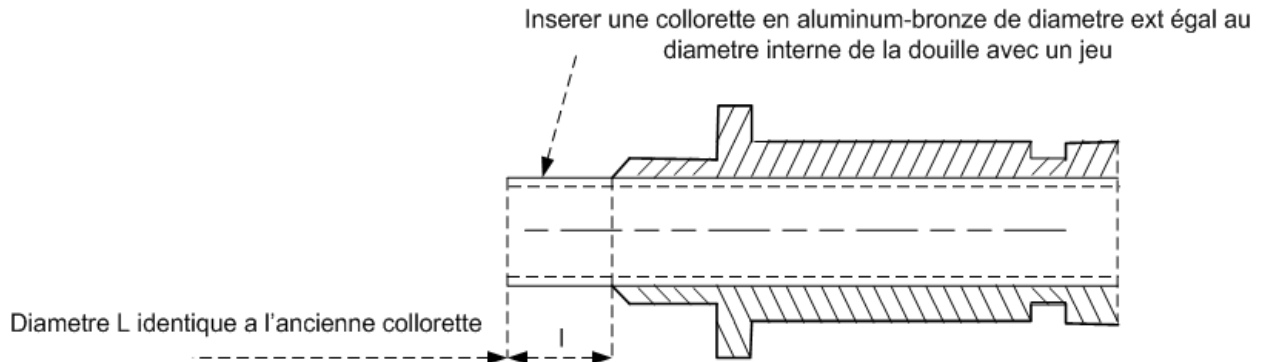


Figure III.10 :Deuxième étape

Troisième étape :

Soudure du tube de faisceau avec la colletterette (figure 25)

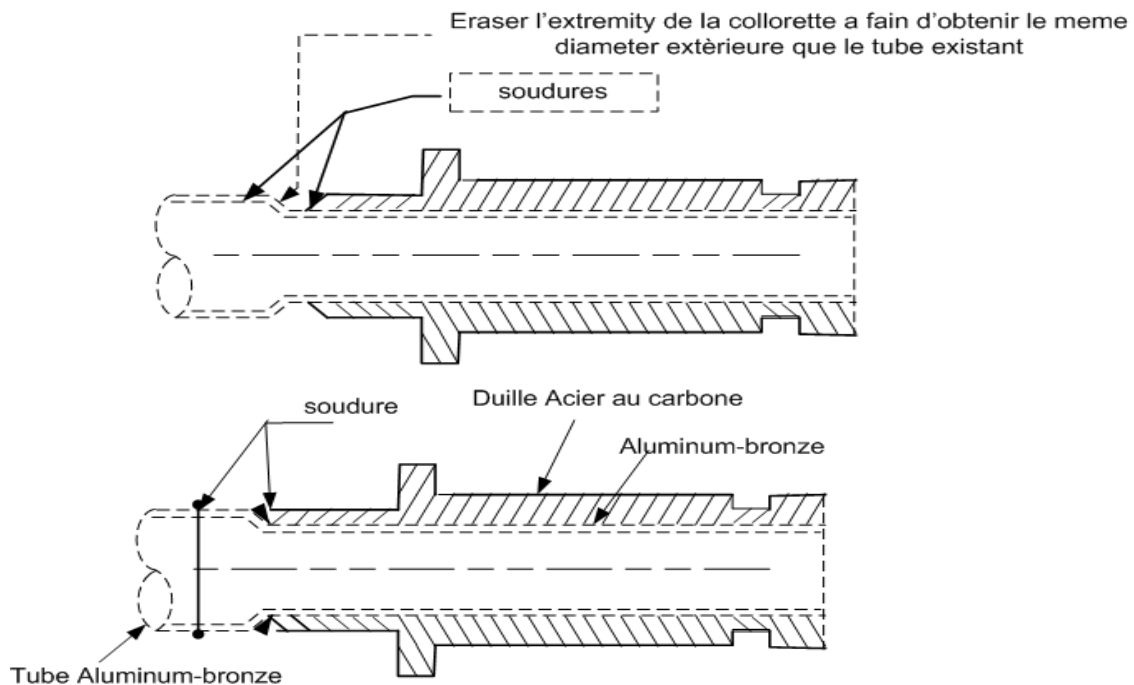


Figure III.11 :Troisième étape

III.5.2 La 2^{ème} Solution proposée

Le refroidisseur (E.758) de la gazoline et de type tube entre tube. Sa fonction est d'assurer un très bon échange de chaleur entre les deux fluides, l'eau de mer comme agent réfrigérant et la gazoline comme fluide chaud. Pendant les dernières années les problèmes de fuites sont devenus fréquents qui augmentent le coût des pertes de production en cas d'arrêt de train (GNL et gazoline), et la réparation du refroidisseur de gazoline (E.758).

Afin de régler définitivement ce problème technique, nous proposons comme solution de remplacer ce type d'échangeur par un autre de type tubes-calandre pour régler tous ces problèmes. On garde les mêmes propriétés et les mêmes conditions de fonctionnement de refroidisseur E-758.

III.5.2.1 Calcul d'un nouvel échangeur

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.

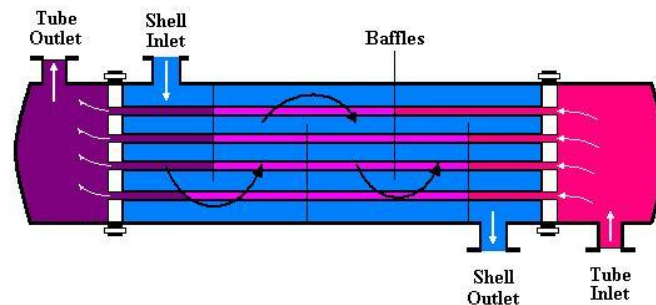


Figure III.12 :Schéma d'un échangeur tube calandre

La méthode de KERN a été appliquée dans cette partie.

Letableaugroupe les données nécessaires pour le calcul de l'échangeur

Table III.5 :Données nécessaires pour le calcul de refroidisseur E-758

Fluide	Calandre (Gazoline)	Tube (eau de mer)
Débit (kg/h)	6108	26181
Température (°C)	T ₁ =106 T ₂ =32	t ₁ =28 t ₂ =38
Masse volumique (kg/m ³)	530.20	997
C _p (kcal/kg°C)	0.66	1.03
Viscosité (kg/s.m)	2.1*10 ⁻⁴	10 ⁻³
Cond (W/m°C)	0.01	0.10

III.5.2.1.a Bilan thermique

Quel que soit le type d'appareil utilisé, si l'on ne prend en considération que les conditions d'entrée et de sortie des deux fluides, il est possible d'établir le bilan thermique global de l'appareil en écrivant que la quantité de chaleur Q perdue par le fluide chaud est égale à celle prise par le fluide froid, si l'on néglige les pertes thermiques:

$$Q = M C_p (T_1 - T_2)$$

$$Q = 6108 * 0.66 * 4.18 / 3600 * (106 - 32)$$

$$Q = 3747.43 \text{ KW}$$

Q : puissance thermique de l'appareil (KW)

M : débit massique circulant à l'intérieur des tubes (Kg/h)

C_p : chaleur spécifique de fluide froid (Kcal /kg°C)

T₁ : température d'entrée côté tube (°C)

T₂ : température de sortie côté tube (°C)

III.5.2.1.b Calcul de l'écart logarithmique moyen de température

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 à tout point, et qu'il n'y a pas une perte thermique.

On détermine l'écart de température à l'aide de la formule suivante :

$$DTLM = (T_1 - t_2) - (T_2 - t_1) / \ln((T_1 - t_2) / (T_2 - t_1))$$

Pour l'écoulement à contre-courant Avec :

T₁: température d'entrée de fluide chaud

T_2 : température de sortie de fluide chaud

t_1 : température d'entrée de fluide froid

t_2 : température de sortie de fluide froid

On trouve $\Delta TLM=22.59^\circ\text{C}$

III.5.2.1.c Calcul du nombre de passes côté calandre

Le rapport calorifique : $R = (T_1 - T_2) / (t_2 - t_1) = 7.40$

Le rendement thermique de l'échangeur : $E = (t_2 - t_1) / (T_1 - t_1) = 0.13$

Selon la littérature, lorsque le coefficient de correction F est supérieur à 0.75 ($F > 0.75$)

Du graphe (voir l'annexe 2): $F = 0.9 > 0.75$ Donc $nc = 1$

III.5.2.1.d Sélection d'un échangeur

III.5.2.1.d.1 Estimation du coefficient de transfert sale

De l'annexe 3 tableau: $U'_s = 730 \text{ kcal/h.m}^2\text{C}$

$$U'_s = 730 * 4.18 * 1000 / 3600$$

$$U'_s = 874.61 \text{ W/m}^2\text{C}$$

III.5.2.1.d.2 Calcul de la surface d'échange

D'après la formule :

$$Q = U * Ad * \Delta TLM$$

$$Ad = \frac{Q}{U * \Delta TLM}$$

$$Ad = \frac{Q}{U * \Delta TLM}$$

$$Ad = 93.33 \text{ m}^2$$

III.5.2.1.d.3 Choix des matériaux à utiliser

Aluminium-Bronze/L'eau de mer est très corrosive

III.5.2.1.d.4 Choix du diamètre des tubes

$$d_o = 0.75 \text{ inch}$$

$$d_o = 0.75 * 25.4$$

$$d_o = 19.05 \text{ mm}$$

III.5.2.1.d.5 Choix de l'épaisseur

$$e = 0.62 \text{ mm}$$

III.5.2.1.d.6 Choix de la longueur

$$l = 16 \text{ ft}$$

$$l = 16 * 0.3048$$

$$l = 4.88 \text{ m}$$

III.5.2.1.d.7 Choix du pas des tubes

$$P = 1,25 * d_o$$

$$P = 23.81 \text{ mm}$$

III.5.2.1.d.8 Calcul de nombre des tubes

$$a = \pi d_o l = 3.15 * 92.2029 * 7.62 / 1000$$

$$a = 0.29 \text{ m}^2$$

$$N_t = Ad/a * n_c = 93.33 / 0.29 * 1$$

$$N'_t = 319.76$$

III.5.2.1.d.9 Choix de la disposition

Triangulaire

III.5.2.1.d.10 Calcul du nombre de passes côté tubes

De l'annexe 1 : $N_t = 334$

$$n_t = 2$$

$$D_c = 686 \text{ mm}$$

$$D_c = 686 * 25.4$$

$$D_c = 27.01 \text{ inch}$$

III.5.2.1.d.11 Choix du pas des chicanes

$$B = 5 \text{ inch} \quad B = 127 \text{ mm}$$

III.5.2.1.d.12 Calcul du nombre de chicane

$$N_c = l/b$$

$$N_c = 4.88 / 127 * 1000$$

$$N_c = 38$$

III.5.2.1.e Choix des fluides à l'intérieur du faisceau et dans la calandre

Côté tubes : Eau de mer très corrosive

Côté calandre : Gazoline plus facile à nettoyer puisqu'on a choisi un pas triangulaire

III.5.2.1.f Calcul du coefficient d'échange global de l'appareil

$$U_s = U'_s * N'_t / N_t$$

$$U_s = 847.61 * 319.76 / 334$$

$$U_s = 811.48 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

III.5.2.1.g Calcul des températures caloriques

Écarts des températures faibles

$$DTLM = 22.59 \text{ °C}$$

$$T_1 - T_2 = 74 \text{ °C}$$

$$t_2 - t_1 = 10 \text{ °C} \text{ Donc } F_c = 0.50 \text{ de l'annexe 4}$$

$$T_c = (106 + 32) / 2 \quad T_c = 69^\circ\text{C}$$

$$t_c = (28 + 38) / 2 \quad t_c = 33^\circ\text{C}$$

III.5.2.1.h Calcul du coefficient de transfert propre Up

III.5.2.1.h.1 Côté tubes

III.5.2.1.h.1.1 Section de passage par passe

$$a_t = Nt / n\pi d_i^2 / 4$$

$$a_t = 0.042 \text{ m}^2$$

III.5.2.1.h.1.2 Vitesse massique

$$G_t = m / at$$

$$G_t = 174.80 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

III.5.2.1.h.1.3 Nombre de Reynolds

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

$$Re_t = 3113.20$$

$Re_t > 2000$ donc Régime transitoire.

Du graphe (annexe 1) $J_H = 7.8$ car $l/d_i = 273.82$

$$h_i / \Phi_t = j_H * \lambda / d_i * (C\mu/\lambda)^{1/3}$$

$$h_i / \Phi_t = 95.99 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$h_{i_o} / \Phi_t = h_i / \Phi_t * d_i / d_o$$

$$h_{i_o} / \Phi_t = 89737.46 \text{ W/m}^2\text{C}$$

III.5.2.1.h.2 Côté calandre

III.5.2.1.h.2.1 Section de passage par calandre

$$a_{cT} = D_c / P * (P - d_o) * B$$

$$a_{cT} = 0.017 \text{ m}^2$$

III.5.2.1.h.2.2 Diamètre équivalent

$$D_e = (3,464 * P^2 / \pi * d_i) - d_i$$

$$D_e = 13.77 \text{ mm}$$

III.5.2.1.h.2.3 Vitesse massique

$$G_{cT} = M / a_{cT}$$

$$G_{cT} = 97.37 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

III.5.2.1.h.2.4 Nombre de Reynolds

$$Re_{cT} = D_e * G_{cT} / \mu$$

$$Re_{cT} = 6385.14$$

De l'annexe 1 graphe $j_H = 20$

$$h_o/\Phi_c = j_H * \lambda / D_e * (C\mu/\lambda)^{1/3}$$

$$h_o/\Phi_c = 27.58 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

III.5.2.1.h.3 Température du tube

$$T_t = T_c - (h_{io}/\Phi_t / (h_{io}/\Phi_t + h_o/\Phi_c)) * (T_c - t_c)$$

$$T_t = 33.16\text{°C}$$

$$\Phi_t = (\mu/\mu_t)^{0.14} = 1.04$$

$$\Phi_c = (\mu/\mu_t)^{0.14} = 1.00$$

$$h_{io} = h_{io}/\Phi_t * \Phi_t = 93252.37 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_o = h_o/\Phi_c * \Phi_c = 27.58 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

III.5.2.1.h.4 Calcul de U_p

$$U_p = h_o * h_{io} / (h_o + h_{io}) = 27.58 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

III.5.2.1.i Vérification de la résistance d'encrassement

III.5.2.1.i.1 Calcul de R_s

$$R_s = (U_p - U_s) / U_p * U_s$$

$$R_s = 3,50 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{°C/W}$$

$$R_s \text{ admissible} = R_{sc} + R_{sf}$$

$$R_s \text{ admissible} = 3,63 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{°C/W} \quad (R_s > R_s \text{ admissible})$$

III.5.2.1.j Calcul des pertes de charges

III.5.2.1.j.1 Côté tubes

Coefficient de friction de l'annexe 1 graphe $f_t (Re_t): f_t = 0.009$

Perte de charge

$$\Delta P_t = n_c \cdot n_t \cdot G_t^2 / \rho \cdot (f_t \cdot l / d_i \cdot \Phi_t + 2)$$

$$\Delta P_t = 164.33 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_t = 0.01 \text{ bar} < \Delta P \text{ admissible}$$

III.5.2.1.j.2 Côté calandre

Coefficient de friction De l'annexe 1 graphe $f_{cT} (Re_{cT}): f_{cT} = 0.40$

Perte de charge

$$\Delta P_c = n_c \cdot f_{cT} \cdot G_{cT}^2 \cdot (N_c + 1) \cdot D_c / (\rho \cdot D_e \cdot \Phi_c)$$

$$\Delta P_c = 13898.08 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_c = 0.14 \text{ bar} > \Delta P \text{ admissible}$$

Table III.6 : Les résultats de calcul

Dimensions de l'échangeur	Valeur (SI)
Nombre des tubes	320
Diamètre extérieur (mm)	19.05
Diamètre intérieur (mm)	17.81
Epaisseur (m)	0.62
Longueur (ft)	16
Pas (mm)	23.81
Espacement entre chicane (mm)	127
Surface (m²)	93.33
Diamètre de calandre (mm)	686

III.5.2.1.k Interprétation des résultats

Le calcul dimensionnel de l'échangeur proposé est jugé très satisfaisant d'une part parce que le coefficient d'échange est assez important permettant un meilleur transfert de chaleur entre les deux fluides assurés par la surface totale d'échange (nombre de tube) et d'autre part les pertes de charge qui sont jugées minimales. Donc ces résultats sont admissibles pour notre échangeur.

Sur la base de ces résultats et afin de trouver une solution finale du problème de refroidisseur E-758, il a été recommandé de remplacer l'échangeur tubulaire E-758 par un échangeur tube calandre. Les avantages cités justifient la justesse de la modification de l'installation.

Conclusion générale

L'objectif primordial de notre étude était d'analyser et préciser le problème des refroidisseurs de la gazoline (E.758) des trains de productions du complexe GL1/Z. Pour trouver la solution possible qui donne des résultats convenables, et en même temps la plus économique pour le complexe GL1/Z.

Il est évident que l'eau de mer étant très riche en sels minéraux, est la plus corrosive des eaux de refroidissement. Sa nature corrosive est aggravée par la présence d'organismes marins. L'eau de mer est la cause principale de ce problème qui touche les refroidisseurs de gazoline. Provoquant la perforation de la manchette par effet de corrosion galvanique.

On a proposé deux solutions à ce problème, après une étude approfondie des deux côtés: côté physico-chimique et côté process.

La plus économique est la solution physico-chimique, qui consiste à modifier la construction du métal de la manchette.

Et la proposition la plus logique qui convient au complexe est la solution côté process, qui consiste à remplacer les échangeurs dans les six trains par des échangeurs de type tube-calandre, à côté de la sphère de stockage.

Pour réaliser le changement côté process, nous avons fait le dimensionnement d'un échangeur de type tube-calandre qui va remplacer l'actuel; en utilisant la méthode de KERN qui a donné des résultats admissibles pour notre échangeur.

Nous concluons, à la lumière des résultats que nous avons obtenus à travers ce présent travail que les deux propositions de solution du problème du refroidisseur de gazoline (E.758), donnent un gain économique appréciable au complexe GL1/Z.

Références bibliographiques

- [1] Formation d'ingénieur GL1Z (1984).
- [2] Manuel opératoire utilités volume V
- [3] P. WHITHIERS « Raffinage et génie chimique tome II » édition technique (1972).
- [4] A .IVANOFF. Introduction à l'océanographie .propriétés physiques et chimiques des eaux de mer .Vuibert, 1972
- [5] M .G.FONTANA ,N.D.GREENE , Corrosion Engineering-Mc Graw-Hill Book Cy Inc, New York, London, (1967)

ANNEXE

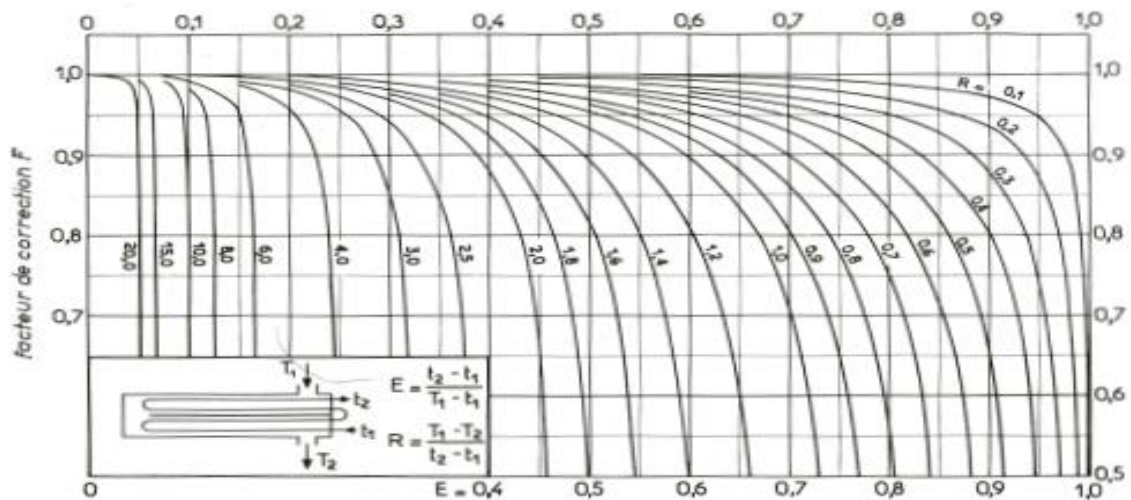
Table 1

COMPOSANT	% MOLAIRES MINIMUM	% MOLAIRES MAXIMUM
N2	0,60	1,40
C1	4,00	92,50
C2	6,00	8,50
C3	2,20	3,00
IC4	0,30	0,50
C4	0,30	0,70
C5	0,00	0,02

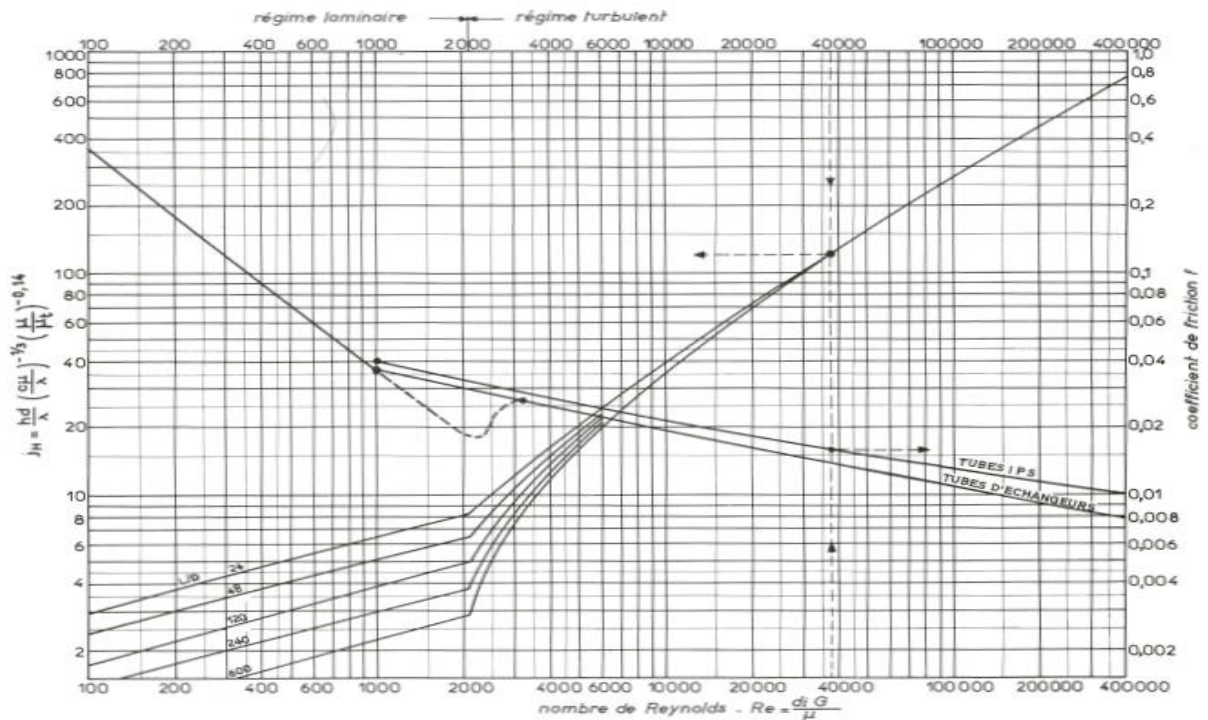
Table 2

COMPOSANT	NOMENCLATUR	MOLAIRE ENNE	EN
iC ₄	iso butane	0,09	
nC ₄	Butane	1,76	
iC ₅	iso pentane	31,14	
nC ₅	pentane	33 .47	
C ₆₊	les essences	33.54	
TOTAL	100,00		

Annexe 1 :Tableaux deComposition chimique du GNL et de la gazoline



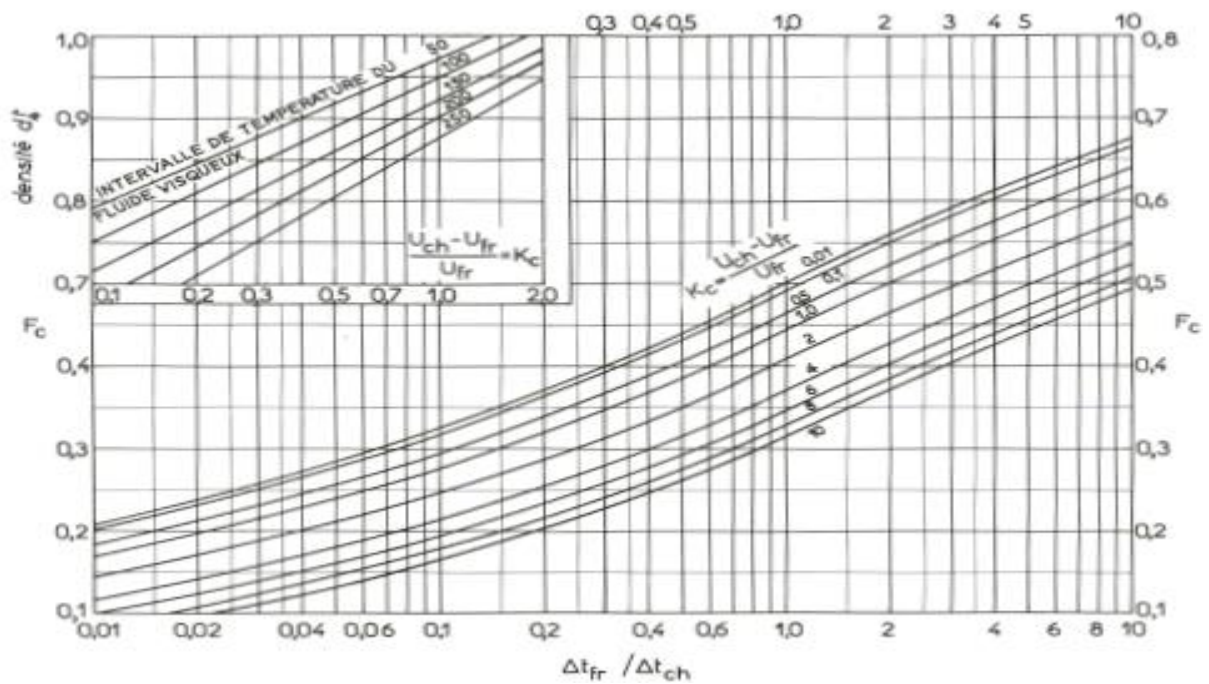
Annexe2 :deux passes côté calandre, quatre passes (ou plus) côté tubes



Annexe3 : Coefficient de transfert et coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds à l'intérieur des tubes

ÉCHANGEURS		U _s	
FLUIDE CHAUD	FLUIDE FROID	kcal/h.m ² .°C	BTU/hr. ft ² .°F
Eau	Eau	1 250 - 2 500	250 - 500
Solutions aqueuses	Solutions aqueuses	1 250 - 2 500	250 - 500
Hydrocarbures légers ^(P)	Hydrocarbures légers	200 - 370	40 - 75
Hydrocarbures moyens ^(P)	Hydrocarbures moyens	100 - 300	20 - 60
Hydrocarbures lourds ^(P)	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 : μ < 2 cPo	1 000 - 3 400	200 - 700
Vapeur d'eau	Solutions aqueuses : μ > 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
Dowtherm	Gaz	25 - 250	5 - 50
Dowtherm	Gaz	20 - 200	4 - 40
Dowtherm	Hydrocarbures lourds	30 - 300	6 - 60

Annexe 4: coefficient de transfert sale U_s



Annexe 5 :Détermination des températures caloriques

DISPOSITION DES TUBES EN TRIANGLE

D _i calandre		Tubes : 3/4" P = 15/16"				Tubes : 3/4" P = 1"				Tubes : 1" P = 1 1/4"			
		nombre de passes : n _i				nombre de passes : n _i				nombre de passes : n _i			
(m)	(cm)	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
8	20,3	32	26	24	18	30	24	24		16	16	14	
10	25,4	56	47	42	36	52	40	36		32	26	24	
12	30,5	98	86	82	78	82	76	74	70	52	48	46	44
13 1/4	33,7	114	96	90	86	106	86	82	74	66	58	54	50
15 1/4	38,7	160	140	136	128	138	122	118	110	86	80	74	72
17 1/4	43,9	224	194	188	178	196	178	172	166	118	106	104	94
19 1/4	48,9	282	252	244	234	250	226	216	210	152	140	136	128
21 1/4	54,0	342	314	306	290	302	278	272	260	188	170	164	160
23 1/4	59,1	420	386	378	364	376	352	342	328	232	212	212	202
25	63,5	506	468	446	434	452	422	394	382	282	256	252	242
27	68,6	602	550	536	524	534	488	474	464	334	302	296	286
29	73,7	692	640	620	594	604	556	538	508	376	338	334	316
31	78,8	822	766	722	720	728	678	666	640	454	430	424	400
33	83,8	938	878	852	826	830	774	760	732	522	486	470	454
35	88,9	1068	1004	988	958	938	882	864	848	592	562	546	532
37	94,0	1200	1144	1104	1072	1044	1012	986	870	664	632	614	598
39	99,0	1330	1258	1248	1212	1176	1128	1100	1078	736	700	688	672

Annexe 6 :Disposition des tubes en triangle