

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara Boumerdes

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département : Transport et équipements des hydrocarbures

Mémoire de Master

Spécialité : Génie mécanique : Mécanique des unités pétrochimiques

THEME

**INFLUENCE DE L'ENCRASSEMENT SUR LES
PERFORMANCES D'UN ECHANGEUR DE
CHALEUR**

Présenté par : SANHADJA Mehdi

Promotrice : HARKAT Yamina

Année universitaire 2021 / 2022

Remerciement

Après que je remercie le dieu je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma promotrice de mémoire, Madame Harkat Yamina. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les enseignants qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Et je voudrai remercier également chaque personne J'ai rencontré pendant mon stage a GNL3Z notamment les ingénieurs et les techniciens de service maintenance pour leurs accueils et leur soutien durant mon séjour.

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

Résumé

Dans les entreprises industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel pour la maîtrise de l'énergie. L'objectif de cette étude est de connaître les différents types d'échangeurs de chaleur et l'encrassement et ces différents types avec leur influence sur les performances de l'échangeur de chaleur à plaques, Cela consiste à calculer la résistance d'encrassement et évalué son évolution, à l'aide d'une simulation réalisée par HYSYS on détermine le dysfonctionnement d'un échangeur à plaques et ailettes nommé la boîte froide.

Abstract

In industrial companies, the heat exchanger is essential for energy control. The objective of this study is to know the different types of heat exchangers and the fouling and these different types their influence on the performances of the plate heat exchanger, It consists in calculating the fouling resistance and evaluating its evolution, with the help of a simulation carried out by HYSYS we determine the dysfunction of a plate and fin heat exchanger named the cold box.

Sommaire

Chapitre I : Présentation du complexe GL3/Z

Introduction.....	1
I. Historique du complexeGL3/Z	1
I.1 Présentation du complexeGL3/Z.....	1
I.2 Fiche technique du complexe GL3/Z.....	1
I.3 Description des principales installations du complexeGL3/Z.....	3
I.4 Conception et Principe de fonctionnement.....	3
I.4.1 Conception.....	3
I.4.2 Principe de fonctionnement du train.....	5
Conclusion.....	7

Chapitre II : Les échangeurs de chaleur

Introduction.....	8
II.1 Principe de fonctionnement.....	8
II.2 Classement des échangeurs de chaleur.....	9
II.2.1 Classement suivant le matériau de la paroi d'échange.....	9
II.2.2 classements suivant le Type de contact.....	9
II.2.3 Classement suivant La compacité de l'échangeur.....	10
II.2.4 Classement suivant la disposition des écoulements.....	10
II.2.5 Classement suivant la construction.....	10
II.2.5.1 Les échangeurs tubulaires.....	12
II.2.5.1.1 Echangeurs à tube spiral	12
II.2.5.1.2 Echangeur coaxial (double tube)	12
II.2.5.1.3 Echangeurs tubes et calandre	13
II.2.5.2 Les régénérateurs.....	13
II.2.5.2.1 Les régénérateurs statiques (à valve)	14
II.2.5.3 Les échangeurs à surface étendu	14
II.2.5.4 les échangeurs à plaques.....	15
II.2.5.4.1 Echangeur de chaleur plaques et joints.....	16
II.2.5.4.2 Echangeur de chaleur à plaques brasées.....	16
II.2.5.4.3 échangeurs de Chaleur à plaques soudées.....	17
II.2.5.4.4 Echangeurs à plaque circuit imprimé (PCHE)	17
II.2.5.5 Autres types des échangeurs.....	18
II.2.5.5.1 Echangeur lamellaire.....	18
II.2.5.5.2 les aéroréfrigérants	19
Conclusion.....	20

Chapitre III : dysfonctionnement et isolement des échangeurs

Introduction.....	21
III.1.1 L'encrassement	21
III.1.2 Aspect physique de l'encrassement.....	21
III.1.3 Aspect économique de l'encrassement.....	22
III.1.4 Les différents types d'encrassement.....	23
III.1.4.1. Encrassement par corrosion.....	23
III.1.4.2. Encrassement par dépôt.....	24
III.1.4.3 Encrassement biologique.....	24
III.1.4.4 L'entartrage.....	25
III.1.5 Nature des dépôts	25
III.1.6 Processus d'encrassement.....	26
III.1.6.1 Initiation.....	26
III.1.6.2 Transport.....	26
III.1.6.3 Fixation.....	26
III.1.6.4 Élimination.....	26
III.1.6.5 Le vieillissement.....	27
III.1.7 Facteurs jouant sur la fréquence et le degré d'encrassement.....	27

III.1.7.1 La température du fluide.....	27
III.1.7.2 Nature du fluide.....	27
III.1.7.3 Vitesse du fluide.....	28
III.2 Isolement thermique des échangeurs de chaleur.....	28
III.2.1 Les différents types d'isolement thermique.....	28
III.2.1.1 Gilets d'isolation pour échangeurs de chaleur.....	28
III.2.1.2 Isolation en mousse de polyuréthane.....	29
III.2.1.3 Isolation par la perlite.....	29
Conclusion.....	30

Chapitre IV : Simulation de la boîte froide

Introduction.....	31
IV.1 Problématique de la boîte froide.....	32
IV.2 Présentation de HYSYS.....	32
IV.3 Description de l'unité 17 Récupération du GNL et Fractionnement.....	33
IV.4 Simulation et calcul.....	35
IV.4.1 Les caractéristiques des fluides.....	35
IV.4.2 La composition chimique des trois fluides.....	36
IV.4.3 Hypothèse.....	37
IV.4.4 Bilan enthalpique.....	37
IV.4.5 Calcul de la surface d'échange entre deux fluides de la boîte froide.....	37
IV.4.6 Calcul de la différence logarithmique moyenne ΔT_{Lm}	38
IV.4.7 Calcul de la résistance d'encrassement.....	39
IV.4.8 Résultats de calcul.....	39
IV.4.7 Interprétation des résultats.....	43
Conclusion.....	43

Chapitre V : Maintenance des échangeurs de chaleur

Introduction.....	44
V.1 Maintenance des échangeurs de chaleur.....	44
V.1.1 Maintenance programmée ou préventive.....	44
V.1.2 Maintenance corrective.....	44
V.2.1 Prévention et Maintenance lors de fonctionnement.....	44
V.2.1 Prévention et maintenance lors de conception.....	45
V.2.3 Prévention et maintenance lors de fabrication.....	45
V.3 Nettoyage des échangeurs de chaleur.....	45
V.3.1 Nettoyage mécanique en ligne.....	45
V.3.2 Le nettoyage mécanique hors ligne.....	45
V.3.3 Le nettoyage chimique hors ligne.....	46
V.4 Maintenance de la boîte froide.....	47
V.4.1 Soufflage de la boîte froide 17-MC02.....	47
A/ Préparation.....	48
B/ Début des opérations de soufflage.....	48
V.4.2 Inspection du filtre FZ-152.....	51
V.4.3 Soufflage de la ligne 18.....	52
V.4.4 Inspection des ballons filtres 13-MD04 A-B.....	53
V.4.5 Analyse de la situation.....	54
Conclusion.....	54

Liste des figures

Figure I.1: Maquette 3D de la vue d'ensemble du GL3/Z.....	2
Figure I.2 : Schéma fonctionnel global du complexe.....	6
Figure II.1 : Echangeur à contact indirect.....	9
Figure II.2 : Échangeur a contact direct.....	9
Figure II.3 : Radiateur d'automobile.....	10
Figure II.4 : Différents modes de circulation.....	10
Figure II.5 : Organigramme de différents types d'échangeurs en fonction de la construction.....	11
Figure II.6 : Échangeur de chaleur spirale.....	12
Figure II.7 : Échangeur double tubes (coaxial)	12
Figure II.8 : Échangeur tubes et calandre.....	13
Figure II.9 : régénérateur statique à clapet.....	14
Figure II.10 : régénérateurs rotary (rotatif)	14
Figure II.11 : Les différents types des ailettes.....	15
Figure II.12 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques.....	15
Figure II.13 : Échangeur de chaleur plaques et joints.....	16
Figure II.14 : Echangeur de chaleur à plaques brasées.....	17
Figure II.15 : Échangeur de Chaleur à plaques soudées.....	17
Figure II.16 : Les plaques imprimées de PCHE.....	18
Figure II.17 : Échangeur lamellaire.....	19
Figure II.18 : Aéroréfrigérant.....	19
Figure III.1 : L'encrassement dans un échangeur tubulaire.....	21
Figure III.2 : Les différents types de corrosion.....	23
Figure III.3 : Encrassement par dépôt d'un échangeur de chaleur à plaques.....	24
Figure III.4 : Encrassement biologique d'un échangeur de chaleur à plaques.....	24
Figure III.5 : Encrassement chimique d'un échangeur de chaleur à plaques.....	25
Figure III.6 : Processus d'encrassement.....	27
Figure III.7 : Gilet d'isolation d'un échangeur a plaques et joints.....	29
Figure III.7 : la mousse de polyuréthane.....	29
Figure III.8 : la perlite en vrac.....	30
Figure IV.01 : une partie d'un PFHE typique.....	31
Figure IV.02 l'écoulement des trois fluides.....	32
Figure IV.03 : simulation d'une partie de l'unité 17 (où se trouve la boîte froide)	34
Figure IV.4 : La détermination des fluides entrants et sortants.....	35
Figure IV.5 : Caractéristiques des fluides.....	35
Figure IV.6 : La composition chimique des trois fluides.....	36
Figure IV.7 : Les résultats obtenus par la simulation.....	36
Figure IV.8. Paramètre de perte des charges thermique.....	37
Figure IV.9 : Distribution des températures-Echangeur à contre-courant.....	38
Figure IV.10 : Données de constructeur.....	39
Figure IV.11 : La température de sortie GN en fonction de la résistance d'encrassement.....	41
Figure IV.12 : Coefficient de transfert U en fonction de temps.....	41
Figure IV.13 : La résistance d'encrassement en fonction du temps.....	42
Figure IV.14 : La différence de température moyenne logarithmique en fonction de résistance d'encrassement.....	42
Figure V.1 : Nettoyage d'un échangeur tubulaire par l'eau à haute pression.....	46
Figure V.2 : Processus de la boîte froide.....	47
Figure V.4 : Extrait du plan P&ID montrant le point d'injection d'azote et la position du Joint d'éclatement.....	48

Figure V.5 : Débris récupérés après le 1 ^{ème} soufflage de la boîte froide.....	49
Figure V.6 : Test N°3 avant l'éclatement du joint après l'éclatement du joint.....	49
Figure V.7 : Etat du joint d'éclatement après le 3 ^{ème} soufflage.....	50
Figure V.8 : Test N°6 avant l'éclatement du joint et après l'éclatement du joint.....	50
Figure V.9 : Etat du joint d'éclatement après le 6 ^{ème} soufflage.....	51
Figure V.10 : Etat du joint d'éclatement après le dernier soufflage.....	51

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Estimation des coûts d'encrassement dans certains pays.....	22
Tableau IV.1 : Les résultats de simulation.....	40

Abréviations

GPHE : gasket plat heat exchanger
 BPHE : Brased plat heat exchanger
 PCHE : printed circuit heat exchanger
 PFHE : plat fin heat exchanger
 GNT/ GN ; gaz naturel traité
 NUT : nombre d'unités de transfert
 LMTD/ DTML : différences de températures logarithmiques moyenne

INTRODUCTION GENERALE

Dans la majorité des installations industrielles, l'utilisation rationnelle de l'énergie est un facteur déterminant de rentabilité et de protection de l'environnement. La majeure partie des échanges énergétiques industriels se fait moyennant des échangeurs de chaleurs. L'amélioration de l'efficacité énergétique des industries des procédés suscite une attention particulière surtout dans le cas des réseaux d'échangeurs.

Le processus de transformation du gaz naturel en GNL est réalisé par un cycle de réfrigération cryogénique, ce dernier permet de refroidir le gaz et de le condenser en un liquide à travers des boîtes froides qui sont des structures autoportantes protégeant les équipements cryogéniques tels que les échangeurs de chaleur, les colonnes de distillation, les tuyauteries, les vannes et l'instrumentation.

Les échangeurs de chaleur à plaques jouent un rôle crucial dans le domaine de la cryogénie, de par leur capacité à faciliter le transfert de chaleur sous des écarts de température minimales. Le suivi de bon fonctionnement par monitoring des paramètres de service aux bornes d'échangeur a conduit notre travail qui est composé des chapitres suivants :

- Dans le premier chapitre nous exposerons une présentation du complexe GNL3Z spécialisé dans la liquéfaction du gaz naturel.
- Dans le deuxième chapitre nous exposerons une présentation non détaillée des échangeurs de chaleur.
- Dans le troisième chapitre nous exposerons les différents problèmes liés au fonctionnement et spécialement le phénomène d'encrassement et les différentes méthodes de l'isolation thermique.
- Dans le quatrième chapitre, à travers le calcul thermique on va calculer la résistance d'encrassement en fonction de temps, l'allure de l'évolution de l'encrassement et l'impact de ce dernier sur quelques paramètres, les résultats obtenus ont été présentés par des courbes analysées et commentées.
- Le cinquième chapitre nous aide à voir la maintenance des échangeurs de chaleur et de la boîte froide en particulier notamment leur soufflage. L'exploitation de ces deux derniers chapitres nous mènent à proposer quelques perspectives et finaliser ce travail par une conclusion.

Introduction

Ce premier chapitre abordera essentiellement la présentation générale du complexe GL3/Z, notamment sa description tout en citant les unités et les équipements qui le constituent.

I. Historique du complexe GL3/Z

Le complexe GL3/Z est le dernier complexe de liquéfaction de Gaz naturel réalisé en Algérie pour le compte de l'entreprise nationale Sonatrach.

C'est le consortium Snamprogetti (Italie) / CHIYODA (Japon) qui a décroché ce mégaprojet dont le coût de réalisation dépasse les 4,55 milliards de dollars, soit 280 milliards de dinars.

I.1 Présentation du complexe GL3/Z

Le complexe GL3/Z est un site industriel de production de gaz naturel liquéfié (GNL) situé dans la zone industrielle d'Arzew au nord-ouest de l'Algérie.

L'installation est composée d'un seul train de liquéfaction du gaz naturel (méga train) et de toutes les infrastructures nécessaires y compris les utilités, les stockages et les installations de chargements des navires.

Le gaz naturel liquéfié produit et les composants plus lourds, comme le GPL et la gazoline sont exportés vers les marchés internationaux.

Le gaz éthane, sous-produit extrait du gaz naturel, est prévu pour être exporté vers l'usine de vapocraquage non encore réalisée à ce jour. Néanmoins, une partie de cet éthane continue de satisfaire la consommation interne du train, consistant en sa réinjection dans le réfrigérant multiple et son utilisation comme gaz combustible.

I.2 Fiche technique du complexe GL3/Z

- Localisation : dans la zone proche du port Industriel d'Arzew El Djedid.
- Le complexe Jumbo GPL - GP1/Z - se trouve à la limite Est du site, tandis que l'usine de dessalement (Kahrama) et le complexe GL2/Z voisins se trouvent à la limite Ouest. Le complexe GL3/Z se trouve coincé entre la mer Méditerranée et la route du port Nord et la route principale de la zone industrielle au Sud.
- Superficie : 50,6 hectares.
- Disponibilité de l'usine : 330 jours par an.

- Objet : Liquéfaction et séparation des composants lourds du gaz naturel.
- Capacité de production : 4,7 millions de tonnes par an.
- Procédé utilisé : Air Product Chemical Inc's (APCI).
- Produits : GNL, éthane, propane liquide, butane liquide, gazoline.
- Constructeur : le consortium Snam-Progetti (Italie) et Chiyoda (Japon).
- Nombre de trains : 1 train unique avec prévision de construire un second train similaire.
- Capacité de stockage:
 - Deux réservoirs de GNL à rétention totale d'une capacité de 160 000 m³ chacun.
 - Les GPL (C₃ et C₄) sont stockés dans des réservoirs de rétention totale séparés de 56 000 m³ pour le propane et 12000 m³ pour le butane.
 - La gazoline produite est stabilisée puis stockée dans une sphère d'une capacité de 1 800m³.
 - Destination de la production : Les produits finis sont destinés à l'exportation et au marché national.



Figure I.1: Maquette 3D de la vue d'ensemble du GL3/Z.

I.3 Description des principales installations du complexe GL3/Z

Les installations de l'usine GL3/Z comprennent :

- Le train de procédé.
- Les utilités.
- Le stockage des produits finis et les installations off-site liées.
- Une jetée avec une plateforme de chargement de GNL extensible dotée d'un brise-lame.
- La protection du bord de mer.
- Tous les bâtiments et les infrastructures nécessaires.

Les Installations d'entrée de l'usine se trouvent dans le côté sud-ouest de la zone d'implantation. C'est là que le gaz d'alimentation entre dans l'usine GL3/Z.

Le côté ouest comprend la Zone de Génération d'Energie et les Turbines à gaz.

La partie sud de l'usine est constituée des Utilités et de leurs dispositifs de stockage.

La section nord longe la mer et contient les installations pour le Stockage des Produits et des Réfrigérants, la zone de Torche et la jetée.

Le train de procédé est situé au milieu de la zone d'implantation. Il est subdivisé en deux parties : la première comprend les Unités de Prétraitement et de Liquéfaction, alors que la seconde comprend les équipements de Fractionnement et de Récupération des LGN (Liquides du Gaz Naturel).

I.4 Conception et Principe de fonctionnement

I.4.1 Conception

On distingue principalement quatre zones :

A. Zone de procédé

Le procédé tout entier est effectué dans les unités opératives suivantes :

- Unité 01 : Installations d'entrée.
- Unité 02 : Stockage du solvant (amine).
- Unité 08 : Stockage de l'huile chaude.
- Unité 10 : Commune/Général.
- Unité 11 : Conditionnement du gaz d'alimentation.
- Unité 12 : Elimination du gaz acide.
- Unité 13 : Déshydratation du gaz.

- Unité 14 : Système du gaz combustible.
- Unité 15 : Liquéfaction.
- Unité 16 : Réfrigération.
- Unité 17 : Récupération et fractionnement du LGN.
- Unité 18 : Système de l'huile chaude.
- Unité 19 : Système d'Eau de refroidissement.

B. Les utilités

Cette zone est constituée de plusieurs unités :

- Unité 51 : Génération de l'énergie électrique.
- Unité 53 : Système du générateur diesel de secours.
- Unité 55 : Système gaz combustible commun.
- Unité 56 : Système de production de l'air instrument.
- Unité 57 : Système de génération d'azote.
- Unité 58 : Circuit d'eau potable.
- Unité 59 : Système de l'eau de service et déminéralisée.
- Unité 64 : Traitement des eaux usées et des effluents.

C. Unités off-site

La zone off site est constituée de:

- Unité 71 : Produit de stockage et chargement du GNL.
- Unité 72 : Produit de stockage et chargement du GPL.
- Unité 75 : Système de torche.
- Unité 76 : Système de stockage de gazoline.

D. Système anti- incendie off-site

La zone du système anti incendie est constitué par une seule unité :

- Unité 80 : Infrastructure – Commun/Générale.

I.4.2 Principe de fonctionnement du train

Le train comprend essentiellement un compresseur de gaz d'alimentation, une section d'élimination du mercure, une unité d'élimination du CO₂ (sous licence de BASF), un système de déshydratation, une unité de récupération et de fractionnement des LGN et un cycle de réfrigération au propane dédié, une section de liquéfaction et de réfrigération (C₃-MR sous licence APCI).

Les utilités et les installations off-sites comprennent le système de génération d'énergie, le stockage et le chargement des cargos de GNL et de GPL, l'huile chaude, l'eau de refroidissement, l'air service/ instrument, l'azote, le gaz combustible, les torches, le traitement des eaux usées, l'eau de service/ potable, le gasoil, le stockage du réfrigérant et de la gazoline.

L'usine peut traiter le gaz naturel de composition "légère" (ayant une teneur faible en hydrocarbures) ou "lourde" (ayant plutôt une teneur élevée en hydrocarbures).

Le gaz d'alimentation est d'abord comprimé et traité en vue d'éliminer le mercure, les gaz acides et l'eau. En aval des unités de prétraitement, le gaz est refroidi et envoyé vers le déméthaniseur pour séparer le méthane des hydrocarbures plus lourds. Le courant liquide est fractionné dans une série de plusieurs colonnes de rectification, en éthane, propane, butane et gazoline qui sont considérés comme des sous-produits à grande valeur ajoutée.

Le courant de vapeur de tête du déméthaniseur obtenu est composé principalement de méthane, lequel est refroidi d'abord par propane réfrigéré, puis par le réfrigérant mixte, jusqu'à atteindre l'état liquide (GNL) à la sortie de l'unité de liquéfaction.

Le GNL produit par le train de procédé est acheminé vers deux réservoirs de stockage de GNL, puis exporté au moyen d'un système de chargement sur cargo dédié comme cela a été expliqué précédemment.

Les différentes installations constituant le procédé principal de l'Usine GL3/Z sont représentées sur le Schéma Fonctionnel Global (Fig. I.2). L'illustration présente les débits du courant principal et les connexions clés entre les différentes unités de l'usine.

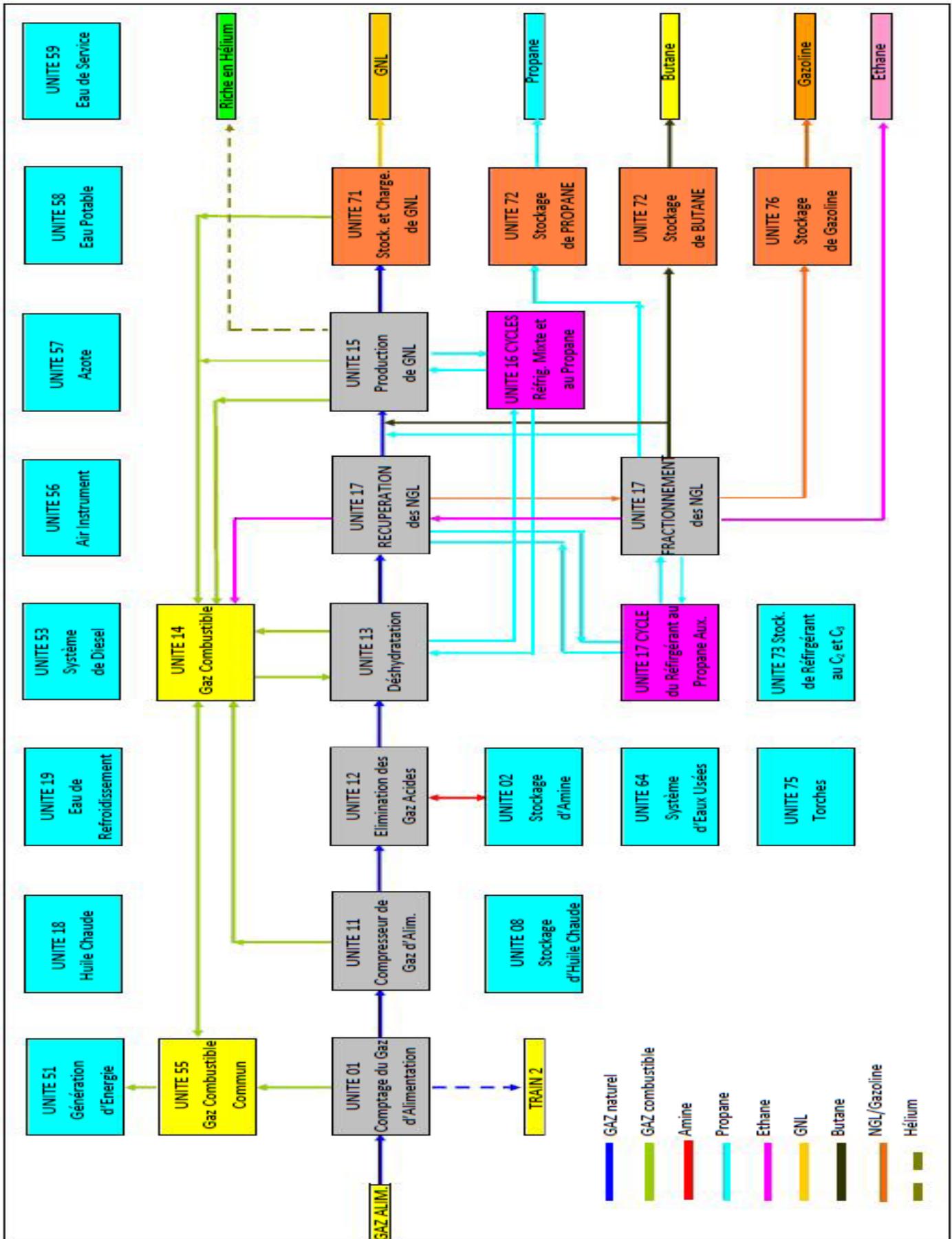


Figure I.2 : Schéma fonctionnel global du complexe.

Conclusion

Les coûts de liquéfaction sont un facteur déterminant de la production, des nouveaux procédés sont développés pour les réduire notamment les systèmes d'amélioration qui ce profit de les gaz brûlés et de torchage considérant que si l'unités de liquéfaction consomme environ 12% du gaz qu'elle traite, la rentabilité sera faible.

Introduction

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs qui permettent d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans ou avec contact direct entre les deux fluides. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications. Parmi celles-ci l'industrie pétrolière. Les échangeurs de chaleur peuvent être classés selon plusieurs critères de classification. Citons les principaux ci-dessous :

- Le matériau de la paroi
- Type de contact
- La compacité de l'échangeur
- Dispositions de l'écoulement
- La construction

De manière générale, les échangeurs de chaleur représentent trois catégories principales : continus, discontinus et par mélange. ^(1,2)

II.1 Principe de fonctionnement

Dans les échangeurs les plus courants, les deux fluides sont séparés par une paroi au travers de laquelle les échanges se font par conduction, et la transmission de chaleur fluide-paroi relevant essentiellement de la convection. Dans certains appareils, la transmission de chaleur est associée à un changement de phase de l'un des fluides. C'est le cas des condenseurs, évaporateurs, tours de refroidissement, etc...

Les fonctions des échangeurs de chaleur sont extrêmement diverses, on peut situer les suivantes :

- Les préchauffeurs ou refroidisseurs (liquides ou de gaz), on peut en rappeler de nombreux exemples qui se caractérisent par une fonction simple : contrôler la température du fluide à un point précis du procédé.
- Récupérateur de chaleur : La fonction de cet échangeur est d'assurer le transfert d'une capacité thermique maximale pour une récupération maximale de la chaleur d'échappement selon des critères énergétiques et économiques.
- Les réfrigérants (et aéroréfrigérant lorsque le refroidissement se fait par l'air) garantissent que l'énergie thermique non récupérable est dissipée du processus vers l'environnement extérieur, c'est une fonction essentielle dans de nombreux processus.
- Humidificateur ou condenseur partiel pour assurer la condensation de la vapeur mélangée au gaz incondensable pour obtenir du gaz appauvri en vapeur en fin de fonctionnement
- Evaporateurs qui assurent l'évaporation complète ou partielle de liquides dans divers procédés, notamment la génération d'énergie mécanique (cycle Rankine, cycle moteur Sheehan) et la production de froid : cycle à compression (PAC), réfrigérateurs.
- Condenseurs pour assurer une condensation complète ou partielle de gaz (vapeur), par exemple pour la production d'énergie mécanique et frigorifique. ^(3,4)

II.2 Classement des échangeurs de chaleur

II.2.1 Classement suivant le matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

- Les échangeurs métalliques (acier, cuivre, aluminium ou alliages)
- Les échangeurs non métalliques (plastique, céramique, graphite, verre, etc.).⁽⁸⁾

II.2.2 Classement suivant le Type de contact

- Échangeurs à contact direct : les deux fluides sont directement mélangés dans un récipient et atteignent la même température finale, communément les fluides sont hétérogènes.
- Échangeurs à contact indirect : séparés par une paroi les deux fluides s'écoulent dans des différents espaces.^(6,7)

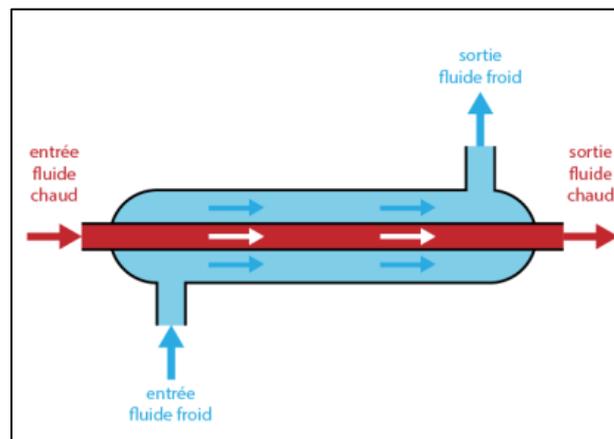


Figure II.1 : Echangeur à contact indirect

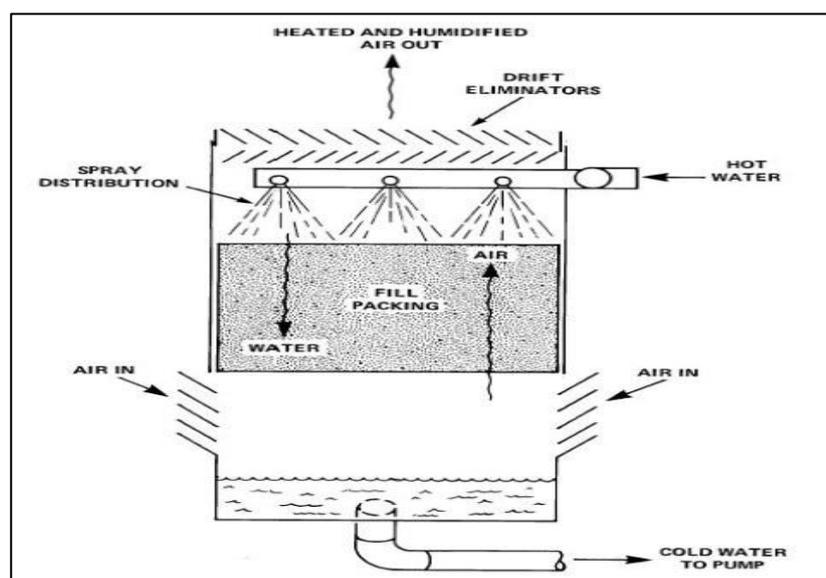


Figure II.2 : Échangeur a contact direct

II.2.3 Classement suivant La compacité de l'échangeur

La compacité est définie comme le rapport de la surface au volume total de l'échangeur. Le dispositif d'échange est considéré comme compact si son compactage est supérieur à $700 \text{ m}^2 / \text{m}^3$; cette valeur peut varier de 500 à $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$. On peut donner un exemple d'échangeur compact le plus répandu dans la pratique, les radiateurs des véhicules. ^(2,5)

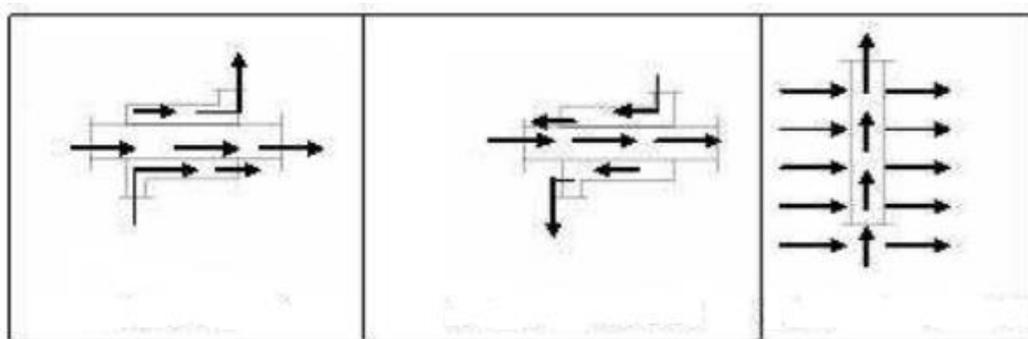


Figure II.3 : Radiateur d'automobile

II.2.4 Classement suivant la disposition des écoulements

Dans les échangeurs à contact indirect, l'écoulement des fluides peuvent être :

- Même sens « co-courants ».
- Sens contraire « contre-courant ».
- Perpendiculaire l'un à l'autre « courant croisés ». ⁽⁴⁾



a. Co-courant

b. contre-courant

c. courant croisé

Figure II.4 : Différents modes de circulation

II.2.5 Classement suivant la construction

Du fait de la variété de ces appareils et des variantes de leurs constructeurs, il est difficile de donner une description exhaustive de leur technologie. L'organigramme suivant montre les principales classes d'échangeurs en fonction de la construction :

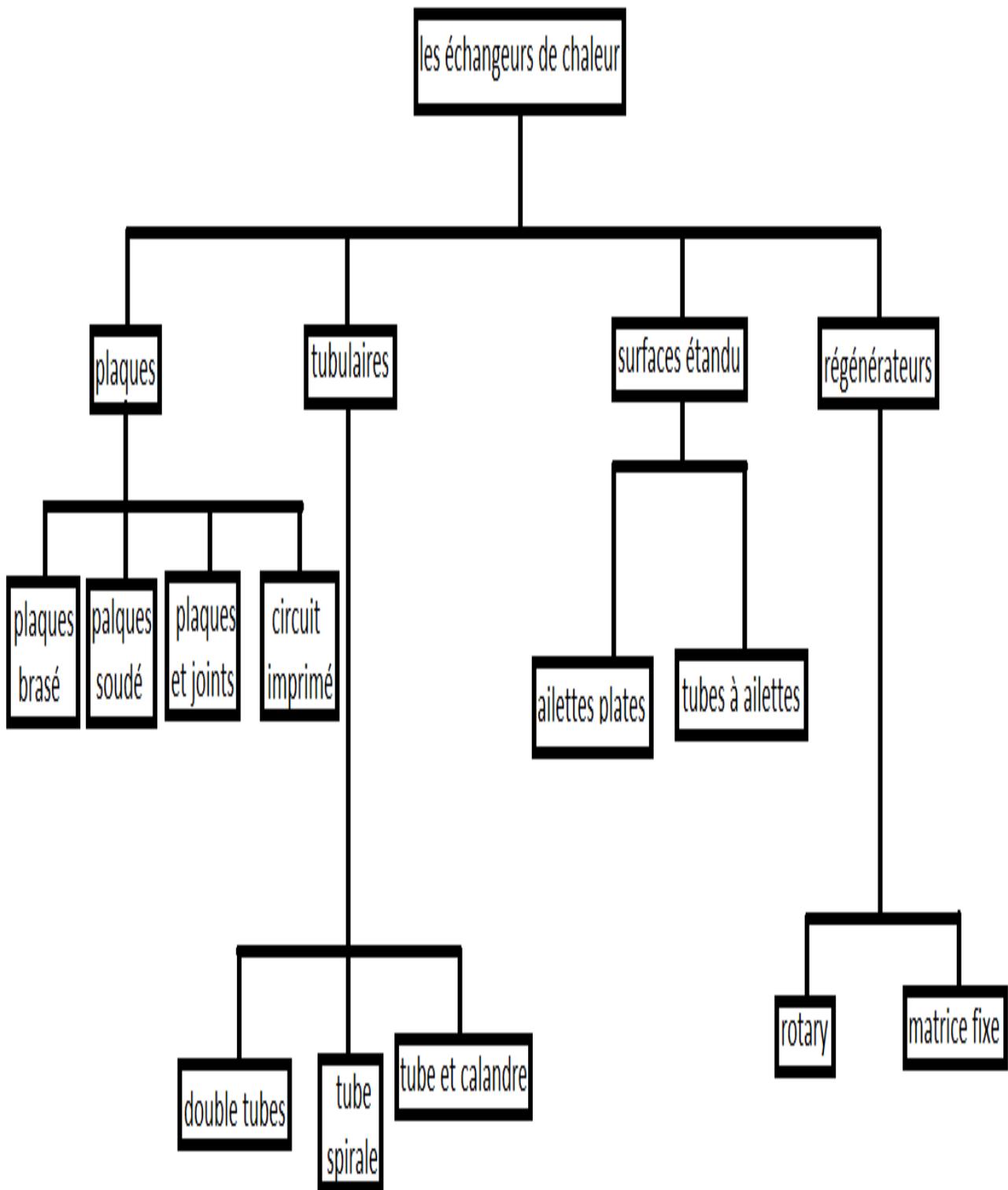


Figure II.5 : Organigramme de différents types d'échangeurs en fonction de la construction

II.2.5.1 Les échangeurs tubulaires

L'échangeur utilisant le tube comme élément principal de la paroi d'échange est le plus courant. On peut classer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur placement.

II.2.5.1.1 Echangeurs à tube spiral

L'échangeur de chaleur Spirale est constitué de deux canaux enroulés en spirale placés dans une calandre sur lesquels sont soudés des entretoises, qui favorisent un écoulement turbulent dans chaque canal. Le coefficient de transfert de chaleur est plus élevé dans un tube spiral que dans un tube droit. Ils sont adaptés à la dilatation thermique et aux fluides corrosifs, car le nettoyage est difficile. ⁽⁹⁾

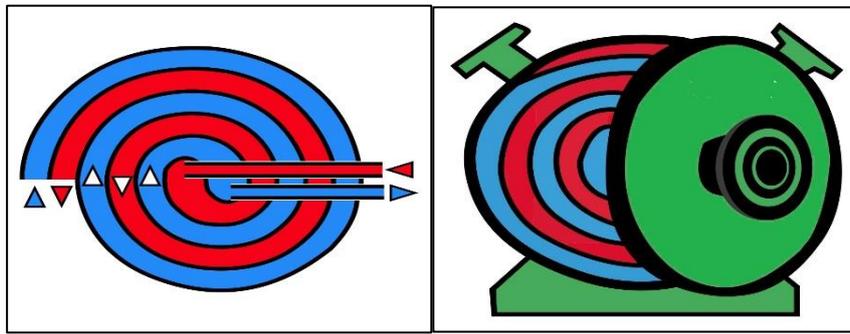


Figure II.6 : Échangeur de chaleur spirale

II.2.5.1.2 Echangeur coaxial (double tube)

Il est constitué de deux tubes cintrés de diamètres différents. Les deux fluides échangent la chaleur au niveau de la paroi du tube intérieur.

En général, le fluide le plus chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur. ^(1,2)



Figure II.7 : Échangeur double tubes (coaxial)

II.2.5.1.3 Echangeurs tubes et calandre

Il est constitué d'un faisceau tubulaire, disposés à l'intérieur d'une calandre. Un fluide s'écoule à l'intérieur de calandre et l'autre fluide s'écoule à travers les tubes. Les chicanes sont utilisées afin d'améliorer le transfert de chaleur par augmentation de la surface de contact et aussi pour fixer et supporté les tubes. Les boîtes de distribution à chaque extrémité du faisceau, assurent la circulation du fluide à l'intérieur des tubes. La calandre est également équipée de tuyaux d'entrée et de sortie pour le fluide qui circule à l'extérieur des tubes. Le choix de la section des tubes est optimisé en fonction de la nature du fluide et les tubes peuvent être à une seule ou à plusieurs passes. ^(1,10)

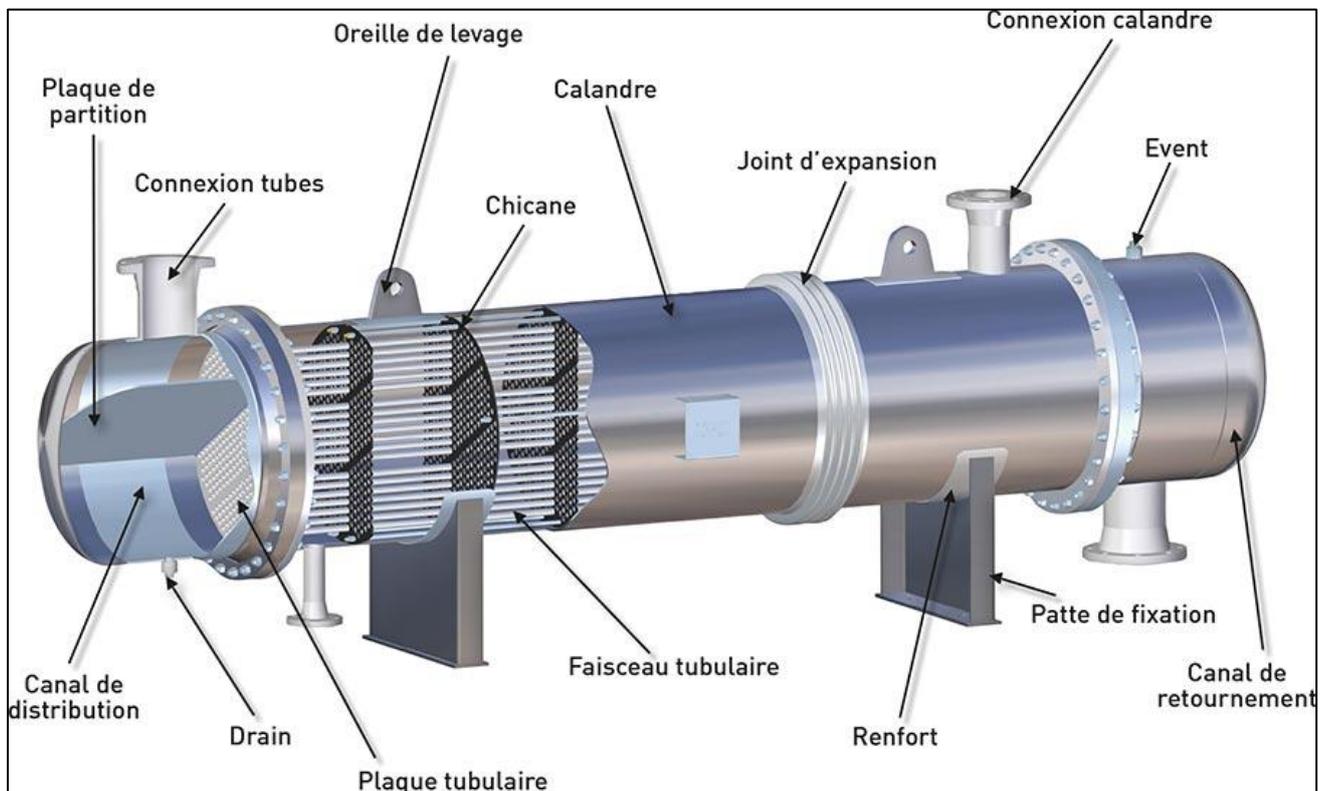


Figure II.8 : Échangeur tubes et calandre

II.2.5.2 Les régénérateurs

Ils sont des échangeurs où le fluide chaud cède l'énergie thermique à un matériau accumulateur et le passage alternatif, fluide chaud puis fluide froid, permet l'échange de

chaleur entre les deux fluides. On distingue deux catégories, les régénérateurs statiques ou à valves et à matrice tournante (rotary).

II.2.5.2.1 Les régénérateurs statiques (à valve)

Dans lesquels les matrices sont intermittent parcourues par les courants chaud et froid, par exemple le régénérateur statique à clapet, le clapet échange le trajet de l'air pour que l'accumulateur soit alternativement traversé par l'air neuf et l'air recyclé. ⁽¹¹⁾

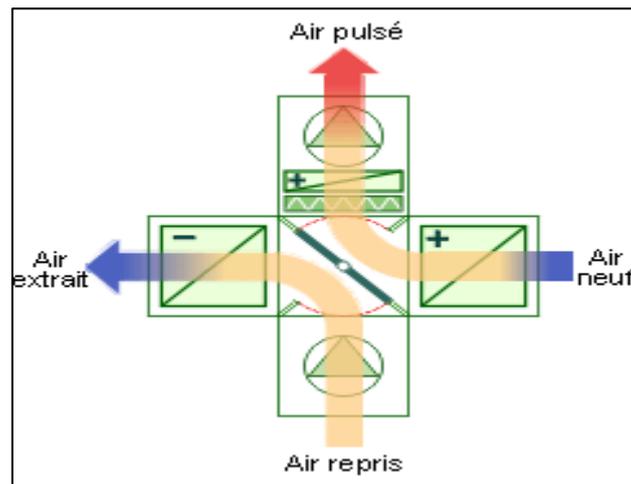


Figure II.9 : régénérateur statique à clapet

II.2.5.2.2 les régénérateurs rotary

Il y a deux types d'écoulement dans le régénérateurs rotary, Si la matrice est constituée d'un disque dont l'axe de rotation est parallèle à l'écoulement, c'est un écoulement axial, et quand la matrice est constituée d'un tambour tournant suivant un axe perpendiculaire à l'écoulement, c'est l'écoulement radial. ⁽¹¹⁾

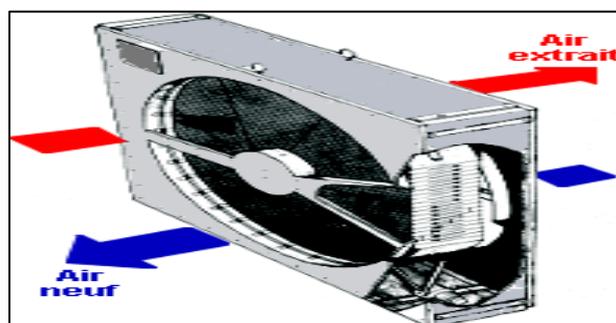


Figure II.10 : régénérateurs rotary (rotatif)

II.2.5.3 Les échangeurs à surface étendu

Les échangeurs de chaleur à surface étendue sont des dispositifs comportant des ailettes ou des appendices sur la surface primaire de transfert de chaleur (tubulaire ou plaque) dans le but d'augmenter la surface de transfert de chaleur. Les ailettes sont largement utilisées pour les fluides qui possèdent un coefficient d'échange de chaleur (h) faible, notamment le gaz (l'échange de chaleur gaz-gaz et gaz-liquide).⁽¹⁾

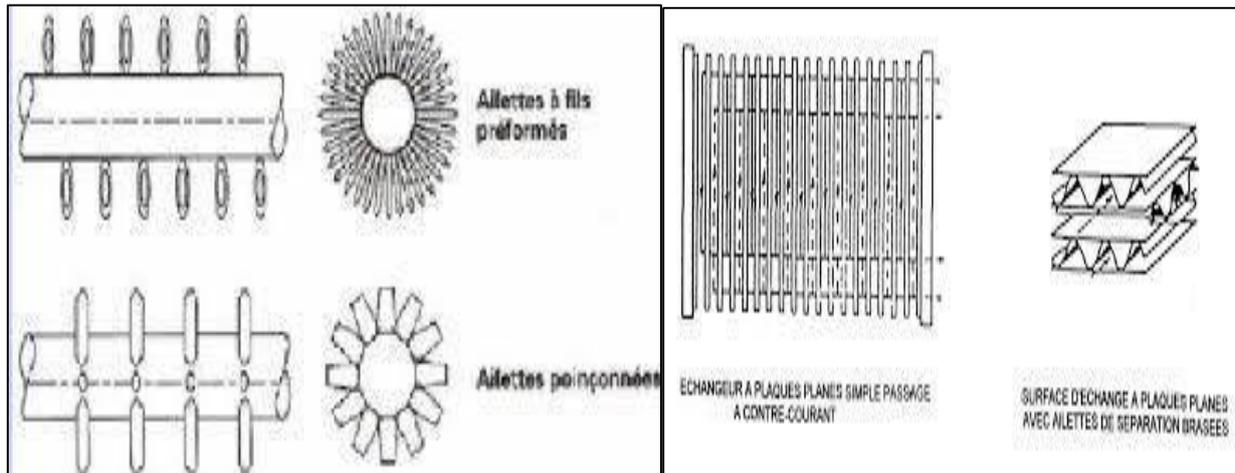


Figure II.11 : Les différents types des ailettes

II.2.5.4 les échangeurs à plaques :

Ils sont composés d'un bloc de plaques, qui sont brasées, serré sur un bâti avec des joints ou imprimé entre elles. Entre les plaques, circulent le fluide à refroidir et le fluide à réchauffer en alternance. La construction des plaques provoque un flux turbulent pour un mieux transfert de chaleur. Par comparaison aux autres échangeurs thermiques (tubulaires ou spirale), l'échangeur à plaques se caractérise par des avantages suivants :

- Rendement thermique plus élevé
- Installation et commande simples
- Modèle compact
- Plus grande flexibilité
- Meilleure récupération de la chaleur

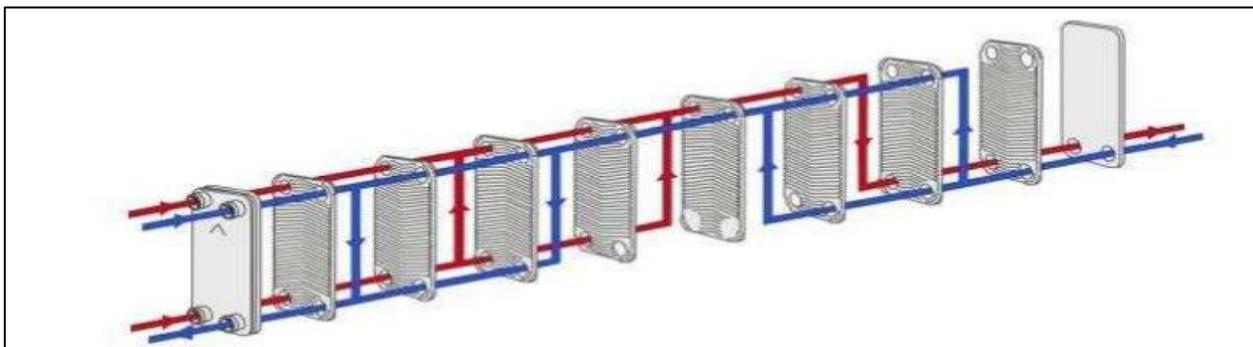


Figure II.12 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

II.2.5.4.1 Echangeur de chaleur plaques et joints

Les échangeurs à plaques et joints (GPHE) sont constitués d'un paquet de plaques corruguées et embouties suivant des profils différents, avec des canaux de circulation pour les deux fluides, l'étanchéité périphérique de chaque plaque est assurée par les joints qui autorisent ou empêchent l'écoulement des fluides entre les plaques.

Ils sont convenables pour l'échange de chaleur à hauts débits et les Différents profils de plaques nous permettent une adaptation pour chaque utilisation. ^(1,8)

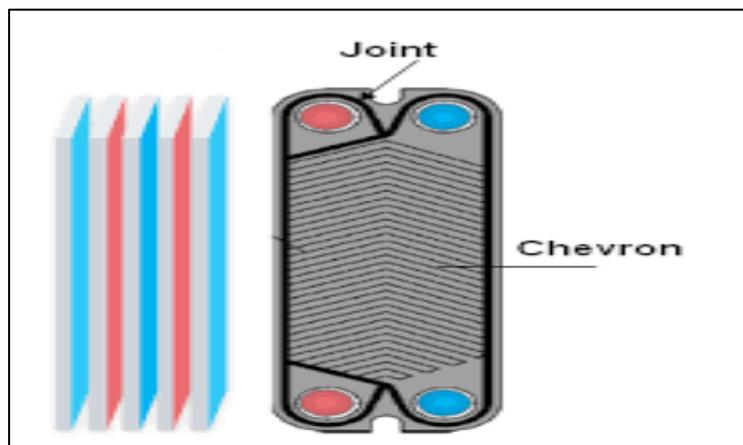


Figure II.13 : Échangeur de chaleur plaques et joints

II.2.5.4.2 Echangeur de chaleur à plaques brasées

Les échangeurs à plaques brasées (BPHE) sont des échangeurs où les plaques en acier inoxydable ou bien l'inox sont assemblées par brasure cuivre ou des alliages à base de nickel au lieu de joint. En général ils sont utilisés pour les fluides agressifs, Pendant le processus de brasage de l'ensemble de plaques, le matériau d'apport ou de brasage est attiré vers les points de contact entre les plaques alternées qui forment des jonctions de brasure. Ces jonctions de brasure améliorent considérablement l'intégrité structurelle des échangeurs BPHE et les rendent aptes à des pressions de fonctionnement plus élevées, allant jusqu'à 30-40 bars. ⁽¹³⁾

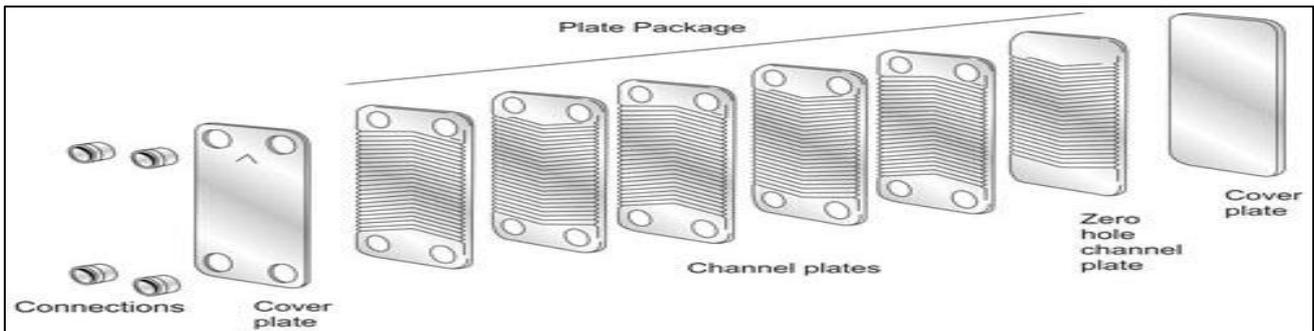


Figure II.14 : Échangeur de chaleur à plaques brasées

II.2.5.4.3 échangeurs de Chaleur à plaques soudées

Les échangeurs à plaques soudées sont constitués de plaques soudées au laser par Point, augmentant la longévité de l'échangeur. De plus, leurs performances thermiques sont, les pertes de charge minimales ainsi qu'un encombrement réduit. L'étanchéité entre les plaques est assurée par la soudure. Mais les panneaux, démontables, sont équipés de joints pour assurer l'étanchéité.⁽¹⁴⁾

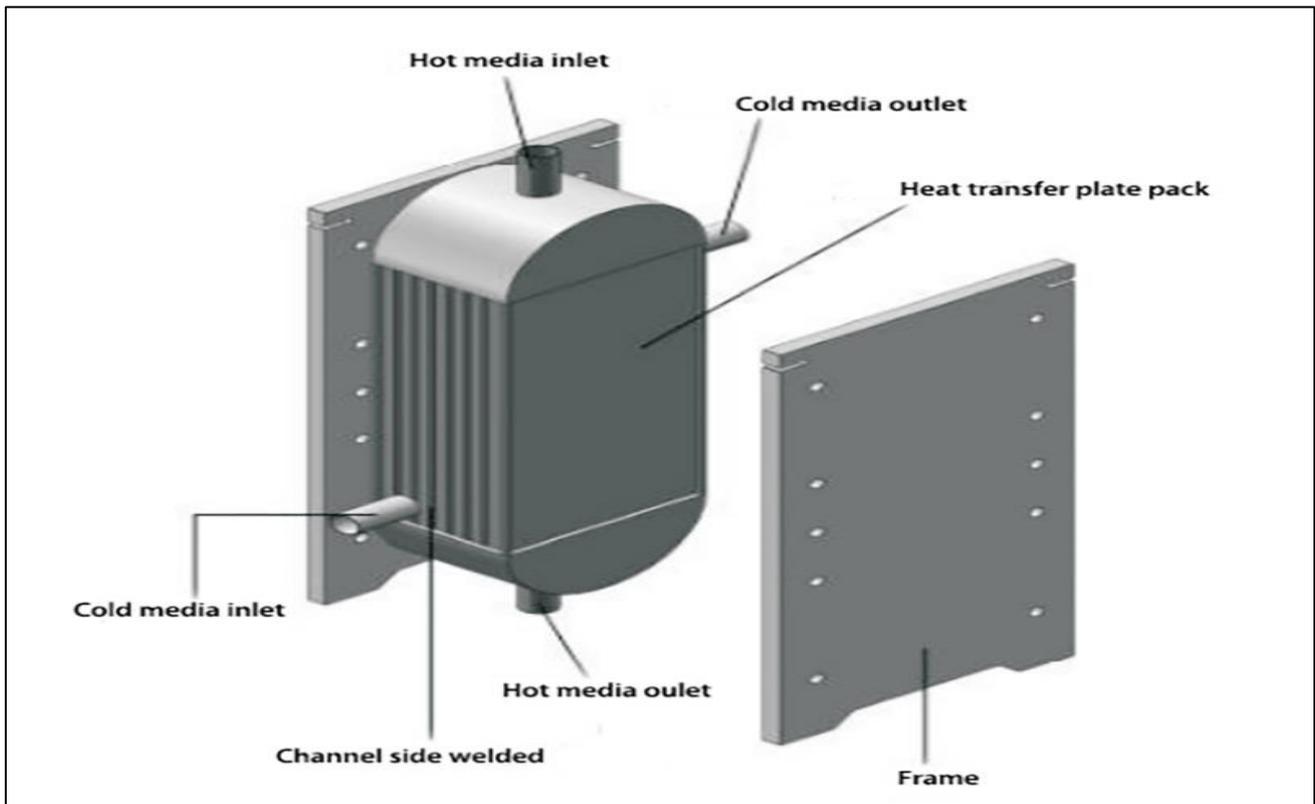


Figure II.15 : Échangeur de Chaleur à plaques soudées

II.2.5.4.4 Echangeurs à plaque circuit imprimé (PCHE)

Les échangeurs de chaleur précédents ne peuvent pas fournir une résistance mécanique suffisante en raison de la soudure périphérique. Cela signifie qu'une forte résistance mécanique doit être assurée pour atteindre les objectifs de conception en termes de critères de performance et de sécurité car la déformation mécanique ne garantissant pas le bon comportement pendant les opérations. Les

constructeurs proposent l'échangeur de chaleur le plus performant atteignant 40 bars, Il est un échangeur compact qui peut potentiellement supporter des hautes pressions, La technologie de l'échangeur de chaleur à circuit imprimé qui utilise le collage par diffusion comme procédé de soudage. Il en résulte un bloc final unique composé de toutes les plaques soudées ensemble. ^(12,13)

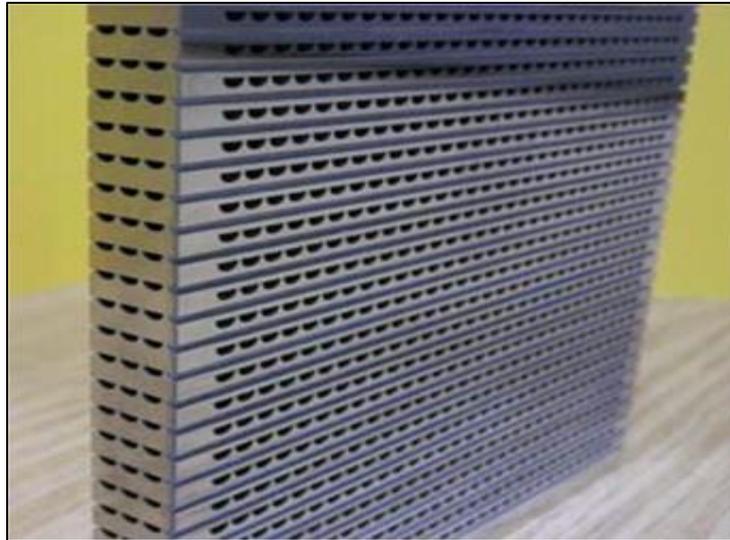


Figure II.16 : Les plaques imprimées de PCHE

II.2.5.5 Autres types des échangeurs

II.2.5.5.1 Echangeur lamellaire

C'est un échangeur constitué d'un ensemble de canaux ou de lamelles parallèles, soudés, à plaques minces (tubes plats ou canaux rectangulaires) placés longitudinalement dans une calandre. L'écoulement du côté de la calandre se fait généralement en un seul passage autour des plaques et s'écoule dans les espaces entre les canaux. Les limites de fonctionnement de cet échangeur sont de 350 °C en température et 25 bars en pression maximale. ⁽¹⁾

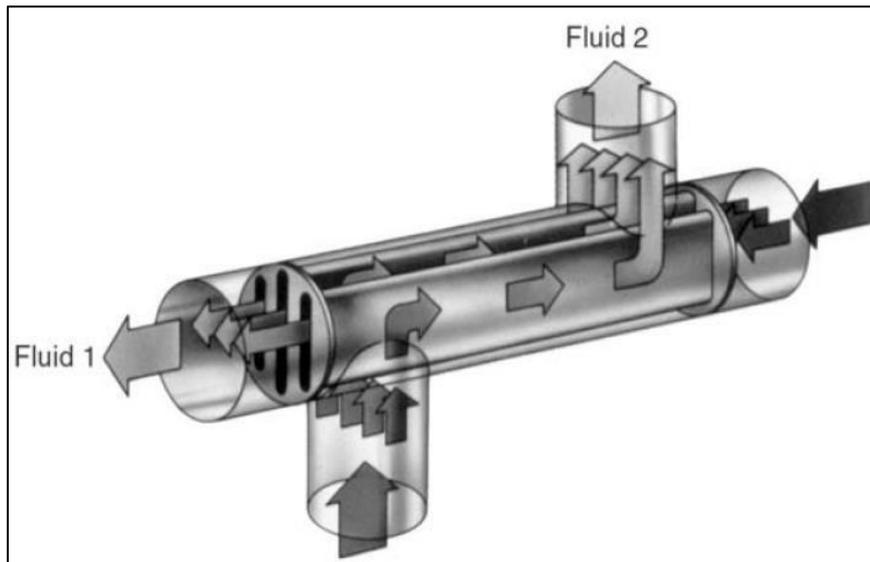


Figure II.17 : Échangeur lamellaire

II.2.5.5.2 les aéroréfrigérants

Le principe de fonctionnement d'un ACHE est simple. Le fluide de traitement chaud entre dans une extrémité de l'ACHE et circule dans des tubes, tandis que l'air ambiant circule sur et entre les tubes, qui ont généralement des surfaces à ailettes extérieures. La chaleur de traitement est transférée à l'air, qui refroidit le fluide et l'air chauffé est évacué dans l'atmosphère.

Les aéroréfrigérants ont deux conceptions, convection forcée et convection naturelle. ⁽¹⁾

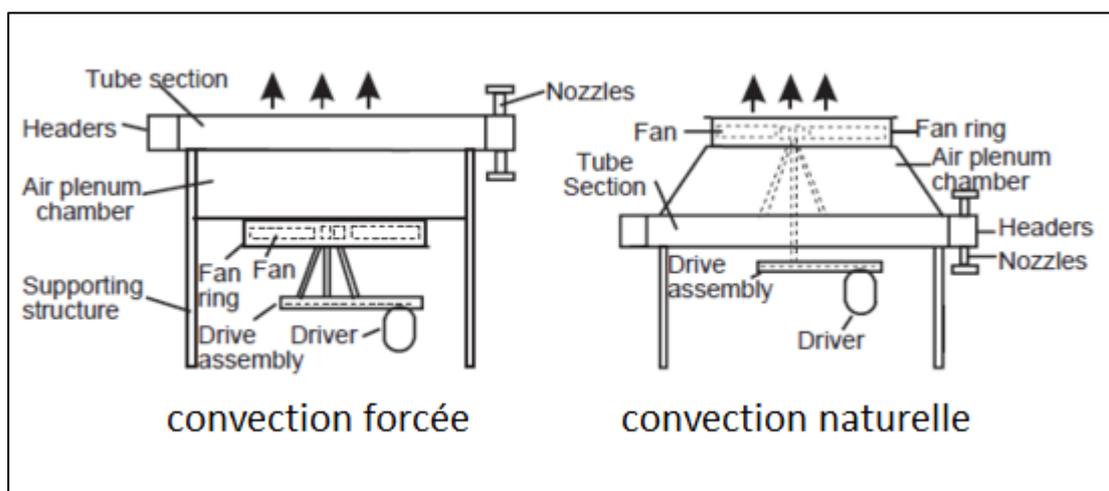


Figure II.18 : Aéroréfrigérant

Conclusion

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle important dans le traitement du pétrole et du gaz. Ils sont utilisés dans le processus de raffinage ainsi que dans la liquéfaction du gaz naturel. La nécessité d'un échangeur de chaleur a conduit l'industrie pétrolière et gazière à faire progresser le marché des échangeurs de chaleur de diverses manières.

Introduction

Les problèmes qui provoquent un dysfonctionnement d'échangeur de chaleur sont principalement : le phénomène d'encrassement, les vibrations et la tenue mécanique. L'encrassement est encore le phénomène le moins bien compris dans l'industrie. Il affecte le dimensionnement de l'échangeur et leur durée de vie, et produit une dépense d'énergie supplémentaire. Les vibrations doivent être prises en compte lors du dimensionnement des échangeurs tels que les échangeurs thermiques ou les pertes de charge. Les problèmes de tenue mécanique sont des problèmes liés à la résistance mécanique de l'échangeur (flexion, compression, etc.).⁽¹⁵⁾

III.1.1 L'encrassement

La définition la plus courante de l'encrassement en relation avec les échangeurs de chaleur est le dépôt et l'accumulation de matériaux indésirables tels que le tartre, les solides en suspension, les sels insolubles et même les algues sur les surfaces internes de l'échangeur de chaleur. Tout dépend des matériaux concernés, cet encrassement peut se produire sur les surfaces primaires ou de service de l'échangeur, et parfois sur les deux à la fois.⁽¹⁶⁾

III.1.2 Aspect physique de l'encrassement

L'accumulation d'encrassement réduit également la section transversale des tubes ou des canaux d'écoulement et augmente la résistance de la surface traversée par le fluide. Ces effets secondaires se combinent pour augmenter la chute de pression à travers l'échangeur de chaleur, réduisant les débits et aggravant encore le problème. Dans le pire des cas, l'échangeur de chaleur se bloque rapidement.

La corrosion de l'échangeur thermique peut se produire en fonction des dépôts d'encrassement concernés, qui peuvent souvent être cachés par la couche d'encrassement elle-même. Cela réduit la durée de vie de l'échangeur de chaleur et peut entraîner une défaillance catastrophique.⁽¹⁶⁾



Figure III.1 : L'encrassement dans un échangeur tubulaire

III.1.3 Aspect économique de l'encrassement

La réduction du taux de transfert de chaleur et l'augmentation de la résistance thermique dans un échangeur particulier en raison de l'encrassement peut augmenter le besoin énergétique global du processus industriel.

Les inconvénients économiques de l'encrassement sont dus à :

- D'importantes pertes d'énergie dues à l'inefficacité thermique.
- Coûts de maintenance élevés lors du nettoyage de l'échangeur.
- Perte de production massive pendant les temps d'arrêt pour nettoyage.

Aux États-Unis, une étude réalisée sur les coûts annuels de l'encrassement et de la corrosion dans l'industrie pétrolière et gazière a publié un chiffre de 10 millions de dollars par an pour une raffinerie, ce chiffre extrapolé à l'ensemble du monde occidental, atteignant un total de 500 millions de dollars. Le tableau ci-dessous présente une Estimation des coûts d'encrassement dans certains pays. ⁽¹⁷⁾

Pays	Coûts d'encrassement US \$ million	PNB (1984) US \$ million	Coûts d'encrassement % of PNB
USA (1982)	3860-7000 8000-10000	3634000	0.12-0.22 0.28-0.35
Japan	3062	1225000	0.25
West Germany	1533	613000	0.25
UK (1978)	700-930	285000	0.20-0.33
Australie	260	173000	0.15
Nouvelle Zélande	35	23000	0.15
Tout le monde industriel	26850	13429000	0.20

Tableau III.1 : Estimation des coûts d'encrassement dans certains pays

III.1.4 Les différents types d'encrassement

Il existe différents types d'encrassement, qui peuvent varier en fonction d'un certain nombre de facteurs, tels que les conditions de fonctionnement dans lesquelles l'échangeur de chaleur est utilisé. Il existe également différents termes utilisés dans le monde pour désigner les différents types d'encrassement, ce qui peut entraîner une certaine confusion quant à ce qui se passe réellement dans une situation donnée.

III.1.4.1. Encrassement par corrosion

L'encrassement par corrosion est le conséquent d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface d'échange de chaleur et le fluide qui la traverse, Les produits qui se produisent et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement. ⁽¹⁷⁾

Il existe quatre types de corrosion :

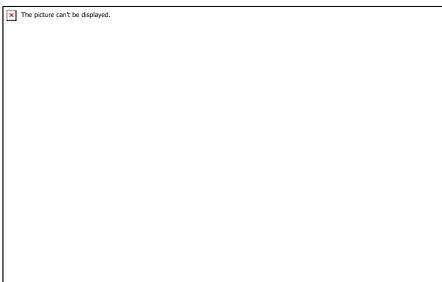
- Corrosion uniforme caractérisée par des pertes d'épaisseur fréquentes mais dont la vitesse n'est pas nécessairement proportionnelle au temps
- Corrosion par piqûres, lorsque l'attaque est limitée à des zones de très petite surface.
- Corrosion fissurante à l'échelle microscopique ou intergranulaire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



a. Corrosion fissurante



b. Corrosion sélective



c. Corrosion par piqure



d. corrosion uniforme

Figure III.2 : Les différents types de corrosion

III.1.4.2. Encrassement par dépôt

Également appelé encrassement par sédimentation se produit lorsque les particules contenues dans le fluide se déposent sur la surface d'échange, généralement lorsque la vitesse du fluide tombe en dessous d'un niveau critique le nettoyage devient inévitable. Le montage vertical de l'échangeur de chaleur peut également minimiser l'effet, car la gravité attire toutes les particules hors de l'échangeur de chaleur, loin de la surface de transfert de chaleur, même à des niveaux de vitesse faibles. ⁽¹⁶⁾

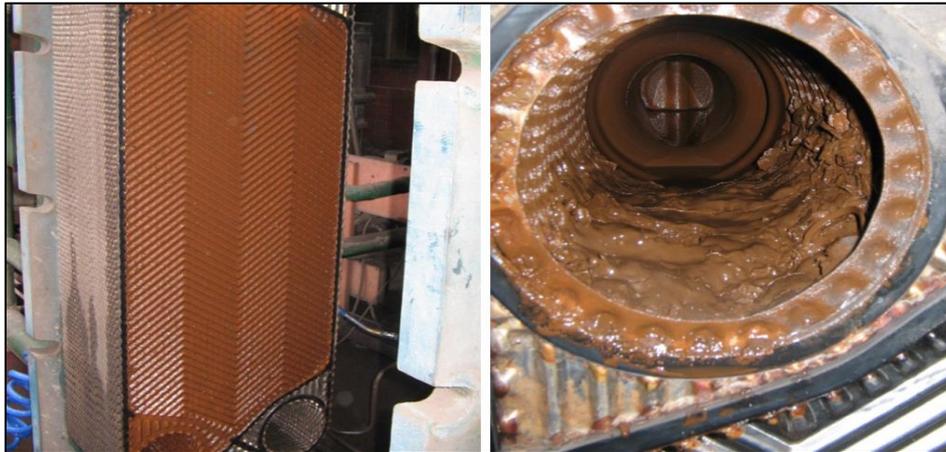


Figure III.3 : Encrassement par dépôt d'un échangeur de chaleur à plaques

III.1.4.3 Encrassement biologique

L'encrassement biologique est causé par la croissance d'organismes, comme les algues, dans le fluide qui se dépose sur les surfaces de l'échangeur de chaleur. Bien que les concepteurs d'échangeurs de chaleur n'aient aucun contrôle direct sur ce phénomène, il peut être influencé par le choix du matériau. Par exemple, les matériaux en laiton non ferreux sont toxiques pour certains organismes. ⁽¹⁶⁾



Figure III.4 : Encrassement biologique d'un échangeur de chaleur à plaques

III.1.4.4 L'entartrage

L'encrassement chimique, ou entartrage, se produit lorsque des changements chimiques dans le fluide provoquent le dépôt d'une couche d'encrassement sur la surface du tube ou plaque. Un exemple courant est l'entartrage d'une bouilloire ou d'une chaudière causée par les sels de dureté qui se déposent sur les éléments chauffants car la solubilité des sels diminue avec l'augmentation de la température. La probabilité d'entartrage augmente avec l'augmentation de la température, de la concentration et du pH. Ces effets peuvent être minimisés par un contrôle minutieux de la température de la paroi du tube en contact avec le fluide. ⁽¹⁶⁾

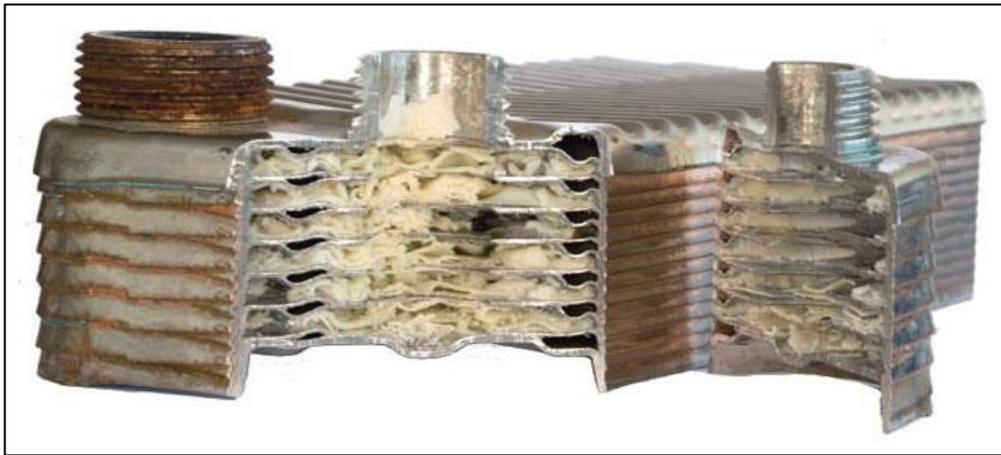


Figure III.5 : Encrassement chimique d'un échangeur de chaleur à plaques

III.1.5 Nature des dépôts

- **Dépôt dur** : Il s'agit d'une structure dense et renforcée qui ne se ramollit pas au simple jet d'eau ou à la vapeur, mais nécessite un traitement mécanique ou un nettoyage chimique adapté. Il s'agit d'un cas de dépôt corrosif ou de cristallisation. La résistance à la chaleur d'une mine dure est directement proportionnelle à son épaisseur.
- **Dépôt poreux** : C'est le matériau d'un dépôt dur, qui se manifeste dans une structure moins dense, sous l'influence des conditions de fonctionnement de. Ce cas est plus grave que la fois précédente où le liquide emprisonné dans les pores a une conductivité thermique inférieure à celle du solide matériau.
- **Dépôt mou** : C'est le cas de boues, poudres de coke ou de fibres végétales. La résistance dans ce cas a plus à voir avec le fluide confiné qu'avec le matériau formant l'échangeur. Un simple soufflage peut donner des résultats positifs lors du nettoyage.

III.1.6 Processus d'encrassement

L'encrassement est un phénomène complexe dû à l'implication d'un grand nombre de variables. D'un point de vue fondamental, le mécanisme d'encrassement suit certaines étapes dans son développement sur une surface. Ces étapes sont les suivantes : Initiation, transport, fixation, élimination et vieillissement. ^(16,17)

III.1.6.1 Initiation

La surface est conditionnée pendant la période d'initiation. La période d'initiation est influencée par la température de surface des matériaux, le matériau, la finition de surface, la rugosité et le revêtement de surface. Avec l'augmentation du degré de sursaturation par rapport à la température de la surface de transfert de chaleur ou l'augmentation de la température de la surface, la période d'induction diminue.

Pendant la période d'induction, des noyaux de cristallisation du dépôt sont également formés pour la croissance biologique. ⁽¹⁷⁾

III.1.6.2 Transport

Dans cette partie, les substances d'encrassement du fluide de masse sont transportées vers la surface de transfert de chaleur. Cela dépend des propriétés physiques du système. Le transport s'effectue par un certain nombre de phénomènes, notamment la diffusion, la sédimentation et la thermophorèse. La sédimentation est un phénomène de transport d'une matière particulaire dans un fluide en raison de la gravité sur une surface horizontale ou inclinée. Elle joue un rôle essentiel lorsque les particules sont lourdes et que la vitesse du fluide est faible. ⁽¹⁷⁾

III.1.6.3 Fixation

À ce stade, les dépôts adhèrent à la surface et entre eux. Les ions salins qui s'approchent de la surface sont attirés par celle-ci en raison des forces électromagnétiques et adhèrent à la surface pour former une nucléation qui s'accroît progressivement avec le temps pour former une couche d'encrassement. Ainsi, les forces agissant sur les particules lorsqu'elles s'approchent de la surface sont impuissantes à déterminer l'attachement. Les propriétés des matériaux, telles que la taille, la densité et les conditions de surface, dominent le phénomène d'attachement. ⁽¹⁷⁾

III.1.6.4 Élimination

Les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et l'encrassement déposé sont responsables de l'élimination. Les gradients de vitesse à la surface, la viscosité du fluide et la

rugosité de la surface guident les forces de cisaillement. L'élimination de la surface se fait par les mécanismes de dissolution, d'érosion et d'écaillage.

III.1.6.5 Le vieillissement

Le vieillissement commence dès le début du dépôt. Pendant le vieillissement, il peut y avoir transformation des cristaux pour améliorer ou diminuer la résistance du dépôt avec le temps. L'altération de la composition chimique du dépôt par une réaction chimique peut modifier la résistance mécanique. D'autre part, la couche de bio-encrassement peut devenir faible en raison de la corrosion à la surface par empoisonnement lent des micro-organismes.
(17)

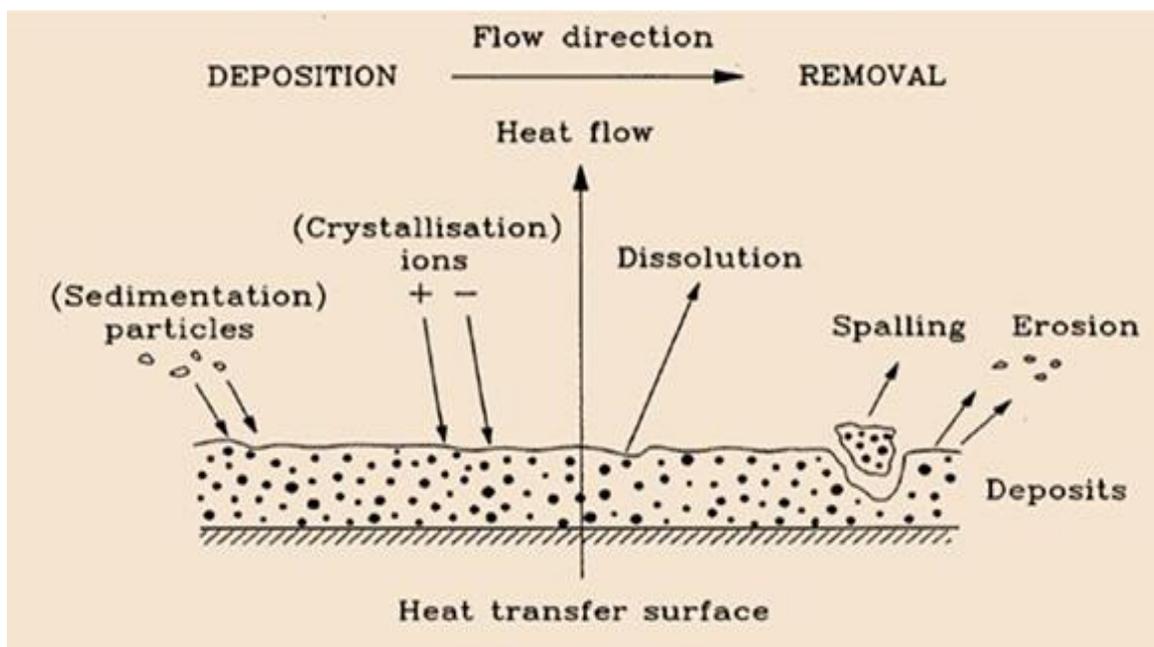


Figure III.6 : Processus d'encrassement

III.1.7 Facteurs jouant sur la fréquence et le degré d'encrassement

III.1.7.1 La température du fluide

On peut donner l'exemple de l'eau qui produit un encrassement à partir de minéraux tels que le carbonate de calcium (CaCO_3). Les sels se déposent sur la surface de l'échangeur de chaleur lorsque la température augmente. De même, avec une augmentation de la température pendant le traitement des aliments, une croissance biologique peut se produire.⁽¹⁸⁾

III.1.7.2 Nature du fluide

Pendant le traitement du lait, par exemple, l'encrassement entraîne une augmentation de la chute de pression à travers l'échangeur en réduisant le débit à cause de la croissance des dépôts. Dans les industries laitières, les protéines, les graisses, les sucres et les minéraux du

lait et des produits laitiers peuvent sortir de leur solution et se déposer sur les surfaces des échangeurs de chaleur et encrasser les canaux. ⁽¹⁸⁾

III.1.7.3 Vitesse du fluide

Dans la plupart des cas, l'encrassement diminue à des vitesses de fluide plus élevées car l'augmentation de la vitesse d'écoulement augmente la contrainte de cisaillement du fluide, ce qui entraîne une plus grande élimination des dépôts. Pour l'encrassement particulaire, l'augmentation de la vitesse d'écoulement peut éliminer l'encrassement. Mais pour les dépôts plus importants, l'augmentation de la vitesse d'écoulement au-delà d'un certain point peut ne pas réduire l'encrassement de manière significative, et dans le cas de dépôts très importants, l'augmentation de la vitesse d'écoulement peut n'avoir aucun effet. ⁽¹⁸⁾

III.2 Isolement thermique des échangeurs de chaleur

Le transfert de chaleur est largement utilisé dans l'industrie, selon divers segments de l'économie l'utilisation de transfert de chaleur efficace est de la plus haute importance dans la diminution de l'utilisation des ressources énergétiques et dans la détermination du coût de la production. L'utilisation de l'isolation thermique dans ces équipements réduit potentiellement le flux de chaleur vers l'environnement. Cela se produit en raison de la diminution de la conductivité thermique et à l'augmentation de l'épaisseur de la paroi. Par conséquent, l'amélioration du transfert thermique de l'équipement. ⁽²¹⁾

III.2.1 Les différents types d'isolement thermique

On peut citer les systèmes d'isolation les plus courants pour les échangeurs de chaleur comme l'utilisation d'une veste d'isolation, isolation en mousse de polyuréthane et Isolation par la perlite (une roche volcanique).

III.2.1.1 Gilets d'isolation pour échangeurs de chaleur

Les gilets d'isolation sont construits par un revêtement en fibre de verre à haute teneur en silice, tissu tressé en acier inoxydable ou céramique, ce qui permet une résistance à l'eau et à l'huile, leur résistance à la température peut atteindre 1000 degrés, et le taux d'économie d'énergie est de 25 % à 40 %. Les gilets isolants mettent longtemps à durcir et à sécher. De plus, Un tel revêtement rend l'inspection et la maintenance difficiles. Même la laine minérale avec une couverture en tôle d'aluminium ou d'acier est problématique pour un régime d'entretien fréquent. Les opérateurs endommagent souvent ce produit lors du démontage. ⁽²²⁾



Figure III.7 : Gilet d'isolation d'un échangeur à plaques et joints

III.2.1.2 Isolation en mousse de polyuréthane

Le polyuréthane possède le meilleur pouvoir isolant parmi les isolants usuels. Il sera donc très intéressant lorsque la contrainte de place est forte. Le polyuréthane est en outre très résistant à la compression et adapté en milieu humide ce qui lui confère une grande polyvalence. En revanche, Les valeurs typiques de conductivité thermique des mousses de polyuréthane sont comprises entre 0,022 et 0,035W/m·K. elles ont une faible résistance au feu ce qui signifie qu'elles sont combustibles. ⁽²³⁾



Figure III.7 : la mousse de polyuréthane

III.2.1.3 Isolation par la perlite

La perlite est une roche d'origine volcanique qui contient de l'eau. Elle est composée de silice, d'alumine, d'oxydes de fer et de titane, de chaux, de magnésie, d'oxyde de sodium et de potassium. Les caractéristiques physiques de la perlite expansée se prêtent à une variété d'utilisations spéciales, y compris l'isolation de réservoirs de stockage cryogéniques et à basse température, de conteneurs d'expédition, de boîtes froides, de chambres d'essai et de traitement des aliments. Elle a une conductivité thermique de 0.025-0.029 W/m·K dans des bases températures de -126°C.

Il existe de nombreux concepts différents pour l'isolation des équipements cryogéniques et à basse température. La plupart sont à double paroi, l'espace annulaire étant rempli de perlite expansée. Les installations portatives d'expansion de perlite sont généralement utilisées pour isoler les grands réservoirs de stockage, les boîtes froides, les navires et autres récipients et tuyaux à double paroi. Dans ces applications, le minerai de perlite est expansé sur place et l'isolant en perlite est transporté pneumatiquement dans l'espace vide. ⁽²⁴⁾



Figure III.8 : la perlite en vrac

Conclusion

L'isolation et le dysfonctionnement jouent un rôle majeur dans la détermination de l'efficacité de l'échangeur de chaleur, en considérant que le dysfonctionnement diminue le coefficient global de l'échange ce qui conduit à des résultats indésirables d'autre part l'isolation améliore l'échangeur de chaleur en empêchant la perte de l'énergie.

Introduction

La boîte froide est un Echangeur de chaleur à plaques-ailettes (PFHE) c'est un échangeur de chaleur compact, consistant en une pile de plaques plates alternées, appelées « feuilles de séparation », et des feuilles d'ailettes ondulées brasées ensemble comme un bloc dans un four sous vide (17MC 02 contient deux blocs). L'aluminium est le matériau préféré pour les tâches cryogéniques, en raison de sa conductivité thermique relativement élevée, résistance à faible températures et faible coût. Les passages d'écoulement sont formés en plaçant une tôle ondulée entre deux feuilles de séparation. Les barres latérales sont placées autour du contour du passages d'écoulement pour les sceller. Les flux de fluide sont connectés à des en-têtes, qui sont soudés sur le bloc, avec des dispositifs de distribution qui sont conçu pour garantir que le flux de fluide s'écoule uniformément sur toute la largeur du trajet d'écoulement. La figure 01 illustre une partie d'un PFHE typique.

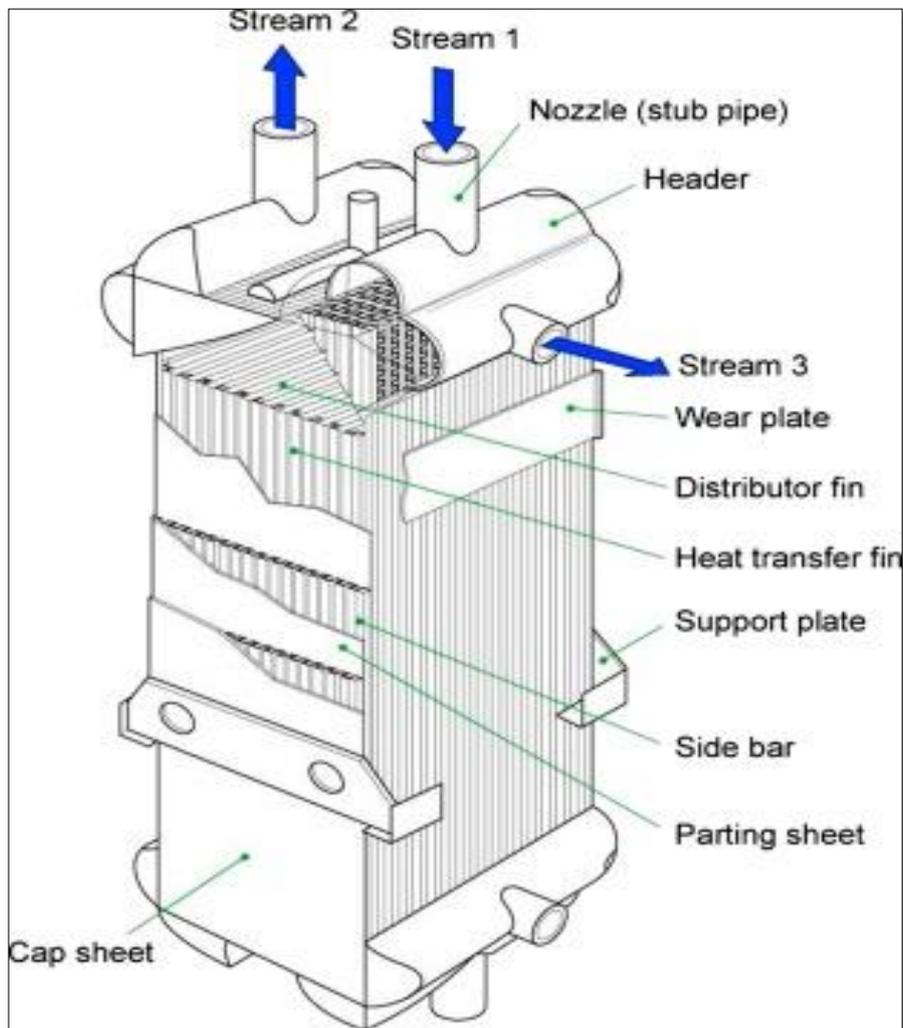


Figure IV.01 : une partie d'un PFHE typique

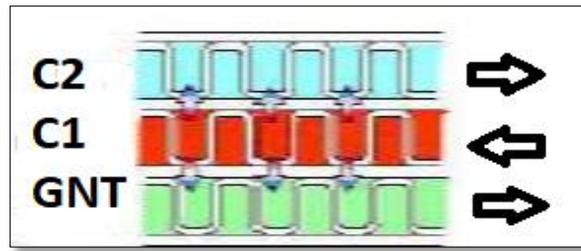


Figure IV.02 l'écoulement des trois fluides

IV.1 Problématique de la boîte froide

la boîte froide 17MC02 a eu une chute de pression au niveau du passage de gaz naturel et leur température de sortie a augmenté pendant une courte durée énormément, à en juger par les symptômes on peut dire qu'il s'agit de l'encrassement coté GN qui a réduit le transfert de chaleur entre le GN et le C1, ce qui est étrange compte tenu de l'efficacité élevée de la boîte froide et sachant que l'impureté des trois fluides qui la traversent est négligeable, par HYSYS on va effectuer une simulation pour mieux comprendre ce problème.

IV.2 Présentation de HYSYS

HYSYS est un puissant outil de simulation d'ingénierie qui a été créé de façon unique en ce qui concerne l'architecture du programme, la conception de l'interface, les capacités d'ingénierie et le fonctionnement interactif. Les capacités intégrées de modélisation en régime permanent et dynamique, où le même modèle peut être évalué dans les deux perspectives avec un partage complet des informations sur le processus, représentent une avancée significative dans l'industrie des logiciels d'ingénierie.

Les divers composants qui composent HYSYS offrent une approche extrêmement puissante de la modélisation en régime permanent. La sélection complète de méthodes d'opérations et de propriétés à un niveau fondamental vous permet de modéliser une large gamme de processus avec confiance. Ce qui est peut-être encore plus important, c'est la façon dont l'approche de HYSYS à la modélisation maximise votre retour sur le temps de simulation grâce à une meilleure compréhension du processus.

Pour comprendre pourquoi HYSYS est un outil de simulation d'ingénierie si puissant, il suffit de regarder sa solide base thermodynamique. La flexibilité inhérente apportée par sa conception, combinée à la précision et à la robustesse inégalées fournies par ses calculs de propriétés, conduit à la présentation d'un modèle plus réaliste.

IV.3 Description de l'unité 17 Récupération du GNL et Fractionnement

Elle traite le gaz afin de Récupérer le méthane (Gaz Naturel) de l'alimentation en gaz naturel qui est envoyé à l'unité de liquéfaction (unité15) pour obtenir le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) et Fractionner les hydrocarbures plus lourds qui ont été extrait du gaz d'alimentation, pour produire :

- Éthane : une partie est utilisée comme gaz combustible.
- Propane : Il est utilisé en tant que réfrigérant dans l'unité 16 de réfrigération.
- Butane : Il est stocké en tant que produit ou réinjecté dans le circuit du Réfrigérant Mixte.
- Pentane : Il est envoyé à l'unité 18.
- Gazoline : il est stocké en tant que produit.

La Boîte Froide de Récupération (17-MC02) conçu pour assurer le prérefroidissement du gaz naturel (GN) et le courant de recyclage d'éthane (C2) en préchauffant le produit de tête du Déméthaniseur(C1). Après le refroidissement de GN, sa pression sera réduite avant d'alimenter la section supérieure du Déméthaniseur. La boîte froide refroidie que 28 % de GN qui se traite dans l'unité 17, le reste (72%) est envoyée au Turboexpandeur (17-MJ01) qui assure le refroidissement du courant gazeux principal après il entre ensuite dans la section conique du Déméthaniseur.

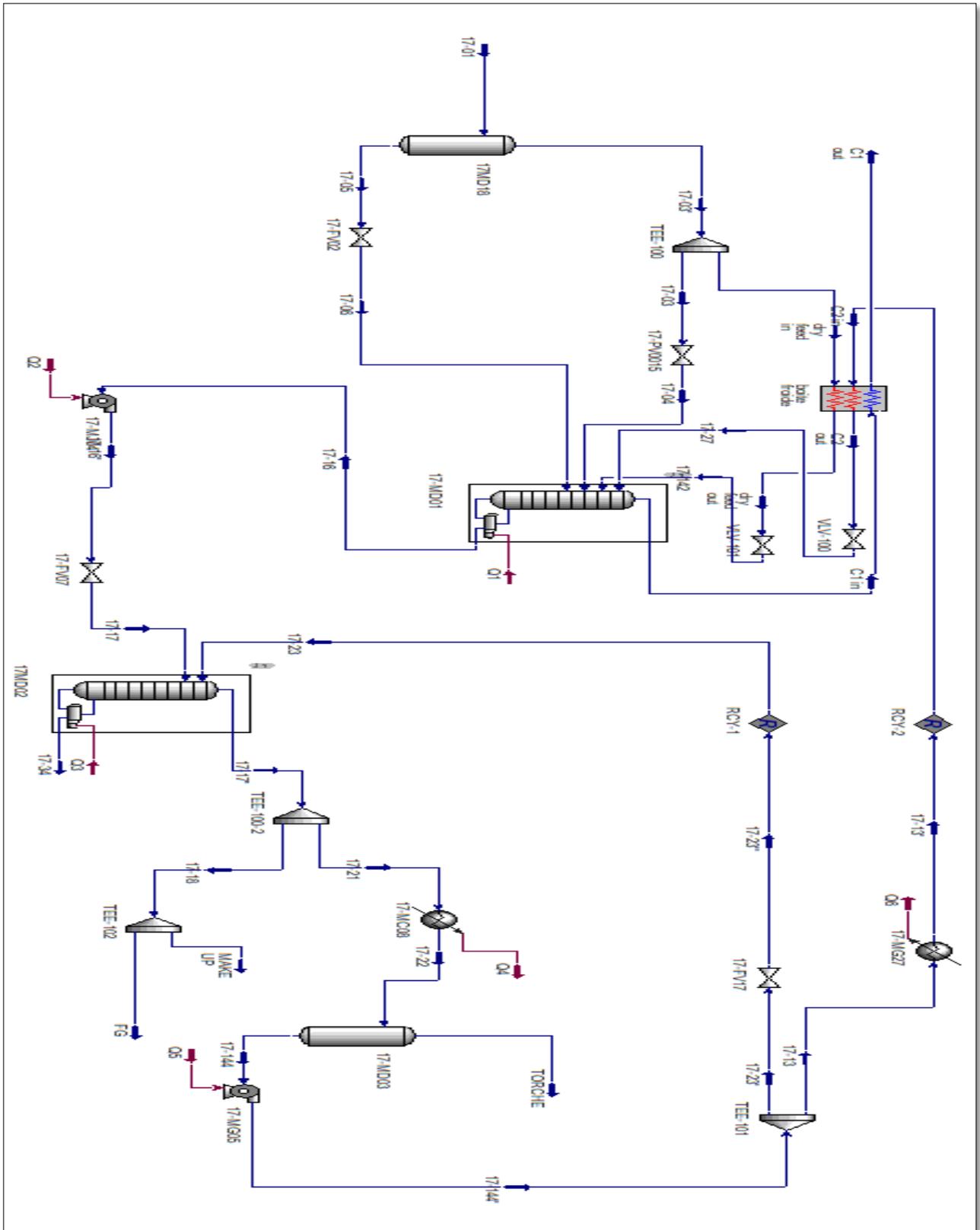


Figure IV.03 : simulation d'une partie de l'unité 17 (où se trouve la boîte froide)

IV.4 Simulation et calcul

On va s'intéresser au calcul des performances de la boîte froide de l'installation au-dessus et l'influence de l'encrassement sur son fonctionnement et l'efficacité, au départ le logiciel HYSYS permet d'effectuer le type d'échangeur et les fluides d'entrés et leurs sorties.

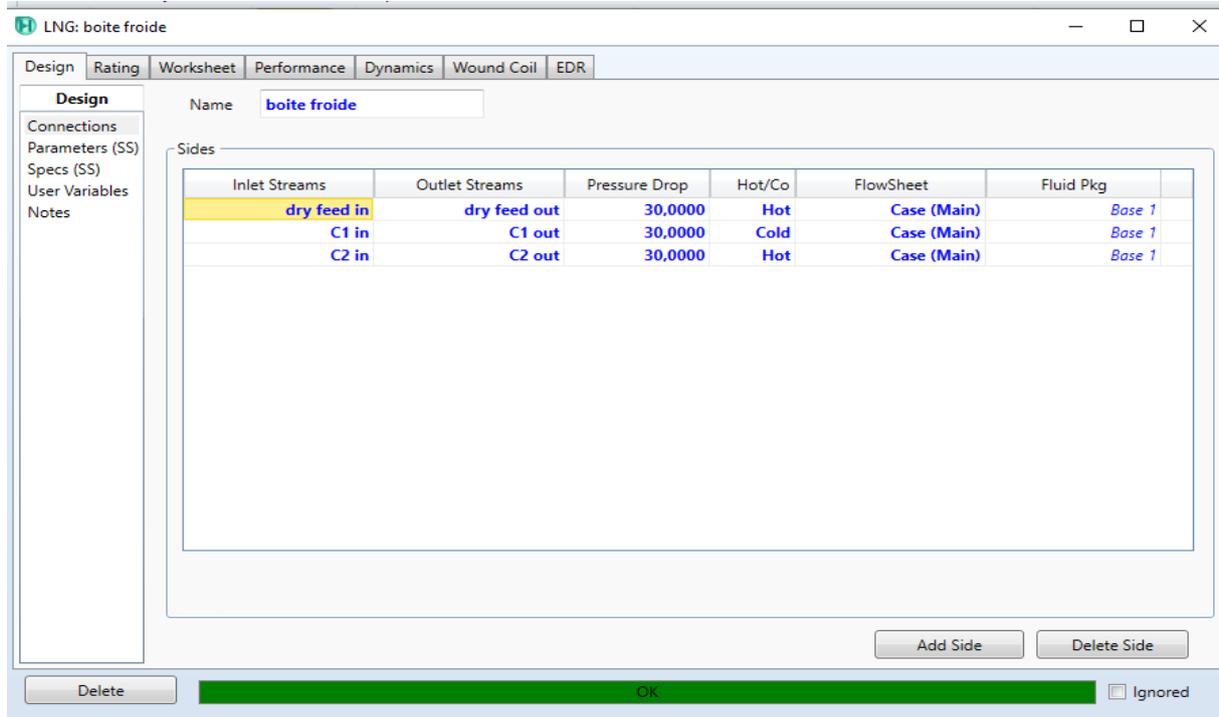


Figure IV.4 : La détermination des fluides entrants et sortants

IV.4.1 Les caractéristiques des fluides

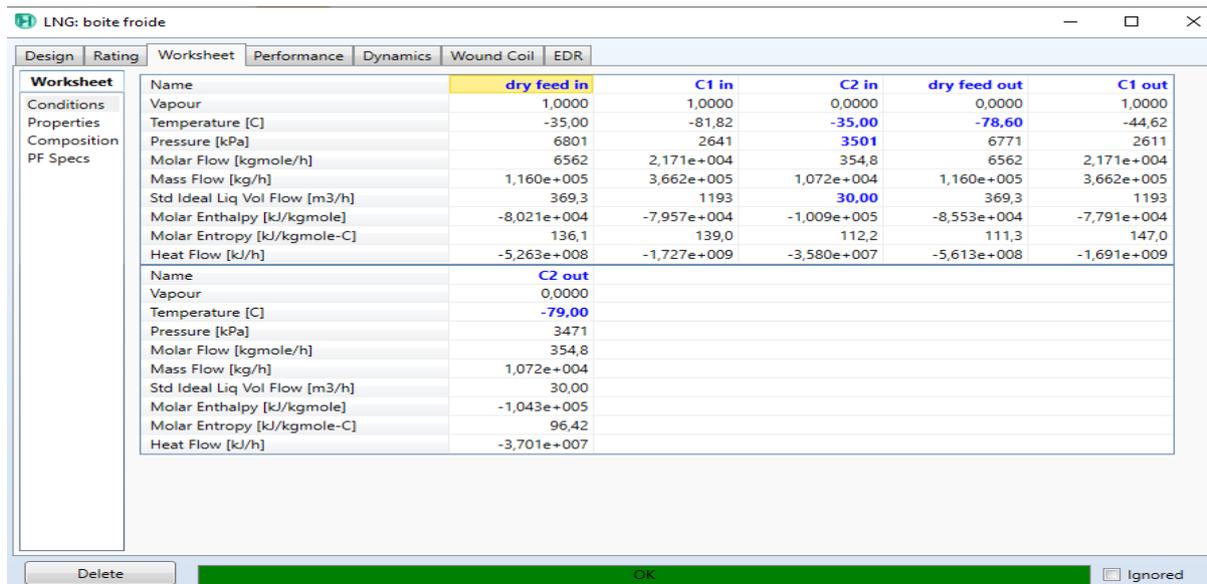


Figure IV.5 : Caractéristiques des fluides

IV.4.2 La composition chimique des trois fluides

	dry feed in	C1 in	C2 in	dry feed out	C1 out
Helium	0,0006	0,0007	0,0000	0,0006	0,0007
Nitrogen	0,0095	0,0099	0,0000	0,0095	0,0099
Methane	0,9004	0,9386	0,0000	0,9004	0,9386
Ethane	0,0751	0,0508	0,9900	0,0751	0,0508
Propane	0,0108	0,0001	0,0100	0,0108	0,0001
i-Butane	0,0011	0,0000	0,0000	0,0011	0,0000
n-Butane	0,0014	0,0000	0,0000	0,0014	0,0000
i-Pentane	0,0004	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000
n-Pentane	0,0003	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000
n-Hexane	0,0004	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000
CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Figure IV.6 : La composition chimique des trois fluides

En raison d'un manque de données de la boîte froide et du fait qu'il s'agit d'un échangeur de chaleur entre trois fluides, nous ne pourrions pas calculer le flux et le coefficient d'échange thermique qui concernent le fluide froid (C1) et le gaz naturel (GN) uniquement par les méthodes directes (KEREN, DTLM.ETC), d'où nous devons donc compter sur HYSYS pour nous donner les résultats corrects.

Par HYSYS, nous changerions les températures des fluides qui ont été enregistrées pendant une période de 24 jours par la salle de contrôle de GNL3Z, et à chaque fois nous enregistrons le flux (Q) et le coefficient d'échange thermique multiplié par la surface de transfert (UA) qui correspond au gaz naturel.

Pass Name	Inlet T	Outlet T	Molar Flow	Duty	UA	Hot/Cold
dry feed in-dry feed c	-35,00	-78,60	6561,90	-3,4926672e+07	5,84511e+06	Hot
C1 in-C1 out	-81,82	-44,62	21706,79	3,6138109e+07	6,04816e+06	Cold
C2 in-C2 out	-35,00	-79,00	354,75	-1,2114374e+06	2,03050e+05	Hot

Figure IV.7 : Les résultats obtenus par la simulation

IV.4.3 Hypothèse

De façon à obtenir un modèle mathématique simple qui décrit ce problème, on suppose que :

- Échangeur sans pertes, c'est-à-dire un échangeur dans lequel la chaleur cédée par le fluide chaud est intégralement transmise au fluide froid
- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels
- L'écoulement des fluides est supposé laminaire et stationnaire
- Le transfert thermique ne s'effectue que par convection et conduction, transfert par rayonnement négligeable.

IV.4.4 Bilan enthalpique

Considérant les pertes de l'énergie est non existantes le bilan enthalpique être comme suit :

D'après HYSYS on a le flux thermique cédé par le gaz naturel ($Q_{GN} = -34926671,8323581$ kJ/h) et le flux cédé par le C2 reflux ($Q_{C2} = -1211437,35483416$ kJ/h).

$$Q_{GN} + Q_{C2} = (-1211437,35483416) + (-34926671,8323581) = 36138109,1796753$$

$$= - Q_{C1}$$

Avec Q_{C1} est le flux transmis au méthane overhead

D'où :

$$Q_{C1} = -(Q_{GN} + Q_{C2})$$

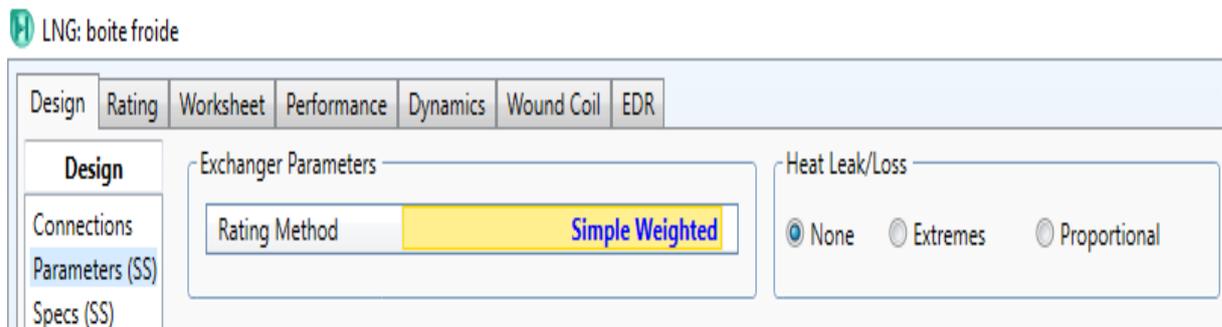


Figure IV.8. Paramètre de perte des charges thermique

IV.4.5 Calcul de la surface d'échange entre deux fluides de la boîte froide

D'après le constructeur, les dimensions d'un seul échangeur sont $1,5 \times 1,5 \times 8$ m avec

$$S_T / V = 14000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

On calcule le volume V : $1,5 \times 1,5 \times 8 = 18 \text{ m}^3$

D'où $S_T = 14000 \times 18$

$$= 252000 \text{ m}^2$$

S_T : la surface d'échange d'un seul échangeur

V : le volume d'un seul échangeur

La boîte froide contient deux échangeurs de ce type donc :

$$S = S_T \times 2$$

$$= 252000 \times 2$$

$$S = 504000 \text{m}^2$$

IV.4.6 Calcul de la différence logarithmique moyenne ΔT_{Lm}

En raison de type d'écoulement du gaz naturel (GN) et le méthane (C1) qu'est à contre-courant, on va utiliser la relation au-dessous pour calculer DTLM :

$$\Delta T_{Lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Avec : $\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fs}$ et $\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fe}$

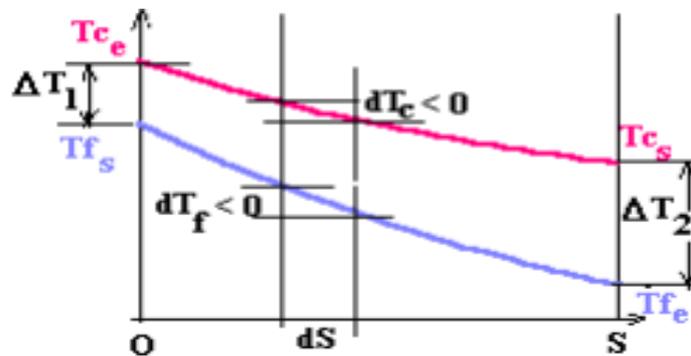


Figure IV.9 : Distribution des températures-Echangeur à contre-courant

Pour le calcul de l'efficacité de refroidissement on utilise la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}}$$

D'après les données de constructeur on peut calculer l'efficacité de refroidissement du gaz naturel :

$$\text{On a : } \varepsilon = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{(-32,1) - (-78,6)}{(-32,1) - (-81,8)} = 0,93$$

$$\varepsilon = 93 \%$$

T_{ce} : température d'entrée de fluide chaud (GN)

T_{cs} : température de sortie de fluide chaud (GN)

T_{fe} : température d'entrée de fluide froid (C1)

T_{fs} : température de sortie de fluide froid (C1)

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	22,84					
	GAZ D'ALIMENTATION SEC		REFLUX D'ETHANE		COURANT SUPERIEUR DU DEMETHANISEUR	
PRESSION DE CALCUL (barg)	75		43		32	
TEMPERATURE DE CALCUL MAX/MIN (°C)	65 / -160		65 / -130		65 / -130	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	60,3	59,8	32,3	31,3	26,9	26,3
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	-32,1	-78,6	-31,8	-78,8	-81,8	-38,7

Figure IV.10 : Données de constructeur

IV.4.7 Calcul de la résistance d'encrassement

$$R = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0}$$

Où U et U_0 sont les coefficients de transfert de chaleur globaux pour les conditions de propreté et d'encrassement respectivement. la valeur de $\frac{1}{U_0}$ est négligeable aux comparaisons à celle de $\frac{1}{U}$.

IV.4.8 Résultats de calcul

Les résultats des relations précédentes sont présentés dans le tableau suivant :

Temps (Jour)	T _{ce} (°C)	T _{fe} (°C)	T _{cs} (°C)	T _{fs} (°C)	ΔT_{Lm}	Q(KJ/h)	U en W/M2.C	R	Efficacité
1	-35,1	-81,5	-80,78	-43,19	3,04654627	-36207473,6	0,00467178	214,051077	82,5646552
2	-35	-82	-80,88	-43,11	3,53071462	-36264991,3	0,00480283	208,210517	82,7446809
3	-34,9	-81,6	-80,5	-43,37	3,61058524	-36045872,9	0,00440181	227,179497	81,862955
4	-35	-81,5	-80,45	-43,39	3,53181703	-36016929,3	0,00436586	229,050135	81,9569892
5	-35	-81,7	-80,15	-43,6	4,1143683	-35842711	0,0041064	243,522243	81,5845824
6	-35	-81,7	-79	-44,35	5,35373034	-35165710,5	0,00340973	293,278639	79,9785867
7	-34,8	-81,8	-79,05	-44,31	5,44834844	-35195457,7	0,00344219	290,512772	79,7659574
8	-34,9	-81,81	-78,69	-44,55	5,78323968	-34980621,4	0,00326343	306,425944	79,4286932
9	-35	-81,65	-78,13	-44,93	6,18069922	-34643336,1	0,00302482	330,597949	78,7138264
10	-35	-82	-77,12	-45,62	7,38174614	-34025020,1	0,00266571	375,13436	77,4042553
11	-35	-80,9	-77	-45,7	6,73756175	-33950664,5	0,0026277	380,561034	76,6884532
12	-35	-81,5	-77,11	-45,62	7,0522198	-34018831,2	0,00266354	375,43996	77,1612903
13	-35,1	-81,7	-76,9	-45,77	7,34833744	-33888552,2	0,00259665	385,111387	77,1030043
14	-35	-81,7	-76,09	-46,34	8,1416843	-33380299,3	0,00236621	422,616008	75,7173448
15	-35,2	-81,7	-75,88	-46,48	8,25108712	-33246990,4	0,00231361	432,22513	75,7419355
16	-35	-81,7	-74,6	-47,41	9,50917923	-32419846,5	0,00201929	495,222816	73,4261242
17	-35	-81,7	-74,77	-47,28	9,35131404	-32531199,1	0,00205645	486,27598	73,7044968
18	-35	-82	-73,93	-47,87	10,2839762	-31976267,5	0,0018947	527,787631	72,6170213
19	-35	-81,8	-72,43	-49,02	11,5392694	-30953942,6	0,00165101	605,68944	70,042735
20	-34,9	-81,83	-71,7	-49,59	12,2690911	-30440458,9	0,00152778	654,54384	68,6980609
21	-34,9	-81,6	-71,6	-49,67	12,2303614	-30369245,4	0,00151379	660,593894	68,372591
22	-34,9	-81,65	-71,5	-49,75	12,351319	-30297815,3	0,0014997	666,800328	68,2352941
23	-35	-81,5	-71	-50,14	12,6788084	-29937342	0,00143267	697,998143	67,4408602
24	-35,1	-81,7	-70,8	-50,31	12,93555	-29791561,6	0,00140668	710,892325	67,360515

Tableau IV.1 : Les résultats de simulation

Pour interpréter et analyser les résultats sera mieux de les présenter graphiquement :

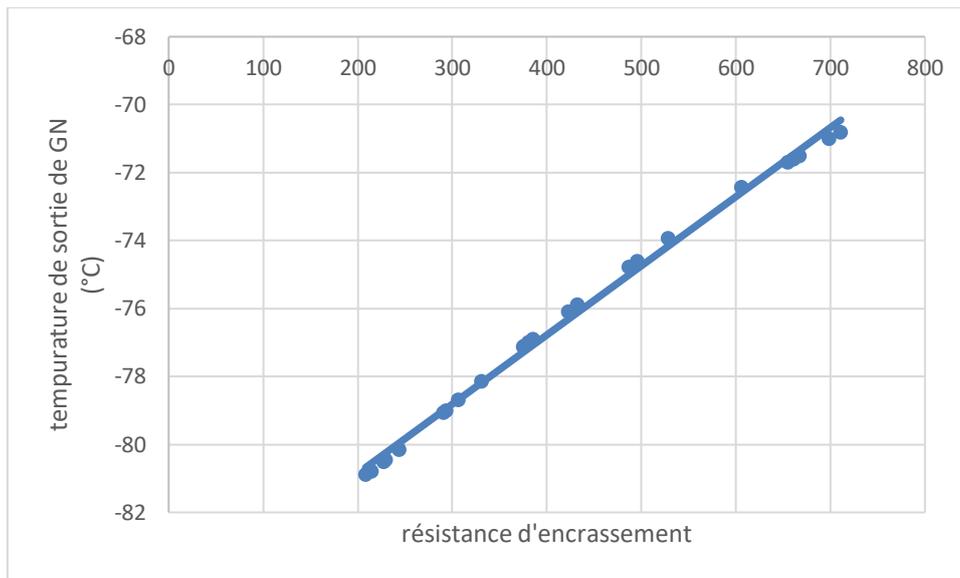


Figure IV.11 : La température de sortie GN en fonction de la résistance d'encrassement

Commentaire : La figure 11 montre la variation de la résistance de l'encrassement avec la température de sortie GN, On peut voir que la résistance diminue lorsque la température augmente qui montre l'effet d'encrassement sur le fonctionnement de la boîte froide.

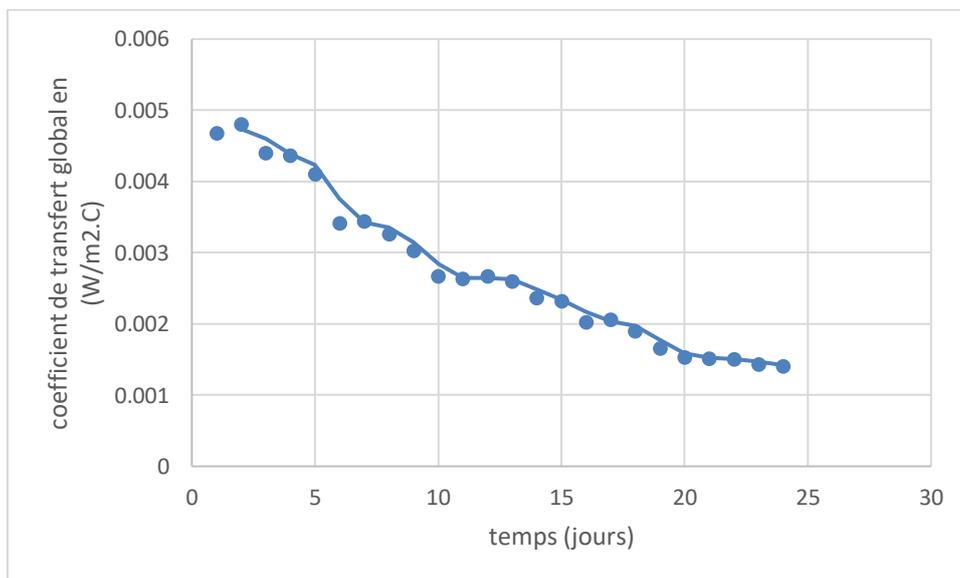


Figure IV.12 : Coefficient de transfert U en fonction de temps

Commentaire : La figure 12 montre clairement qu'une réduction du coefficient d'échange total a eu lieu. Cette baisse atteint son minimum à $14.07 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2.\text{C}$ pour le coefficient d'échange.

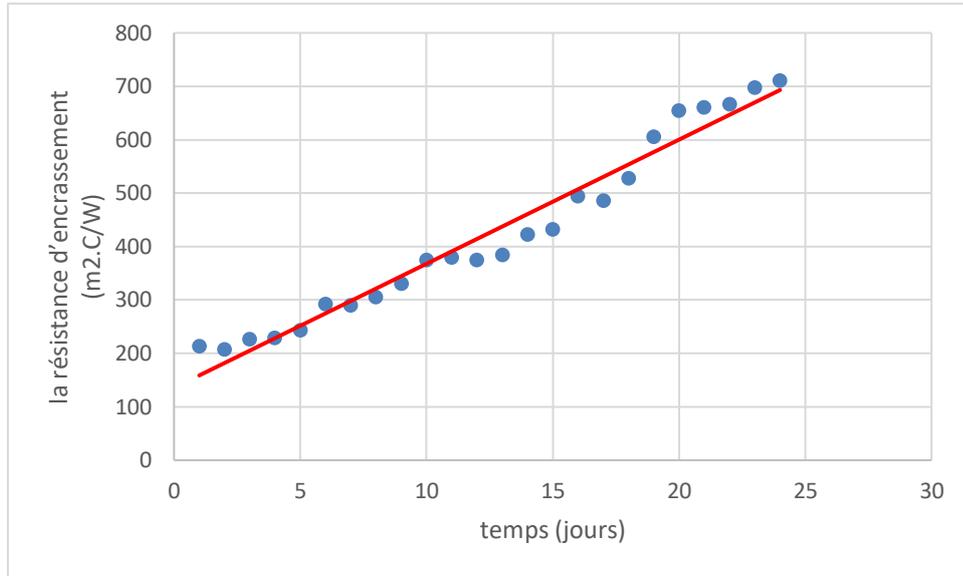


Figure IV.13 : La résistance d'encrassement en fonction du temps

Commentaire : La figure montre une augmentation de la résistance de l'encrassement à mesure que la température diminue le coefficient de transfert. Elle augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale de 236,964108 m²C/W.

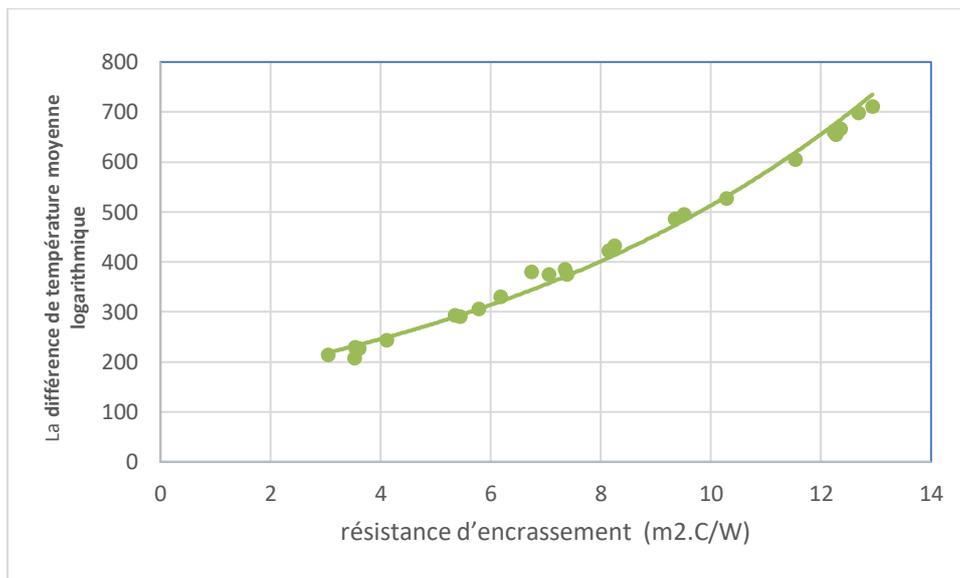


Figure IV.14 : La différence de température moyenne logarithmique en fonction de résistance d'encrassement

Commentaire : DTML s'augmente proportionnellement avec la résistance d'encrassement à cause des écarts de température qui se grandie à chaque fois que le coefficient de transfert global démunie.

IV.4.7 Interprétation des résultats

L'évolution de la résistance d'encrassement est une droite qui peut s'exprimer sous forme $R = K.t + B$ où K représente le taux d'encrassement de la résistance R et B représente la phase d'initiation associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre, la relation précédente caractérise les dépôts durs et adhérents et nous montre que la vitesse de dépôt est constante et qu'il n'y a pas de réentraînement à cause de la pression d'écoulement de gaz naturel (GN) qui est celle de la boîte froide à 68 bars.

L'efficacité se diminue en raison de l'augmentation de température de sortie (GN), elle arrive à une valeur minimale de 67,36 % qui est insuffisante à la comparaison avec celle du constructeur 93 %.

Conclusion

Selon les résultats de nos calculs et leurs analyses, nous pouvons voir le développement de la résistance à l'encrassement, conséquent une réduction des performances thermiques de l'échangeur par la diminution marquée du facteur de transfert et l'augmentation de la température de sortie (GN) et la dégradation de leur efficacité de refroidissement jusqu'à obtenir des valeurs indésirables pour la procédure de liquéfaction du gaz naturel.

Introduction

La maintenance est la discipline et la profession qui consiste à appliquer des concepts d'ingénierie pour optimiser les équipements, les procédures et les budgets des départements afin d'obtenir une meilleure maintenabilité, fiabilité et disponibilité des équipements. Elle a pris de plus en plus d'importance en raison de l'augmentation du nombre d'équipements et d'infrastructures. Depuis la révolution industrielle, les équipements et les structures sont devenus de plus en plus complexes, nécessitant une multitude de systèmes connexes nécessaires à leur maintenance.

V.1 Maintenance des échangeurs de chaleur

V.1.1 Maintenance programmée ou préventive

L'entretien programmé permet de prolonger la durée de vie des échangeurs et de maintenir les mêmes performances que celles pour lesquelles ils ont été conçus. En outre, un entretien ordinaire préventif permet également, à long terme, de réaliser des économies, car ses coûts sont inférieurs à ceux d'un entretien extraordinaire, survenant, par exemple, en cas d'interruption soudaine. Une maintenance extraordinaire implique souvent le remplacement complet des échangeurs ou une intervention très coûteuse. ⁽¹⁹⁾

V.1.2 Maintenance corrective

Dans certains cas, l'échangeur a besoin d'une intervention corrective en raison d'un état particulièrement critique de l'échangeur de chaleur ou de certains de ses composants. La maintenance corrective de bout en bout a un impact financier plus important, car elle implique souvent de longs temps d'arrêt des équipements. De plus, une grande partie de ces pannes peut être évitée si une maintenance préventive est en place. ⁽¹⁹⁾

V.2.1 Prévention et Maintenance lors de fonctionnement

Les opérations d'entretien et de maintenance sont utilisées pour éviter la formation de Dépôts de saleté dans l'échangeur. Par conséquent, ils peuvent prolonger la durée de vie de l'équipement. Selon la nature d'encrassement différents procédés existent, par exemple les procédés mécaniques pour les liquides encrassent circulants à l'intérieur l'échangeur de chaleur, avec des billes, des ressorts, des brosses, etc.

Procédés mécaniques pour les échangeurs utilisant des gaz, tel Que :

- La projection de vapeur ou d'air comprimé.
- Le nettoyage à l'eau
- Le grenailage.
- Le soufflage acoustique.
- Le nettoyage par chocs thermiques.

V.2.1 Prévention et maintenance lors de conception

Tout d'abord, il faut choisir parmi différents types d'échangeurs, leur coût, leurs dimensions et leurs niveaux de température et de pression, selon ce qui est le mieux S'adapter à un problème donné. Deuxièmement, il faut choisir les modes de configuration et de fonctionnement, comme la disparition des zones stagnantes, Points chauds ou froids, état de surface, optimisation ou sélection de vitesse matériaux pour minimiser les effets nocifs de la saleté. ⁽¹⁷⁾

V.2.3 Prévention et maintenance lors de fabrication

A ce stade, des précautions doivent être prises, telles que la protection des surfaces d'échange tout l'environnement qui favorise le dépôt ou la corrosion. Lorsqu'il est mis en Prestations d'installation, compte tenu de la surface excédentaire allouée à prendre en compte l'Encrassement, l'échangeur ne peut pas fonctionner dans des conditions optimales. En fait, des taux de cycle plus lents et des températures de surface plus élevées Important pour favoriser l'encrassement. Il faut donc faire des efforts au démarrage pour obtenir la valeur nominale de fonctionnement. ⁽¹⁷⁾

V.3 Nettoyage des échangeurs de chaleur

Une diminution des performances d'un échangeur de chaleur au-delà d'un niveau acceptable nécessite un nettoyage. Dans certaines applications, le nettoyage peut être effectué en ligne pour maintenir des performances acceptables sans interruption de fonctionnement. A d'autres moments, le nettoyage hors ligne doit être utilisé.

Le nettoyage en ligne utilise généralement une méthode mécanique ne nécessite aucun démontage pour le côté tube d'un échangeur tubulaire et L'inversion du flux est nécessaire pour le nettoyage des échangeurs a plaques. L'alimentation chimique peut également être utilisée comme technique de nettoyage en ligne mais peut perturber le reste de la boucle de service liquide. ⁽²⁰⁾

V.3.1 Nettoyage mécanique en ligne

Les techniques de nettoyage mécanique en ligne sont également les systèmes à brosses et à boules d'éponge. L'avantage du nettoyage en ligne est la continuité du service de l'échangeur et l'espoir qu'aucun temps d'arrêt lié au nettoyage ne se produira. Le principal inconvénient est le coût supplémentaire d'une nouvelle installation d'échangeur de chaleur ou le coût élevé des modernisations. De plus, il n'y a aucune garantie suffisante de nettoyage. ⁽¹⁷⁾

V.3.2 Le nettoyage mécanique hors ligne

Le nettoyage mécanique hors ligne est une procédure fréquemment utilisée. L'approche consiste à abraser ou à racler le dépôt par des moyens mécaniques. La méthode comprend l'eau à haute pression, la vapeur, les lances et les pistolets à eau. Le nettoyage mécanique hors ligne présente des avantages tels qu'un excellent nettoyage de chaque tube et un bon potentiel d'élimination des dépôts très tenaces. Les désavantages incluent l'incapacité de nettoyer avec

succès les faisceaux de tubes en U, le problème habituel de démontage et la grande quantité de travail nécessaire. ^(17,20)

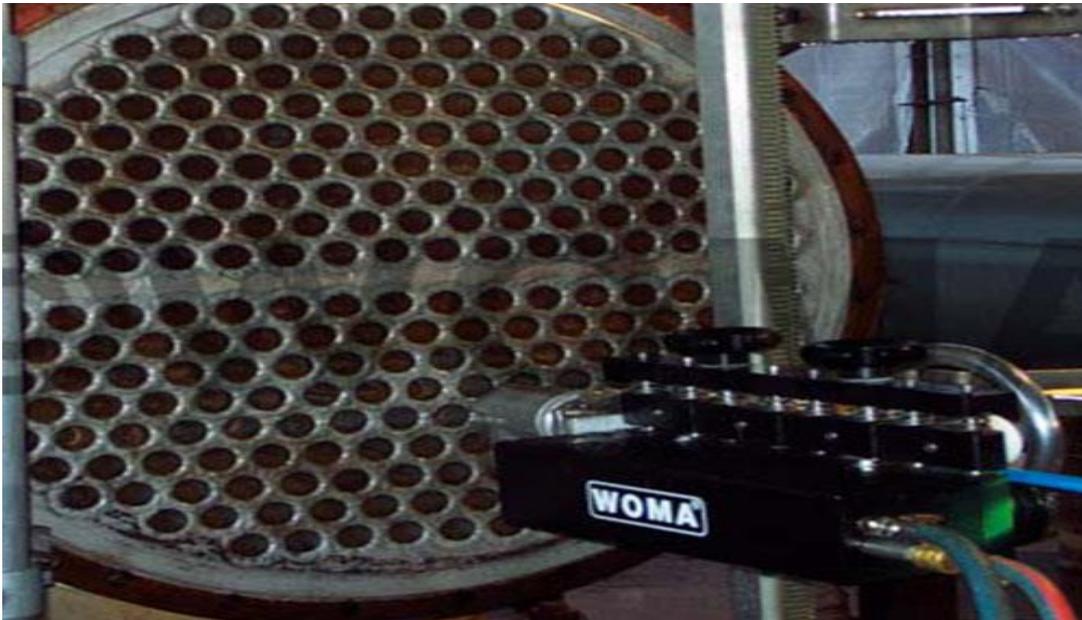


Figure V.1 : Nettoyage d'un échangeur tubulaire par l'eau à haute pression

V.3.3 Le nettoyage chimique hors ligne

Le nettoyage chimique hors ligne est une technique très fréquemment utilisée pour nettoyer les échangeurs. Certaines raffineries et usines chimiques disposent de leurs propres installations de nettoyage pour la recirculation des solutions de nettoyage. En général, ce type de nettoyage a pour but de dissoudre le dépôt au moyen d'une réaction chimique avec le fluide de nettoyage. Les avantages de l'approche du nettoyage chimique incluent le nettoyage des zones difficiles à atteindre. Souvent, lors d'un nettoyage mécanique, le nettoyage est incomplet en raison de régions difficiles à atteindre avec les outils de nettoyage. Le nettoyage chimique ne cause pas de dommages mécaniques aux échangeurs, mais il existe une possibilité de dommages dus à la corrosion en raison d'une réaction du matériau de surface d'échange avec le liquide de nettoyage. Ce problème potentiel peut être résolu par un rinçage approprié de l'unité. Les inconvénients du nettoyage chimique hors ligne sont le risque de corrosion, la manipulation de produits chimiques dangereux et l'utilisation d'une procédure complexe. ^(17,20)

V.4 Maintenance de la boite froide

Une augmentation de la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la boite froide côté gaz sec d'alimentation (delta P) est enregistrée au niveau du 17-PDI 0020, qui avait un impact direct sur la production du complexe GL3Z provoquant systématiquement durant l'arrêt d'Août 2017, il a été décidé conjointement avec TE (département technique et exploitation) d'effectuer un soufflage de la boite froide. L'opération a été scindée en 04 parties, à savoir :

- Soufflage de la boite froide;
- Inspection du filtre FZ152;
- Soufflage de la ligne d'entrée 18'' du 17-MC02 ;
- Inspection interne des filtres 13-MD04-A et 13-MD04-B

L'opération de soufflage adoptée dans ce cas de figure a été inspirée de la procédure de Lynde Gas.

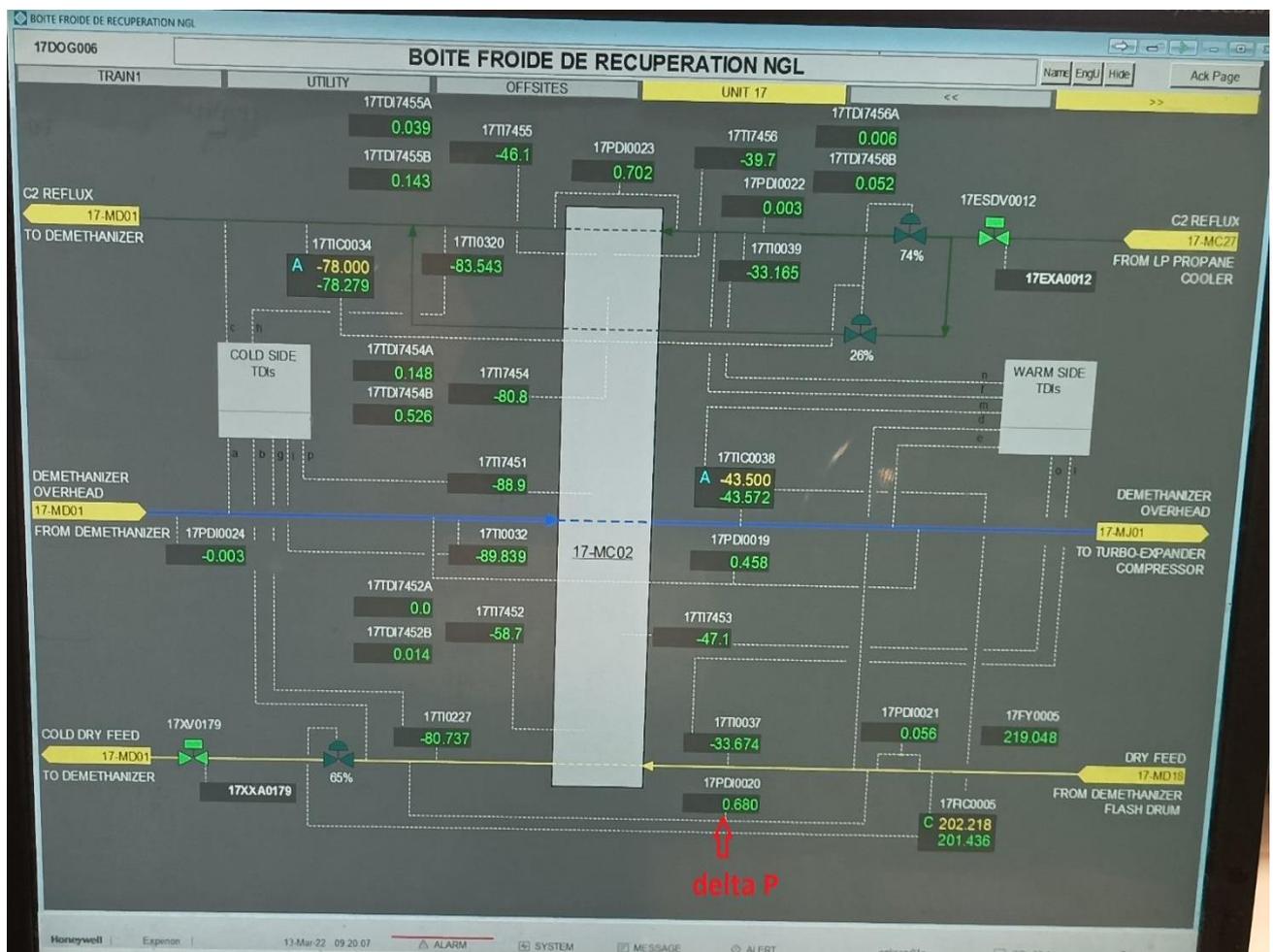


Figure V.2 : Processus de la boite froide

V.4.1 Soufflage de la boite froide 17-MC02

L'opération de soufflage de la boite froide s'est déroulé comme suit :

A/ Préparation :

Tous les paramètres ont été mis en place pour le bon déroulement de cette opération, à savoir :

- Le choix de la bride d'entrée de la boîte froide partie GN comme point d'éclatement avec installation d'un dispositif pour récupérer les débris après le soufflage (figure V.3)
- Le point de pressurisation (N2) de l'équipement avec de l'azote utilisé (figure V.4).
- Utilisation d'un manifold munis pour la lecture de la pression d'éclatement.

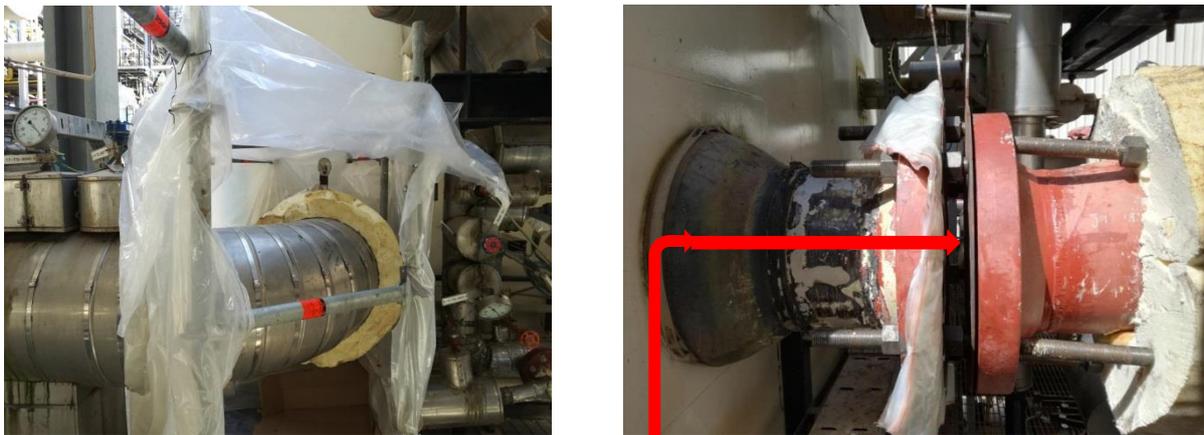


Figure V.3 : Dispositif mis en place pour récupérer les débris installation du joint d'éclatement

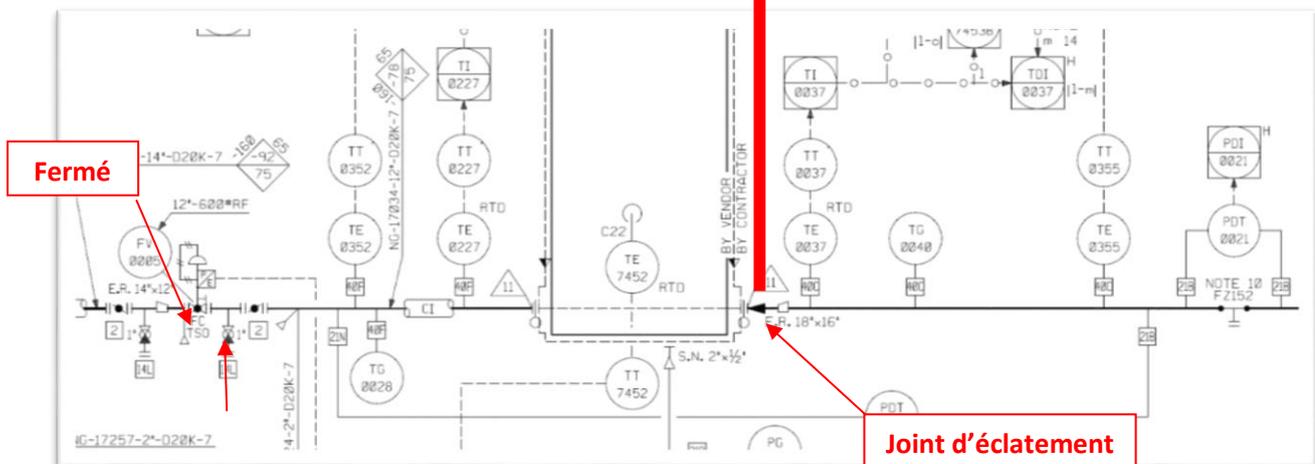


Figure V.4 : Extrait du plan P&ID montrant le point d'injection d'azote et la position du Joint d'éclatement

B/ Début des opérations de soufflage

N2

Le 1^{er} jour :

Test N°1 : Utilisation d'un joint d'éclatement constitué de 30 feuilles en plastique, la pression a été de 2.6 bar sans éclatement. A cet effet le test a été interrompu, 3 bar de pression est considéré comme une valeur critique.

Test N°02 : on Diminue le nombre de feuilles en plastique, 11 feuilles utilisées au lieu de 30, à une pression de 2.2 bars on avoir un éclatement, constaté par un dégagement d'un nuage de poussière de couleur marron. des débris constituaient d'un ensemble de petites particule de différentes tailles certaines sont plus grandes que le diamètre du Fine Mesh 80, aussi on a constaté des petits débris d'oxydes de fer avec un mélange de poussière.



Figure V.5 : Débris récupérés après le 1^{ème} soufflage de la boîte froide

Test N°3 : 14 feuilles en plastique, on a enregistré un éclatement à une pression de 2.3 bar avec dégagement d'un nuage marron plus clair que le précédent.

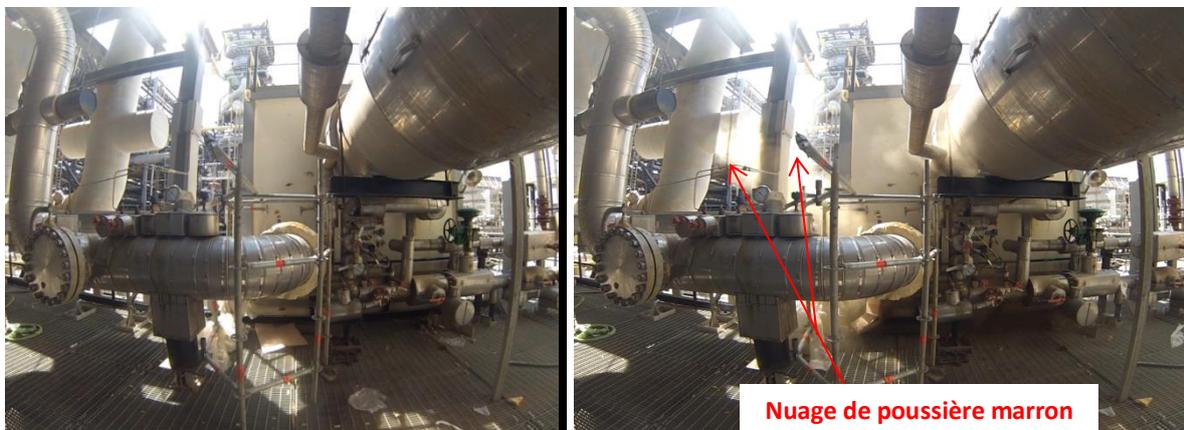


Figure V.6 : Test N°3 avant l'éclatement du joint après l'éclatement du joint

Test N°4 : 23 feuilles, 3 bars, sans éclatement, l'opération prendre place le jour après.

Le 2eme jour :

Test N°05 : 18 feuilles, éclatement à 2.4 bars, On voit bien sur la figure ci-dessous les traces de la poussière dans sortis de la boîte froide après la 5^{ème} opération de soufflage, les traces de salissures nous ont conduits de continuer l'opération de soufflage



Figure V.7 : Etat du joint d'éclatement après le 3^{ème} soufflage

Test N°06 : on utilise 14 feuilles en plastique, on a enregistré un éclatement à une pression de 2.1 bar avec dégagement d'un nuage marron moins foncé que 5^{ème} test.



Figure V.8 : Test N°6 avant l'éclatement du joint et après l'éclatement du joint

Test N°07 : 14 feuilles l'éclatement a eu à 2.1 bars, avec dégagement d'un Nuage marron clair, pratiquement le même résultat obtenu que le test N°6. L'état du joint d'éclatement donne une idée sur la qualité de l'azote sortant de la boîte froide après le soufflage, et en fonction de ça, on se prononce sur la poursuite ou non de l'opération jusqu'à ce qu'on obtienne un nuage d'azote blanc ou un joint d'éclatement plus propre.

Le 3eme jour :

Test N°08 : 16 feuilles éclatement 2.1 bars, L'azote sortant de la boîte froide devient de plus en plus clair.



Figure V.9 : Etat du joint d'éclatement après le 6^{ème} soufflage

Test N°09 : 16 feuilles éclatement 2.1 bars, L'état du joint d'éclatement du 9^{ème} test nous donne une idée sur l'état interne de la boîte froide, qui après 7 opérations de soufflage a présenté une qualité d'azote sortant plus propre, ce qui explique le bon nettoyage de l'équipement.

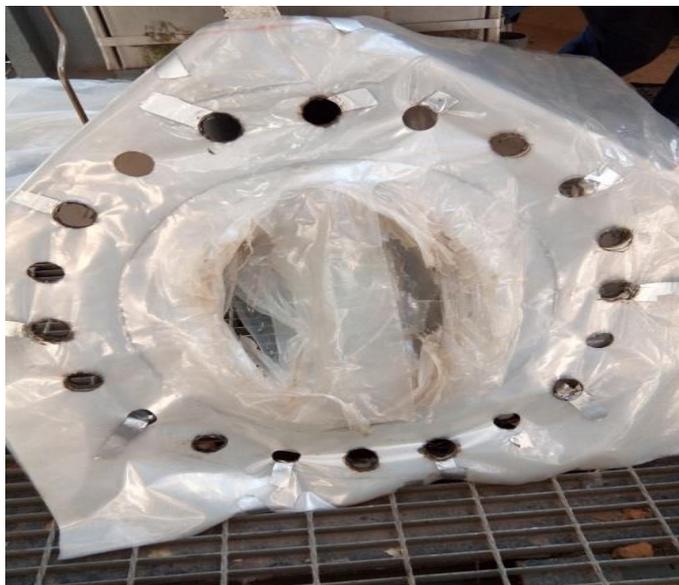


Figure V.10 : Etat du joint d'éclatement après le dernier soufflage

V.4.2 Inspection du filtre FZ-152

En vue de préparation de l'opération de soufflage de la ligne d'entrée 18'' de la boîte froide côté GN, le filtre FZ 152 de l'entrée de la boîte froide coté GN a été déposé pour inspection, on a constaté la présence de salissure et des petites particules de différentes tailles de couleur grisâtre et marron de la même nature que celles récoltées après le premier soufflage de la boîte froide.

D'autre part, le filtre a présenté des déchirures au niveau du Fine Mesh 80, ces dernières peuvent en conséquent favoriser le passage d'impureté qui en conséquent influent sur le rendement de notre équipement.



Figure V.11 Débris récupérés au niveau du filtre FZ 152



Figure V.12 Constat de déchirures au niveau du Fine Mesh

V.4.3 Soufflage de la ligne 18

La ligne 18 est la tuyauterie qui connecte le ballon de détente 17-MD18 avec la boîte froide, L'opération s'est déroulée comme suit :

Installation de joint plein au niveau de la bride de connexion avec la boîte froide dans le but de souffler seule la ligne 18'' à travers la bride du filtre FZ 152 jusqu'au ballon 17-MD18, L'opération de soufflage n'a révélée aucune anomalie vue que le nuage d'azote était blanc.



Figure V.13 : opération de soufflage de la ligne 18 (entrée 17-MC02)

V.4.4 Inspection des ballons filtres 13-MD04 A-B

Après les deux opérations de soufflage à savoir, la boîte froide et la ligne 18, il a été jugé nécessaire de mener une inspection au niveau des filtres 13-MD04-A/B installés en aval des sécheurs 13-MD02 A-B-C qui sont des colonnes à garnissage, pour confirmer l'hypothèse de la source des particules solide constatées au niveau du filtre FZ-152 et une bonne partie récupérée après le 1^{er} soufflage de la boîte froide.

L'inspection a révélé une Présence de la même nature des débris récupérée au niveau du filtre FZ-152 et la boîte froide avec des quantités importante, suite à ce constat on a confirmé la provenance de ces particules solides qui sont à l'origine de l'encrassement de la partie dry feed (GN) de la boîte froide. Ces derniers sont probablement le résultat de l'effritement des billes en céramique constituant les tamis moléculaires des sécheurs.

Les deux filtres ont été nettoyés avec changement de l'ensemble des cartouches endommagés.



Figure V.14 : Cartouches des filtres 13-MD04-A/B

V.4.5 Analyse de la situation

La seule hypothèse qui peut confirmer le passage des débris, c'est l'endommagement partiel des éléments filtrant des cartouches situées dans la première rangée de l'entrée du gaz venant des sécheurs 13-MD02 A-B-C. A la base, ces filtres sont conçus pour filtrer des traces de particules très fines contenues dans le gaz, mais dans ce cas de figure, la quantité des débris est très importante surtout sous l'effet de la pression et de la vitesse, ces particules solides véhiculées par le gaz impactent les filtres et affectent en conséquent leurs intégrités. Le Soufflage de la boite froide conformément à la procédure adoptée dans le présent travail nous confirme que le bouchage est dû à l'encrassement provoquant la montée de la delta P.

Conclusion

En conclusion, la compréhension des causes communes de dysfonctionnement des échangeurs de chaleur peut aider à déterminer des mesures préventives à un stade précoce, permettant une efficacité maximale, évitant une maintenance non planifiée, et finalement réduisant les coûts.

CONCLUSION GENERALE

Dans le présent travail nous nous sommes intéressés au problème de fonctionnement des échangeurs de chaleur rencontrés spécialement l'encrassement qui a provoqué la réduction des performances de l'équipement, les échangeurs de chaleur à plaque ont une grande importance considérant leur haute performance notamment les boîtes froides qui sont largement utilisés dans les basses températures, A l'aide de la collecte des données au niveau de l'unité GNL3 et le calcul fait par le logiciel HYSYS (simulation) nous avons pu déterminer la présence et l'évolution du phénomène.

Les courbes ainsi dressées nous ont montré l'impact de l'encrassement sur le fonctionnement des échangeurs de chaleur ce qui nous a permis de conclure que la surveillance des impuretés dans l'alimentation en gaz de la boîte froide est indispensable pour assurer une liquéfaction fiable.

Pour ce type de problème, je recommande d'approfondir l'étude sur les compositions chimiques des trois fluides à propos de leur passage dans la boîte froide pour déterminer un meilleur système de filtrage qui est plus adapté et durable aux conditions de production.

Enfin, le travail expérimental, malgré son coût, reste le meilleur moyen de faire la lumière sur des phénomènes complexes comme l'encrassement. Des essais poussés peuvent être réalisés à partir de méthodes de mesure adaptées Pour gagner en précision dans ce travail et mettre l'outil de simulation au service de l'observation expérimentale.

Références

1. Heat Exchangers Selection, rating, and thermal design (second Edition)
2. A. BENBRIK. Cours Echangeur de chaleur, plateforme UMBB
3. Fonctionnement d'un échangeur de chaleur (www.factoryfuture.fr)
4. Les échangeurs de chaleur (www.encyclopedie-energie.org)
5. Echangeurs de chaleur : description des échangeurs (www.techniques-ingenieur.fr)
6. D.R. BAKER, H.A. SHRYOCK. 1961. A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance
7. Types d'échangeurs de chaleur et leurs caractéristiques (flowtrend.com)
8. Dr. Fadil AYAD Cours d'échangeurs de chaleur, université de Luxembourg
9. Spiral Plate Heat Exchangers (www.nexson-group.com)
10. L'ÉCHANGEUR UNIVERSEL (thermofin.net)
11. Echangeur à régénération (energieplus-lesite.be)
12. F.VITTILO, Ph.D. in Experimental and numerical contribution to heat transfer enhancement in plate heat exchangers
13. VIJAYA SEKHAR GULLAPALLI, Ph.D. in Estimation of Thermal and Hydraulic Characteristics of Compact Brazed Plate Heat Exchangers
14. Les aéroréfrigérants (www.usinenouvelle.com)
15. Dysfonctionnement des échangeurs (www.techniques-ingenieur.fr)
16. Understanding and preventing heat exchanger fouling (www.watertechonline.com)
17. S. N. KAZI, Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces (www.intechopen.com)
18. Cleaning and Maintaining Your Heat Exchanger: Complete Guide (csidesigns.com)
19. Heat Exchanger Maintenance – Nuova Saimar
20. Maintenance d'un échangeur de chaleur (factoryfuture.fr)
21. SERGIO RICARDO LOURENÇO, a study on the effects of the use of thermal insulation in plate heat exchangers (copec.eu)
22. Thermal insulation-jacket for plate heat exchanger (www.pamaens.comt)
23. Mousse de polyuréthane (conseils-thermiques.org)
24. Perlite for non evacuated cryogenic and low temperature service (www.perlite.org)