

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

### INTITULE

**DIMENSIONNEMENT D'UN ECHANGEUR A TUBES ET  
CALANDRE DE L'UNITE DE DECARBONATATION DU  
COMPLEXE GL1K SIKKDA**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : MASTER

SPECIALITE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR : MEKCEM MAROUA

DIRECTEUR DU MEMOIRE : DR. A. HAOUAM

DEVANT LE JURY

PRESIDENT: H. MZAD Pr UBM-ANNABA

EXAMINATEURS :  
L. BOUMARAF Pr UBM-ANNABA  
A. DJEMILI MC-A UBM-ANNABA  
A. HAOUAM MC-A UBM-ANNABA

Année : 2016/2017

## **Remerciements**

*Nous remercions tout d'abord Dieu pour ses bienfaits inestimables, de m'avoir illuminé le chemin vers le savoir et la science et de m'avoir permis de terminer mes études ainsi que ce projet dans de bonnes conditions.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur **Mr. Haouam A** je le remercie de m'avoir encadré, orienter, aider et conseiller. Je suis reconnaissante pour le temps qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à **Mr. Mzad H** notre responsable de filière et président de jury, et à Mme **Boumaaraf A** et **Mr Djemili**, pour l'attention de nous examiner.*

*Mes vifs remerciements s'adressent aux enseignants du département génie mécanique et aux travailleurs du complexe GL1K Skikda de leur aide aimable et d'avoir me conseiller et orienter tout le long de la période du stage.*

*Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

## *Dédicace*

*Plusieurs obstacles auraient été insurmontables sans l'aide du Tout Puissant, le soutien et l'appui dont j'ai bénéficié au cours de l'élaboration de ce travail.*

*Je remercie Mes parents : **Ma mère**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

***Mon père**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Ma famille, spécialement à mes frères Hamza, Yousra, Khalil, Mr. Smain, Mme Naadia et mes amis Yousra, Aicha, Salsabil, Mr Saleh, Ali, Kheireddine et le groupe énergétique et environnement.*

*A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire : Merci.*

*Maroua*

# SOMMAIRE

## CHAPITRE I

I. Introduction	01
I.1. Le gaz naturel	01
I.2. But de la liquéfaction	02
I.3. Historique	02
I.4 Présentation du complexe GLIK	03
I.4.1 Situation géographique	04
I.4.2 Les installations de lesquelles se constitue le complexe GLIK	05
I.4.3 Organisation du complexe	08
I.4.4 Présentation générale des installations du nouveau Méga train de GN	08
I.4.5 Les unités du Nouveau Méga Train de GNL	12
I.5. Volet Environnement	15
Les principaux déchets générés par l'activité du complexe et leurs solutions	15
I.5.2 Consommation d'eau de mer	16

## CHAPITRE II

II. Introduction	17
II.1 Notions du transfert de la chaleur	17
II.1.1 Le transfert de chaleur	17
II.1.2 Les modes de transfert de chaleur	17
II.1.3 Flux de chaleur	19
II.1.4 Flux de chaleur lié à un débit massique	20
II.2. Les échangeurs de chaleur	20
II.2.1. Définition de l'échangeur de chaleur	20
II.2.2. Matériaux de construction	21
II.2.3. Critères de classement des échangeurs de chaleur	21
II.3. Les échangeurs à plaques et joints	26

II.4 Les échangeurs à tubes et calandre et leurs composants	28
II.4.1. Les différents types d'ailette des tubes	30
II.4.2. Les types des échangeurs à tubes et calandre	31
II.4.3. Critères du choix de l'ordre de passage des fluides	33
II.4.4. Echangeurs de type TEMA	33
II.4.5. Recommandations du TEMA	35
II.5. Problèmes de fonctionnement des échangeurs de chaleur	36
II.5.1 Encrassement	36
II.5.1.1 Types d'encrassement	37
II.5.1.2 Impact de l'encrassement sur le dimensionnement des échangeurs	38
II.5.1.3 Coefficient d'excès de surface $C_s$	39
II.5.1.4 Les paramètres influençant l'encrassement	40
II.5.1.5 Prévention de l'encrassement	41
II.5.2. Les vibrations	41
II.5.3 La maintenance des échangeurs	42
II.6 Evaluation des performances d'un échangeur	42
II.6 .1. Evaluation par la méthode DTLM	42
II.6 .2. Evaluation par la méthode NUT	43
II.7. Conclusion	44

## **CHAPITRE III**

III.1. Introduction	45
III.2. Description et rôle des échangeurs à plaques 12-MC22A/B/C au niveau de la section décarbonatation	45
III.3. Problématique	46
III.4. Dimensionnement de l'échangeur tubes et calandre	47
III.5. Dimensionnement du nouveau échangeur à tubes et calandre	48
III.6. Interprétation des résultats	57
III.7. Conclusion	58

## **CHAPITRE IV**

IV.1.La simulation	58
IV.2. Principes de fonctionnement et rôle des simulateurs	58
IV.3. Modes de fonctionnement des simulateurs	59
IV.4. utilisation de la simulation	60
IV.5. Concepts et caractéristiques du simulateur HYSYS	60
IV.5.1 Concepts de base du simulateur HYSYS	60
IV.5.2. Environnement de simulation	61
IV.5.3.Caractéristiques principales de HYSYS	62
IV.6. Simulation de l'échangeur à tubes et calandre dimensionné précédemment avec le simulateur HYSYS	63
IV.7. Conclusion	71

# Liste des figures

## CHAPITRE I

Fig. I.1 : Répartition mondiale du GN	01
Fig. I.2 : Exploitation du GN, liquéfaction et transport	02
Fig. I.3 : Les voies d'exportations gazières algériennes	03
Fig. I.4 : Schéma d'occupation du sol	04
Fig. I.5 : Les utilités du complexe	05
Fig. I.6 : Organisation du complexe GL1K	08

## CHAPITRE II

Fig. II.1 : Schéma du transfert de chaleur par conduction	18
Fig. II.2 : Schéma du transfert de chaleur radiatif	18
Fig. II.3 : Schéma du transfert de chaleur convectif	19
FigII.4 : Différents modes de circulation des fluides	22
Fig. II.5 : Différents types d'échangeurs tubulaires	24
Fig. II.6 : Echangeurs spirales	24
Fig. II.7 : Echangeurs à plaques soudées (partiellement ou totalement)	25
Fig. II.8 : Echangeur à plaques brasées (l'échangeur 15 MC-06)	25
Fig. II.9 : Echangeurs à plaques et joints	25
Fig. II.10 : Les différents types d'ailette des plaques	26
Fig. II.11 : Les principaux composants échangeur à plaques et joints	26
Fig. II.12 : Plaques à surface secondaire	27
Fig. II.13.a : Les différentes distributions des fluides à l'intérieur des plaques	27
Fig. II.13.b : les différentes distributions des fluides à l'intérieur des plaques	28
Fig. II.14 : Echangeur à tubes et calandre	28

Fig. II.15 : Plaque tubulaire	29
Fig. II.16 Disposition des tubes	29
Fig. II.17 Autre différent type d'ailettes	30
Fig. II.18: les types de chicanage	31
Fig. II.19 : Échangeur à tête flottante	32
Fig. II.20 : Échangeur à plaque tubulaire fixe	32
Fig. II.21 : Échangeur à tube en U	33
Fig. II.22 : Echangeur propre (à droite) et échangeur sale (à gauche)	36
Fig. II.23 : Déformation de la tôle extérieure d'un échangeur de chaleur (type à plaques brasées)	41

## **CHAPITRE IV**

Fig. IV.1 : Définition de la géométrie de l'échangeur	63
Fig. IV.2 : Définition des paramètres du processus	63
Fig. IV.3 : Définition de la composition chimique du fluide froid	64
Fig. IV.4 : Définition des propriétés du fluide froid	64
Fig. IV.5 : Variation de la chaleur spécifique du fluide froid en fonction $T^\circ$	65
Fig. IV.6 : Variation de la viscosité du fluide froid en fonction de la $T^\circ$	66
Fig. IV.5 : Variation de la conductivité thermique du fluide froid en fonction de $T^\circ$	66
Fig. IV.6 : Définition de la composition chimique du fluide chaud	67
Fig. IV.7 : Définition des propriétés du fluide chaud	67
Fig. IV.8 : Variation de la viscosité du fluide chaud en fonction de la $T^\circ$	68
Fig. IV.9 : Variation de la chaleur spécifique du fluide chaud en fonction de la $T^\circ$	69
Fig. IV.10 : Variation de la conductivité thermique du fluide chaud en fonction de $T^\circ$	69
Fig. IV.11: Plan mécanique	70
Fig. IV.12: Disposition optimum des tubes d'après le logiciel	70

# Liste des tableaux

## Chapitre I

Tableau I.1: les composants chimiques du GN de HASSI R'MEL	4
Tableau I.2 : Tableau comparatif entre les valeurs de consommation d'eau de mer avant et après l'installation du Méga Train	16

## Chapitre II

Tableau II.1 : Limites acceptables de Cs	40
Tableau II.2 : Actions envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs	41

## Chapitre III

Tableau III.1 : Caractéristiques thermo-physiques des deux fluides des échangeurs 12-MC-22A/B/C et paramètres de fonctionnement de l'échangeur	48
Tableau III.2 : récapitulatif des résultats	57
Tableau III.3 : Tableau comparatif des résultats de l'échangeur dimensionné et l'échangeur à plaques existant	58

## Chapitre IV

Tableau IV.1 : Résultats obtenues pour les propriétés du fluide froid	65
Tableau IV.2: Résultats obtenues pour les propriétés du fluide chaud	68

# Nomenclature

Indice « c » : côté calandre

Indice « t » : côté tube

Q : Quantité de chaleur (W)

$C_p$  : La chaleur spécifique (kJ/ (kg K))

m : Le débit massique (kg/s)

DTLM : La différence de température logarithmique moyenne(°C)

F : Facteur de correction de température

n : Nombre de passe

l : Longueur du tube (m)

A : La surface totale d'échange de la chaleur (m<sup>2</sup>)

A' : La surface d'échange dans une calandre (m<sup>2</sup>)

Nt' : Nombre des tubes par calandre

a : Section de passage (m<sup>2</sup>)

$D_e$  : Le diamètre équivalent (m)

$R_e$  : Nombre de Reynolds

G : Vitesse massique (kg/m<sup>2</sup>.s)

f : Facteur de friction (côté tube)

f' : Facteur de friction (côté calandre)

$\Phi$  : Rapport de viscosité

h : Coefficient de transfert de chaleur W/m<sup>2</sup>.K

T : La température (°C)

$\Delta P$  : Perte de charge (kPa)

## **Introduction générale :**

Les échanges thermiques interviennent dans des nombreux secteurs d'activités industrielles, ils s'effectuent généralement sans altération des milieux intervenant dans le transfert thermique. L'utilisation d'équipements spécifiques d'échange est alors nécessaire, ces équipements sont connus sous la dénomination d'échangeurs de chaleur, ce sont des systèmes thermodynamiques présents dans toutes les unités industrielles dans lesquelles interviennent les processus d'extraction de chaleur.

L'étude d'un échangeur de chaleur permet de dimensionner un appareil fournissant un service thermique donné (traduit en général par une puissance d'échange) avec une surface d'échange et une géométrie optimales. En fait, il s'agit de mettre à la disposition de l'utilisateur un échangeur qui soit le plus économique possible.

C'est durant la période du stage effectué au sein du nouveau projet « Méga train » du GL1K Skikda en Mars 2017, que ce thème a été abordé avec comme objectif une étude de substitution des échangeurs à plaques type 12-MC22 A/B/C de l'unité de la décarbonatation par des échangeurs de type tubes et calandre ; en raison des fuites décelées lors de leur fonctionnement et suite à l'échec des différentes tentatives de réparation.

Notre thème renferme une étude thermique qui consiste essentiellement à déterminer la surface d'échange thermique nécessaire et le flux thermique échangé, et une autre étude hydraulique qui fait appel à la mécanique des fluides, nécessaire pour la détermination des pertes de charges dans l'échangeur.

➤ Le projet comprend les parties suivantes :

Introduction générale

Chapitre 1:Présentation du complexe GL1K

Chapitre 2 : Généralités sur les échangeurs de chaleur

Chapitre 3 : Description de l'échangeur 12-MC22 A/B/C

Chapitre 4 : Dimensionnement d'un échangeur de type tubes-calandre

Chapitre 5 : Partie simulation

Conclusion générale

### I. Introduction :

Le gaz naturel (GN) est la source d'énergie fossile qui a connu la plus forte progression depuis les années 70. En raison de ses avantages économiques et écologiques, le gaz naturel devient chaque jour plus attractif pour beaucoup de pays. Les propriétés de ce produit font de lui l'une des sources d'énergie les plus fiables connue à ce jour. Il représente la deuxième source d'énergie la plus utilisée après le pétrole.

Le commerce international du GN est en plein développement. Ces dernières années, l'Algérie y joue un rôle actif puisque son économie est basée essentiellement sur l'exportation des hydrocarbures, dont le gaz naturel liquéfié (GNL) représente une grande partie.

L'Algérie dispose en effet de réserves importantes estimées à 3000 milliards de mètres cubes (quatrième place mondiale après la Russie, l'Iran et les USA), où les usines de production du GNL, sont situées aux côtes Est et Ouest du pays (Skikda et Arzew).

Le premier chapitre présente une description du complexe GL1K de Skikda et du Méga train de GNL, ainsi que le procédé de liquéfaction du GN utilisé.

#### I.1 Le gaz naturel :

Le GN est une énergie fossile composée essentiellement d'hydrocarbures dont le constituant principal est le méthane ( $\text{CH}_4$  : 75 % à 95 %), il se trouve sous pression dans les roches poreuses du sous-sol ou en solution avec du pétrole brut ou du condensat.

La mise en œuvre de cette énergie repose sur la maîtrise technique de l'ensemble de la chaîne gazière, qui va de l'extraction aux utilisateurs, en passant par le stockage, le transport, la distribution.

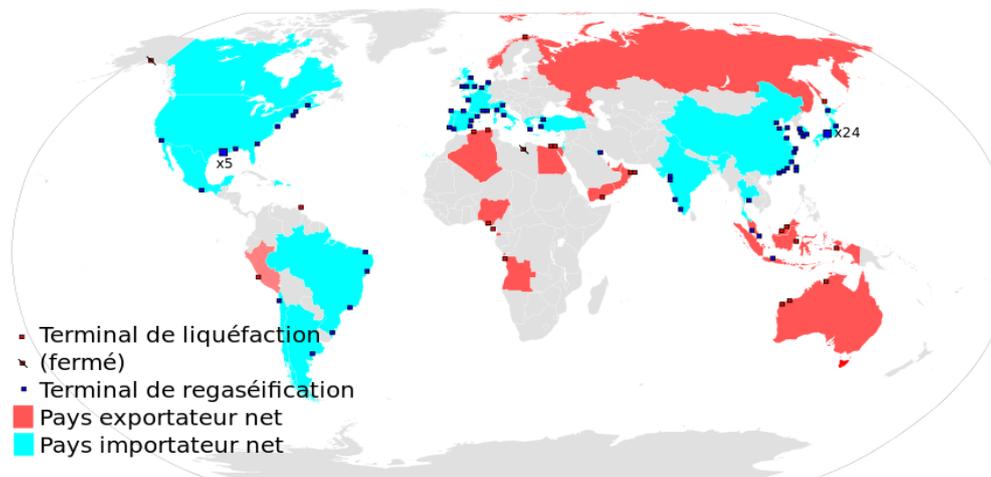


FIG I.1 : Répartition mondiale du GN

### I.2 But de la liquéfaction :

Le but de la liquéfaction est de transformer le GN de l'état gazeux à l'état liquide à une température de  $-162\text{ °C}$  à la pression atmosphérique et réduire son volume dans un rapport de 600 à 1 ( $600\text{ m}^3\text{ GN} = 1\text{ m}^3\text{ GNL}$ ) afin de faciliter son transport dans des conditions optimum aussi bien sur le plan économique que sur celui de la sécurité.

Le GNL est par la suite stocké puis transporté par des méthaniers, vers les terminaux de réception où il sera vaporisé puis distribué aux clients sous forme gazeuse. Durant le transport, une partie de la cargaison s'évapore, du fait de l'entrée de chaleur à partir l'atmosphère. Cette quantité de gaz est récupérée pour être utilisée comme combustible sur le navire (chaudière ou turbine gaz).

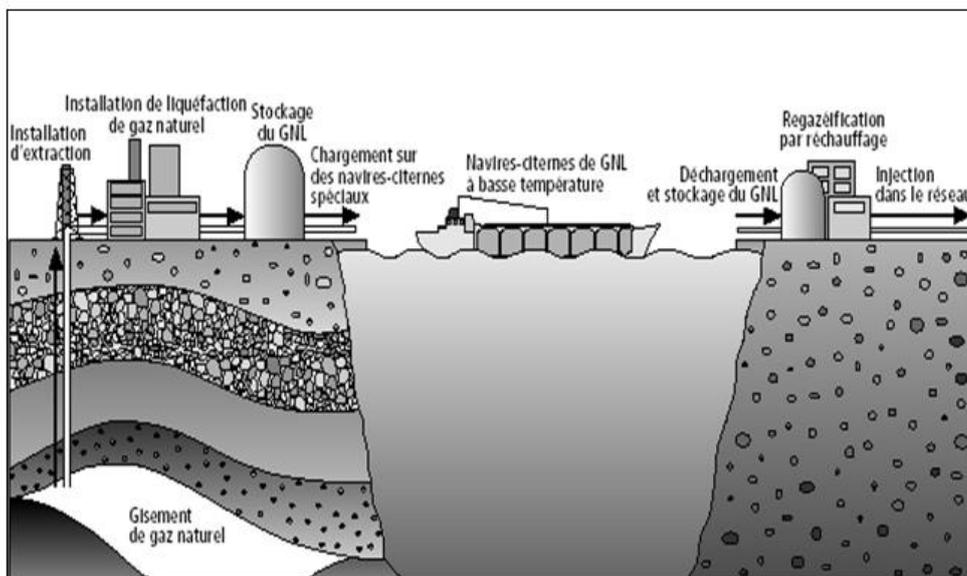


FIG I.2 : Exploitation du gaz naturel, liquéfaction et transport par navires- citernes de GNL

### I.3 Historique :

Le GN a été découvert à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle par Philippe Lebon et William Murdoch. Dans la période 1940 / 1942, les Américains envisagèrent sa liquéfaction pour pouvoir le stocker et le transporter sur des longues distances mais cette tentative s'est soldée par un échec.

Le 20 Février 1959, les Américains et les Anglais réussirent la première cargaison de GNL depuis Lake Charles (USA) à Convery Island (Angleterre).

La découverte du GN pour la première fois en Algérie, remonte à l'année 1956 dans les champs de HASSI R'MEL et AIN AMENAS au sud du pays. Ces champs enferment l'une des plus importantes réserves nationales du gaz naturel. Par la suite, ils se sont reliés aux

usines de production du GNL aux côtes est et ouest du pays (Skikda et Arzew), par des gazoducs comme moyen d'acheminement.

La Compagnie Algérienne du Méthane Liquide (CAMEL) a été créée et installée à Arzew par Air Liquide et SN REPAL de France et Conth International d'Angleterre.

Le Complexe GL1K de Skikda a été construit par la Société mixte Algérienne du Gaz (SOMALGAZ), avec 51 % des parts appartenant à Sonatrach et 49 % à ERAP (Entreprise Française du Raffinage de Pétrole).

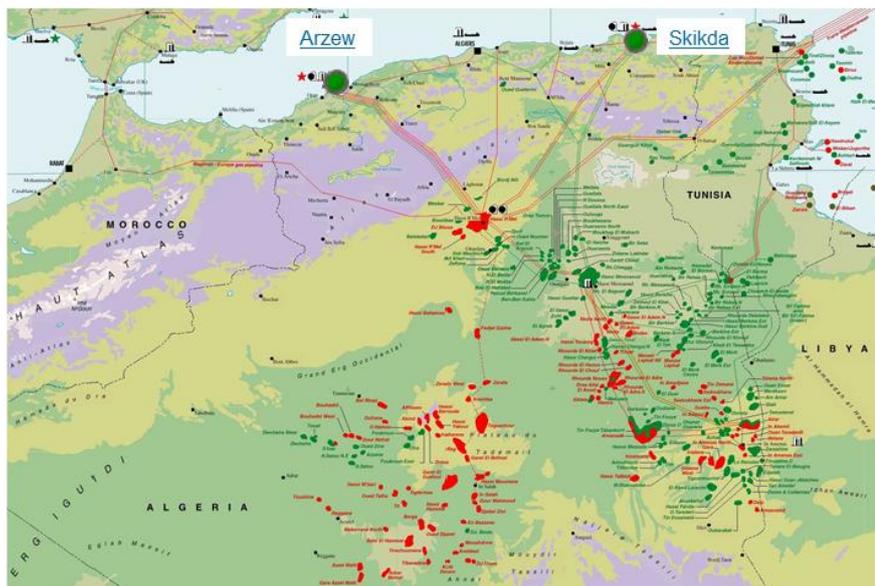


FIG I.3 : Les voies d'exportations gazières algériennes

### I.4 Présentation du complexe GL1K :

Dans le cadre de l'objectif stratégique de valorisation des ressources en GN, principalement du gisement de HASSI R'MEL, des usines de GNL ont été construites dans le nord du pays, dont le but principal est l'exportation du GNL vers l'Europe et les USA par méthaniers. Parmi ces usines, nous citons le complexe de GL1K de SKIKDA dont le chantier a débuté en mars 1969 et la production en Novembre 1972.

Le GL1K joue un rôle très important dans le développement du pays. Sa production est prévue pour l'exportation du GNL pour couvrir une partie des besoins nationaux et pour fournir la matière au complexe des matières plastiques CP1K qui se trouve à proximité.

LeGN produit par le gisement de « HASSI R'MEL » est acheminé jusqu'au complexe par un gazoduc d'une longueur de 580 Km et de 40'' de diamètre.

Le GN arrive du gisement, sous une pression de 42 bars et à une température de 25°C, avec la composition molaire suivante :

Composant	% molaire	Composant	% molaire
CO <sub>2</sub>	0.226	iC <sub>4</sub>	0.281
He	0.169	nC <sub>4</sub>	0.417
N <sub>2</sub>	5.454	iC <sub>5</sub>	0.08
C <sub>1</sub>	83.252	nC <sub>5</sub>	0.09
C <sub>2</sub>	7.909	C <sub>6+</sub>	0.00
C <sub>3</sub>	2.022	H <sub>2</sub> O	0.01

Tableau I.1: les composants chimiques du GN de HASSI R'MEL et leurs fractions molaires

#### I.4.1 Situation géographique :

Le complexe GL1K s'étend actuellement sur une superficie de 92 hectares, il est situé à 3 km à l'Est de la ville de Skikda entre l'embouchure de l'oued Saf-Saf et le village Larbi Ben M'Hidi, dont les différentes unités de liquéfaction sont construites sur la côte pour faciliter l'exportation du produit fini.



FIG I.4 : Schéma d'occupation du sol

### 1.4.2 Les installations de lesquelles se constitue le complexe GL1K :

Le complexe GL1K est constitué des installations suivantes :

- ❖ **Méga train GNL:** Le nouveau Méga train de GNL est construit en remplacement des unités (20, 30,40) détruites lors de l'incident du 19/01/2004.
- ❖ **Unité 10 :** utilise le procédé TEAL de la société TECHNIP et AIR LIQUIDE pour la liquéfaction du GN, actuellement est à l'arrêt (en conservation).
- ❖ **Unités 5P/6P :** utilisent le procédé PRICO de la société PRITCHARD pour la liquéfaction du GN. Ces unités sont à l'arrêt et en conservation depuis le 01/01/2014. Leur capacité de production installée est de 4.76 Millions m<sup>3</sup> / an.
- ❖ **L'unité GPL :** cette unité est partiellement à l'arrêt depuis le 01/01/2014. Les sections de stockage et de réfrigération, de chargement et de transfert GPL, des utilités, de torche et de production d'isobutane sont en service.
- ❖ **Installations de stockage et d'expédition de GNL, GPL et de gazoline.**
- ❖ **Les utilités**
- ❖ **Le réseau anti-incendie.**

#### ❖ *Les utilités:*

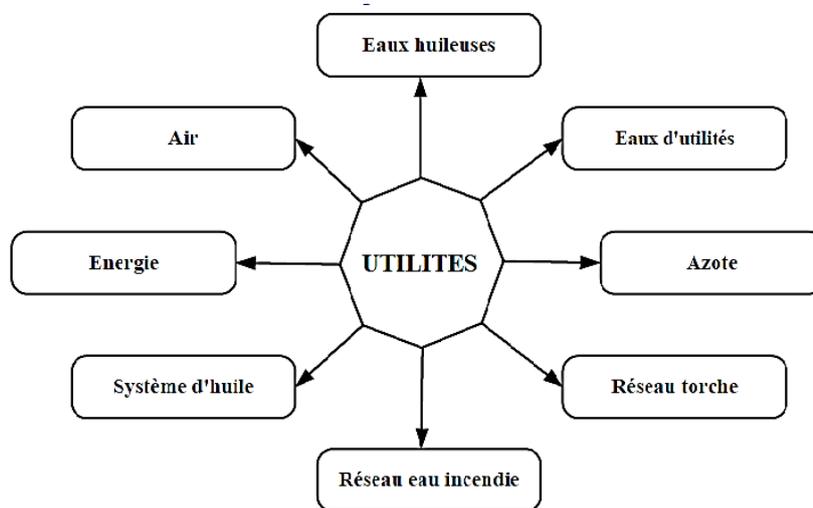


FIG I.5: Les utilités du complexe

Le rôle des utilités est de fournir les éléments nécessaires au bon fonctionnement du train du GNL et de gérer les réseaux communs qui le composent. Ces unités produisent et distribuent l'énergie électrique l'air de service et l'air instrument. Elles gèrent également les réseaux communs tels les systèmes de torche, eaux diverses, azote, huile chaud et comptage.

### 1- L'énergie électrique :

- (05) turbo générateurs (turbines à gaz entraînant des alternateurs) d'une puissance unitaire de 25 MW.
- (05) Générateurs Diesel d'une puissance unitaire de 1.8 MW, Ces équipements servent à fournir l'énergie électrique nécessaire pour le démarrage et pour l'arrêt sécurisé des installations.
- (06) sous stations pour la distribution électrique.

Ces équipements servent à fournir l'énergie électrique pour tous les consommateurs du Nouveau Train de GNL et, après raccordement, aux installations existantes (GL1K).

### 2- La production d'air instrument et d'air service comprenant :

Trois (03) compresseurs d'une capacité unitaire de 3300 Nm<sup>3</sup>/h, munis d'une batterie de sècheurs et de ballons de recette associés.

Cette unité produit de l'air instrument sec pour les besoins de l'instrumentation (vannes, positionneurs, etc.) ainsi que de l'air service non séché pour les besoins utilitaires des installations (nettoyage par exemple).

### 3- La production d'eau potable :

A partir du réseau d'eau industrielle (de barrage) fournie par le complexe GL-1/K, cette eau est traitée dans un package spécial pour être amenée aux conditions sanitaires exigées avant sa mise à la consommation.

### 4- Le système torche et brûlot :

Une torche reçoit les effluents gazeux des unités du nouveau train de GNL et du complexe existant. La hauteur de cette torche est de 150 m. Elle est montée sur un seul derrick comprenant 3 futs (2 pour le Nouveau Train et 1 pour les unités existantes de GL1K).

Une torche basse pression (torche confinée) reçoit le boil off du nouveau train du GNL et du complexe GL-1/K existant.

Un brûlot reçoit les liquides torchés à partir du nouveau train de GNL et du complexe existant.

### 5- Eaux huileuses et eaux pluviales:

Ce système sert à récupérer et traiter les eaux contaminées et celles de pluie à partir de l'ensemble de l'usine.

**NB : Le reste des utilités est assuré par le complexe GL1K existant:**

- L'azote qui sera utilisé durant les opérations de mise sous atmosphère inerte des installations lors des opérations de maintenance ou de préparation de démarrage.
- L'eau déminéralisée, utilisée pour les circuits de réfrigération de l'huile des machines tournantes et pour la préparation et le maintien de la concentration d'eau à solution MDEA utilisée pour la décarbonatation du GN.

### 6- Stockage et chauffage d'huile pour les échangeurs :

Ce système a pour but de stocker, chauffer et fournir l'huile chaude nécessaire pour le réchauffage des rebouilleurs et des réchauffeurs de l'ensemble du train. Ce système est composé de 3 unités :

- Unité 08 : pour le stockage d'huile et la compensation des pertes par appoint aux unités 18 et 58.
- Unité 18 : assure le chauffage d'huile des échangeurs du traitement du gaz et pour le réchauffeur de fuel gaz.
- Unité 58 : Chauffage d'huile pour les échangeurs du fractionnement et pour le réchauffeur du GN.

### 7- Le réseau incendie :

Le réseau incendie du Nouveau Train de GNL est alimenté par une pompe électrique située au niveau de la pomperie eau de mer du complexe GL1K. Ce réseau est interconnecté à celui de GL1K en trois points. En marche normale, ce réseau est maintenu en pression par de l'eau industrielle (de barrage).

### 1.4.3 Organisation du complexe :

L'organisation du complexe GL1K est représentée dans l'organigramme suivant :

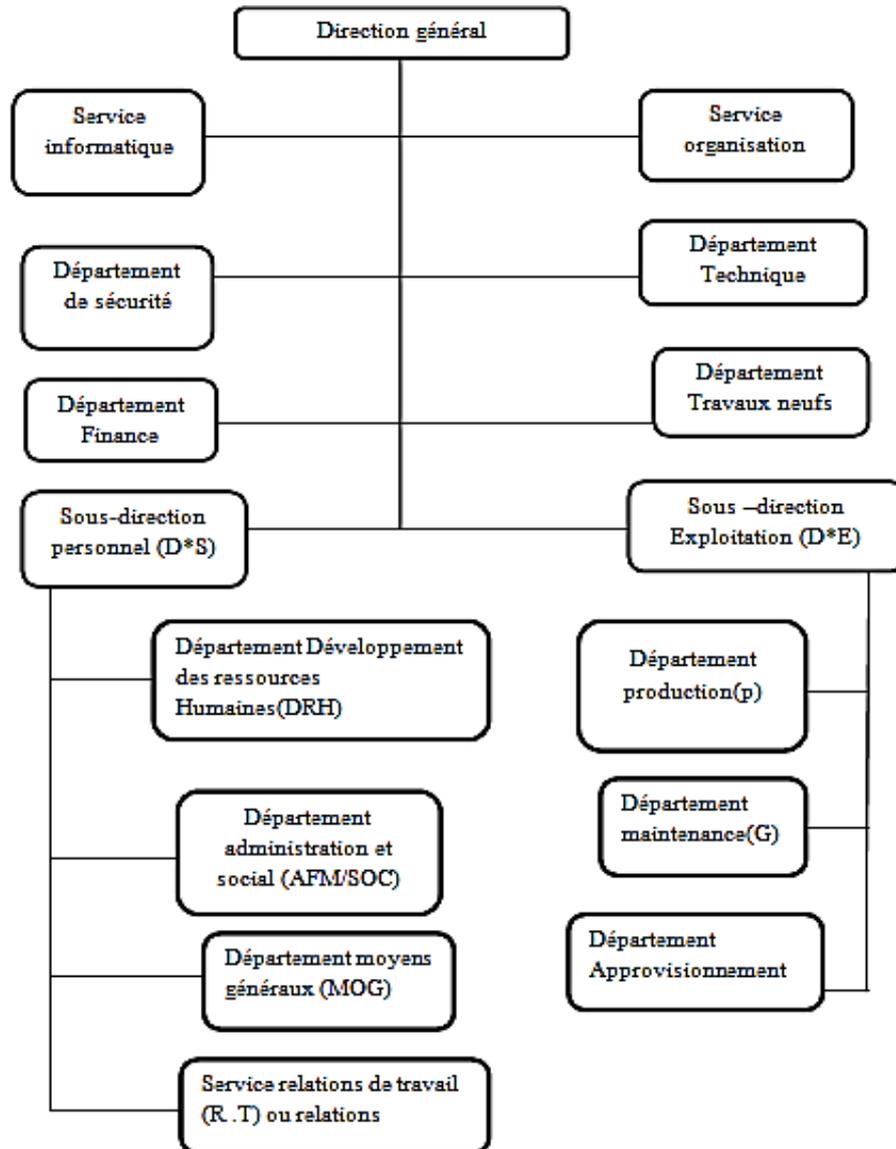


Fig I.6 : Organisation du complexe GL1K

#### 1.4.4 Présentation générale des installations du nouveau Méga train de GNL :

Le nouveau Méga train de GNL est entré en production le 27/03/2013, il est situé au nord-ouest du GL1K, il utilise le procédé APCI pour la liquéfaction du GN, sa capacité de production installée est de 4.5 Millions tonnes/ande GNL, soit 10 Millions de m<sup>3</sup> /an.

#### ❖ Caractéristiques de production :

Les caractéristiques de fonctionnement avec ou sans extraction de sous-produits sont données dans le tableau en [annexe 1].

Le Nouveau Train de GNL a été conçu pour une capacité de production de 4,5 Millions de tonnes de GNL par an, et peut fonctionner avec ou sans extraction des sous-produits (Ethane, Propane, Butane, Gazoline).

Une charge de gaz enrichi en Hélium est également produite pour alimenter l'usine de production d'Hélium mitoyenne (HELISON). En retour, Helison renvoie de l'azote gazeux et du Fuel Gas (48% azote, 52% méthane).

Etant donné que l'usine Helison est aussi alimentée en gaz enrichi en hélium par les unités existantes de GL-1/K, l'azote et le Fuel Gas retournés sont aussi utilisés par ces unités.

- **Capacité de Production contractuelle installée du méga train:**

- Production de GNL : 4.5 Millions tonnes/an
- Production d'Ethane: 164 700 tonnes/an
- Production de Propane: 207 600 tonnes/an
- Production de Butane: 171 400 tonnes/an
- Production de Naphta: 108 700 tonnes/an
- Production de Gaz de charge riche en Hélium: 163 Millions m3/an

- **Cas de marche prévus :**

Le Nouveau Train de GNL est conçu pour fonctionner selon 8 cas de marche :

**Cas de marche 1:** Charge lourde avec extraction des GPL à une température ambiante de 24°C et avec chargement de GNL.

**Cas de marche 2:** Charge lourde sans extraction des GPL à une température ambiante de 24°C et avec chargement de GNL.

**Cas de marche 3 :** Charge lourde avec extraction des GPL à une température ambiante de 40°C et avec chargement de GNL.

**Cas de marche 4 :** Charge légère avec extraction des GPL à une température ambiante de 24°C et avec chargement de GNL.

**Cas de marche 5 :** Charge de HassiR'Mel 2007 sans extraction des GPL à une température ambiante de 24°C et avec chargement de GNL.

**Cas de marche 6 :** Charge de HassiR'mel 2017 sans extraction des GPL à une température ambiante de 24°C et avec chargement de GNL.

**Cas de marche 7 :** Charge de HassiR'Mel 2007 sans extraction des GPL à une température ambiante de 24°C et avec chargement de GNL.

**Cas de marche 8 :** Charge lourde sans extraction des GPL à une température ambiante de 40°C et avec chargement de GNL.

❖ Le Nouveau Train de GNL (MEGA TRAIN) utilise le procédé **APCI (Air Product and Chemicals Incorporation)** pour la liquéfaction du GN, celui-ci utilise :

### **1- Une boucle de réfrigération (pré refroidissement) au propane comprenant :**

- Un compresseur principal de propane (15-MJO4) à 4 étages (51,8 MW) entraîné par une turbine à gaz FRAME 7 (81.9 MW). Sur le même arbre est attelé un moteur d'assistance au démarrage (helpermotor) de 17 MW.

- Une batterie d'évaporateurs.

- Une batterie d'aéro-réfrigérants.

❖ Le rôle de cette boucle de réfrigération est de :

- Pré refroidir environ 2/3 du réfrigérant principal de +40°C à -36°C avant son utilisation dans l'échangeur cryogénique principal où il va refroidir le GN.

- Pré refroidir le GN décarbonaté et sec de + 22°C à -35°C avant son entrée dans l'échangeur principal cryogénique.

### **2- Une boucle de réfrigération au réfrigérant mixte (MR), comprenant:**

- Un compresseur à 3 corps (16-MJOI-02-03) entraîné par une turbine à gaz. FRAME 7 (83.3 MW). Sur le même arbre est attelé un moteur d'assistance au démarrage (helpermotor) de 17 MW.

- Une batterie d'évaporateurs.

- Une batterie d'aéro-réfrigérants.

❖ Le rôle de cette boucle de réfrigération est de refroidir et liquéfier le GN dans l'échangeur principal cryogénique. Les différents constituants du réfrigérant mixte (MR) sont obtenus à partir du GN.

**NB :** Le troisième corps (16-MJO3, 28.6 MW) du compresseur MR est entraîné par la turbine du compresseur principal de propane.

### **3- Une boucle externe de réfrigération au propane comprenant:**

- Un compresseur de propane (20-MJOI) à 4 étages (22 MW) entraîné par une turbine à gaz FRAME 5 (31 MW).
- Une batterie d'évaporateurs.
- Une batterie d'aéro-réfrigérants

❖ Le rôle de cette boucle de réfrigération est de:

- Pré refroidir environ 1/3 du réfrigérant principal de +40°C à -36°C avant son utilisation dans l'échangeur cryogénique principal où il va refroidir le GN.
- Assurer la réfrigération pour les échangeurs de l'unité de fractionnement.

**4-** Un échangeur principal de type bobiné pour la liquéfaction. Cet échangeur est constitué d'une calandre en aluminium et de plusieurs faisceaux de tubes en aluminium enroulés autour d'un noyau central (mandrin).

### **❖ La salle de contrôle principale comprend:**

- Les postes de conduite et les équipements associés.
- Les salles engineering et maintenance.
- La salle de formation OTS (simulateur).
- La salle de réunion, cuisine, vestiaires...

### **❖ Le système de contrôle et de sécurité :**

- Il comprend un ensemble de systèmes regroupés à le sein de l'ICS (Instrument Control System).

- Le système de contrôle utilisé est le DCS EPKS (ExperionProcessKnowledge System R310).
- Il fait partie de l'ICS qui communique avec tous les autres systèmes de contrôle et de sécurité.

### ❖ Le système de détection feux et gaz :

Le Nouveau Train de GNL est équipé de systèmes de détection feux et gaz répartis sur l'ensemble du Train. Les alarmes sont reportées en salle de contrôle. En cas de feu ou fuite de gaz sur une zone du Train, et en cas de nécessité, l'opérateur dispose d'un système d'isolement et de dépressurisation de la zone concernée.

**NB :** Le Nouveau Train de GNL n'utilise pas d'eau de mer (sauf pour le réseau incendie). Il n'utilise pas non plus de la vapeur. Les échangeurs (rebouilleurs et réchauffeurs) utilisent de l'huile comme fluide de chauffage: Cette huile est elle-même chauffée par les gaz d'échappement de la turbine d'entraînement du compresseur principal de propane.

### I.4.5 Les unités du Nouveau Méga Train de GNL :

#### 1/ Unité de comptage :

Son rôle est de compter les quantités de GN consommées. Le comptage sert à fournir les éléments nécessaires pour le calcul des divers bilans de l'usine ainsi que pour le calcul des quantités consommées pour les besoins de facturation (la facturation est normalement établie sur la base des chiffres fournis par le fournisseur de matière RTE).

#### ➤ **Distribution du gaz naturel :**

##### **1- Nouveau Train de GNL :**

- Ligne de 36'' d'alimentation principale.
- Ligne de 6'' de 1er démarrage des turbo alternateurs.
- Ligne de 10'' d'appoint GN pour les besoins suivants :
  - ✓ Protection contre la mise sous vide des bacs de stockage de GNL, Butane, Propane, Gazoline.

- ✓ Balayage des collecteurs de torche
- ✓ Pilotes torche et brûlot
- ✓ Pressurisation / vaporisation du liquide au niveau du blow down.
- ✓ Gaz d'assistance au brûlot

### 2- Unités existantes (GL-1/K):

- Ligne de 20'' vers l'unité 10.
- Ligne de 24'' vers les unités 5P/6P
- Ligne de 6'' vers le réseau combustible.
- Ligne de 3'' vers le pôle 2 (torche, GPL, HELISON)

### 2 / Unité de compression :

Dans le but de faciliter sa liquéfaction, le GN doit être comprimé à la sortie de l'unité de comptage, jusqu'à une pression de 66 bars. Ce qui diminue l'énergie nécessaire pour la liquéfaction et réduit la section des conduites d'acheminement.

### 3/ Unités de traitement: Elle contient les unités suivantes :

#### *a. Unité de décarbonatation :*

Pour réduire la teneur en CO<sub>2</sub> contenu dans le GN qui arrive à 0.19% molaire et doit être réduit à  $\leq 50$  ppm, pour éviter la solidification dans l'unité de liquéfaction ; le solvant utilisé est le Méthyl Diéthanol Amine activé (MDEA) concentré à 40% massique, l'unité est conçue pour traiter un GN chargé jusqu'à 0,2% de CO<sub>2</sub>.

#### *b. Unité de déshydratation*

Lors de la liquéfaction, le GN est refroidi par étape depuis +35°C à -164°C. Si l'eau, contenue dans le gaz, n'est pas extraite elle se solidifierait et pourrait provoquer le bouchage de l'échangeur principal (15-MC05) d'où la baisse du rendement d'échange thermique. Le séchage est réalisé par trois (03) sécheurs qui fonctionnent alternativement, par circulation du gaz carbonaté du haut en bas sur des tamis

moléculaires ayant un haut pouvoir d'adsorption. Le taux d'humidité à la sortie doit être inférieur à 1ppm.

### *c. Unité de démercurisation :*

La dernière unité de traitement est celle de démercurisation. Elle est conçue pour éliminer le mercure du gaz d'alimentation et protéger la section cryogénique de l'usine. Cela se fait, par un démercuriseur (14-MD01) qui retient le mercure contenu dans le gaz, l'absorbant de ce dernier contient un lit de charbon actif imprégné du soufre qui réduit la teneur de mercure dans le gaz à moins de 5ng/m<sup>3</sup>.

### **4 / Unité de liquéfaction:**

La liquéfaction est la sixième étape dans le processus de production de GNL. C'est la plus importante, elle consiste à combiner entre l'abaissement de la température du gaz et l'augmentation de sa pression. C'est-à-dire, on comprime suffisamment le gaz puis on enlève sa chaleur par le biais d'un fluide réfrigérant (MR) dans l'échangeur principal (Main Exchanger 15-MC05). Ce fluide à son tour sera auto-refroidi à contre-courant dans le même échangeur cryogénique, ensuite par échange de chaleur dans des condenseurs dont le fluide réfrigérant est le propane. La chaleur du GN est ainsi enlevée, le GNL est liquéfié à une température de -164°C à la pression atmosphérique et il est stocké dans un bac de 150 000 m<sup>3</sup>.

### **5/ Unité de fractionnement:**

Son but est la séparation des constituants lourds (éthane, propane, butane, gazoline C5+) pour avoir un GNL qui répond aux spécifications commerciales. Le train de GNL est dimensionné pour pouvoir réinjecter totalement ces produits de fractionnement,

### **6 /Unité de stockage des produits finis:**

L'unité de stockage comprend:

- Un bac de stockage de GNL de 150 000 m<sup>3</sup>. Il est du type à confinement intégral avec une structure extérieure en béton armé précontraint à toit suspendu et une cuve interne en acier à 9% de nickel.
- Les gaz d'évaporation des bacs (boil off) et de retour des méthaniers durant le chargement sont repris par des compresseurs et envoyés dans le réseau Fuel Gas et/ou recyclés à l'entrée de l'unité de liquéfaction du Nouveau Train de GNL.

- Un bac de stockage de propane de capacité totale de 66 000 m<sup>3</sup> (type confinement intégral).
- Un bac de stockage de butane de capacité totale de 66 000 m<sup>3</sup> (type confinement intégral).
- Une unité de réfrigération de GPL (propane et butane). Cette unité reçoit:
  - ✓ Les gaz d'évaporation des bacs de propane et de butane du Nouveau Train. Ce boil off est liquéfié puis est renvoyé au stockage au Nouveau Train.
  - ✓ Une sphère de stockage de gazoline de capacité totale de 3 760 m<sup>3</sup>.

### **I.5. Volet Environnement :**

#### **I.5.1 Les principaux déchets générés par l'activité du complexe et leurs solutions sont :**

- Les déchets ménagers et assimilés sont évacués chaque jour vers la décharge publique Zef .
- Les déchets inertes sont évacués vers le nouveau centre d'enfouissement technique El-Gassaba.
- Les déchets d'herbes sont évacués vers des particuliers.
- Les huiles usagées sont évacuées vers le centre NAFTAL.
- Les déchets ferreux et non ferreux sont stockés au niveau de la zone de réforme du complexe en attendant la signature de la convention spécifique SONATRACH/ GL1.K – EPE/ ERE.
- Les matériaux d'isolation (polyuréthane, laine de verre et laine de roche) sont stockés dans les normes au niveau du complexe en attendant leur élimination par des entreprises spécialisées.
- Le charbon actif utilisé pour la filtration de la MDEA, il a une durée de vie de 03 ans, il sera éliminé après, par des entreprises spécialisées.
- Le charbon actif utilisé pour enlever le mercure du GN, il a une durée de vie de 03 ans, il sera éliminé après, par des entreprises spécialisées.

**NB:**les durées de vie du charbon actif dépendent des conditions d'exploitation et des teneurs des produits à retenir.

- Les quantités des boues huileuses déposées au niveau des bassins de séparation des eaux huileuses sont très faibles, elles seront stockées au niveau du complexe dans des conditions conformes en attendant leur élimination par des entreprises spécialisées.

### I.5.2 Consommation d'eau de mer:

La capacité de consommation d'eau de mer au niveau du complexe a été réduite à 98 % et ce suite à l'arrêt des anciennes installations (U5P, U6P, U10, etc...) qui avaient besoin d'énormes quantités d'eau de mer pour le refroidissement, les nouvelles installations du Méga Train sont refroidies à l'air, un résumé de la consommation actuelle en eau de mer est indiqué dans le tableau ci-après :

<b>Consommation eau de mer avant démarrage Méga Train</b>	<b>Consommation eau de mer après démarrage Méga Train</b>
55233 m <sup>3</sup> /h	720 m <sup>3</sup> /h
1325592 m <sup>3</sup> /jour	17280 m <sup>3</sup> /jour

*Tableau I.2 : Tableau comparatif entre les valeurs de consommation d'eau de mer avant et après l'installation du Méga Train*

### II. Introduction :

Le transfert thermique représente un aspect de l'échange d'énergie, incontournable dans l'ingénierie.

Ce chapitre sera structuré selon trois questions :

- Qu'est-ce que le transfert thermique ?
- Qu'est-ce que un échangeur de chaleur ?
- Quels problèmes peuvent rencontrer un échangeur ?

### II.1 Notions du. :

On définit un transfert de chaleur ou transfert thermique entre 2 corps comme une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les deux corps. On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

- La conduction thermique (diffusion thermique)
- Le rayonnement thermique
- La convection (libre / forcée)

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques, seuls la conduction et le rayonnement sont les modes fondamentaux de transmission de la chaleur, sachant que la convection est très importante et ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide.

#### II.1.2 Les modes de transfert de chaleur :

- **La conduction :**

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \vec{\text{grad}}(T)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}$$

Avec :

- $\varphi$  : Flux de chaleur transmis par conduction [W]
- $\lambda$  : Conductivité thermique du milieu [ $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ]
- $x$  : Variable d'espace dans la direction du flux [m]
- $S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur [ $\text{m}^2$ ]

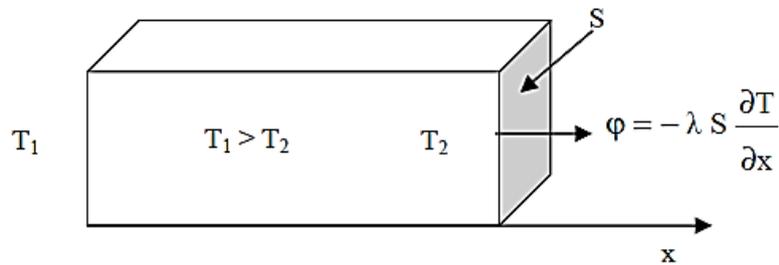


Fig. II.1 : Schéma du transfert de chaleur par conduction

- **Le rayonnement :**

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4)$$

Avec :

- $\varphi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement [W]
- $\sigma$  : Constante de Stefan Boltzmann [ $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ]
- $\epsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface
- $T_p$  : Température de la surface [K]
- $T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface [K]
- $S$  : Aire de la surface [ $\text{m}^2$ ]

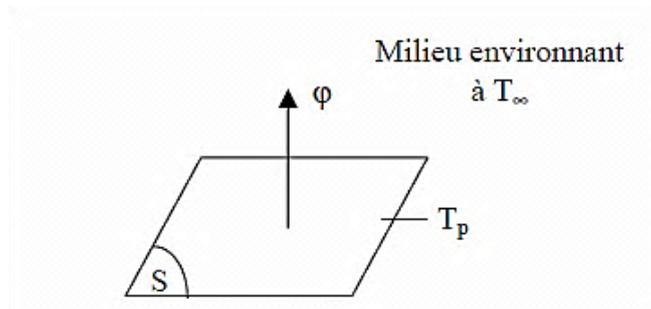


Fig. II.2 : Schéma du transfert de chaleur radiatif

- **La convection :**

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\varphi = h S (T_p - T_\infty)$$

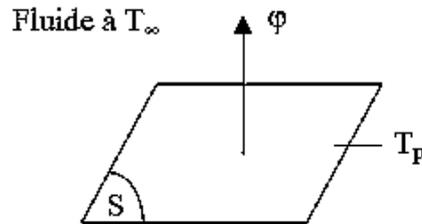


Fig. II.3: Schéma du transfert de chaleur convectif

Avec :

- φ: Flux de chaleur transmis par convection [W]
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W m^{-2} °C^{-1}$ )
- $T_p$  : Température de surface du solide [ $°C$ ]
- $T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide [ $°C$ ]
- S : Aire de la surface de contact solide/fluide [ $m^2$ ]

➤ On distingue deux types de convection :

**Convection naturelle :** Dans laquelle le mouvement du fluide est créé par des différences de densité et de température.

**Convection forcée :** Où le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

**Remarque :**

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection (h) est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

### II.1.3 Flux de chaleur :

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur et définit par la formule suivantes:

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt}$$

Avec :

S : L'aire de la surface [m<sup>2</sup>]

Q : La quantité de chaleur échangée [W]

t : Unité de temps [s]

### II.1.4 Flux de chaleur lié à un débit massique :

Lorsqu'un débit massique ( $\dot{m}$ ) de matière entre dans un système à la température  $T_1$  et sort à la température  $T_2$ , on doit considérer un flux de chaleur entrant correspondant au bilan suivant:

$$\phi_e = \dot{m} c_p (T_1 - T_2)$$

Avec :

$\phi_e$  : Flux de chaleur entrant dans le système [W]

$\dot{m}$  : Débit massique [kg.s<sup>-1</sup>]

$c_p$  : Chaleur spécifique [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$T_1, T_2$  : Températures d'entrée et de sortie [K]

## II.2. Les échangeurs de chaleur :

### II.2.1. Définition de l'échangeur de chaleur :

L'échangeur de chaleur est un équipement permettant de transférer la chaleur entre deux fluides ou plus à des températures différentes. Le même fluide peut conserver son état physique liquide ou gazeux, ou se présenter successivement sous les deux phases, c'est le cas des : condenseurs, évaporateurs, bouilleurs ou des tours de refroidissement.

Dans le domaine des échangeurs de chaleur les résistances thermiques par conduction et par rayonnement sont souvent négligées devant la résistance convective globale des deux fluides.

On distingue deux modes de transferts mis en jeu lors le fonctionnement d'un échangeur de chaleur, sont :

#### A- Le transfert de chaleur :

Dans le domaine des échangeurs de chaleur, la convection est le mode le plus important et le plus délicat à estimer en raison des fluides mis en jeu. Elle dépend fortement du type de fluide à utiliser, les vitesses mises en jeu et de la géométrie de l'échangeur.

Les résistances thermiques par conduction et par rayonnement sont souvent négligées devant la résistance convective globale des deux fluides.

### **B- Le transfert de masse :**

Le transfert de masse est l'élément moteur de l'analyse technique de l'échangeur, il est dépendant aux propriétés physiques des fluides circulant dedans et la géométrie de l'échangeur de chaleur. Il est caractérisé par des grandeurs adimensionnelles comme le nombre de Reynolds qui nous donne le régime d'écoulement mis en jeu.

### **II.2.2. Matériaux de construction**

Les matériaux de construction utilisables sont variés, leurs résistance à la corrosion et leurs coûts sont très différents (acier carbone, inox, titane, tantale, matière plastique, ...). L'utilisateur connaît souvent mieux que quiconque le matériau résistant le mieux dans les fluides qu'il exploite. Il est le seul à pouvoir accepter un compromis entre coût d'achat et durée de vie. C'est donc à lui d'indiquer les matériaux qu'il souhaite voir utiliser ou ceux qui sont prohibés.

### **II.2.3. Critères de classement des échangeurs de chaleur:**

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux [10]:

#### **a- Type de contact :**

- **Échangeurs à contact direct :** Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.
- **Échangeurs à contact indirect :** les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi.

#### **b- Classement suivant les types d'échange :**

##### **• Échangeur sans changement de phase :**

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase.

### • Échangeur avec changement de phase:

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents:

1- l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.

2- le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.

3- le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état.

### c- Classement suivant la disposition des écoulements :

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories :

- Même sens « co-courants ».
- Sens contraire « contre-courant ».
- Ou bien les vecteurs vitesses sont perpendiculaire l'un à l'autre ; il s'agit cette fois de « courant croisés »

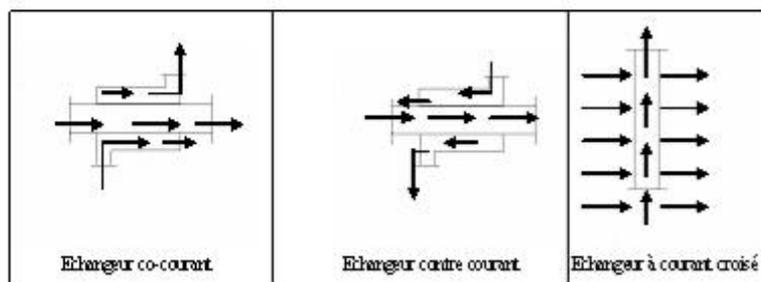


Fig.II.4 : Différents modes de circulation des fluides

### d- Classement suivant la compacité de l'échangeur :

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

### e- Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange :

On retiendra deux types de paroi :

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

### f- Classement suivant le procédé de transfert de chaleur :

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

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

### g- Classement technologique :

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- Echangeurs à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.

Pour des raisons économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

- *échangeur monotube* (figure 2a), dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent.
- *échangeur coaxial* (figure 2b), dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés, en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.
- *échangeur multitubulaire*, existant sous quatre formes :
  - *échangeur à tubes séparés* (figure 2c) : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.
  - *échangeur à tubes rapprochés* (figure 2d) : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans,
  - *échangeur à tubes ailettes* (figure 2e) : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.
  - *échangeur à tubes et calandre* (figure 2f) : c'est l'échangeur actuellement le plus répandu.

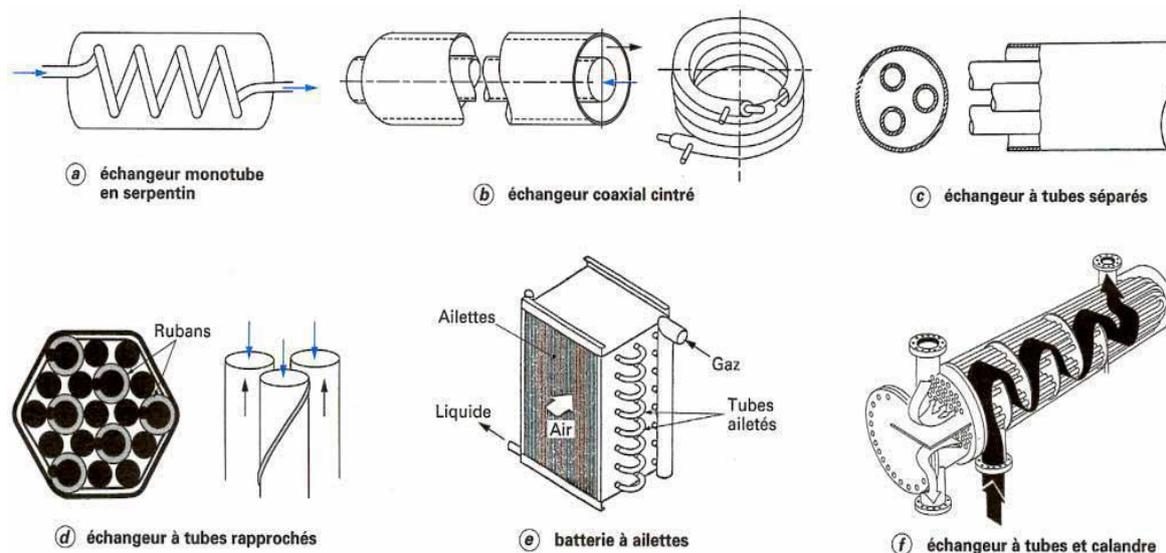


Fig. II.5 : Différents types d'échangeurs tubulaires

- **Echangeurs à plaques** : à surface primaire ou à surface secondaire (avec des ailettes)

Les échangeurs à plaques ont les meilleures performances thermiques. Cependant leur efficacité importante a fait qu'ils sont actuellement largement utilisés pour des applications diverses. On les rencontre dans l'industrie du froid et de la cryogénie, dans l'industrie chimique et pétrochimique, dans l'industrie pharmaceutique, dans l'industrie alimentaire... Leur technologie a aussi évolué tant dans la fabrication des plaques, du choix des matériaux que dans le mode d'assemblage des plaques. Initialement ce type d'échangeur a été conçu pour des fluides très propres mais l'uniformité de l'écoulement dans l'appareil, l'inexistence de zones mortes fait que leur encrassement est bien plus faible que pour les échangeurs tubulaires, de même que la simplicité de leur nettoyage permet d'étendre leur utilisation à des fluides plus encrassant.

- Les principaux types des échangeurs à plaques sont figurés ci-dessous :

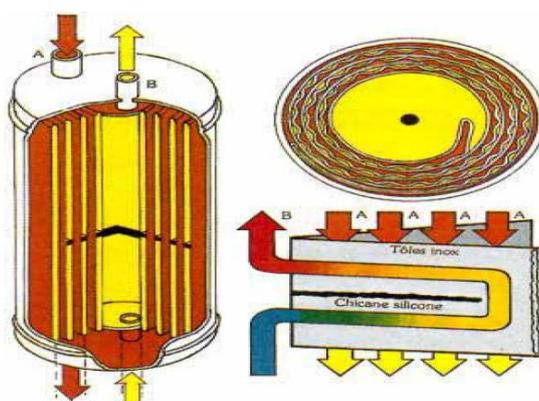


Fig. II.6 : Echangeurs spirales

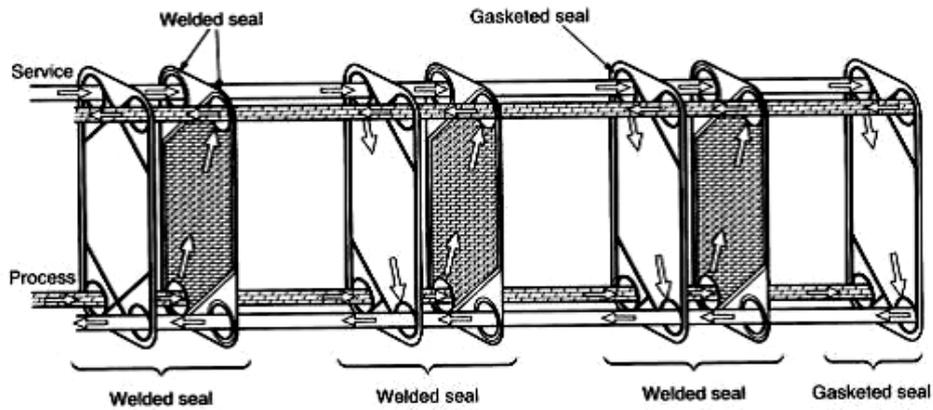


Fig. II.7 : Echangeurs à plaques soudées (partiellement ou totalement)

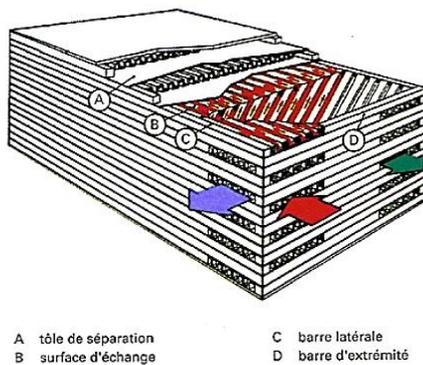


Fig. II.8 : Echangeur à plaques brasées

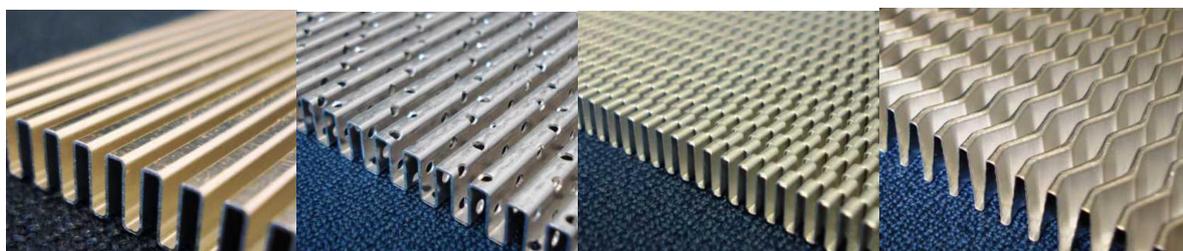
(Prise de vue des plaques de l'échangeur 15 MC-06- Complexe GLIK)



Fig.II.9 : Echangeurs à plaques et joints

- **Les différents types d'ailette des plaques :**

En pratique une surface est pourvue de plusieurs ailettes afin d'augmenter sa surface d'échange, donc améliorer le rendement d'échange de chaleur. On distingue plusieurs types d'ailettes.[9]



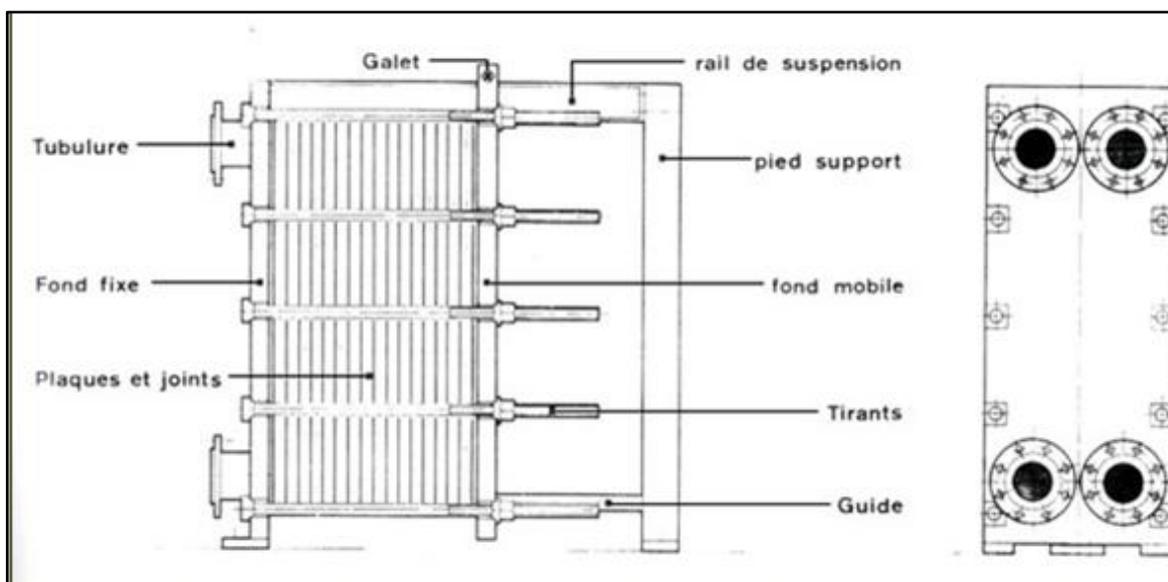
*Ailettes planes    Ailettes perforées    Ailettes serrées    Ailettes ondulées*

*Fig. II.10 : Les différents types d'ailette des plaques*

- **Nous nous limitons à une description générale des échangeurs à plaques et joints et les échangeurs à tubes et calandre.**

### II.3. Les échangeurs à plaques et joints :

On les trouve aujourd'hui dans divers secteurs de l'industrie. Ils sont constitués par un empilement de plaques métalliques embouties qui servent de surfaces d'échanges à deux fluides ou plus. Les plaques positionnées dans un bâti constitué par un flasque fixe et un flasque mobile sont serrées entre elles au moyen de tirants latéraux. Dans d'autres configurations, les plaques peuvent aussi être brasées ou soudées entre elles.



*Fig.II.11 : Les principaux composants échangeur à plaques et joints*

Le joint par plaque assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques.

Des cannelures droites ou en chevrons favorisent la turbulence des fluides (même pour des liquides visqueux) et assurent une bonne tenue à la pression du fait du grand nombre de contact métal/métal. On distingue les échangeurs à surface primaire (les plus communs) et les échangeurs à surface secondaire (on ajoute des ailettes plissées ou ondulées entre les plaques).

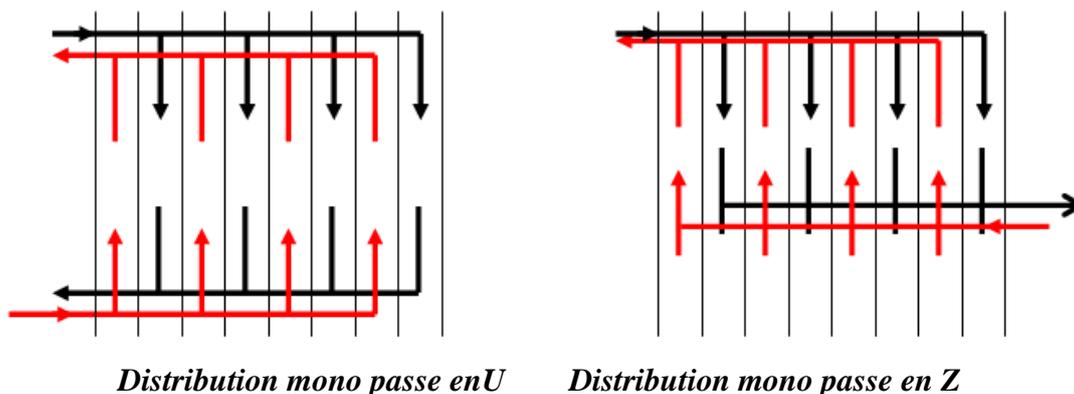


*Fig. II.12 : Plaques à surface secondaire*

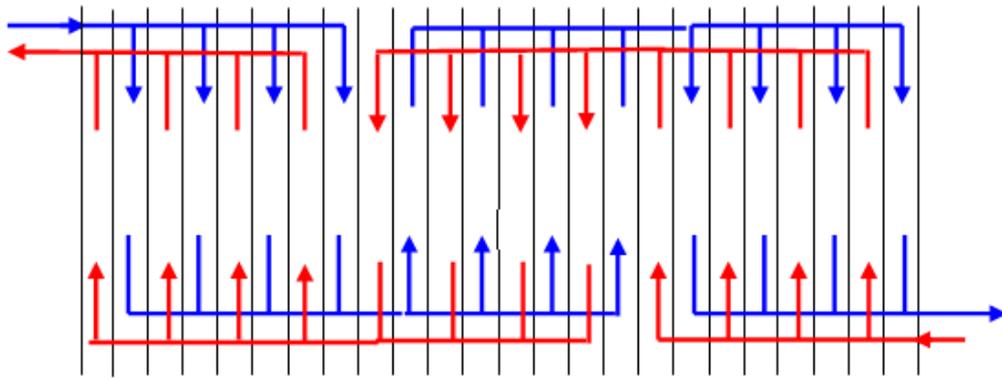
Par ailleurs, le domaine d'application des échangeurs à plaques est limité par la tenue des joints. On admet cependant, comme marges d'utilisation 0 à 250 °C en température et une pression voisine de 20 bars. L'utilisation de plaques soudées ou brasées a pour effet d'augmenter le niveau de température et de pression par rapport aux échangeurs à plaques et joints (de -40 à 500 °C en température et jusqu'à 30 bars en pression).

L'emploi de ce type d'échangeur a tendance à se généraliser de plus en plus car il est très efficace thermiquement et permet par ailleurs, en augmentant ou en réduisant le nombre de plaques, de répondre à un service thermique pouvant être variable.

- *distributions des fluides à l'intérieur des plaques :*



*Fig. II.13.a : les différentes distributions des fluides à l'intérieur des plaques*



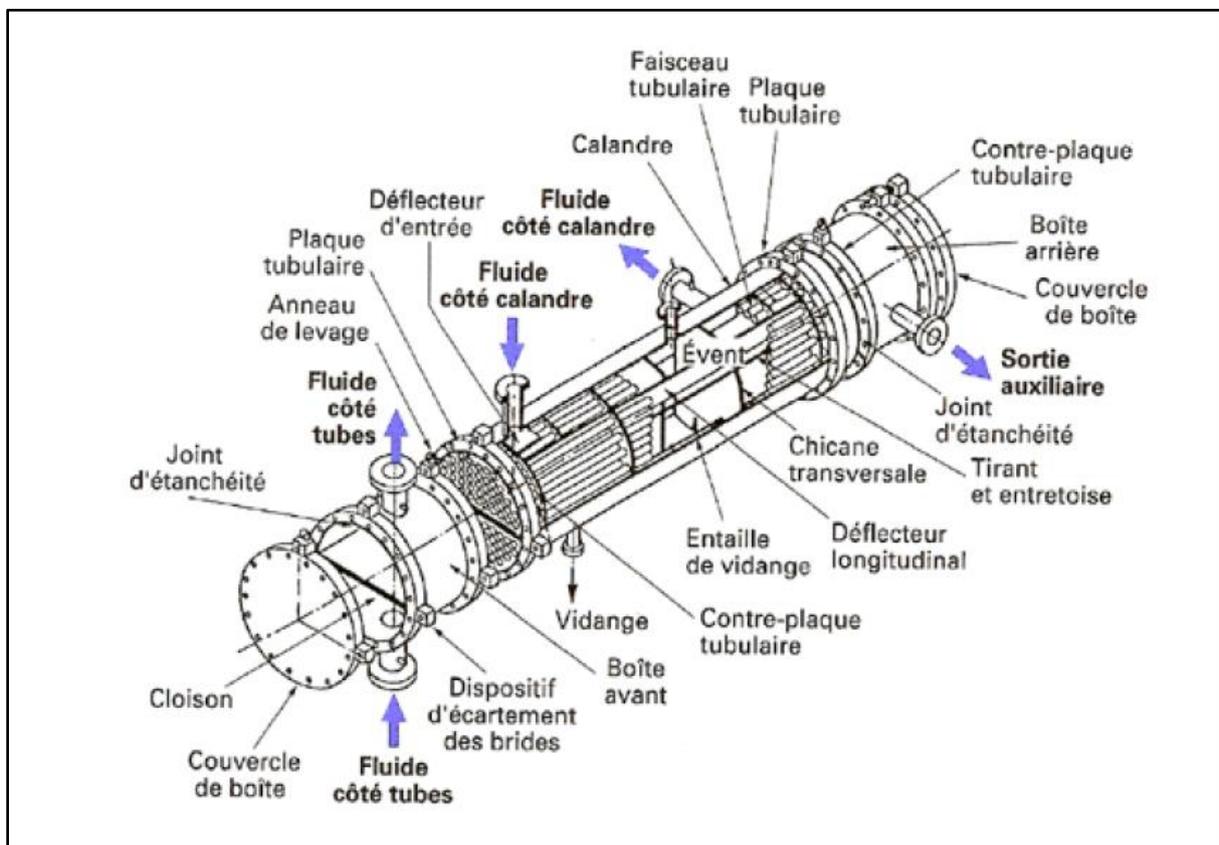
*Distribution à trois passes sur chaque fluide*

Fluide chaud Fluide froid

*Fi. II.13.b : les différentes distributions des fluides à l'intérieur des plaques [3]*

#### II.4 Les échangeurs à tubes et calandre :

L'échangeur sous forme d'un faisceau de tubes, disposés à l'intérieur d'une enveloppe dénommée calandre. L'un des fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes.



*Fig.II.14 : Echangeur à tubes et calandre*

Les éléments essentiels constituant d'un échangeur à tubes et calandre sont :

- **La boîte d'échangeur (distributeur)** : c'est l'organe qui reçoit et distribue le fluide à l'extrémité du faisceau de tubes. En général, un échangeur comporte deux distributeurs, à l'exception de la configuration de tubes en U ou en épingle.
- **La calandre (virole)** : c'est l'enveloppe cylindrique qui contient le faisceau tubulaire.
- **Les plaques tubulaires** : Ce sont des plaques percées et supportant le faisceau tubulaire aux extrémités de la calandre. Leur épaisseur est calculée de façon à tenir compte de la différence de pression entre le fluide dans la calandre et le fluide dans les boîtes ainsi que des contraintes dues aux différences de dilatation entre tubes et calandre. Les tubes sont fixés sur la plaque par dudgeonnage (Opération qui consiste à assembler par refoulement de matière l'extrémité d'un tube sur la plaque Tubulaire.) Ou par soudure ou par les deux, la soudure servant alors à assurer l'étanchéité.

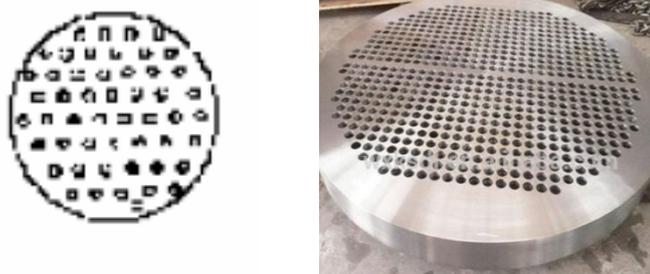


Fig II.15 :Plaque tubulaire

- **Le faisceau tubulaire**: ce sont généralement des tubes (lisses ou ailettes) normalisés disposés de deux façons possibles : le pas carré et le pas triangulaire.

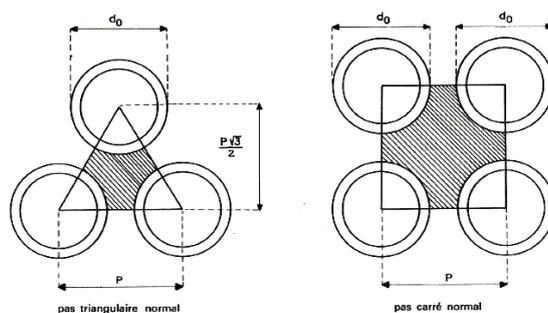


Fig II.16 : Disposition des tubes

II.4.1. Les différents types d'ailettage des tubes :

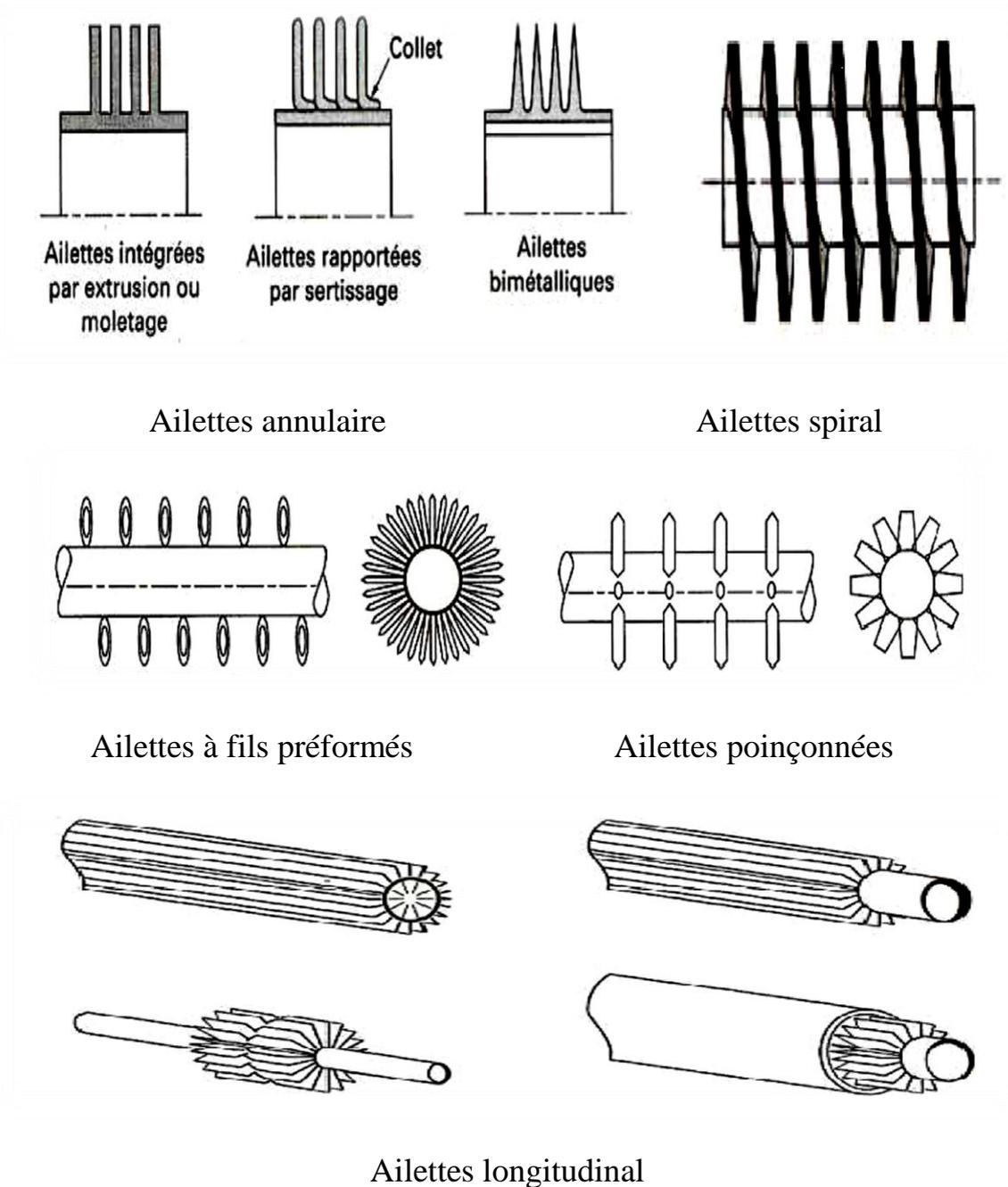
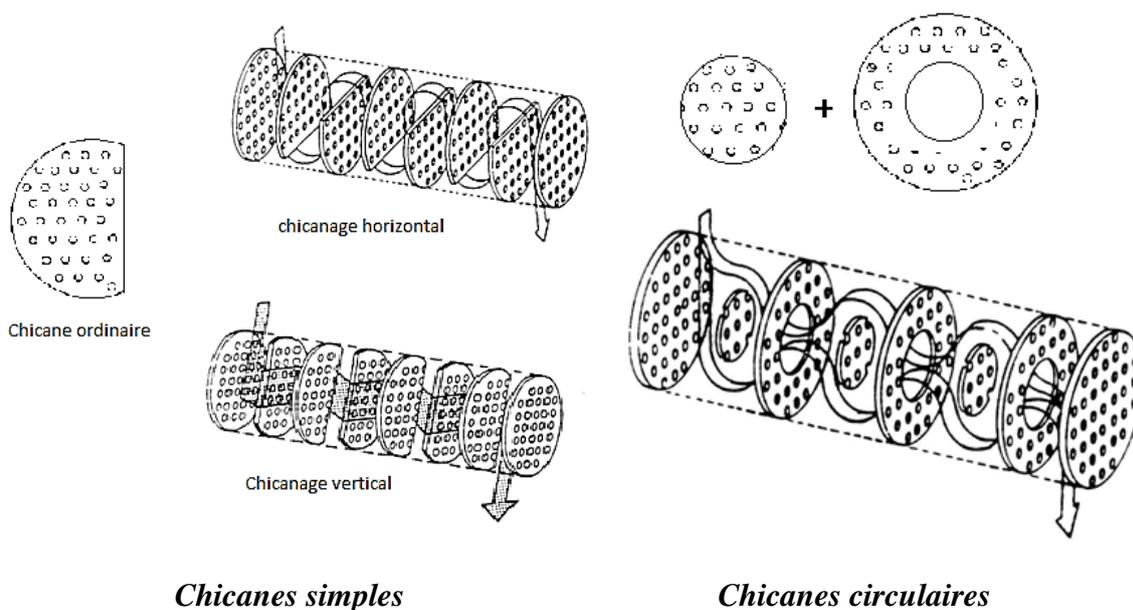


Fig. II.17 :Autre différent type d'ailettes [4]

- **Chicanes** : pouvant être de forme horizontales ou transversales, elles servent à assurer une bonne rigidité du faisceau et un bon brassage du fluide, car en augmentant la vitesse d'écoulement de celui-ci, elles améliorent le coefficient d'échange. Cependant, un compromis doit être réalisé entre le coefficient d'échange et les pertes de charge.



*Chicanes simples*

*Chicanes circulaires*

Fig. II.18 : les types de chicanage [8]

- **Tirants et entretoises** : assurent la liaison et l'espacement des chicanes et confèrent de la rigidité au faisceau.
- **Détecteurs** : assurent l'orientation de l'écoulement du fluide afin d'assurer une bonne distribution de celui-ci et protègent dans certains cas, le faisceau contre l'impact direct du fluide entrant (vapeurs saturées par exemple).
- **Events et vidange** : dans toute conception d'un échangeur destiné pour le réchauffage ou le refroidissement d'un liquide, il est impératif de prévoir des piquages de vidange et d'évents afin d'éliminer d'éventuelles poches de gaz qui en stagnant dégradent les performances de l'échangeur.

## II.4.2. Les types des échangeurs à tubes et calandre :

### a- Echangeur de chaleur 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, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre. [4]

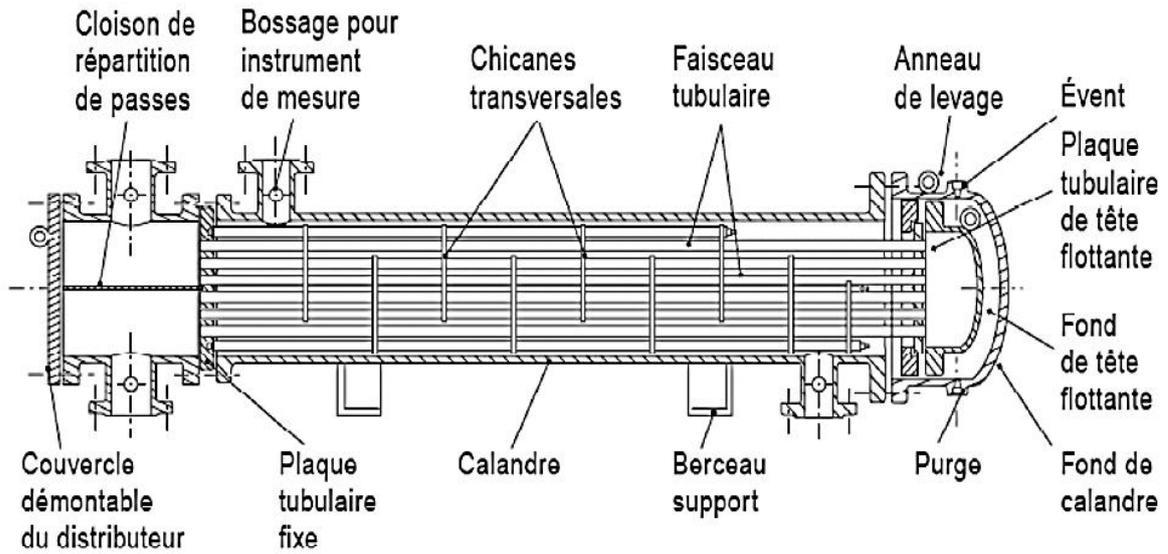


Fig. II.19 : Échangeur à tête flottante

**b- Echangeur à plaque tubulaires fixes :**

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre. [4]

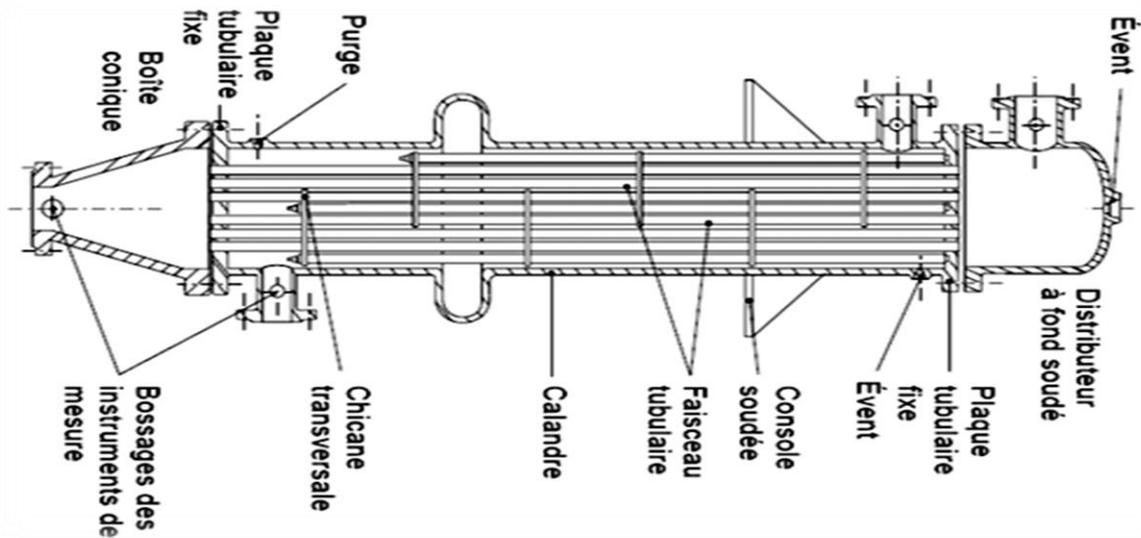


Fig. II.20 : Échangeur à plaque tubulaire fixe

**c- Echangeur à tubes en U :**

Le faisceau est constitué de tubes coudés en forme d'épingle, il n'est donc porté que par une seule plaque tubulaire. Ce système permet la libre dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable autrement que par voie chimique.

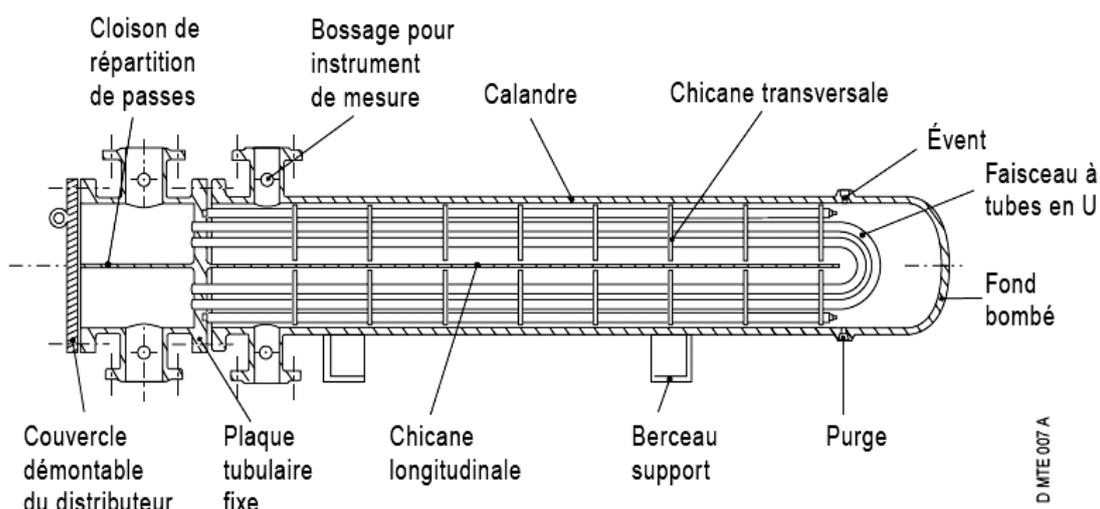


Fig. II.21 : Échangeur à tube en U

#### II.4.3. Critères du choix de l'ordre de passage des fluides :

Côté tube :

- L'eau de refroidissement (pour gagner éventuellement la quantité évacuée par convection naturelle).
- Le fluide le plus corrosif (le remplacement des tubes coûte moins cher que celui de la calandre).
- Le fluide le plus sale (il est plus simple de nettoyer l'intérieur des tubes que le faisceau à l'extérieur).
- Le fluide le moins visqueux (il est plus simple d'améliorer le coefficient d'échange de ce côté-ci des tubes).
- Le fluide sous haute pression (l'épaisseur des tubes et les dégâts seraient moindres).
- Le liquide de moindre débit volumique (On améliore mieux les coefficients de ce côté-ci).
- Le fluide soumis au moindre écart de température (Pour des écarts importants  $> 100^\circ$ , tout le faisceau devrait pouvoir se dilater, par conséquent le fluide changera de côté). [3]

#### II.4.4. Echangeurs de type TEMA :

Les échangeurs de chaleur ne sont pas des appareils normalisés, bien que bons nombres d'éléments les constituant, le sont. Les échangeurs tubulaires sont des appareils standardisés et codifiés. La construction des échangeurs tubulaires suit les règles de codes nationaux et internationaux: Le **T.E.M.A** (Tubularexchangersmanufacturers association U.S.A). En France c'est le S.N.C.T (syndicat national des chaudronniers et tôliers France). Ces codes

suivent les normes de construction des réservoirs sous pressions de leurs pays, par exemple l'A.F.N.O.R pour la France et l'A.S.M.E pour les U.S.A. Le **T.E.M.A** est le code qui fait autorité internationale.

En **Algérie**, l'E.N.C.C de HassiAmeur (Oran) est une entreprise qui fabrique des échangeurs de chaleurs de type multitubulaires, elle utilise le code **T.E.M.A** et l'**A.S.M.E**.

La combinaison de distributeurs, de calandres et de fonds de calandre (boîtes arrière) permet de réaliser un type d'échangeur TEMA, qui est désigné par trois lettres représentant respectivement le type de boîte avant, de calandre et de boîte arrière de l'échangeur.[L'annexeN°2]donne quelques combinaisons possibles d'échangeurs de type TEMA.[1]

Les lettres figurant dans ce tableau correspondent respectivement à :

### **Pour les distributeurs :**

- A** : distributeur (boîte avant) avec fond démontable
- B** : distributeur à fond soudé
- C** : plaque fixe et couvercle démontable
- D** : fond spécial pour haute pression
- E** : plaque fixe et couvercle démontable

### **Pour les calandres :**

- E** : il s'agit d'une calandre à une seule passe
- F** : calandre à deux passes et chicane longitudinale
- G** : calandre dont l'écoulement est divisé par une chicane longitudinale
- H** : calandre dont l'écoulement est doublement divisé par des chicanes longitudinales
- J** : calandre dont l'écoulement est divisé par une chicane transversale
- K** : rebouilleur type Kettle
- X** : calandre dont l'écoulement est croisé

### **Pour les fonds de calandres (boîtes arrière) :**

- L** : plaque tubulaire fixe (formant bride de calandre) et faisceau démontable (boîte type A)
- M** : plaque tubulaire fixe et faisceau démontable
- N** : plaque tubulaire fixe (soudée) et faisceau démontable
- P** : fond flottant (glissant) avec presse étoupe extérieur
- S** : fond flottant avec anneaux démontables
- T** : fond flottant
- U** : faisceau de tubes en U
- W** : fond flottant avec presse étoupe extérieur à détecteur de fuite

### II.4.5. Recommandations du TEMA :

Le standard TEMA introduit les recommandations suivantes pour la construction des échangeurs :

- \_ Les tolérances de fabrication des différents éléments constituant un échangeur sont proposées, et autres paramètres sont également mentionnés.
- \_ Un modèle de feuille de calcul (ou notice des spécifications) est recommandé.
- \_ Une plaque minéralogique est demandée sur ce type d'échangeurs, sur la base d'un inspecteur des mines.
- \_ Le fabricant doit garantir les performances thermiques et mécaniques de l'échangeur durant l'exploitation et ce conformément aux doléances du client, soit 12 mois après livraison, quand l'échangeur est utilisé dans les bonnes conditions.

Ajoutons que la durée de vie et la satisfaction du client sont obtenues pour les unités qui sont bien conçues et construites avec soins. Une installation correcte et une maintenance préventive sont de la responsabilité de l'utilisateur. Néanmoins, il est utile de rappeler que le manque de performances d'un échangeur peut provenir de plusieurs origines, dont :

- L'encrassement excessif.
- L'accumulation d'air ou de gaz dans l'appareil suite à un mauvais pompage, chute de pression ou mauvais dégazage.
- Les conditions opératoires différentes de celles pour lesquelles l'échangeur a été conçu.
- Une mauvaise distribution du fluide.
- Une mauvaise conception thermique de l'appareil.

Par ailleurs, le TEMA ajoute :

- Il faut permettre le démontage de l'échangeur.
- Prévoir des fondations et des boulons de fondations.
- Dispositions à prendre pour le nettoyage
- Prévoir des vannes et des by-pass afin de permettre l'inspection de l'échangeur et sa maintenance.
- Prévoir également des soupapes de dégazage facilitant l'évacuation des gaz qui peuvent s'accumuler.

- Une attention particulière doit être accordée au problème de vibrations, afin d'éliminer ou tout au moins minimiser les vibrations qui peuvent apparaître dans les échangeurs fonctionnant par exemple sous haute pression.
- Lors du démarrage, envoyer d'abord le fluide froid suivi du fluide chaud pour réduire au mieux les dilatations du faisceau et éviter les chocs thermiques.
- La maintenance régulière des échangeurs est une garantie d'une durée de vie allongée. Le nettoyage peut être chimique ou mécanique. Dans le cas du nettoyage chimique, la connaissance de la composition des dépôts par analyse permet de prévoir les bons produits dissolvant du tartre. [1]

### II.5. Problèmes de fonctionnement des échangeurs de chaleur :

Lors de l'exploitation des échangeurs de chaleur, les industriels sont le plus souvent confrontés aux phénomènes liés à l'encrassement, la corrosion et les vibrations, voir la tenue mécanique des appareils. La tenue mécanique des échangeurs peut être considérée comme un problème à part, dans la mesure où pour les échangeurs de géométrie classique, elle est réglementée par des textes spécifiques et est en phase d'être régie par une normalisation européenne.

#### II.5.1 Encrassement :

L'encrassement englobe tout processus d'accumulation de particules solides contenues dans un fluide en circulation, soit par dépôt de tartre, soit par apparition de micro-organismes d'origine biologique.



Fig. II.22 : Echangeur propre (à droite) et échangeur sale (à gauche)

### II.5.1.1 Types d'encrassement

Selon le mécanisme de dépôt, on convient de classer les différents types d'encrassement en six catégories :

- encrassement particulaire
- corrosion
- entartrage
- encrassement biologique
- encrassement par réaction chimique
- encrassement par solidification

#### ➤ **Encrassement particulaire :**

Ce type d'encrassement concerne les phénomènes de dépôt, puis d'accumulation de particules solides sur les surfaces d'échange, charriées par un fluide en écoulement.

Ainsi, l'eau d'une chaudière (produits de corrosion), ou d'une tour de refroidissement (Poussières, oxydes et hydroxydes de fer) ou encore les fumées industrielles qui déposent un résidu solide de combustion sont considérés comme des systèmes provoquant de l'encrassement particulaire.

#### ➤ **Corrosion :**

Il s'agit ici du résultat d'une réaction chimique (ou électrochimique) entre la surface d'échange et le fluide en écoulement influencée par plusieurs paramètres dont : la nature du métal, son état de surface, la nature de l'agent agressif et les conditions physico-chimiques (température, vitesse d'écoulement, ...).

Cela se traduit par un encrassement dû aux produits de la réaction qui se déposent sur la surface d'échange (on parle alors de corrosion in situ). En revanche, les produits de corrosion créés ailleurs, entraînent un encrassement particulaire (corrosion ex situ).

#### ➤ **Entartrage :**

Il intervient généralement quand on est en présence d'une production de solution solide à partir d'une solution liquide. Ce phénomène est rencontré surtout dans les échangeurs refroidis à l'eau, dans les unités de dessalement d'eau de mer ou saumâtre, dans les chaudières et les systèmes géothermiques.

### ➤ Encrassement biologique :

Le développement de micro-organismes tels que les bactéries, les algues,..., crée un film au contact de la surface thermique. Ce type d'encrassement bien qu'apparaissant comme un processus naturel (les bactéries sont omniprésentes dans l'eau) peut être particulièrement favorisé par les conditions physico-chimiques rencontrées dans les échangeurs.

### ➤ Encrassement par réaction chimique :

Il apparaît quand une réaction chimique se déroule près de la surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Ce phénomène se traduit souvent par une polymérisation. En général, les domaines concernés sont l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les systèmes de chauffage utilisant des fluides organiques.

### ➤ Encrassement par solidification :

La solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie se traduit parfois par la formation d'une couche de glace ou givre entraînant l'encrassement par solidification des conduites. On peut tout simplement observer le dépôt d'hydrocarbures paraffiniques (possédant un point de congélation élevé) au contact d'une surface d'échange froide. Enfin, on peut assister en réalité plutôt à un mode combiné, car la plupart des dépôts sont le résultat d'au moins deux types d'encrassement. Ainsi, un échangeur refroidi par eau peut être sujet à l'entartrage, à l'encrassement particulaire et à l'encrassement biologique par exemple.

### II.5.1.2 Impact de l'encrassement sur le dimensionnement des échangeurs :

D'un point de vue thermique, l'encrassement d'un échangeur se traduit par la diminution de ses performances. En effet, les différents dépôts localisés sur la surface d'échange génèrent une résistance thermique supplémentaire qui s'oppose au transfert de chaleur à travers la paroi et par suite une diminution du coefficient d'échange global est observée conformément à l'expression déjà établie (Cas d'encrassement des tubes) :

$$K_e = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{D_e}{D_i} + r_{e_i} \frac{D_e}{D_i} + \frac{e}{\lambda} \frac{D_e}{D_m} + r_{e_e} + \frac{1}{h_e}}$$

Avec :  $D_e/D_m$  désigne le rapport du diamètre extérieur de la conduite au diamètre moyen ( $D_m = (D_e + D_i)/2$ ) et « e » l'épaisseur du tube. L'expression s'écrit encore :

$$\frac{1}{K_e} = R_{th} = \left( \frac{1}{h_i} \frac{D_e}{D_i} + \frac{D_e}{\lambda} + \frac{e}{\lambda} \frac{D_e}{D_m} \right) + r_{e_i} \frac{D_e}{D_i} + r_{e_e}$$

C'est à dire sous la forme :

$$\frac{1}{K_e} = R_{th} = \frac{1}{K_{in}} + r_{e_i} \frac{D_e}{D_i} + r_{e_e}$$

En d'autres termes, la résistance thermique  $R_{th}$  de l'échangeur après encrassement, est égale à la résistance thermique de l'échangeur neuf  $\frac{1}{K_{in}}$  majorée des résistances d'encrassement interne ( $r_{e_i} \frac{D_e}{D_i}$ ) et externe  $r_{e_e}$ . [1]

En fait, l'évaluation de la résistance d'encrassement pour des conditions d'utilisation données est importante car elle peut guider le projeteur de l'échangeur dans le surdimensionnement éventuel de la surface d'échange pour atténuer le phénomène d'encrassement. Deux approches sont envisagées pour évaluer la résistance d'encrassement :

- Utilisation des tables, tables TEMA1 par exemple, pour déterminer la résistance thermique d'encrassement dû à certains liquides, ou d'autres tables relatives à l'encrassement côté gaz industriels.
- Utilisation de données issues de l'utilisateur possédant une certaine expérience dans le domaine des échangeurs.

### **II.5.1.3 Coefficient d'excès de surface $C_s$ :**

En ce qui concerne le surdimensionnement de la surface d'échange, la prise en compte de l'encrassement peut encore être traduite en termes d'excès de surface, caractérisé par un coefficient  $C_s$  (en %) :

$$C_s = \frac{S - S_{in}}{S_{in}} \times 100$$

Avec  $S$  et  $S_{in}$  respectivement surfaces d'échange après et avant encrassement. Notons qu'ici le calcul de  $S$  et  $S_{in}$  est effectué de manière à échanger le même flux thermique avec la même différence de température logarithmique moyenne DTLM. [1]

❖ **Valeurs recommandées de  $C_s$  :**

Le tableau suivant donne quelques valeurs du coefficient d'excès de surface pouvant servir de limites acceptables avec les domaines d'utilisation. Quoiqu'il en soit, on recommande d'éviter un surdimensionnement dépassant la valeur de 50 %. Dans ce cas, d'autres solutions sont envisageables telles que le choix de deux échangeurs en parallèle ou un dispositif de nettoyage en continu.

Valeurs de $C_s$	domaines d'utilisation
$C_s \approx 10 \%$	valeur minimale d'un surdimensionnement prenant en compte l'encrassement
$C_s \approx 15 \%$ à $25 \%$	valeurs usuelles (pour un grand nombre de cas)
$C_s \approx 30 \%$ à $50 \%$	surdimensionnement extrême (à utiliser pour les cas difficiles et là où il y'a risque de pénalités sévères si l'échangeur ne réalise pas les performances)

*Tableau II.1 : Limites acceptables de  $C_s$ [1]*

**II.5.1.4 Les paramètres influençant l'encrassement :**

Plusieurs paramètres ont été identifiés durant la conception comme ayant une influence directe sur l'encrassement des échangeurs. Ces paramètres sont :

- Les propriétés des fluides et leurs aptitudes à encrasser
- La température et la rugosité de surface.
- La vitesse d'écoulement et les effets hydrodynamiques.
- Le matériau des tubes.
- Les impuretés et l'étanchéité de l'échangeur
- Les produits solides en suspension.
- Le fluide encrassant du côté tube.
- L'écoulement côté calandre.
- La géométrie et l'orientation de l'échangeur
- Les changements saisonniers de température.
- Le changement de phase (la condensation, la vaporisation)

**II.5.1.5 Prévention de l'encrassement :**

Il existe des procédés mécaniques ou chimiques de prévention de l'encrassement pendant le fonctionnement de l'échangeur. L'objectif de ces procédés est non seulement une amélioration notable des performances, mais également une augmentation de la durée de service entre deux arrêts programmés (pour maintenance). Le tableau suivant représente quelques techniques utilisées pour prévoir l'encrassement des échangeurs :

Phase fonctionnement	Phase construction et montage	Phase fonctionnement	Phase d'arrêt
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix de type d'échangeur</li> <li>• choix de la géométrie et de la configuration</li> <li>• choix des conditions de fonctionnement (température, débit,...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• assurance qualité sur la fabrication</li> <li>• protection pendant le transport et lors du stockage</li> <li>• opération de nettoyage et de passivation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maintien des conditions de fonctionnement (températures, débit,...)</li> <li>• prétraitement des fluides</li> <li>• utilisation d'additifs (inhibiteurs, antitartres, dispersants, acides)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• démontage et nettoyage manuel</li> <li>• attaques mécanique du dépôts(perçage,...)</li> <li>• nettoyage hydraulique à la lance(vapeur,air)</li> </ul>

Tableau II.2 : Actions envisageable pour limiter l'encrassement dans les échangeurs

**II.5.2. Les vibrations :**

L'importance des vibrations doit amener le concepteur d'un échangeur à prendre en considération ce volet au même titre que le transfert de chaleur et les pertes de charges. Les échangeurs de chaleur sont soumis à leurs propres vibrations générées par l'écoulement des fluides circulant dans la calandre<sup>3</sup> (sans oublier les vibrations classiques induites par les chocs,...). Il s'agira pour nous d'introduire les vibrations d'un système et de voir les caractéristiques vibratoires des tubes telles que fréquence propre et amortissement, ainsi que les caractéristiques hydrauliques (écoulement, instabilité,...).



Fig. II.23 : Déformation de la tôle extérieure d'un échangeur de chaleur (type à plaques brasées- unité de liquéfaction du GN- GL1K)

### II.5.3 La maintenance des échangeurs :

- Durant l'exploitation, il faut faire attention à la réduction de la vitesse d'écoulement qui peut augmenter
  - Veiller à la formation du personnel exploitant qui doit être au courant des mécanismes d'augmentation de l'encrassement.
  - Les échangeurs compacts sont plus sensibles à l'encrassement que le reste des échangeurs, il faut faire autant attention aux filtres, aux doseurs chimiques, ... que pour les pompes.
  - Etablir des procédures claires lors de blocages.
  - Etablir des procédures claires pour l'entretien des échangeurs.
  - Le nettoyage des échangeurs se fait de plusieurs façons selon le type d'échangeur, la nature de l'application, la nature des fluides en circulation...
  - Lorsqu'on ne peut pas démonter les échangeurs, on peut : Faire circuler de l'eau, des solutions alcalines ou acides, ou autre solutions chimiques permettant de dissoudre les dépôts, d'injecter de l'air ou de l'azote dans le fluide ce qui permet de disloquer les dépôts.
- [1]

### II.6 Evaluation des performances d'un échangeur :

L'étude d'un échangeur peut se faire selon deux méthodes différentes :

- Méthode du nombre d'unité de transfert : *NUT*, appelée méthode de l'efficacité.
- Méthode de la différence moyenne logarithmique : (*DTLM*).

#### II.6.1. Evaluation par la méthode DTLM (Différences de Températures Logarithmiques Moyenne) :

Cas où l'échangeur est à dimensionner dont les débits des fluides chauds et froids et leurs températures sont connus à l'entrée et à la sortie. L'objectif consiste alors à déterminer:

- la surface d'échange requise
- la géométrie appropriée en fonction du type d'échangeur, du coût, de la masse et de l'encombrement.
- On fixe  $T_{CS}$  et  $T_{FS}$
- Evaluer  $\Delta T_{LM}$ .
- Détermination du flux  $\phi = US\Delta T_{LM}$  pour une première itération.
- Utiliser les nouvelles valeurs de  $T_{CS}$  et  $T_{FS}$  pour refaire itération si c'est nécessaire.

### II.6 .2. Evaluation par la méthode NUT :

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

- Calculer  $Nut = \frac{US}{C_{\min i}}$
- Déterminer  $\frac{C_{\min i}}{C_{\max i}}$  et tirer E à partir des abaques.
- Calculer  $\phi = E C_{\min i} (T_{ce} - T_{fe})$ .
- Calculer  $T_{CS}$  et  $T_{FS}$  par  $\phi = m_c C_c (T_{ce} - T_{cs}) = m_f C_f (T_{fs} - T_{fe})$ .

### II.7. Conclusion

Vu de l'importance industrielle des échangeurs de chaleur, il existe une diversité des différents types qui ont des nombreuses applications. En outre leurs domaines d'étude sont vastes, citons : le transfert thermique, la mécanique des fluides, mécanique des matériaux, encrassement.

L'échangeur de chaleur ne contient aucune pièce mécanique mobile, et il peut subir plusieurs problèmes techniques, donc une maintenance préventive est nécessaire afin d'éviter ses problèmes car leurs maintenance corrective est coûteuse.

Le dimensionnement de cet appareil se fait selon deux méthodes NUT et DTLM, dont La dernière est traitée dans le chapitre suivant.

### III.1. Introduction :

La section traitement Gaz constitue la première étape dans le processus de liquéfaction, dont le but est de baisser les teneurs en eau, en CO<sub>2</sub> et en mercure à des seuils tolérés par le processus.

De ce fait, tout dysfonctionnement ou indisponibilité des équipements installés au niveau de la section peuvent provoquer des perturbations comme c'étaient le cas récemment des échangeurs à plaques 12-MC22A/B/C de la section de décarbonatation, qui ont provoqués l'arrêt du complexe suite à leurs indisponibilité, causé par des fuites externes de l'aMDEA.

### III.2. Description et rôle des échangeurs à plaques 12-MC22A/B/C au niveau de la section décarbonatation :

#### ❖ La nécessité d'extraire le CO<sub>2</sub> du gaz naturel :

Durant le processus de liquéfaction, le gaz naturel est refroidit progressivement de +35°C à -162°C. Durant la même étape, le CO<sub>2</sub> contenu dans le gaz naturel, s'il n'était pas extrait, se solidifierait et provoquerait le bouchage de l'échangeur principal où est réalisée la liquéfaction.[11]

La méthyl-diéthanolamine, ou MDEA, est un composé chimique de formule  $C_5H_{13}NO_2$  c'est un liquide incolore ou jaune pâle à l'odeur ammoniacale. Il est miscible à l'eau, à l'éthanol et au benzène. La MDEA est une amine tertiaire très utilisée pour le traitement des gaz acides en chimie, dans le raffinage du pétrole, la production de gaz naturel.

Les 3 échangeurs 12-MC22A/B/C sont du type à plaques conçus par le fabricant TRANTER spécialement pour les besoins process du Méga-Train de Skikda.

Chaque échangeur dispose de deux circuits amine pauvre et amine riche avec des débits de circulation d'environ 200 tonnes/h par circuit. Chaque échangeur est constitué de:

- 451 plaques d'une épaisseur de 0.7mm;
- 450 joints plus deux joints spécifiques (au niveau des plaques fixe et mobile)

En effet, la solution d'amine riche, chargée de CO<sub>2</sub>, sortant du fond de la colonne d'absorption 12-MD21 à 42°C, est détendue au niveau de la colonne HP 12-MD22 ; puis, réchauffée à travers les échangeurs 12-MC22A/B/C jusqu'à 109,88°C, en échangeant de la chaleur avec l'a MDEA pauvre sortante du fond de la colonne de régénération 12-MD27.

La solution aMDEA riche est envoyée par la suite, vers la colonne de régénération 12-MD27 pour se débarrasser des gaz acides (CO<sub>2</sub>).

La solution aMDEA pauvre sortant du fond de la colonne de régénération 12-MD27 à 129°C, est refroidie jusqu'à 50,96°C, avant d'être introduite dans la colonne de décarbonatation 12-MD21. Le processus de la décarbonatation est schématisé dans [l'annexe N°3].

### III.3. Problématique :

Nous rappelons que les premières fuites au niveau des échangeurs ont été décelées lors de la phase de démarrage, obligeant ainsi l'entrepreneur KBR à effectuer des serrages pour étancher les fuites.

En plus, et en date du 28/04/2014, et suite aux fuites importantes d'amine (aMDEA) décelées sur l'échangeur à plaques **12-MC-22C**, une tentative de réparation a été opérée par le complexe GL1K conformément à la procédure de démontage approuvée par KBR.

Néanmoins, et lors des opérations de démontage de l'échangeur **12-MC-22C**, les plaques se sont effondrées suite au fléchissement de la barre la barre de support supérieure causé par une corrosion avancée des cordons de soudure au niveau de la barre citée.

Durant les trois dernières années de fonctionnement, plusieurs grands travaux de maintenance ont été effectués par les moyens du complexe pour fiabiliser les échangeurs, citons entre autres :

- Le remplacement de la totalité de la jointure du **12-MC-22C**, opération effectuée sous la supervision de spécialistes du fabricant.
- Le remplacement de 55 nouvelles plaques déformées, opération effectuée sous la supervision de spécialistes du fabricant.
- Tentative de réparation par le complexe sans résultats des échangeurs 12-MC-22A/B la remise en état afin d'étancher les fuites.
- Remise en état pour la deuxième fois du **12-MC-22C** avec un emplacement de 120 joints, nécessitant un long arrêt du complexe de 15 jours.
- Tentative de remise en état des deux échangeurs 12-MC-22A/B sous la supervision de deux spécialistes du fabricant pour le remplacement de 451 joints et la barre supérieure du 12-MC-22A. [12]

Cette dernière tentative a échoué du fait que ; les plaques sont déformées selon les spécialistes du fabricant, obligeant ainsi le complexe de lancer l'acquisition de 900 plaques.

Actuellement et malgré les différentes tentatives de remise en état des échangeurs, effectuées sous la supervision des spécialistes du fabricant, le complexe se trouve dans une situation inconfortable avec un seul échangeur en fonctionnement, et dont le risque d'un arrêt forcé par une indisponibilité des échangeurs n'est pas à écarter.

À la suite de ces analyses et avec l'expérience de maintenance récoltée lors des opérations de réparation ; nous pouvons dire que les causes très probables des fuites sont dues :

- À la déformation des plaques lors des opérations de serrage.
- Aux fluctuations brusques des débits d'alimentation lors du fonctionnement ou pendant la phase mise en service, ces dernières peuvent provoquer à la longue des contraintes mécaniques au niveau des plaques.
- la dégradation des joints suite au dépassement de leur durée de vie permise par le fabricant et ce par, perte des caractéristiques des joints sous l'effet des contraintes thermiques ainsi par contact avec les produits process véhiculés.
- Le fléchissement de la barre de support peut être à l'origine des fuites par la création des efforts (l'espacement entre plaques)
- Bouchage ou saleté qui peuvent encrasser les passes créant ainsi des pressions supplémentaires au niveau des plaques adjacentes.

Au vu de ce qui précède et vu l'expérience vécue au niveau des anciennes unités de liquéfaction en matière d'exploitation et de maintenance des échangeurs, nous nous sommes retournés vers l'idée de l'utilisation des échangeurs de type Tube et Calandre, qui présente à notre avis une solution pour surmonter les difficultés rencontrées au niveau des échangeurs à plaques afin d'avoir une maintenance facile, maîtrisée et moins coûteuse bien que, les échangeurs de type Tube et Calandre sont encombrants et occupent plus d'espace à comparer aux échangeurs à plaques. [12]

De ce fait, nous venons de dimensionner un échangeur Tube-calandre afin de le proposer comme solution parmi d'autres pour un éventuel remplacement des échangeurs à plaques **12-MC-22A/B/C**.

### **III.4. Dimensionnement de l'échangeur tubes et calandre :**

Le dimensionnement et le choix des échangeurs de chaleur est complexe et dépendra de plusieurs facteurs citons entre autres :

- La grande diversité des appareils (échangeurs tubulaires, à plaques, etc.)
- la variété des régimes d'écoulement : simple phase en régime laminaire ou turbulent, avec ou sans effet de convection naturelle, diphasique en évaporation ou en condensation, condensation avec ou sans incondensables, mélanges de fluides, etc.
- Le nombre important des configurations d'écoulement, pouvant aller bien au-delà de deux fluides dans le cas d'un échangeur compact, par exemple.

La conception d'un échangeur de chaleur peut être divisée essentiellement en trois parties :

- l'analyse ou le calcul thermique et géométrique.
- la conception préliminaire mécanique.
- la conception finale aux fins de fabrication.

La première partie est celle qui nous concernera tout au long de ce chapitre est le calcul de la surface d'échange requise afin qu'une quantité de chaleur déterminée soit échangée.

### **III.5. Dimensionnement du nouveau échangeur à tubes et calandre :**

Dans notre cas on va utiliser la méthode de KERN (DTLM) destinée pour le dimensionnement d'un nouveau appareil, en connaissant les quatre températures des deux fluides au niveau des entrées et sorties de l'échangeur, et dont le but est de rechercher la géométrie (conception) de l'échangeur. [6], [7]

➤ **Le calcul** :Données : Obtenues de la fiche technique des échangeurs à plaques 12-MC-22A/B/C.[Annexe N°4]

	<b>Fluide chaud (Pauvre)</b>	<b>Fluide froid (Riche)</b>
Débit (kg/h)	264635,7	285102,3
$T_e$ (C°)	129,28	45,30
$T_s$ (C°)	50,96	109,88
$\mu$ (mPa.s)	1,1	1,58
$C_p$ (Kj/kg.K)	3,97	3,73
$\lambda$ (W/m.K)	0,47	0,46
P (KPa)	9,5	4,85

*Tableau III.1 :Caractéristiques thermo-physiques des deux fluides des échangeurs 12-MC-22A/B/C et paramètres de fonctionnement de l'échangeur*

▪ **Choix d'écoulement des fluides (côté tubes ou calandre)/**

- ✓ Côté tubes : fluide froid (MDEA riche)
- ✓ Côté calandre : fluide chaud (MDEA pauvre)

### 1/ Bilan thermique :

On a la relation suivante :

$$Q = mC_p \Delta T$$

Avec :  $Q = Q_{cédée} = Q_{recue}$

$$Q_c = - m_c C_{pc} \Delta T = \frac{264\,635,7}{3600} \times 3,97 \times (129,28 - 50,96)$$

$$Q_c = 22\,856\,467,79 \text{ W} = 22,86 \text{ MW}$$

$$Q_f = m_f C_{pf} \Delta T = \frac{285\,102,3}{3600} \times 3,73 \times (109,88 - 45,30)$$

$$Q_f = 19\,076\,780,94 \text{ W} = 19,08 \text{ MW}$$

Soit, k est le coefficient des pertes thermiques de l'échangeur :

$$Q_f = k \cdot Q_c, \quad k = \frac{Q_f}{Q_c} = \frac{19\,076\,780,94}{22\,856\,467,79} = 0,83$$

$$Q_f = 0,83 \cdot Q_c$$

### 2/ Calcul de la différence logarithmique moyenne de température:

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

$$DTLM = \frac{(129,28 - 109,88) - (50,96 - 45,30)}{\ln \left( \frac{129,28 - 109,88}{50,96 - 45,30} \right)}$$

$$DTLM = 11,15 \text{ C}^\circ$$

### 3/ Détermination du coefficient correctif et le nombre des passes:

On détermine le coefficient correctif d'après le graphe de dépendance des paramètres auxiliaires (R, E), voir [annexe N° 5].

R : Ratio thermique

E : l'efficacité de transfert de l'échangeur

$$R = \frac{T_{ec} - T_{sc}}{T_{sf} - T_{ef}}$$

$$R = \frac{129,28 - 50,96}{109,88 - 45,30} = 1,21$$

$$R = 1,21$$

$$E = \frac{T_{sf} - T_{ef}}{T_{ec} - T_{ef}}$$

$$E = \frac{109,88 - 45,3}{129,28 - 45,3} = 0,76$$

$$E = 0,76$$

➤ Les valeurs E, R se croisent dans l'abaque de l'échangeur tubulaire 4 passes côté calandre et 8 passes côté tube. On obtient le facteur de correction **F = 0,57**

$$DTLM_{\text{corrigée}} = (DTLM).f = 6,35 \text{ C}^\circ$$

**4/ la surface totale d'échange « A » :**

$$Q = A.U_s'.f.DTLM$$

Avec  $U_s'$  coefficient de transfert sale.

$$U_s' = 1835 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$Q = 22856467,79 \text{ W}$$

$$A = \frac{Q}{A.U_s'.f.DTLM} = \frac{22856467,79}{1835.6,35} = 1961,55 \text{ m}^2$$

$$A = 1961,55 \text{ m}^2$$

➤ Selon le standard TEMA, pour une surface d'échange supérieure à 300 m<sup>2</sup>, on utilise plusieurs échangeurs de chaleurs.

Soit  $N_{HX}$  le nombre d'échangeurs de chaleur (calandres) équivalent à une surface d'échange A et A' est la surface d'échange d'un seul échangeur (une calandre).

$$N_{HX} = A/300 = 6,54 \approx 7$$

$$A' = 1961,55/7 = 280,22 \text{ m}^2$$

❖ On propose une disposition des calandres en parallèle, dont les débits des fluides seront fractionnés selon  $N_{HX}$ .

➤ **Les caractéristiques des tubes :**

Selon le standard TEMA et les échangeurs commerciaux, on propose un échangeur de chaleur dont les caractéristiques des tubes sont [Annexe 10]:

- **Matériau de construction : acier au carbone**
- **Diamètre extérieur :  $\frac{3}{4}$ ''  $d_e = 19,05$  mm**
- **Diamètre intérieur :  $d_i = 15,70$  mm**
- **Epaisseur : 1,65 mm**
- **Longueur utile :  $l = 20$  ft = 6,10 mm**
- **Disposition : Pas triangulaire**
- **Le pas :  $P = 23,8$  mm**

**5/ calcul de la surface d'échange d'un tube :**

$$a = \pi \cdot d_0 \cdot l$$

Avec :

$$d_e = 19,05 \text{ mm}$$

$$l = 6,10 \text{ mm}$$

$$\text{AN : } a = 0,37 \text{ m}^2$$

**6/ Nombre des tubes par calandre :**

$$N_t' = \frac{A'}{a \cdot n_c} = \frac{280,22}{0,37 \cdot 4} = 189,34$$

Avec :  $n_c$  est le nombre des passes côté calandre

$$N_t' = 190 \text{ tubes}$$

**7/ Calcul du coefficient global de transfert sale  $U_s$  :**

$$U_s = \frac{U_s' \cdot N_t'}{N_t}$$

➤  $N_t$  est le nombre des tubes le plus proche à celui qui est calculé d'après [l'annexe N°6]

$$N_t = 234 \text{ tubes}$$

$$\text{AN: } U_s = \frac{1835 \cdot 190}{234}$$

$$U_s = 1489,96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

**8/ Calcul des températures caloriques des fluides:**

Pour le fluide chaud :  $T_c = T_{sc} + Fc (T_{es}-T_{sc})$

Pour le fluide froid :  $t_c = t_{ef} + Fc (T_{sf}-T_{ef})$

Fraction calorique :  $Fc = \frac{DTLM}{\Delta t(chaud) - \Delta t(froid)}$

**AN:**

$$Fc = \frac{6.35}{(129,28 - 50,96) - (109,88 - 45,3)} = 0,46$$

$$T_c = 50,96 + 0,46 (129,28 - 50,96) = 86,99 \text{ C}^\circ$$

$$t_c = 45,30 + 0,46 (109,88 - 45,30) = 75,01 \text{ C}^\circ$$

$$Fc = 0,46 ; T_c = 86,99 \text{ C}^\circ ; t_c = 75,01 \text{ C}^\circ$$

**9/ Calcul du coefficient de transfert propre Up :**

**9.1. Calcul du coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur du tube [J<sub>h</sub>] :**

**A. Section de passage :**

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

$$a_t = \frac{234}{8} 3,14 \frac{(0,0157)^2}{4}$$

$$a_t = 0,0057 \text{ m}^2$$

**B. La vitesse massique :**

$$G_t = \frac{M}{a_t}$$

$$G_t = \frac{285102,3}{0,0057 \cdot 3600} = 13\,893,87 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$G_t = 13\,893,87 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

**C. Calcul du nombre de Reynolds:**

$$Re = \frac{d_i \cdot G_t}{\mu}$$

$$Re = \frac{0.0157 \cdot 13\,893,87}{0.00158} = 138\,059,34$$

$Re = 138\,059,34 > 10\,000$  ; Régime d'écoulement : **turbulent**

**D. Coefficient de transfert de chaleur [ $J_h$ ] :**

On peut déterminer le coefficient de transfert de chaleur interne [ $J_h$ ] par deux méthodes :

**a- D'après l'abaque [Annexe N°7]**

$$J_h = f (Re, L/di)$$

$$\frac{L}{di} = \frac{6,10}{0.0157} = 388,54$$

$$J_h = 350 ; f = 0,35$$

✓ f : facteur de friction interne.

**b- Par la relation suivante :**

$$J_h = 0,027 (Re)^{0,8}$$

$$J_h = 349,48$$

❖ Donc on peut déterminer le coefficient du film interne, en prenant la valeur de  $J_h$  obtenue par la deuxième méthode car celle-ci est plus affirmative.

$$\frac{hi}{\phi t} = J_h \frac{\lambda}{di} \left( \frac{Cp}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$AN: \frac{hi}{\phi t} = 349,48 \frac{0,46}{0,0157} \left( \frac{3,73 \cdot 1,58}{0,46} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{hi}{\phi t} = 24\,681,04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{On a: } \frac{hi_0}{\phi t} = \frac{hi \cdot d_0}{d_e}$$

$$\frac{hi_0}{\phi t} = 20\,340,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

**hi<sub>0</sub>**: coefficient de film interne rapporté à la température du tube.

**9.2. Calcul du coefficient de transfert de chaleur externe (côté calandre) :**

**A. Section de passage :** Pour un pas triangulaire, on a la relation suivante :

$$a_{ct} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{D_c}{P} (P - d_e) B$$

P : pas des tubes (m)

B: Espacement entre chicane (m),  $D_c/5 < B < D_c$

$D_c$  : Diamètre de la calandre (m)

$$a_{ct} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{0,489}{0,0238} (0,0238 - 0,01905) 0,0978$$

$$a_{ct} = 0,01102 \text{ m}^2$$

**B. Vitesse massique:**

$$G_{ct} = \frac{m}{act} = \frac{264\,635,7}{0,01102 \cdot 3600} = 6563,39 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$G_{ct} = 6563,39 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

**C. Diamètre equivalent:**

$$D_{eq} = \frac{3,460 \cdot P^2}{\pi \cdot d_e} - d_e = \frac{3,460 \cdot (0,0238)^2}{3,14 \cdot (0,01905)} - 0,01905$$

$$D_{eq} = 0,0137 \text{ m} = 13,7 \text{ mm}$$

**D. Calcul du nombre de Reynolds:**

$$R_e = \frac{G_{ct} \cdot D_{eq}}{\mu} = \frac{6563,39 \cdot 0,0137}{0,0011} = 81\,743$$

$R_e = 81\,743 > 10\,000$  ; Régime d'écoulement : **turbulent**

**E. Le coefficient de transfert de chaleur externe :**

$$\frac{h_0}{\phi_c} = J_h \frac{\lambda'}{D_{eq}} \left( \frac{C_p \rho'}{\lambda'} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$J_h' = 0,36 (Re)^{0,55}$$

$$J_{h'} = 181,20$$

D'après l'abaque [Annexe N°8],  $f' = 1,8$

AN:

$$\frac{h_0}{\phi_c} = 181,20 \frac{0,47}{0,0137} \left( \frac{3,97 \cdot 1,1}{0,47} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{h_0}{\phi_c} = 14\,424,55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### 9.3 Détermination de la température du tube $t_t$ :

$$t_t = T_c - \frac{\frac{h i_0}{\phi_t}}{\frac{h_0}{\phi_c} + \frac{h i_0}{\phi_t}} \times (T_c - t_c)$$

$$t_t = 86,99 - \frac{20\,340,8}{14\,424,55 + 20\,340,8} \times (86,99 - 75,01)$$

$$t_t = 79,98 \text{ C}^\circ$$

### 9.4 Détermination de la viscosité à $t_t$ :

Pour les valeurs de  $\mu$ , voir [Annexe N°9]

➤ À l'intérieur du tube  $\mu_t$ :

$$\Phi_t = (\mu / \mu_t)^{0,14}$$

$$\mu_t = 0,87 \text{ mPa}; \mu = 1,58 \text{ mPa}; \text{AN: } \Phi_t = 1,0871$$

$$h_{i_0} = \frac{h i_0}{\phi_t} \cdot \phi_t$$

$$h_i = \frac{h i}{\phi_t} \cdot \phi_t$$

Donc :

$$h_{i_0} = 18\,191,32 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$h_i = 22\,072,90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

➤ à l'extérieur du tube (côté calandre)  $\mu_t'$  :

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

$$\mu_t' = 1,7 \text{ mPa}; \mu' = 1,1 \text{ mPa}; \text{AN: } \Phi_c = \mathbf{0,9409}$$

$$h_o = \frac{h_o}{\phi_c} \cdot \phi_c$$

Donc :

$$h_o = \mathbf{12\,296,29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

❖ Le coefficient global de transfert de chaleur  $U_p$  :

$$U_p = \frac{h_i \cdot h_o}{h_i + h_o}$$

$$\text{AN: } U_p = \frac{18\,191,32 \times 12\,296,29}{18\,191,32 + 12\,296,29}$$

$$U_p = \mathbf{7336,94 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

10/ La résistance à l'encrassement :

$$R_s = \frac{U_p - U_s}{U_p \cdot U_s}$$

$$\text{AN: } R_s = \frac{7336,94 - 1489,96}{7336,94 \times 1489,96}$$

$$R_s = \mathbf{4,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}}$$

11/ Calcul des pertes de charge :

❖ Côté tubes :

$$\Delta P_t = \frac{\eta c \cdot \eta t \cdot G t^2}{\rho} \left[ \frac{f t \cdot l}{d_i \cdot \phi t} + 2 \right]$$

$$\Delta P_t = \frac{4,8 \cdot (13\,893,87)^2}{1056,85} \left[ \frac{0,35 \cdot 6,1}{0,0157 \cdot 1,0871} + 2 \right]$$

$$\Delta P_t = 52\,956,44 \text{ Pa} = 52,96 \text{ kPa} \quad ; \quad \Delta P_t = \mathbf{0,5 \text{ bar}}$$

✓ Les pertes de charge calculées coté tubes sont comprises dans l'intervalle des pertes de charge admissibles ( $\Delta P_t < 1$ )

❖ Côté calandre :

$$\Delta P_c = \frac{\eta_c \cdot f' \cdot Gc^2 \cdot (Nch + 1) \cdot Dc}{\rho \cdot Deq \cdot \phi_c}$$

$$\Delta P_c = \frac{4.0,2 \cdot (6563,39)^2 \cdot (5+1) \cdot 0,489}{99,31 \cdot 0,0137 \cdot 0,9409}$$

$$\Delta P_c = 25\,641,59 \text{ Pa} = 25,64 \text{ kPa} \quad ; \quad \Delta P_c = 0,26 \text{ bar}$$

✓ Les pertes de charge calculées côté calandre sont comprises dans l'intervalle des pertes de charge admissibles ( $\Delta P_t < 1$ )

**Résultats pour un échangeur de chaleur :**

Paramètres	Coté calandre	Coté tube
Q(W)	22 856 467 ,79	19 076 780,94
$\Delta T$ (C°)	78,32	64,58
DTLM (C°)	11,45	
R	1,21	
E	0,76	
F	0,57	
DTLM corrigée(C°)	6 ,35	
A (m <sup>2</sup> )	1961,55	
A' (m <sup>2</sup> )	280,22	
N <sub>t</sub> '	190	
U <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> .K )	1489,96	
F <sub>c</sub>	0,46	
T <sub>c</sub> (C°)	86,99	/
T <sub>c</sub> (C°)	/	75,01
A (m <sup>2</sup> )	0,01102	0,0057
G (kg/m <sup>2</sup> .s)	6563,39	13 893,87
D <sub>eq</sub> (m)	0,0137	/
R <sub>e</sub>	81 743	138 059,34
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .K )	/	22 072,90
h <sub>io</sub> (W/m <sup>2</sup> .K )	/	18 191,32
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .K )	12 296,29	/
T <sub>t</sub> (C°)	/	79,98
U <sub>p</sub> (W/m <sup>2</sup> .K )	7336,94	
R <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> .K/W)	4,67.10-4	
$\Delta P$ (kPa)	25,64	52,96

*Tableau III.2 : récapitulatif des résultats*

• **Interprétation des résultats :**

	Echangeur à tubes et calandre	Echangeur à plaques 12-MC22-A
$\Delta P_t$ (kPa)	52,96	63,06
$\Delta P_c$ (kPa)	25,64	13,17
A (m <sup>2</sup> )	1961,55	1652,27

**Tableau III.3 :** Tableau comparatif des résultats de l'échangeur dimensionné et l'échangeur à plaques existant

On constate que :

1/ $\Delta P_{totale} = \Delta P_c + \Delta P_t$  ; Pour les deux échangeurs :  $\Delta P_{totale} = 0,76$  bar

2/ La surface d'échange de l'échangeur à tubes et calandre est plus importante que celle de l'échangeur à plaques.

**III.6. Conclusion :**

Partant d'une difficulté d'exploitation des échangeurs à plaques au niveau du complexe GLIK de Skikda, précisément dans le train de liquéfaction du gaz naturel, nous avons été confronté avec les techniciens de l'usine d'envisager la possibilité de substituer l'échangeur à plaque 12MC-22A par un échangeur à tubes et calandre. Pour réaliser cette substitution, on doit s'assurer du respect des conditions d'exploitation du Méga Train de liquéfaction. Pour se faire nous avons utilisé les paramètres de fonctionnement de l'échangeur 12MC-22A à savoir les températures d'entrées et de sorties des deux fluides ainsi que leurs caractéristiques physiques ( $C_p, \lambda, \mu \dots$ ), et en moyennant la méthode de KERN pour déterminer les valeurs finales permettant de sélectionner l'échangeur à tubes et calandre qui assure le remplacement en conservant le même processus.

Il ressort essentiellement que : sept échangeurs à tubes et calandre disposés en parallèle satisfont aux conditions de fonctionnement d'un seul échangeur à plaques selon le standard TEMA. De même la surface d'échange de l'échangeur à tubes et calandre est plus importante que celle de l'échangeur à plaques nécessitant une occupation spatiale plus étendue, notant que sa configuration géométrique est encombrée.

Notre travail est une étude approximative, cependant que l'obtention d'un résultat exacte nécessite une étude plus vaste et précise comprenant l'aspect économique, dont plusieurs solutions proposées peuvent être plus optimales.

### IV.1. Objectif de la simulation :

La simulation est un outil utilisé dans différents domaines de l'ingénierie et de la recherche en général, permettant d'analyser le comportement d'un système avant de l'implémenter et d'optimiser son fonctionnement en testant différentes solutions et différentes conditions opératoires. Elle s'appuie sur l'élaboration d'un modèle du système, et permet de réaliser des scénarios et d'en déduire le comportement du système physique analysé

Un modèle n'est pas représentation exacte de la réalité physique, mais il est seulement apte à restituer les caractéristiques les plus importantes du système analysé.

Il existe plusieurs types de modèle d'un système physique : allant du modèle de représentation qui ne s'appuie que sur des relations mathématiques traduisant les grandeurs caractéristiques de son fonctionnement, jusqu'au modèle de connaissance complexe issu dont dépend principalement des objectifs poursuivis.

### IV.2. Principes de fonctionnement et rôle des simulateurs :

Les simulateurs de procédés utilisés classiquement dans l'industrie, peuvent être considérés comme des modèles de connaissance. Ils sont basés sur la résolution de bilans de masse et d'énergie, des équations d'équilibres thermodynamiques, ...etc, et sont à même de fournir l'information de base pour la conception. Ils sont principalement utilisés pour la conception de nouveaux procédés (dimensionnement d'appareil, analyse du fonctionnement pour différentes conditions opératoires, optimisation), pour l'optimisation de procédés existants et l'évaluation de changements effectués sur les conditions opératoires. Avant même de parler de modèles d'opération de transformation de la matière, il faut des modèles pour prédire les propriétés physiques de la matière. C'est pourquoi ces simulateurs disposent tous d'une base de données thermodynamiques contenant les propriétés des corps purs (masse molaire, température d'ébullition sous conditions normales, paramètres des lois de tension de vapeur, ...). Cette base de données est enrichie d'un ensemble de modèles thermodynamiques permettant d'estimer les propriétés des mélanges.

Tout simulateur industriel de procédés chimiques est organisé autour du module suivant :

- Une base de données des corps purs et un ensemble de méthodes pour estimer les propriétés des mélanges appelés aussi modèles thermodynamiques.

- Un schéma de procédé permettant de décrire les liaisons entre les différentes opérations unitaires constituant l'unité (PFD pour Process Flow Diagram).
- Des modules de calcul des différentes opérations unitaires contenant les équations relatives à leur fonctionnement : réacteur chimique, colonne de distillation, colonne de séparation, échangeurs de chaleur, pertes de charges, etc.
- Un ensemble de méthodes numériques de résolution des équations des modèles.

Avec ce type de logiciel, les ingénieurs peuvent à partir de la donnée des corps purs présents dans le procédé et du schéma de procédé, développer un modèle du processus reposant sur la mise en commun des équations décrivant les différentes opérations unitaires, les réactions chimiques, les propriétés des substances et des mélanges, qui puisse aussi communiquer avec d'autres applications comme Excel, Visual Basic et Matlab,...

### IV.3. Modes de fonctionnement des simulateurs:

Il y a deux modes de fonctionnement dans un simulateur : statique (ou stationnaire) et dynamique.

Les simulateurs statiques résolvent des équations statiques qui traduisent le fonctionnement en régime permanent (à l'équilibre), tandis que les simulateurs dynamiques permettent d'évaluer l'évolution des variables dans le temps à partir de la résolution de systèmes d'équations différentielles. Les simulateurs industriels sur la thermodynamique les plus connus mondialement sont :

- Statiques : ASPEN PLUS (Aspen Technologies), Design II de (WinSim), HYSYS (Hyprotech), PRO/II (Simulation Sciences), PROSIM
- Dynamiques : HYSYS (Hyprotech), ASPEN DYNAMICS (Aspen Technologies), Design II de (WinSim), DYMSYM (Simulation Sciences Inc.)

Selon Winter (Winter, 1992) les simulateurs dynamiques sont en passe de se substituer aux simulateurs en régime permanent. Par exemple, HYSYS (Hyprotech) peut passer de la simulation d'un régime permanent à celle d'un régime transitoire (dynamique) par un seul « click » sur un bouton.

Néanmoins, tout procédé ne peut être simulé à l'aide de ces simulateurs industriels. En effet, dans le cas de la mise au point de nouveau procédé, il est généralement nécessaire de disposer de son propre simulateur. Le concept est le même : sur la base des propriétés thermodynamiques des corps purs impliqués dans l'opération et des modèles thermodynamiques, il y a résolution des équations de bilan de matière et d'énergie et des relations d'équilibre constituant le modèle. La différence vient du fait que généralement seules les propriétés des corps présents dans le procédé chimique considéré ne sont pas détaillées et que l'environnement de développement est moins convivial. On parlera de simulateur dédié (spécifique à un procédé donné). Il a l'avantage de pouvoir avoir une totale maîtrise sur la façon d'écrire les équations du modèle et de les résoudre.

### IV.4. Utilisation de la simulation :

Les différentes tâches qu'un simulateur de procédé devrait effectuer sont :

➤ **Dans la conception (engineering) :**

- La résolution des bilans de matières et d'énergie.
- Le dimensionnement des équipements.
- L'évaluation économique du procédé
- L'optimisation du procédé

➤ **Dans le suivi des procédés :**

- Réajustement des paramètres de fonctionnement dans le cas des changements de composition de l'alimentation.
- Détermination de la performance des équipements.

### IV.5. Concepts et caractéristiques du simulateur HYSYS:

#### IV.5.1 Concepts de base du simulateur HYSYS :

HYSYS est un logiciel de simulation interactif intégrant la gestion d'événements (« Event driven ») : c'est-à-dire qu'à tout moment, un accès instantané à l'information est possible, de même que toute nouvelle information est traitée sur demande et que les calculs qui en découlent s'effectuent de manière automatique. Non seulement toute nouvelle information est traitée dès son arrivée mais elle est propagée tout au long du Flowsheet.

Dans ce qui suit, on définit les principaux concepts de base et vocabulaires associés, qui sont utilisés pendant les étapes de construction d'un modèle dans le simulateur HYSYS.

- « Flowsheet » : c'est un ensemble d'objets « FlowsheetElements » (courants de matière, d'énergie, d'opérations unitaires, de variables opératoires) qui constituent tout ou une partie du procédé simulé et qui utilisent la même base de données thermodynamique « FluidPackage ».
- **Fluid Package**: il permet de définir les composants chimiques présents dans le procédé simulé et leur affecte les propriétés chimiques et physiques contenues dans la base de données des corps purs. Il permet aussi de définir les modèles thermodynamiques qui seront utilisés pour le calcul des propriétés des mélanges et de définir les cinétiques des réactions chimiques mises en jeu dans le procédé.
- **Process Flow Diagram**: ce diagramme permet de visualiser les courants et les opérations unitaires, représentées par des symboles dans le « Flowsheet », ainsi que la connectivité entre les courants, les opérations unitaires et les tableaux des propriétés des courants.
- **Workbook** : il permet d'avoir accès à l'information sur les courants et les opérations unitaires sous forme de tableau de données.
- **Desktop**: c'est l'espace principal de HYSYS pour visualiser les fenêtres lors de la conception.
- **Propertyview** : il contient l'information décrivant un objet (opération ou courant)
- **Simulation Case** (fichier de simulation) : c'est l'ensemble des FluidPackage, Flowsheets et FlowsheetElements qui constituent le modèle.

### IV.5.2. Environnement de simulation:

Il existe 5 environnements de développement pour manipuler et mettre en forme l'information dans le simulateur (voir la Figure 2) :

- **Environnement « Basis Manager »**: cet environnement permet de créer et modifier le « Fluid Package ».
- **Environnement « OilCharacterization »**: il est utilisé pour caractériser les fluides de type pétrolier
- **Environnement « Main Flowsheet »**: il permet de définir la topologie du Flowsheet principal de la simulation. Il est utilisé pour placer et définir les différents courants, opérations unitaires et « Sub-Flowsheets » qui constituent le procédé simulé.

- **Environnement « Sub-Flowsheet »:** il permet de définir la topologie d'un sous-ensemble particulier du schéma principal (un courant ou une opération particulière et des autres Sub- Flowsheets).
- **Environnement « Column »:** c'est un objet particulier permettant de définir la topologie de l'opération unitaire colonne à distiller. Il possède ses propres «Flowsheet», «Fluid Package»,

### IV.5.3. Caractéristiques principales de HYSYS:

Cette partie décrit brièvement les caractéristiques importantes qui font de HYSYS une plate-forme de simulation et de développement très puissante.

- Toutes les applications nécessaires sont utilisées dans un environnement de simulation commun (The Integrated Engineering Environment).
- Il intègre la possibilité d'une modélisation dans un état stable ou stationnaire et en régime dynamique : la modélisation dans un état stable et l'optimisation étant utilisées lors de la conception des procédés, la simulation en régime dynamique étant réservée aux études de contrôlabilité de procédés et au développement de stratégies de contrôle.
- Programmation de HYSYS : HYSYS contient un (Internal Macro Engine) qui supporte la même syntaxe que Microsoft Visual Basic. On peut automatiser différentes tâches dans HYSYS sans avoir besoin d'un autre programme.
- Gestion des événements (Event Driven): HYSYS combine le calcul interactif (les calculs sont exécutés automatiquement chaque fois que l'on fournit une nouvelle information) avec un accès instantané à l'information (à tout moment on peut avoir accès à l'information depuis n'importe quel environnement de simulation).
- Gestion intelligente de l'information (Built-in Intelligence): Les calculs des propriétés thermodynamiques s'effectuent instantanément et automatiquement dès qu'une nouvelle information est disponible.
- Opérations Modulaires: Chaque courant ou unité d'opération peut réaliser tous les calculs nécessaires, en utilisant l'information soit indiquée dans l'opération ou communiquée depuis un courant. L'information est transmise dans les deux directions à travers les Flowsheets.
- Algorithme de résolution non séquentielle : on peut construire des Flowsheets dans n'importe quel ordre.

### IV.6. Simulation de l'échangeur à tubes et calandre dimensionné précédemment avec le simulateur HYSYS V9:

1/ Définir la géométrie de l'échangeur :

The screenshot shows the 'Configuration' and 'Size' sections of the Aspen EDR software. The 'Calculation mode' is set to 'Simulation'. The 'Configuration' section includes parameters for TEMA Type (A-H-N), Tube layout option (New optimum layout), Location of hot fluid (Shell side), Tube OD / Pitch (19,05 / 23,81 mm), Tube pattern (30-Triangular), Tubes are in baffle window (Yes), Baffle type (Single segmental), Baffle cut orientation (Vertical), and Default exchanger material (Carbon Steel). The 'Size' section includes parameters for Shell ID / OD (489 / 505 mm), Tube length (6100 mm), Baffle spacing center-center (97,8 mm), Number of baffles (56), Number of tube / passes (190 / 8), Shells in series (1), and Shells in parallel (7). A 'Recent' and 'Previous' table on the right shows the current settings and previous values.

Parameter	Value	Recent	Previous
TEMA Type	A - H - N	AHN	
Tube layout option	New (optimum) layout	New (optimum) layout	
Location of hot fluid	Shell side	Shell side	
Tube OD / Pitch	19,05 / 23,81 mm	19,05 / 23,81	/
Tube pattern	30-Triangular	30	
Tubes are in baffle window	Yes	Yes	
Baffle type	Single segmental	Single segmental	
Baffle cut orientation	Vertical	V	
Default exchanger material	Carbon Steel	Carbon Steel	

Fig. IV.1 : Définition de la géométrie de l'échangeur

2/ Définir les paramètres du processus :

The screenshot shows the 'Process Data' tab in Aspen EDR. The 'Hot Stream (1) Shell Side' is 'MDEA Pauvre' and the 'Cold Stream (2) Tube Side' is 'MDEA Riche'. The 'Process Data' table is as follows:

Parameter	Hot Stream (1) Shell Side		Cold Stream (2) Tube Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name	MDEA Pauvre		MDEA Riche	
Mass flow rate	73,5099 kg/s		79,1951	
Temperature	129,28 °C	50,96	45,3	109,88
Vapor fraction				
Pressure (absolute)	950 kPa	930,5	485	470,15
Pressure at liquid surface in column				
Heat exchanged		22858,8 kW		
Exchanger effectiveness				
Adjust if over-specified		Outlet temperature		Outlet temperature
Estimated pressure drop	0,195 bar		0,1485	
Allowable pressure drop	26 kPa		50	
Fouling resistance	0,00047 m <sup>2</sup> -K/W		0,00047	

Fig. IV.2 : Définition des paramètres du processus

3/ Définir la composition chimique des fluides et leurs propriétés :

➤ **Fluide froid :**

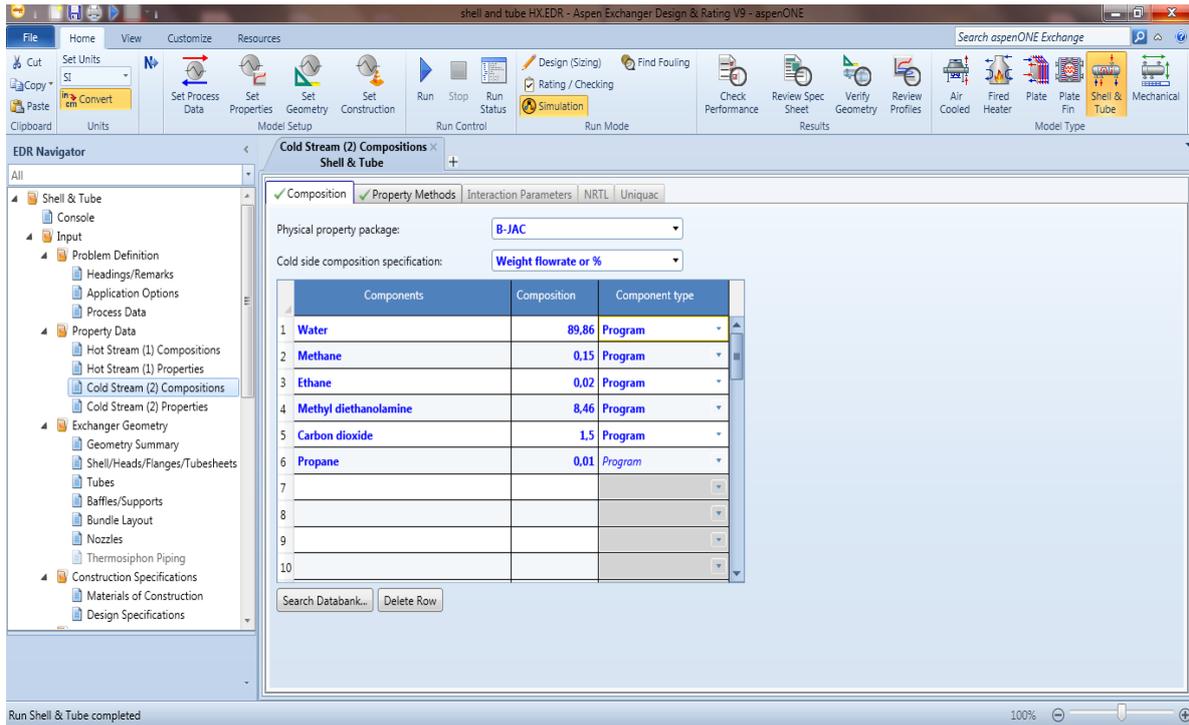


Fig. IV.3 : Définition de la composition chimique du fluide froid

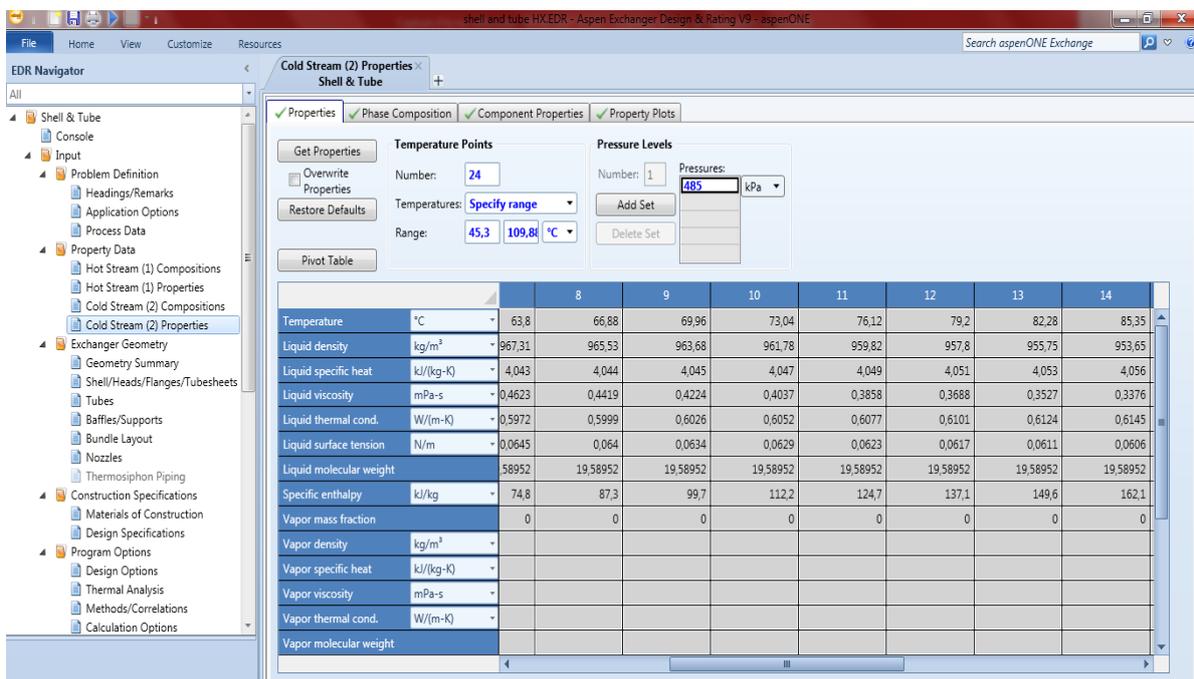


Fig. IV.4 : Définition des propriétés du fluide froid

Résultats obtenus :

Température	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Viscosité	Densité
C°	kJ/(kg*K)	W/(m*K)	mPa*s	kg/m <sup>3</sup>
45,3	4,044	0,5789	0,6161	976,53
48,38	4,044	0,5821	0,5851	975,19
51,47	4,043	0,5853	0,5568	973,77
54,55	4,043	0,5884	0,5307	972,27
57,63	4,043	0,5914	0,5065	970,69
60,72	4,043	0,5943	0,4838	969,03
63,8	4,043	0,5972	0,4623	967,31
66,88	4,044	0,5999	0,4419	965,53
69,96	4,045	0,6026	0,4224	963,68
73,04	4,047	0,6052	0,4037	961,78
76,12	4,049	0,6077	0,3858	959,82
79,2	4,051	0,6101	0,3688	957,8
82,28	4,053	0,6124	0,3527	955,75
85,35	4,056	0,6145	0,3376	953,65
88,43	4,058	0,6166	0,3239	951,51
91,5	4,06	0,6186	0,3121	949,33
94,57	4,063	0,6204	0,3036	947,11
97,63	4,066	0,6221	0,2955	944,86
100,7	4,069	0,6238	0,2877	942,57
103,76	4,072	0,6253	0,2802	940,25
106,82	4,075	0,6266	0,273	937,9
109,88	4,078	0,6279	0,2662	935,53

Tableau IV.1 : Résultats obtenus pour les propriétés du fluide froid

- **La chaleur spécifique :**

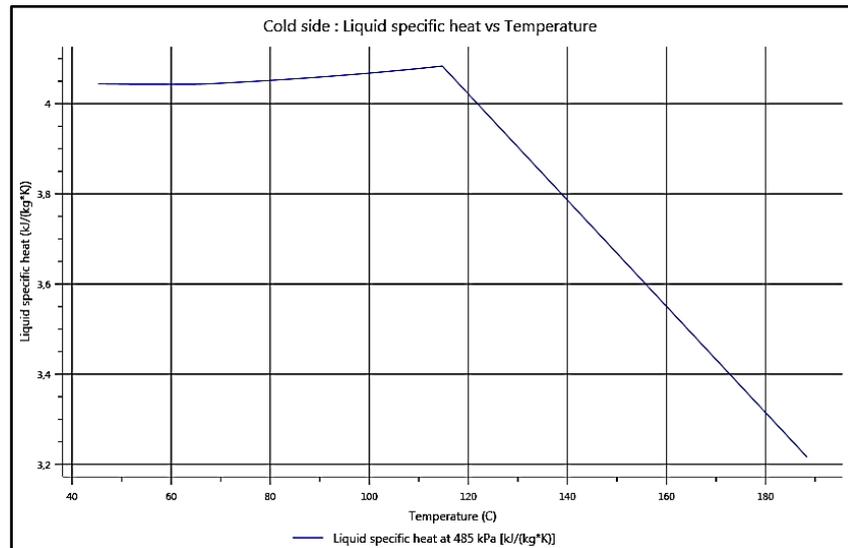


Fig. IV.5 : Variation de la chaleur spécifique du fluide froid en fonction de la température

**Commentaire :**

Généralement la chaleur spécifique  $C_p$  entre  $0^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$  est constante, au-delà de cette valeur, le  $C_p$  est une fonction linéaire de la température ( $T^\circ$  augmente  $\rightarrow C_p$  diminue) ;  $C_p = at+b$

- **La viscosité :**

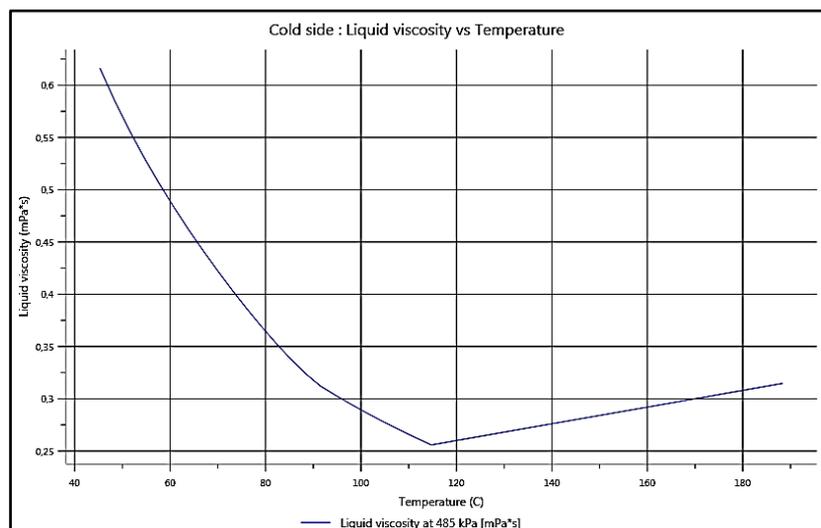


Fig. IV.6 : Variation de la viscosité du fluide froid en fonction de la température

**Commentaire :**

La viscosité est fonction de la température  $\mu = f(T)$  de forme linéaire :  $\mu = aT + b$

Elle est décroissante dans l'intervalle de [40°C ; 115 °C] puis elle croit à partir de 115 °C.

- **La conductivité thermique :**

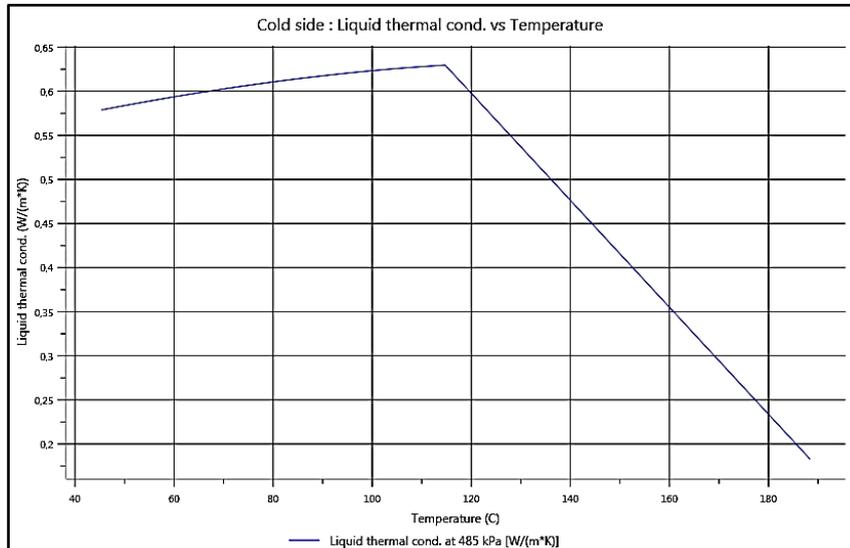


Fig. IV.7 : Variation de la conductivité thermique du fluide froid en fonction de la température

**Commentaire :**

Même chose que la viscosité, la conductivité thermique est fonction de température  $\lambda = f(T)$  de manière inverse.

$$\lambda = aT + b$$

Elle est croissante dans l'intervalle de [40°C ; 115 °C] puis elle décroît à partir de 115 °C

➤ **Fluide chaud :**

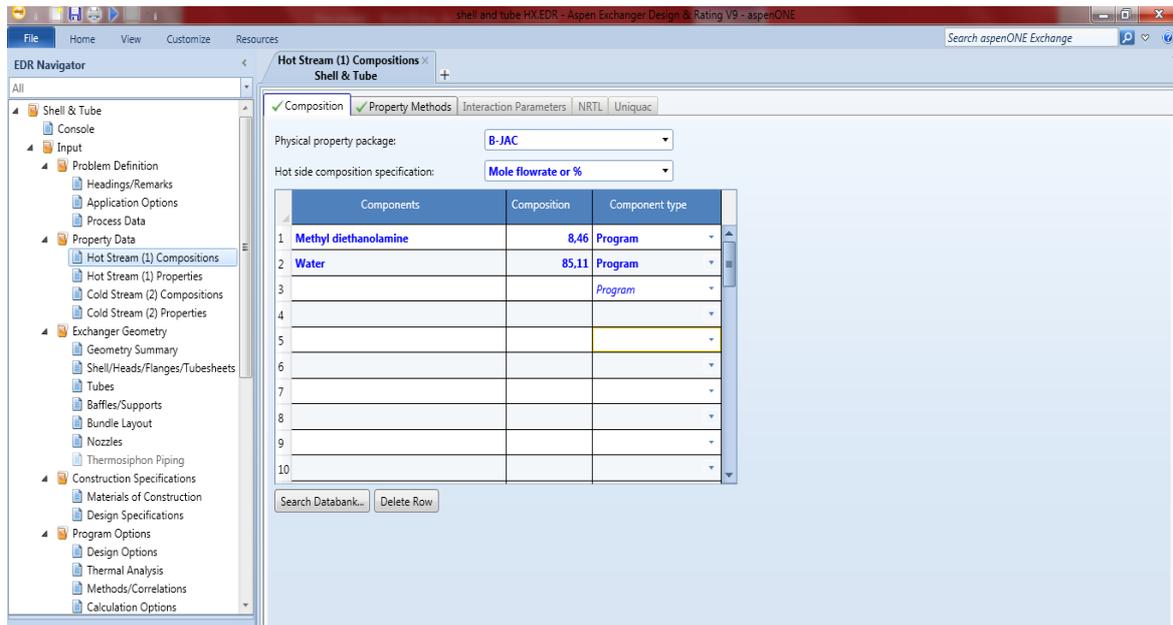


Fig. IV.8 : Définition de la composition chimique du fluide chaud

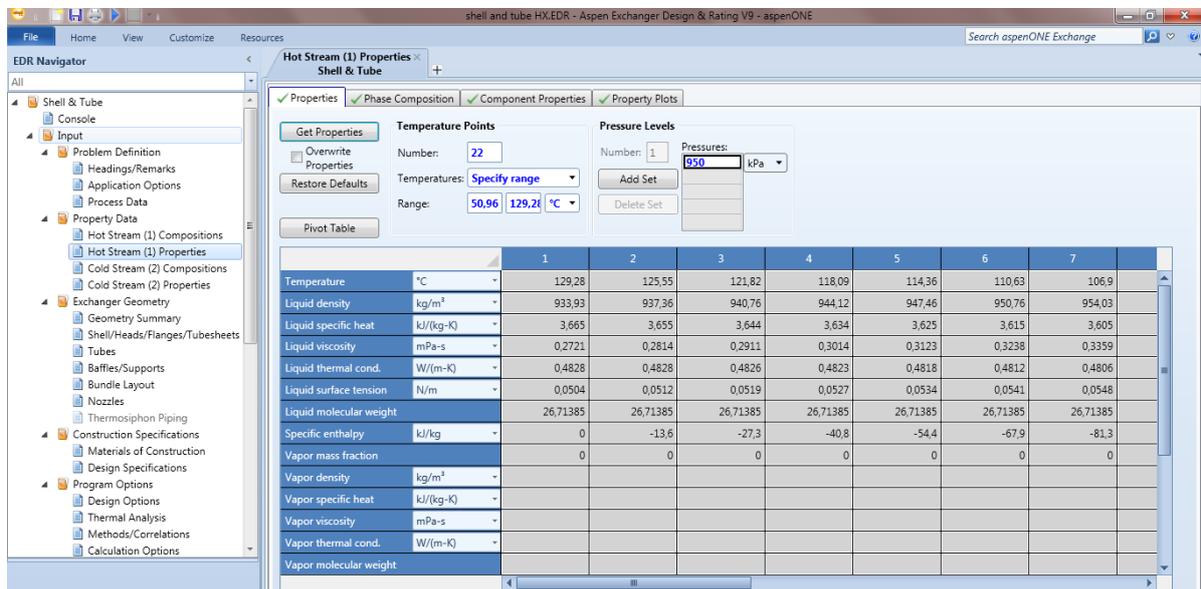


Fig. IV.9 : Définition des propriétés du fluide chaud

Résultats obtenus :

Température C	Chaleur spécifique kJ/(kg*K)	Conductivité thermique W/(m*K)	Viscosité mPa*s	Densité kg/m <sup>3</sup>
129,28	3,665	0,4828	0,2721	933,93
125,55	3,655	0,4828	0,2814	937,36
121,82	3,644	0,4826	0,2911	940,76
118,09	3,634	0,4823	0,3014	944,12
114,36	3,625	0,4818	0,3123	947,46
110,63	3,615	0,4812	0,3238	950,76
106,9	3,605	0,4806	0,3359	954,03
103,17	3,596	0,4797	0,3487	957,26
99,44	3,587	0,4788	0,3624	960,45
95,71	3,578	0,4778	0,3768	963,6
91,98	3,569	0,4766	0,3921	966,7
88,26	3,56	0,4753	0,412	969,76
84,53	3,551	0,4739	0,436	972,77
80,8	3,542	0,4724	0,4624	975,73
77,07	3,534	0,4708	0,4912	978,64
73,34	3,525	0,4691	0,5221	981,48
69,61	3,517	0,4673	0,5549	984,26
65,88	3,509	0,4654	0,5899	986,98
62,15	3,509	0,4635	0,627	989,62
58,42	3,509	0,4614	0,667	992,19
54,69	3,509	0,4593	0,7105	994,68
50,96	3,509	0,457	0,7583	997,08

Tableau IV.2: Résultats obtenus pour les propriétés du fluide chaud

- **La chaleur spécifique :**

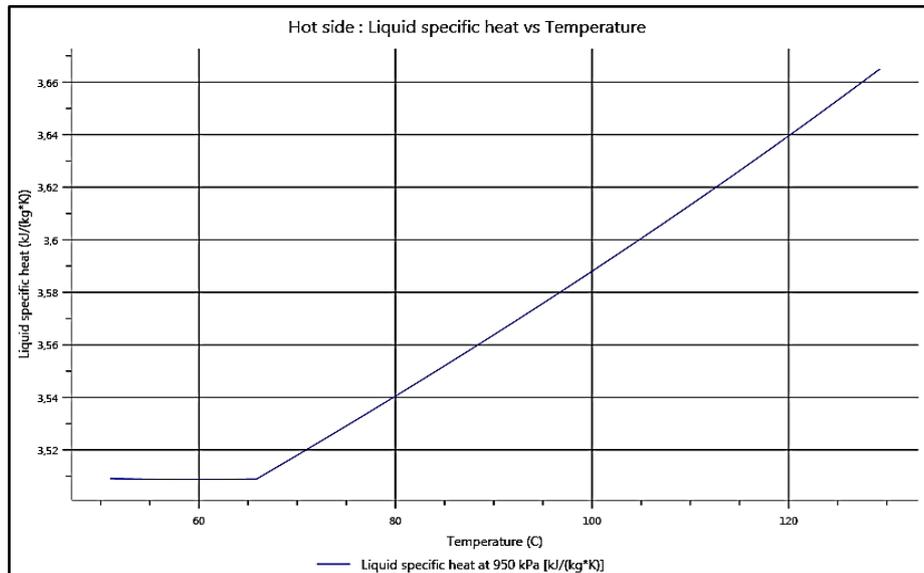


Fig. IV.10 : Variation de la chaleur spécifique du fluide chaud en fonction de la température

**Commentaire :**

$C_p$  est constante dans l'intervalle  $[0^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}]$ , puis elle varie linéairement au-delà de  $65^\circ\text{C}$ , et tant que le fluide chaud se refroidit, il devient plus visqueux.

- **La viscosité :**

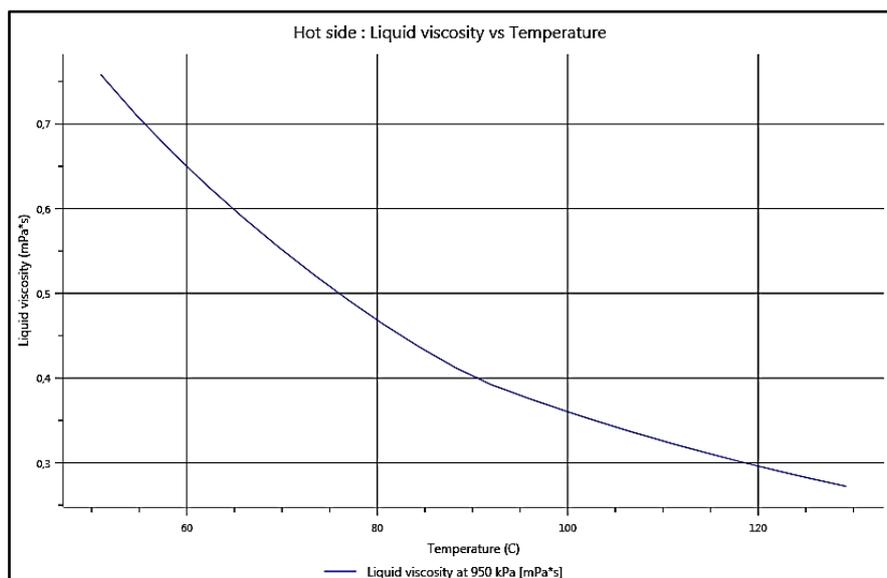


Fig. IV.11 : Variation de la viscosité du fluide chaud en fonction de la température

**Commentaire :**

$\mu = f(T)$  : l'allure est décroissante. Donc, plus que lorsque la température augmente le fluide sera moins visqueux.

- **La conductivité thermique :**

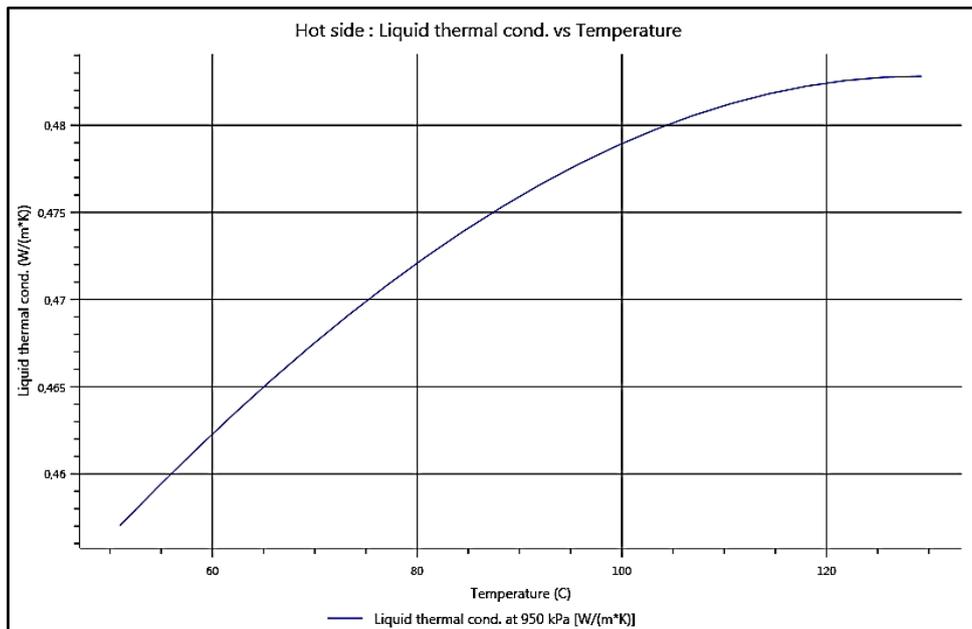


Fig. IV.12 : Variation de la conductivité thermique du fluide chaud en fonction de la température

**Commentaire :**

On constate une évaluation atténuée de la conductivité thermique de fluide de 65 °C à 105 °C, et une stabilisation à 120 °C.

4/ Plan mécanique :

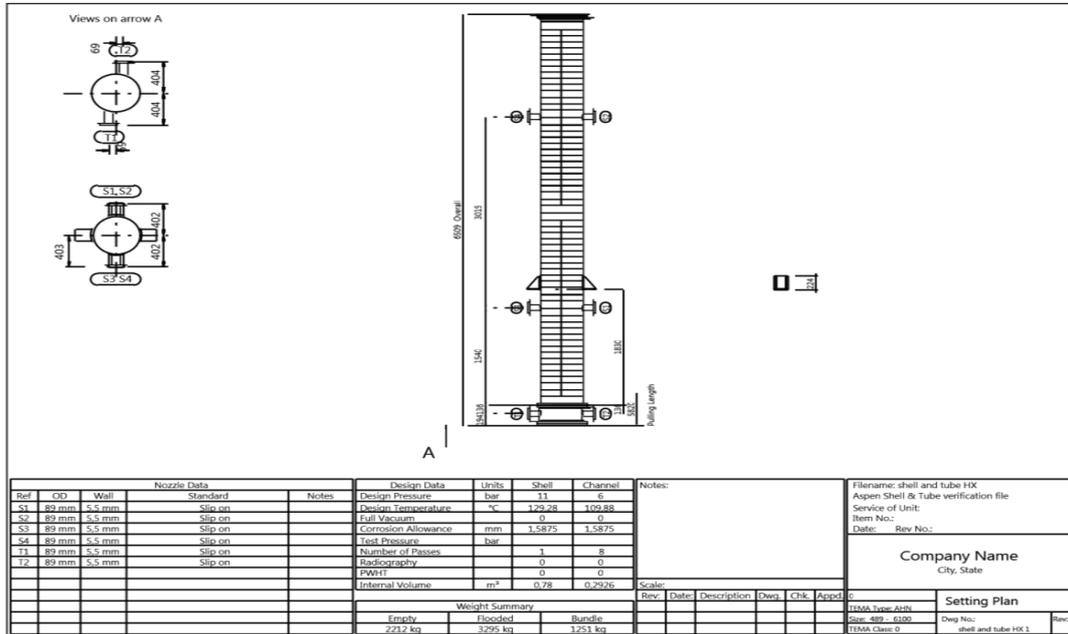


Fig. IV.13: plan mécanique montrant les dimensions du nouvel échangeur à tubes et calandre

5/ La disposition optimum obtenue des tubes :

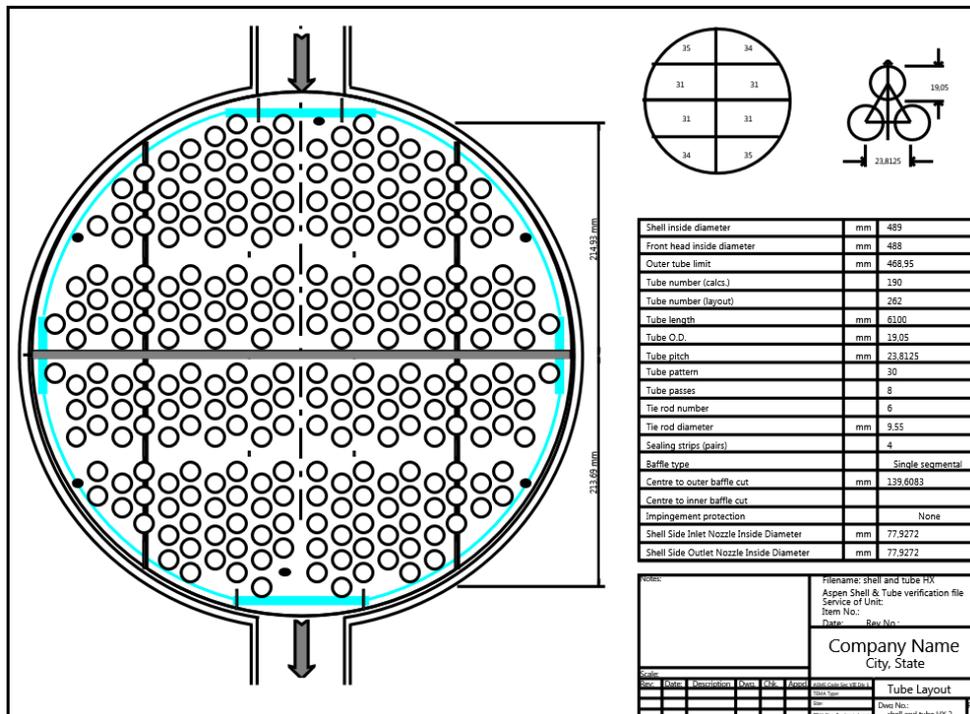


Fig. IV.14: Disposition optimum des tubes d'après le logiciel

### **IV.7.Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons mis en œuvre une simulation numérique avec création d'un modèle à partir de la bibliothèque propre au logiciel selon la sélection de l'exploitant. Le logiciel retenu pour cette simulation est le HYSYS V9, il nous a permis de calculer et visualiser les flux de matière, d'énergie et des paramètres physiques de l'écoulement des fluides circulant dans l'échangeur.

Ce logiciel renferme un module de géométrie qui permet de faire ressortir les paramètres géométriques, ainsi que la disposition optimum des tubes. Ce qui constitue un atout appréciable pour éventuellement un travail en perspective, donc un approfondissement de ce thème.

## **Conclusion générale**

C'est suite au déroulement du stage pratique qui a lieu au complexe GL1K de Skikda, que nous avons pris conscience que les différentes unités sont dépendantes l'une de l'autre ; là où tout dysfonctionnement ou indisponibilité des équipements installés au niveau d'une unité peut provoquer des perturbations qui influent sur la production du complexe.

En outre, vu particulièrement l'importance industrielle et la diversité des types des échangeurs de chaleur qui ont de nombreuses applications, et comme tout équipement industriel, des études préventives de ces équipements se présentent comme évidence pour une industrie.

De ce fait et suite aux problèmes confrontant les échangeurs de chaleur de l'unité de décarbonatation, nous avons dimensionné un échangeur à tubes et calandre afin de le proposer comme solution parmi d'autres pour un éventuel remplacement des échangeurs à plaques 12-MC-22A/B/C. Il ressort essentiellement que : sept échangeurs à tubes et calandre disposés en parallèle satisfont aux conditions de fonctionnement d'un seul échangeur à plaques selon le standard TEMA. De même la surface d'échange de l'échangeur à tubes et calandre est plus importante que celle de l'échangeur à plaques nécessitant une occupation spatiale plus étendue.

Enfin, L'aboutissement de ce travail consiste à comprendre la technologie des échangeurs de chaleur et les problèmes qui peuvent les subir lors le fonctionnement, notant que l'étude de ces équipements est plus vaste qu'elle apparaît, et de nos jours elle se fait en collaboration avec des logiciels de simulation et des essais itératifs afin d'obtenir les meilleurs résultats. En plus, il est indispensable de prendre en compte la notion du développement durable, donc nous nous cherchons toujours la technologie optimum qui doit être économiquement équitable et écologiquement tolérable.

## Références bibliographiques

- [1]-Dr.A.ZIOUCHI- Echangeurs de chaleur- Département maintenance industrielle-2007
- [2]-BERNARD-Echangeurs de chaleur- Chapitre 9 (La deuxième partie)-2014
- [3]-Dr.BOUSSAID-Cours des échangeurs de chaleur-Ecole IAP de Boumerdès- Département Maintenance industrielle.
- [4]-Mémoire-Amine ALI NEHARI- Étude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques et joints : Application aux fluides géothermiques. Université Abou-BakrBelkaid de Tlemcen -département de physique-2011
- [5]- Site WEB :[http://Process.free.fr/Pages/versionnmobile\\_0.php/page=4527](http://Process.free.fr/Pages/versionnmobile_0.php/page=4527)
- [6]- PIERRE WUITHIER- V-Etude et calcul du matériel-Appareils tubulaires d'échange de chaleur.1047-1100
- [7]- Mémoire – Hamza ALEM-Encadré par Pr.MZAD.H- Etude des performances thermiques du préchauffeur 200 E-2 au niveau de la raffinerie de Skikda- Université Badji Mokhtar Annaba- Département Génie Mécanique- Filière Energétique et Environnement -2016
- [8]- [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/Cours d'échangeur thermique: chicanes côté calandre](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/Cours_d'echangeur_thermique_chicanes_cote_calandre)
- [9]- ALPEMA-The standards of the brazed aluminum plate-fin heat exchanger manufacturer's association- Third Edition 2010
- [10]- Mémoire de Master en Génie Energétique- Taourit Farida- étude du comportement dynamique et thermique de deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur-2013
- [11]- manuel opératoire volume i, section 2-1: décarbonatation et stockage de l'ammoniac unité 12 document no: pp-aaa-pp1-102KBR-SONATRACH- projet du NOUVEAU TRAIN de GNL- SKIKDA, ALGERIE
- [12]-Rapport d'incident des échangeurs à plaques 12-MC22A/B/C-Activité LRP-POLE LQS-Complexe GL-1/K-Département Technique

GARANTIES DE PERFORMANCE

Ethane	Propane	Butane	Gazoline	Charge He (Nm <sup>3</sup> /An)
14 700	207 600	171 400	108 700	163 100 000
			98 000	147 800 000

lit le Cas de marche

Max	Ethane		Propane		Butane	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
96.60	0.00	1.46				
8.50	97.11	100.00	C2 - 0.0	2.5		
3.00	0.00	1.43	C3 95.0	100.0	C3 - 0.0	2.0
0.52			C4 + 0.0	2.5	C4 94.0	100.0
0.70					C5+ 0.0	2.5
1.40			TVR (37.8*)	14.60		
10.65			ppm H <sub>2</sub> O	0.00		
			Volatilité à 95%	-38.3 °C		
			Teneur en S	Pass N° 1 Copper Strip		

Annexe 1

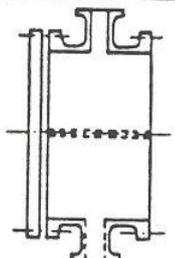
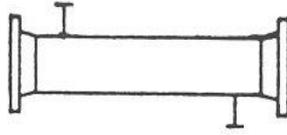
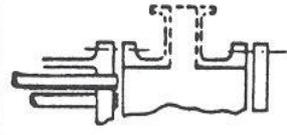
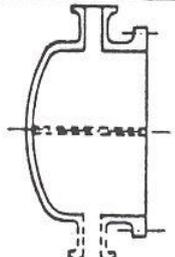
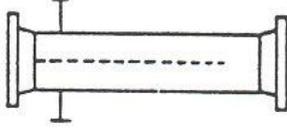
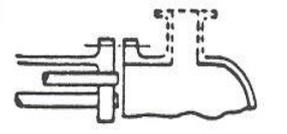
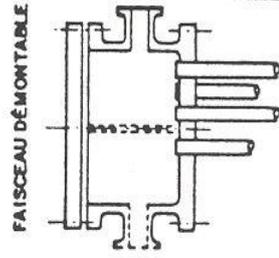
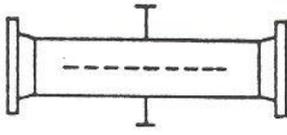
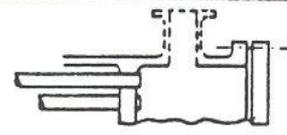
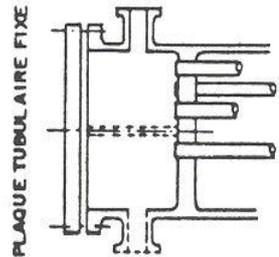
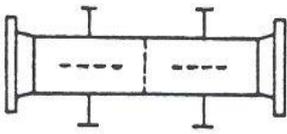
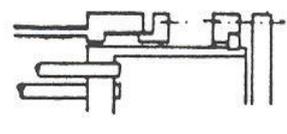
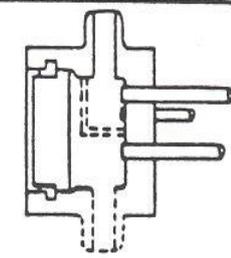
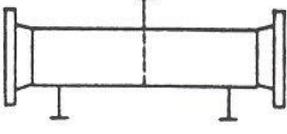
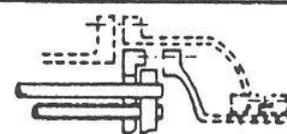
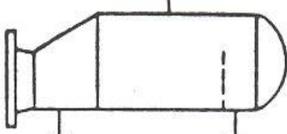
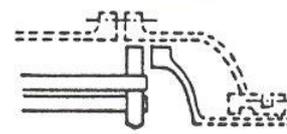
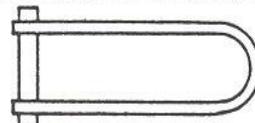
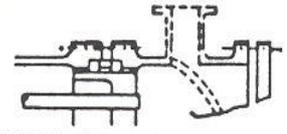
GARANTIES DE PERFORMANCE

Ethane	Propane	Butane	Gazoline	Charge He (Nm <sup>3</sup> /An)
14 700	207 600	171 400	108 700	163 100 000
			98 000	147 800 000

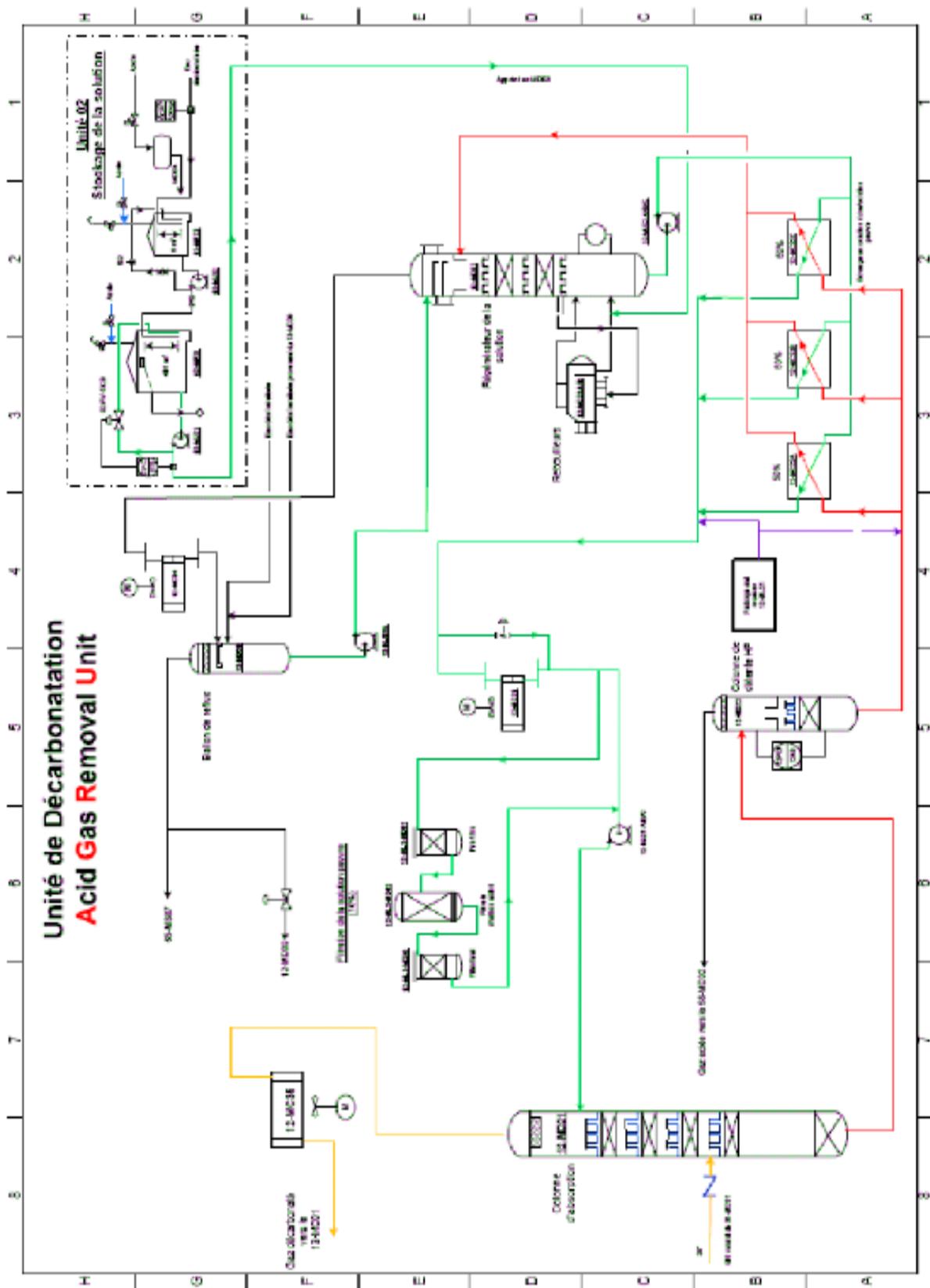
lit le Cas de marche

Max	Ethane		Propane		Butane	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
96.60	0.00	1.46				
8.50	97.11	100.00	C2 - 0.0	2.5		
3.00	0.00	1.43	C3 95.0	100.0	C3 - 0.0	2.0
0.52			C4 + 0.0	2.5	C4 94.0	100.0
0.70					C5+ 0.0	2.5
1.40			TVR (37.8*)	14.60		
10.65			ppm H <sub>2</sub> O	0.00		
			Volatilité à 95%	-38.3 °C		
			Teneur en S	Pass N° 1 Copper Strip		

Annexe 1

	TYPE DE CHAMBRE DE DISTRIBUTION		TYPE DE CALANDRE		TYPE DE TETE FLOTTANTE ET DE FOND DE CALANDRE
A	 CHAMBRE AVEC COUVERCLE DEMONTABLE	E	 UNE PASSE CALANDRE	L	 PLAQUE TUBULAIRE FIXE IDENTIQUE AU TYPE "A" CHAMBRE
B	 CHAMBRE A FOND ET BRIDE MONOBLOC	F	 DEUX PASSES CALANDRE AVEC CHICANE LONGITUDINALE	M	 PLAQUE TUBULAIRE FIXE IDENTIQUE AU TYPE "B" CHAMBRE
C	 FAISCEAU DEMONTABLE	G	 FLUX DIVISE	N	 PLAQUE TUBULAIRE FIXE IDENTIQUE AU TYPE "C" CHAMBRE
	 PLAQUE TUBULAIRE FIXE	H	 DOUBLE FLUX DIVISE	P	 TETE FLOTTANTE AVEC PRESSE-ETOUPE EXTERIEUR
D	 FERMETURE SPECIALE POUR HP	J	 FLUX DIVISE A 2 SORTIES	S	 TETE FLOTTANTE AVEC COURONNE DE FIXATION EN 2 ELEMENTS
		K	 REBOUILLEUR "TYPE CHAUDIERE"	T	 TETE FLOTTANTE A PASSAGE LIBRE
				U	 FAISCEAU TUBULAIRE AVEC TUBES EN EPINGLES "U"
				W	 TETE FLOTTANTE AVEC JOINT TYPE "LANTERNE"

Annexe 2 : Exemples de combinaison d'échangeurs TEMA



Annexe 3 : Schéma du procédé de décarbonatation

H E A T   E X C H A N G E R S   ▲   H E A T   E X C H A N G E R S

 **TRANTER** Plate & Frame Performance Specification

Customer: KBR Technical Inc.	Date Revised : 9/16/2008
Address: 601 Jefferson Ave	S/O No.: 125081
HOUSTON, TX 77002-7990	Item No.: 1
Cust. Reference: 6404-MC007	Technician: TEC
Model: <b>GLD-325-H-7-GP-451</b>	Run No.: 410920
	Units Required: 1



**Intended End Use:** Heat exchanger to cool Lean Solvent 78.32°C using 45.30°C Rich Solvent with pressure drop at or below 50.00 kPa on hot side and at or below 100.00 kPa on cold side.

PERFORMANCE		Hot Side	Cold Side	
Flow Rate (Total)	<i>kg/h</i>	264635.70	285102.30	<i>kg/h</i>
Flow Rate (Unit)	<i>kg/h</i>	264635.70	285102.30	<i>kg/h</i>
Inlet Temperature	<i>°C</i>	129.28	45.30	<i>°C</i>
Outlet Temperature	<i>°C</i>	50.96	109.88	<i>°C</i>
Pressure Drop	<i>kPa</i>	13.17	63.06	<i>kPa</i>
Operating Pressure	<i>kPa(abs)</i>	950.00	485.00	<i>kPa(abs)</i>
Total Heat Exchanged	<i>W</i>		22858843	
U-Value (Service / Clean)	<i>W/(m<sup>2</sup>·°K)</i>		1835 / 1835	
Total Heat Transfer Area (Per Unit)	<i>m<sup>2</sup></i>		1652.27	
LMTD	<i>°C</i>		7.54	
Cleanliness Factor			1.00	

FLUID DATA		Hot Side	Cold Side
Fluid Name		Lean Solvent	Rich Solvent
Density	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	991.31	1056.85
Specific Heat	<i>kJ/(kg·°K)</i>	3.97	3.73
Thermal Conductivity	<i>W/(m·K)</i>	0.47	0.46
Viscosity (avg.)	<i>mPa·s</i>	1.10	1.58

**CONSTRUCTION**

Plate Material/Thickness	SA-240 316L Stainless Steel	0.7 mm.
Gasket Material (Hot/Cold)	HNBR	HNBR
Connection Material	SA-312TP 316LSS	SA-312TP 316LSS
Connection Size (Hot/Cold Inlet)	12" 300# RFWN	12" 150# RFWN
Connection Size (Hot/Cold outlet)	12" 300# RFWN	12" 150# RFWN
Frame/Finish	SA-516-70 Carbon Steel	Painted Per Specification
Guide Bar (plate Guides)/Finish	SA-240 316 Stainless Steel	Mill Finish
Tightening Bolts/Finish	SA-193-B7 Carbon Steel	Zinc Plated
Tightening Nuts/Finish	SA-194-2H Carbon Steel	Zinc Plated

**DESIGN**

Design/Test Pressure	<i>kPa·g</i>	Hot Side - 2000 / 3000	Cold Side - 1600 / 2400 & FV
Design Temperature	<i>°C</i>	Hot Side - 150 / - 12	Cold Side - 135 / -12
ASME Stamp / CE Stamp		Yes	-
Total Weight Empty/Flooded (Per Unit)	<i>kg</i>	24811	29401
No. Plates / Frame Capacity		451	542
Pass Arrangement (Hot/Cold)		1	1
Plate Mix (Hot/Cold)		225H+0H	225H+0H
Flow Direction		Countercurrent	

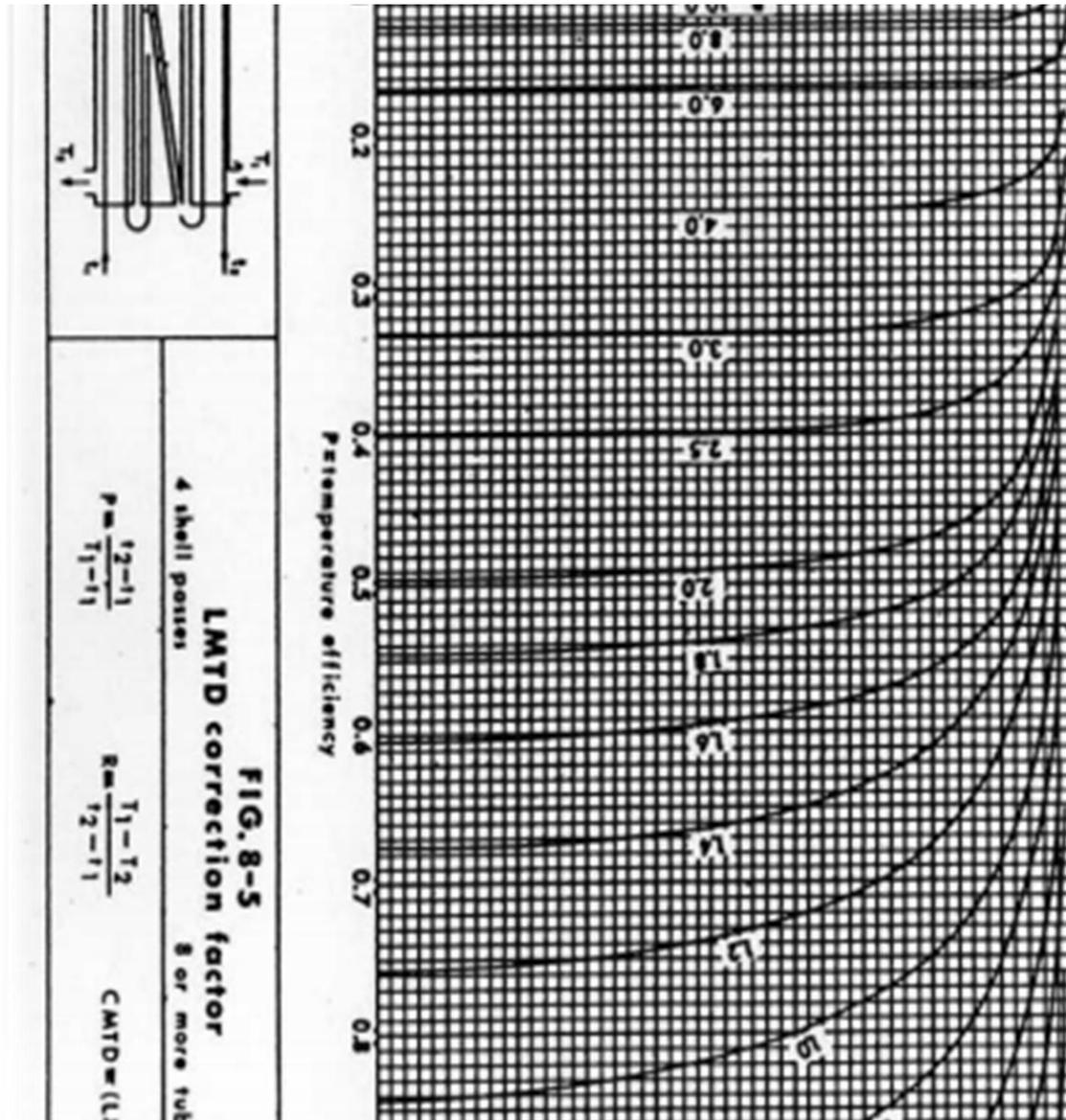
**REMARKS:**

Lean/Rich Solvent Exchanger - Item No. 12-MC22 (As Sold Design)

*The performance guarantee is based on the accuracy of the data presented above, and the customers ability to supply product and operating conditions in conformance with the above.*

Tranter, Inc. ▲ P.O. Box 2289 ▲ Wichita Falls, TX 76307  
Phn: (940) 723-7125 ▲ Fax: (940) 723-5131  
<http://www.tranter.com>

**Annexe 4 : Fiche technique des échangeur à plaque 12-MC22A/B/C (les données pour un échangeur)**



Annexe 5 : Abaque de détermination de facteur de correction  
 (Quatre passes côté calandre- huit passes côté tubes)

DISPOSITION ET NOMBRE DE TUBES EN FONCTION DU DIAMETRE DE LA CALANDRE - PAS TRIANGULAIRE -

FICHE N° 12

Tubes  $d_o = 19 \text{ mm}$  - Pas  $\Delta 23,8 \text{ mm}$       Tubes  $d_o = 19 \text{ mm}$  - Pas  $\Delta 25,4 \text{ mm}$

Calandre Diam. Int. Dc en mm	Tubes $d_o = 19 \text{ mm}$ - Pas $\Delta 23,8 \text{ mm}$					Calandre Diam. Int. Dc en mm	Tubes $d_o = 19 \text{ mm}$ - Pas $\Delta 25,4 \text{ mm}$				
	1 Passe	2 Passes	4 Passes	6 Passes	8 Passes		1 Passe	2 Passes	4 Passes	6 Passes	8 Passes
0,203	36	32	26	24	18	0,203	37	30	24	24	
0,254	62	56	47	42	36	0,254	61	52	40	36	
0,305	103	98	86	82	78	0,305	92	82	76	74	70
0,336	127	114	96	90	86	0,336	103	106	86	82	74
0,387	170	160	140	135	128	0,387	151	138	122	118	110
0,438	239	224	194	188	178	0,438	203	196	178	172	166
0,489	301	282	252	244	234	0,489	262	250	226	216	210
0,540	351	342	314	306	290	0,540	316	302	278	272	260
0,590	442	420	386	378	364	0,590	384	376	352	342	328
0,635	532	506	468	446	434	0,635	470	452	422	394	382
0,685	637	602	550	536	524	0,685	559	534	488	474	464
0,736	721	692	640	620	594	0,736	630	604	556	538	508
0,787	847	822	766	722	720	0,787	745	728	678	666	640
0,838	974	958	898	852	826	0,838	855	830	774	760	732
0,888	1102	1068	1004	958	958	0,888	970	958	882	864	848
0,939	1240	1200	1144	1104	1072	0,939	1074	1044	1012	986	970
0,990	1377	1330	1258	1248	1212	0,990	1205	1175	1128	1100	1078

Tubes  $d_o = 25,4$  - Pas  $\Delta 34,75 \text{ mm}$       Tubes  $d_o = 31,75 \text{ mm}$  - Pas  $\Delta 39,7 \text{ mm}$

Calandre Diam. Int. Dc en mm	Tubes $d_o = 25,4$ - Pas $\Delta 34,75 \text{ mm}$					Calandre Diam. Int. Dc en mm	Tubes $d_o = 31,75 \text{ mm}$ - Pas $\Delta 39,7 \text{ mm}$				
	1 Passe	2 Passes	4 Passes	6 Passes	8 Passes		1 Passe	2 Passes	4 Passes	6 Passes	8 Passes
0,203	21	16	16	14		-					
0,254	32	32	26	24		0,254	20	18	14		
0,305	55	52	48	46	44	0,305	32	30	26	22	20
0,336	68	66	58	54	50	0,336	38	36	32	28	26
0,387	91	86	80	74	72	0,387	54	51	45	42	38
0,438	131	118	106	104	94	0,438	69	65	62	56	54
0,489	163	152	140	136	128	0,489	85	81	86	78	69
0,540	193	186	170	164	160	0,540	117	112	105	101	95
0,590	241	232	212	212	202	0,590	143	136	130	123	117
0,635	284	282	256	252	242	0,635	170	164	155	150	140
0,685	343	334	302	295	286	0,685	202	196	185	177	170
0,736	387	376	333	334	316	0,736	235	228	217	212	202
0,787	472	454	430	424	400	0,787	275	270	255	245	235
0,838	538	522	485	470	454	0,838	315	305	297	283	275
0,888	608	592	562	546	532	0,888	351	348	335	327	315
0,939	674	654	632	614	592	0,939	407	390	380	374	357
0,990	760	736	700	681	672	0,990	474	456	445	431	407

$d_o$ : diamètre extérieur du tube



