

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE HAMMA LAKHDAR EL-OUED

Faculté de la technologie

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité: Raffinage et pétrochimique

Présenté par :FEREDJ Faïçal

Thème

*Etude et solutionnement du problème de givrage au niveau de
l'échangeur E411.*

MODULE 0 / HASSI R'MEL

Soutenu le 26/05/2016

Devant le jury:

| | | | |
|----------------------|-----------|-----|----------------------|
| Mr :BOUDIAF Moussa | Président | MAA | Université d'Eloued. |
| Mr : BEN MYA Omar | Examineur | MCB | Université d'Eloued. |
| Mr :ATIA Abd Elmalek | Encadreur | MCB | Université d'Eloued. |

Année Universaire : 2015/2016

Remerciements

Au terme de ce travail,

Je tiens à remercier mon dieu pour le courage et la pascience qui'il ma donné afin de mener ce projet a terme.

Je remercie très chaleureusement mon prof- consultant M^r:ATIA Abdelmalek pour son encadrement, son aide, ses encouragements et ses conseils.

Je remercie vivement :

- ✓ Le chef service de module 0 Mr : SMAIL Salim.
- ✓ tous les ingénieurs et les contremaitres.
- ✓ Touts les opérateurs et les tableautistes sans exception.

Pour leur aide et leur soutien au cours de stage.

Je remercie également le personnel du laboratoire module 0.

Enfin je remercie toute personne ayant contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE I : GENERALITES..... | 2 |
| I-1. Généralité sur le gaz naturel | 2 |
| I-1-a- Introduction | 2 |
| I-1-b. Gaz naturel dans le monde | 2 |
| I-1-c. Le gaz naturel en Algérie | 3 |
| I-1-d. Caractéristiques de gaz naturel | 5 |
| I-1-e. Composition chimique d'un gaz naturel..... | 6 |
| I-1-f. Les types de gaz naturel | 6 |
| I-2. Généralité sur le GPL..... | 7 |
| I-2-a. Définition des GPL | 7 |
| I-2-b. Les sources des GPL | 7 |
| I-2-c Les caractéristiques générales des GPL | 7 |
| I-2-d. La production mondiale du GPL..... | 8 |
| I-2-e. Le GPL en Algérie | 9 |
| I-2-f. Domaines d'utilisation du GPL | 11 |
| I-2-g. Conclusion pour le GPL | 12 |
| I-3. Généralité sur le condensat | 13 |
| I-3-a. Définition du Condensât | 13 |
| I-3-b. Caractéristiques du Condensât | 13 |
| I-3-c. Domaines d'utilisation du Condensât | 14 |
| CHAPITRE II : PESENTATION DE LA REGION DE HASSI R'MEL | 15 |
| II-1. Situation géographique | 15 |
| II-2. Historique du champ de HASSI R'MEL | 15 |
| II-3. La capacité de production actuelle | 16 |
| II-4. Spécification des produits..... | 16 |

| | |
|--|-----------|
| II-5. Installations gaziers de HASSI R'MEL | 16 |
| II-6. Les modules de traitement de gaz sont reliés..... | 17 |
| II-7. Procédés de traitement du gaz | 18 |
| II-8. Présentation du MPP0 : (module processing plant)..... | 19 |
| II-8-a. Composition du gaz d'alimentation de la région | 20 |
| II-8-b. Capacité de production | 20 |
| II-9. Description du processus | 21 |
| II-9-a. Zone de séparation de condensât | 21 |
| II-9-b. Zone de stabilisation du condensât et récupération du GPL..... | 23 |
| II-9-c. Zone de régénération de glycol | 25 |
| II-9-d. ZONE DE STOCKAGE DE BRUT..... | 26 |
| CHAPITRE IV- GENERALITE SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR..... | 27 |
| IV-1. Introduction..... | 27 |
| IV-2. Modes de transfert de chaleur..... | 27 |
| CHAPITRE V- GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR..... | 31 |
| V-1. Introduction..... | 31 |
| V-2. Critère de classement des échangeurs de chaleurs | 31 |
| V-3. Les fonctions des échangeurs..... | 32 |
| V-4. Les différents types d'échangeurs..... | 34 |
| V-5. Principe de fonctionnement..... | 43 |
| V-6. Mode de circulation des fluides..... | 44 |
| V-7. Recommandation sur le choix des paramètres de l'échangeur..... | 46 |
| V-8. Paramètres influençant sur la performance d'un échangeur..... | 48 |
| V-9. Impératifs à prendre en tendent compte..... | 52 |
| V-9-a. Condition de fonctionnement..... | 52 |
| V-9-b. Conditions de tenue mécanique..... | 54 |
| V-9-c. Conditions de maintenance..... | 56 |

| | |
|--|-----------|
| V-9-d. Impératifs économiques..... | 56 |
| CHAPITRE V : SIMULATION | 58 |
| V-1. Généralités sur la simulation..... | 58 |
| V-2. Le choix du modèle thermodynamique..... | 59 |
| V-2-a. Modèles d'activité..... | 59 |
| V-2-b. Modèles hétérogènes..... | 59 |
| V-2-c. Modèles basés sur les équations d'état..... | 59 |
| V-3. Equations d'état..... | 59 |
| V-3-a. Equation de SOAVE et de PENG-ROBINSON..... | 59 |
| V-4. Les équations les plus utilisées..... | 61 |
| V-5. Description du simulateur HYSYS..... | 61 |
| CHAPITRE VI : PARTIE CALCUL..... | 63 |
| VI-1.Calcul De vérification..... | 64 |
| VI-1-a. Caractéristiques des fluides..... | 63 |
| VI-1-b.Caractéristique d'échangeur..... | 64 |
| VI-1-c.Calcul de la quantité de chaleur échangée..... | 67 |
| VI-1-d. Calcul de DTLM..... | 68 |
| VI-1-e.Calcul de surface d'échange globale A..... | 69 |
| VI-1-f.Calcul le nombre des tubes..... | 69 |
| VI-1-g.Calcul les pertes de charge..... | 69 |
| VI-1-h. Résume les résultats..... | 73 |
| VI-2. Calcul la température de sortie par le logiciel HYSYS..... | 73 |
| VI-2-a.Ouvrire la page de travail PFD (Process Flow Diagrams)..... | 74 |
| VI-2-b.Cas Design..... | 74 |
| VI-2-c.Cas actuel en été..... | 79 |
| VI-2-d.Cas actuel en hiver..... | 85 |
| CONCLUSION | 91 |

LISTES DES FIGURES

| | |
|---|-----------|
| Figure (I-1) : Production de gaz naturel en Algérie | 04 |
| Figure (I-2) : La répartition des réserves gazières en Algérie | 05 |
| Figure (I-3) : Offre prévisionnelle nationale de GPL (en mt)..... | 10 |
| Figure (II-1) : Situation géographique du site de Hassi R'mel..... | 15 |
| Figure (II-2) : Répartition des différentes installations sur le champ de Hassi R'mel..... | 17 |
| Figure (II-3) : Zone séparation du condensat..... | 22 |
| Figure (II-4) : Zone de stabilisation du condensat..... | 24 |
| Figure (IV-1) : Plaques tubulaires..... | 38 |
| Figure (IV-2) : Chicanes longitudinales-transversales..... | 39 |
| Figure (IV-3) : Echangeur double tube ou tube coaxiaux | 40 |
| Figure (IV-4) : Echange à contre courant..... | 44 |
| Figure (IV-5) : Echange a co-courant..... | 45 |
| Figure (IV-6) : Nomenclature des composants des échangeurs..... | 57 |
| Figure (VI-1) : Diagramme des températures..... | 68 |
| Figure (VI-2) schéma de hysys..... | 73 |

LISTES DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau (II-1) : Les différentes zones de Hassi R'Mel..... | 18 |
| Tableau (II-2) : Composition du gaz d'alimentation de Hassi R'mel..... | 20 |
| Tableau (V-1) : Domaines d'applications de l'équation de PENG ROBINSON... | 61 |
| Tableau VI-1 : Composition de la charge (coté tube)..... | 64 |
| Tableau VI-2 : Condition opératoire (coté tube)..... | 65 |
| Tableau VI-3 : Composition de la charge (coté calandre)..... | 66 |
| Tableau VI-4 : Condition opératoire (coté calandre)..... | 67 |
| Tableau VI-5. les résultats de calcul..... | 73 |
| Tableau VI-6 : Composition de la charge (hydrocarbure liquide) | 75 |
| Tableau VI-7 : Composition de la charge(DEG)..... | 76 |
| Tableau VI-8 : Composition de la charge (entrée tube)..... | 77 |
| Tableau VI-9 : Composition de la charge (entrée calandre)..... | 78 |
| Tableau VI-10 : Composition de la charge (Hydrocarbure liquide)..... | 80 |
| Tableau VI-11 : Composition de la charge (DEG hydraté)..... | 81 |
| Tableau VI-12 : Composition de la charge (entrée tube)..... | 82 |
| Tableau VI-13 : Composition de la charge (entrée calandre)..... | 83 |
| Tableau VI-14 : Composition de la charge (Hydrocarbure liquide)..... | 86 |
| Tableau VI-15 : Composition de la charge (DEG hydraté)..... | 87 |
| Tableau VI-16 : Composition de la charge (entrée tube)..... | 88 |
| Tableau VI-17 : Composition de la charge (entrée calandre)..... | 99 |

NOMENCLATURE

- d_0** : Diamètre extérieur des tubes.
 d_i : Diamètre intérieur des tubes.
L : **Longueur** des tubes.
P : **Pas** triangulaire.
e : **Epaisseur** des tubes.
 n_t : Nombre de passe coté tube.
 n_c : Nombre de passe coté calandre.
U : Coefficient de transfert.
 D_c : Diamètre de la calandre.
 D_e : Diamètre hydraulique.
 N_c : Nombre de chicanes.
B: Espacement entre le tubes.
 N_t : Nombre des tubes.
X: Le rapport de l'aire du segment libre à la section intérieur de la calandre.
 h_1 : L'enthalpie à la température d'entrée coté tube.
 h_2 : L'enthalpie à la température de sortie coté tube.
 H_1 : L'enthalpie à la température d'entrée coté calandre.
 H_2 : L'enthalpie à la température d'entrée coté calandre.
 μ_t : Viscosité coté tube.
 μ_c : Viscosité coté calandre.
- : la masse volumique moyenne. ρ_m
m: Débit massique de fluide coté tube.
M: Débit massique de fluide coté calandre.
 Q_f : La quantité de chaleur absorbé.
 Q_c : La quantité de chaleur cédé par le coté tube.
DTLM : La différence de la température logarithmique moyenne.
F: facteur de correction.
A: Surface d'échange globale.
a: La section de passage dans les tubes.
G_t: La vitesse massique.
Re: Nombre de Reynolds.
 ΔP_t : La perte de charge coté tube.
 ΔP_B : Perte de charge dans la boîte de distribution.
f: Coefficient de friction.
 $\Delta P_{total\ tube}$: Perte de charge totale.
 G_{cl} : La vitesse massique longitudinale.
 G_{ct} : La vitesse massique transversale.
 a_{ct} : Air de passage.
 ΔP_{cl} : Perte de charge longitudinale.
 ΔP_{CT} : Perte de charge transversale.
 $\Delta P_{totale\ calandre}$: La perte de charge totale coté calandre.

INTRODUCTION

L'énergie occupe une place prépondérante dans la vie de l'être humain. Les sciences et les progrès techniques ont permis à l'homme de découvrir de nouvelles ressources énergétiques tel que le pétrole brut et le gaz naturel.

Le gaz naturel joue un rôle énergétique croissant au niveau mondial.

Le gaz naturel est le premier concurrent du pétrole sur les marchés de combustibles.

L'Algérie est l'un des pays les plus importants dans le domaine des hydrocarbures et son drivé, elle est classé le 3ème exportateur mondial de gaz naturel et possède l'un des plus grands gisements qui se situe à HASSI R'MEL.

Les échangeurs de chaleur jouent un rôle essentiel dans la politique de maîtrise de l'énergie. Dans les milieux industriels, plus de quatre vint dix pour cent (90%) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés transite, au moins une fois, par un échangeur de chaleur

Dans ce travail, je présente un calcul manuel de vérification d'un échangeur (E411) et un calcul avec le simulateur HYSYS les paramètres de sortie dans le cas design et dans le cas actuel (en été et en hiver).

CHAPITRE I

CHAPITRE I : GENERALITES

I-I. Généralité sur le gaz naturel :

I-2-a- Introduction :

Le gaz naturel brut est composé essentiellement d'hydrocarbure (gazeux, liquide) dont le pourcentage et la nature changent suivant les régions d'extraction, et d'eau avec quelques impuretés de proportions variables (N₂, CO₂, H₂S, composés sulfurés,etc.)

Le gaz naturel se trouve sous pression dans les roches poreuses du sous sol ou on le trouve en solution avec du pétrole brut ou du condensât.

Depuis sa découverte il a été utilisé comme fuel ou a usage domestique, alors que maintenant il joue un rôle énergétique croissant.

I-2-b-.Gaz naturel dans le monde :

I-2-b-1- Réserves de gaz :

La comparaison des taux d'épuisement des ressources d'hydrocarbures constate que le gaz naturel est une ressource énergétique relativement peu exploitée par rapport au pétrole brut.

I-2-b-2- Durée de vie des réserves gazières :

La durée de vie (rapport des réserves à la production d'une année donnée) des réserves totales mondiales de gaz est actuellement de **187 ans**. Elle est de **68 ans** sur la base des seules réserves prouvées, chiffre sensiblement supérieur à celui de **45 ans** pour le pétrole. Selon le scénario, la durée de vie des réserves totales connues sera comprise entre **99** et **124 ans** en **2010** après déduction des quantités consommées d'ici là.

Les réserves mondiales de gaz sont donc abondantes ; leur accroissement a couvert deux fois la production intervenue ces trois dernières années[1] .

I-2-b-3- Production mondiale du gaz naturel :

Le classement des pays producteurs illustre surtout les problèmes liés au coût élevé du transport du gaz naturel hors CEI et USA. Les principaux producteurs sont proches des grands marchés consommateurs : Canada (USA) Pays-Bas, Royaume-Unis et l'Algérie.

L'offre mondiale croît rapidement pour se situer dans l'intervalle **2520-2890 Gm³/an** en **2000**, puis dans l'intervalle **2960-3640 Gm³/an** en **2010**. Cette croissance se ralentit ensuite dans les deux scénarios, le niveau d'offre potentiel en **2030** étant compris entre **3110** et **4130 Gm³/an**.

I-1-c. Le gaz naturel en Algérie :

L'Algérie a une importante industrie de gaz naturel, et un important producteur de gaz au niveau mondial

A la fin de **1953**, plusieurs compagnies de sismiques aboutirent à la mise en évidence d'une zone haute, pouvant constituer un anticlinal, notamment dans la région de Hassi R'Mel, un premier forage (HR1) a été réalisé en **1956**. Huit puits sont alors réalisés, délimitant ainsi une structure anticlinale constituant un grand réservoir de gaz.

Ce premier développement du champ permet de préciser le vicié des niveaux géologiques et d'approfondir les connaissances sur le réservoir et son effluent.

Quatre puits sont reliés à un centre de traitement permettant l'exploitation commerciale du champ, dès février **1961** deux unités livrent du gaz à GL4-Z à travers un gazoduc reliant Hassi-R'Mel à Arzew, le condensât était évacué à Haouadh El Hamra via l'oléoduc «N°8 ».

Depuis la mise en exploitation, plusieurs étapes ont été marquées avant d'atteindre la phase actuelle de développement.

De **1961** à **1971**, la production annuelle de gaz brut passe de 0,8 à 3,2 milliards de m³ et celle du condensât passe de **126 000** à **623 000 tonnes**.

De **1971** à **1974**, des études des réservoirs permettent de définir le mode d'exploitation du champ.

En **1974**, parallèlement à ces études, une extension du centre de traitement était réalisée par l'adjonction de six nouvelles unités d'une capacité totale de **300.10⁶ m³/j**.

Un programme de forage complémentaire était porté sur 23 nouveaux puits réalisés entre **1971** et **1974**.

Depuis **1980**, l'Algérie est devenue l'un des grands exportateurs mondiaux de gaz naturel. Parallèlement à ce mode de transport l'Algérie a pu transporter son gaz par des gazoducs reliant directement Hassi R'mel à l'Europe, c'est ainsi qu'elle exploite actuellement le fameux gazoduc trans-méditerranéen qui relie l'Algérie à l'Italie et la Slovénie via la Tunisie[2].

I-1-c-1- Richesse Algérienne en gaz naturel :

L'Algérie possède des réserves immenses en gaz naturel à savoir le champ de Hassi R'Mel, qui est l'un des plus grands à l'échelle mondiale et celui de Ain- Salah. L'Algérie est placée au quatrième rang, en possédant **10%** environ des réserves mondiales.

L'exploitation de gaz naturel en provenance de l'Algérie atteindra **80 milliards m³** de production (voir figure (I-1)). Autrement dit l'Algérie deviendra le première exportateur dans ce secteur.

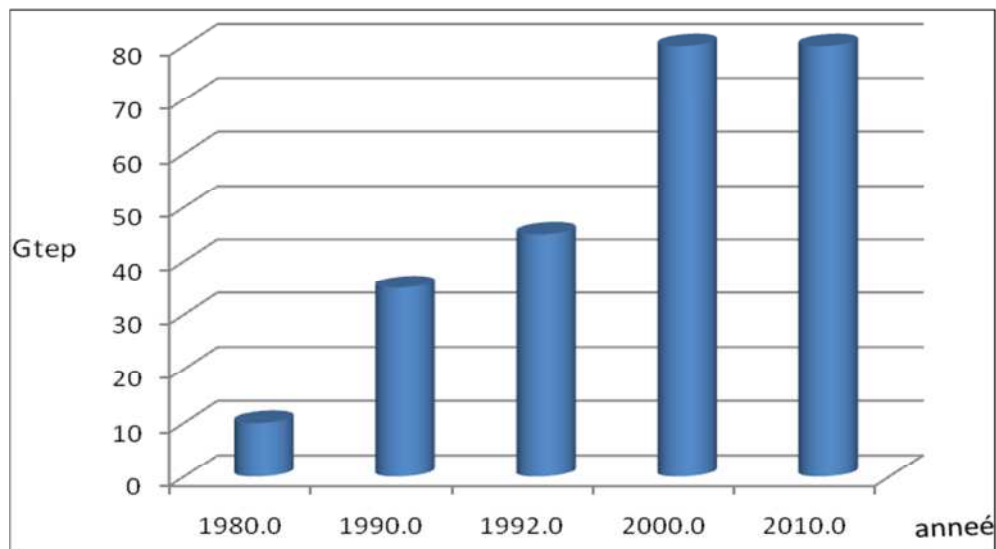


Figure (I -1) : production de gaz naturel en Algérie

I-1-c-2. Les réserves gazières en Algérie :

En **janvier 2003** les réserves prouvées de gaz naturel sont estimées à **4,077.10⁹m³**. Au cours des dix dernières années les bassins de Berkine et d'Illizi ont enregistré les taux de réussite les plus élevés dans l'exploration, avec respectivement **51%** et **50%**. Parmi les autres bassins de Berkine qui se classent comme les plus fructueux figure le bassin de Oued Mya où ils ont effectué une autre découverte de gaz et de pétrole en **2002**, ainsi que les bassins de Timimoun et Hassi Messaoud (voir figure (I-2))

Il est estimé actuellement que des investissements de l'ordre de **7Milliards** de \$ devront être débloqués les prochaines années afin de développer toutes les découvertes réalisées.

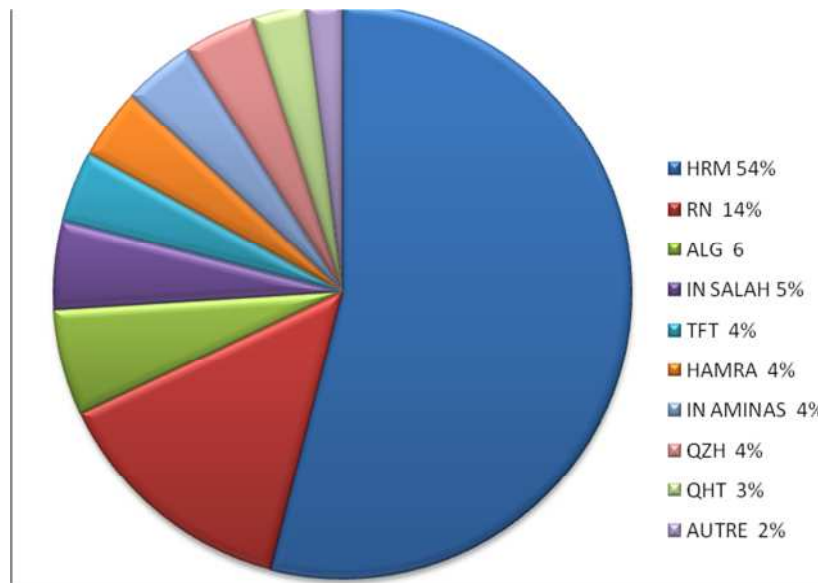


Figure (I-2) : La répartition de réserves gazières en Algérie

I-1-d. Caractéristiques du gaz naturel :

Au stade final de son exploitation, le gaz naturel peut être caractérisé par les propriétés suivantes :

I-1-d-1. Densité :

Un gaz est défini par le rapport de sa masse volumique à celle de l'air dans les conditions déterminées de la température et de pression.

I-1-d-2. Pouvoir calorifique :

C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de volume du gaz, mesurée dans les conditions de référence. Le pouvoir calorifique pour le gaz naturel s'exprime en (j/m^3).

Il existe deux valeurs de pouvoir calorifique :

❖ Pouvoir calorifique supérieur (PCS) :

C'est la quantité de chaleur dégagée lorsque tous les produits de combustion sont ramenés à la température ambiante, l'eau formée étant liquide.

❖ Pouvoir calorifique inférieur (PCI) :

C'est la quantité de chaleur dégagée lorsque tous les produits de combustion sont ramenés à la température ambiante, l'eau reste à l'état vapeur.

I-1-e. Composition chimique d'un gaz naturel :

La composition chimique d'un gaz c'est la nature des hydrocarbures et les autres constituants qu'il renferme, leur importance relative dans le mélange et leur fraction volumique ou moléculaire.

La composition chimique d'un gaz est utilisée pour étudier la vaporisation et calculer certaines de ces propriétés en fonction de la pression et la température

On peut classer les gaz naturels selon leurs origines en :

1) Le gaz naturel bactérien : (biochimique)

C'est un gaz formé par l'action des bactéries sur les débris organiques qui s'accumulent dans les sédiments.

2) Le gaz naturel thermique :

C'est un gaz formé par la dégradation thermique des sédiments portés à des températures et pressions croissantes au cours de l'évolution des bassins sédimentaires, et donne à côté des hydrocarbures une large gamme de composés non hydrocarbures.

3) Le gaz naturel inorganique :

C'est un gaz inorganique qui se forme au cours de formation des gaz hydrocarbures à faible proportion, les gaz volcaniques et les sources hydrothermales contenant parfois du méthane et des inclusions fluides des minéraux, des roches métamorphiques ou magmatiques.

I-1-f. Les types de gaz naturel :

La présence et l'apparition d'une phase liquide avec le gaz selon les conditions de pression et la température dans le réservoir de gisement et en surface conduit à distinguer

- 1. Le gaz sec :** Dans les conditions de production de ce gaz, il n'y a pas une formation de phase liquide et le gaz est concentré en méthane et contient très peu d'hydrocarbures plus lourds que l'éthane.
 - 2. Le gaz humide :** Dans les conditions de production de ce gaz, il y'a une formation de phase liquide dans la condition de surface et le gaz est moins concentré en méthane.
 - 3. Le gaz à condensât :** Dans les conditions de production de ce gaz, il y'a une formation de phase condensée riche en constituants lourds dans le réservoir.
-

4. **Le gaz associé** : C'est un gaz de couverture qui coexiste avec la phase d'huile dans le réservoir d'huile (gisement de pétrole).[1].

I-2. Généralité sur le GPL :

I-2-a. Définition des GPL :

Le GPL (gaz du pétrole liquéfié) est un mélange gazeux constitué essentiellement de propane (C_3H_8), et de butane (C_4H_{10}), et un peu de traces de méthane (CH_4), de l'éthane (C_2H_6) et le pentane (C_5H_{12}).

Le GPL est un produit gazeux à la température ambiante et pression atmosphérique. Il est liquéfié à faible pression (**4 à 5 bar**) et une température très basse pour faciliter son transport, son stockage et sa commercialisation, il se gazéifie au moment de son utilisation.

Le GPL est l'un des meilleurs combustibles avec le gaz naturel en ce qui concerne le contrôle de l'environnement.

I-2-b. Les sources des GPL :

Le GPL est obtenu principalement :

- 1) Dans les raffineries, soit au cours de distillation du pétrole brut ou lors de cracking ou de Reforming des produits en vue de la production des essences.
- 2) Au cours des séparations du gaz naturel (GN) qui a pour but de séparer et de récupérer le condensât et le GPL (**propane, butane, C_5^+**) dans les champs.
- 3) Par liquéfaction du gaz naturel (GP2Z – GL1K). [3]

I-2-c Les caractéristiques générales des GPL :

1. **Odeur** : le GPL est inodore à l'état naturel, mais on doit ajouter un odorant, ce sont des composés sulfurés tel que le diéthylmercaptan ou le diméthylsulfide pour des raisons de sécurité, dans des limites à des fins de commercialisation.
 2. **Tension de vapeur** : la TVR du GPL est de **8 et 2 bars** pour le propane et le butane respectivement à **20°C**.
 3. **Dilatation** : à l'état liquide, le GPL a un haut coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de leur stockage (les sphères ne doivent jamais être complètement remplies).
-

4. **Densité** : aux conditions normales de température et de pression, le GPL est plus lourd que l'air, il est diminué avec l'augmentation de la température à titre d'exemple : à **38°C** la densité est égale **0,534**, la densité est très importante dans le GPL commercial.

De petites quantités de GPL dans l'eau peuvent former un mélange, c'est pour cela qu'il n'est pas toléré de négliger la moindre consigne de sécurité dans l'industrie du gaz

5. **Température d'ébullition** : à la pression atmosphérique la température d'ébullition de propane est de **-42°C**, celle de butane est de **-6°C**.
6. **Pouvoir calorifique** : c'est la propriété la plus intéressante étant que le GPL est traditionnellement utilisé pour les besoins domestiques :
- ✓ Iso-butane : PC = **29460** (kcal/kg).
 - ✓ Normal butane : PC = **29622** (kcal/kg).
 - ✓ Propane : PC = **22506** (kcal/ kg).
7. **Impuretés** : le plus important est le soufre, la teneur en soufre est inférieure ou égale à **0,005 %** en masse, ainsi que l'eau qui est l'un des impuretés importantes.

Le GPL est non corrosif à l'acier mais généralement aux cuivre et ces alliages ou à l'aluminium.

Le GPL n'a aucune propriété de lubrification et cet effet doit être pris en considération lors de la conception des équipements du GPL (pompes et compresseurs). Le GPL est incolore, que ce soit en phase liquide ou gazeux[3].

I-2-e. La production mondiale du GPL :

Il existe deux sources de GPL : la récupération du propane et du butane sur les champs de pétrole et du gaz naturel représente **60%** des ressources.

Le propane et le butane commercial ne sont pas des produits purs mais des mélanges, une séparation complète des molécules serait aussi coûteuse qu'inutile car la plupart des utilisations acceptent des mélanges.

La production mondiale du GPL représentait **162 MT** en **1995**, elle croîtra à un rythme de **5%** par année.

I-2-e. Le GPL en Algérie :

I-2-e-1. La production nationale du GPL :

Puisque l'Algérie est un pays pétrolier et gazier, l'industrie du GPL est très importante, sa production suivit d'une croissance soutenue en raison de l'intérêt suscité chez les pays industrialisés par cette forme d'énergie idéale pour la protection de l'environnement.

Jusqu'à **1984** l'Algérie importait du butane en période de pointe, depuis cette date et suite, à la mise en service du complexe GP1Z. La production nationale est largement excédentaire par rapport à la demande d'un marché national.

Durant les dernières années, l'industrie Algérienne du GPL a connue des changements profonds, notamment en matière de production, d'exploitation et dans les activités de transport maritime. Le programme de valorisation des ressources gazières lancé au début des années **90** fait bénéficier aujourd'hui des disponibilités importantes du GPL.

Depuis la mise en exploitation du champ gazier de Hamra en **1996**, la production du GPL en Algérie connait un développement rapide.

Le niveau de l'offre national du GPL est de l'ordre de 5,5 millions de tonnes en 1996, et plus de 7,3 millions de tonnes en 1998, et environ 9 millions de tonnes en 2001, un pic de 12,5 millions de tonnes sera atteint en 2006 lorsque les projets développés auront été mise en service. Cette offre provenant de trois sources différentes :

- ◆ **10%** obtenus à la suite du raffinage du pétrole brut aux raffineries de Skikda, Arzew, Alger.

- ◆ **11%** sont obtenus à l'issue de la liquéfaction du gaz naturel aux complexes de liquéfaction de Sonatrach GL2Z, GL1K et réparti comme suit :

GL2Z : 405.000 tonnes dont 50% en butane.

GL1K : 170.000 tonnes dont 40% en butane.

- ◆ **79%** sont produits à partir des gisements d'hydrocarbures, suite à la séparation du gaz et le traitement du pétrole brut ; soit 4,35 millions de tonnes.

L'offre du GPL est localisée essentiellement dans la région Ouest à Arzew avec **87%**, **9%** dans la région Est (Skikda), **2%** au Centre et **2%** dans le Sud au niveau des champs de Hassi R'mel, Haoudh - Berkaoui et l'Hamra.

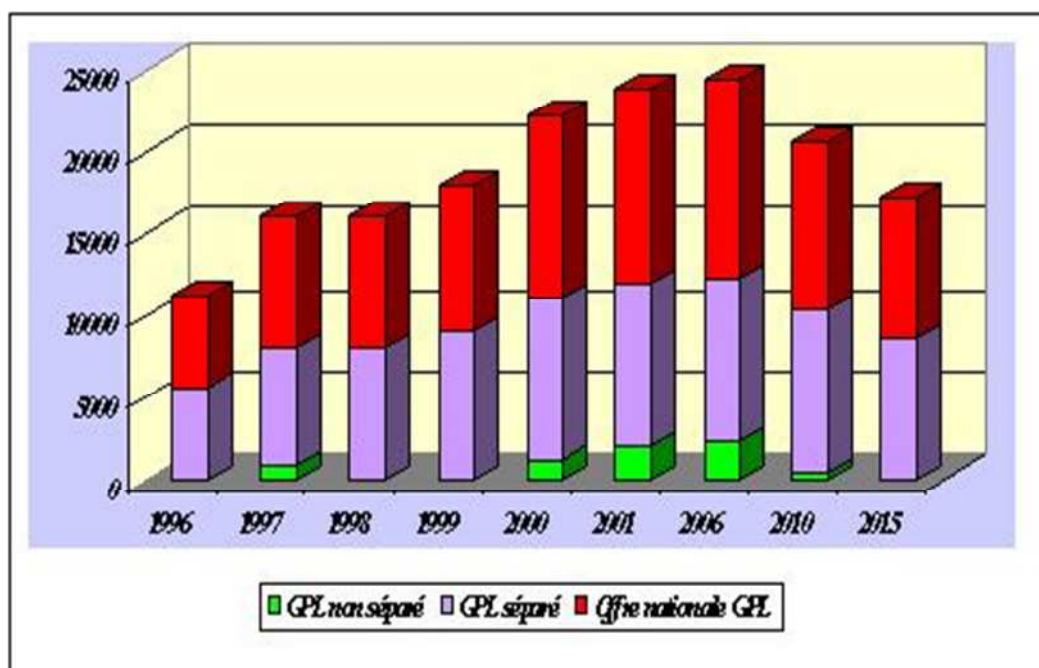


Figure (I-3) : Offre prévisionnelle nationale de GPL (en MT)

I-2-e-2. La consommation nationale du GPL :

La consommation nationale du GPL a connu un rythme très élevé à partir de **1970**, suite à la mise en place de nouvelles capacités d'enfûtage en **1980** par **29** centres en futeurs portant la capacité de **1,2 millions de tonnes/an** en une équipe, soit l'équivalent de **43** centres en futeurs implantés à travers l'ensemble du territoire national. La consommation est passé de **148.000 tonnes** en **1970** (**11kg / habitant**) et à **720.000 tonnes** en **1975**(**38kg/hab**) pour atteindre **1,4 millions de tonnes** en **1996** (**51 kg/hab**).

I-2-e-3 Exportation du GPL :

Accroissement substantiel des quantités à l'exportation en 2005 : 8,5 millions de tonnes dont 6 millions de tonnes en propane.

L'année **1997** illustre parfaitement le rôle de notre industrie sur le marché international.

Les marchés méditerranéens et américains (U S A) restent les principaux marchés et représentent près de **75%** des exportations.

I-2-f. Domaines d'utilisation du GPL :

➤ **Le GPL carburant :** Dès 1912, aux USA le GPL / C alimentait les voitures, mais cette innovation est restée sans lendemain, car il n'était utilisé que comme carburant de substitution en cas de crises. Il fallut attendre les années 80 pour que la fiscalité devienne favorable dans certains pays et permette le développement des voitures équipées de la bicarburant.

Le GPL/C a largement prouvé ses qualités à être un carburant alternatif avantageux tant au plan économique qu'au plan écologique. Actuellement de nombreux pays possédant une flotte de véhicules roulant au GPL/C, se sont principalement :

Les Pays-Bas, le Japon, l'Italie, l'Allemagne, la Grande-Bretagne, la France, les USA, l'Espagne, la CIE et le Canada.

Le GPL / C est adopté sous le nom commercial « **SIRGHAZ** », L'indice d'octane élevé du GPL / C permet leur substitution à l'essence sans modification du moteur.

Le niveau alarmant de pollution devrait au contraire favoriser l'utilisation des véhicules GPL/C, car il produit moins de **CO₂** et de **CO**, il ne contient pas de Plomb.

L'introduction massive du GPL/C en Algérie est aujourd'hui une option stratégique, d'une part en raison de l'accroissement de la demande nationale en carburant et d'autre part pour des raisons environnementales cruciales. Il a été introduit en Algérie en **1980**.

➤ **Le GPL dans la pétrochimie :** La demande pétrochimique globale du GPL enregistre un taux de croissance de l'ordre de **10 %**. Il est utilisé dans ce domaine comme charge de vapocraqueur à fin d'obtenir des oléfines.

Le butane et le propane qui sont obtenus par la séparation du GPL utilisés pour la déshydrogénation dans la production de butadiène et le propylène qui vont servir comme matière première pour la synthèse des caoutchoucs.

Le butane utilisé dans la fabrication MTBE qui sert comme booster d'octane des essences en substitution au plomb, il est ainsi utilisé comme charge des unités d'alcoylation. Le propane et le butane sont utilisés pour la production d'acétaldehyde, formaldéhyde, l'acide acétique et l'acétone.

➤ **Le GPL dans la production d'électricité :** Il est utilisé pour la génération d'électricité, pourrait être important si les conditions de nature économique venaient à être favorables,

les marchés ciblés à cet effet, et qui sont attractive pour le GPL.

La production d'électricité en Algérie est effectuée uniquement par le gaz naturel, le GPL n'est pas introduit jusqu'ici dans la génération d'électricité ou dans la combustion.

- **Le GPL dans les ménages :** Le butane et le propane qui sont obtenus par la séparation du GPL ont une grande importance dans les ménages.
- **Le GPL dans la climatisation :** Il est utilisé pour la construction des réfrigérateurs et des climatiseurs grâce à sa détente d'absorption de la chaleur et de créer le froid.
- **Le GPL dans L'agriculture :** L'utilisation du GPL dans ce secteur sera orientée vers l'aviculture, et certain culture sous-serre, le niveau de consommation prévu est relativement faible (**40.000 tonnes/an**) pour le court terme, il est attendu une évolution plus significative à moyen et long terme particulièrement par l'introduction dans le domaine de l'élevage (éclairage, climatisation, chauffage....etc.).

I-2-g. Conclusion pour le GPL :

L'industrie des GPL et par l'intermédiaire des organisations telle que le forum mondial du GPL, a pour mission de promouvoir ces combustibles gazeux, et doit le faire tout provoque dans le choix de combustible saluaires pour l'environnement ,et à combustion propre , gaz naturel et GPL peuvent servir cet objectif et ont leur place dans le résolution des problèmes actuels en matière de l'environnement car il y a une diminution importante de la pollution , donc il permette de réduire la dépendance vis à vis des autres sources d'énergie .

I-3. Généralité sur le condensat :

I-3 -a.Définition du Condensât :

Le condensât est constitué d'un mélange d'hydrocarbures paraffiniques, de (iC_5H_{12}) jusqu'au ($C_{12}H_{26}$) et plus, généralement extrait des gisements du gaz à condensât. Il est sous forme liquide dans les conditions normales de température et de pression.

I-3-b.Caractéristiques du Condensât :

Les principales caractéristiques du condensât sont :

- **Aspect** : C'est un liquide incolore, avec une odeur d'essence.
- **Poids spécifique** : Poids spécifique du condensât est compris entre 0,7 à 0,8.
- **Point d'éclair** : Son point d'éclair est inférieur à $-40^{\circ}C$.
- **Limites d'inflammabilités** : Il est très inflammable, car il a un point d'éclair inférieur à zéro, ses limites d'inflammabilités sont approximativement : 1,4 et 7,6% (dans l'air).
- **Densité de vapeur** : Les vapeurs du condensât sont plus lourdes que l'air, la densité de ces vapeurs est de 3 à 4 plus grande que celle de l'air.
- **Explosivité et inflammabilité** : Le condensât est un fluide hautement inflammable et évaporable à une température et pression normales, du fait qu'il n'est pas électroconducteur, il présente un danger d'inflammation ou d'explosion du fait de l'étincelage électrostatique amorcé par coulage, filtration, chute, pulvérisation etc...

On devra faire attention car les vapeurs du condensât constituent un mélange gazeux explosif se répandant par terre du fait de sa densité plus élevée que celle de l'air .

- **Toxicité physiologique** : Les vapeurs du condensât sont toxiques. Lorsqu'un Homme s'y expose le premier symptôme constaté sera l'irritation des yeux ce qui sera suivie de symptômes névropathies (étourdissement).

La victime peut éventuellement se mettre à crier, rire stupidement et finir à avoir du mal à marcher.

Lorsque la concentration des vapeurs du condensât est de l'ordre de 0,025% à 0,05%

volumique dans l'air, elles ne peuvent pas causer des symptômes heure d'inhalation.

- **Précautions hygiéniques :** Pour prévenir l'intoxication, on doit réaliser une ventilation convenable des locaux de travail et maintenir la concentration des vapeurs du condensât à moins de 300 ppm.

I- 3 -c. Domaines d'utilisation du Condensât :

La particularité du condensât réside dans son utilisation dans deux secteurs industriels entièrement stratégiques : le raffinage et la pétrochimie.

Elle confère à ce produit une valeur différente par secteur d'utilisation, qui représente en fait un coût d'opportunité par rapport à la charge classique dans une raffinerie ou un craqué.

I- 3 -c-1. Utilisation du Condensât dans la pétrochimie :

La valorisation du condensât, se fait principalement dans le domaine de la pétrochimie où la demande est très importante.

Il est principalement utilisé pour la production des oléfines par le vapocraquage

I- 3 -c-2. Utilisation du Condensât dans le raffinage :

Le condensât est utilisé dans la production des carburants notamment les essences, leurs prix de revient est plus bas que les essences produites à partir du pétrole brut car la séparation et la transformation du condensât sont moins coûteuses, et sa composition chimique riche en éléments légers.

Il est utilisé dans le procédé d'isomérisation pour produire l'essence « isomérisée », en transformant les normales paraffines en iso-paraffines qui ont un haut indice d'octane haut et utilisé également dans le reforming catalytique. [2].

CHAPITRE II

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA REGION DE HASSI R'MEL :

II-1.Situation géographique :

Le gisement de Hassi R'mel est situé à **525 km** au sud d'Alger, entre les wilayas de Ghardaïa et Laghouat, dans cette région relativement plate du Sahara l'altitude moyenne est d'environ de **750 m** au dessus du niveau de la mer. Le climat est caractérisé par une pluviométrie faible (**140mm/an**) et une humidité moyenne de **19%** en été et **34%** en hiver.

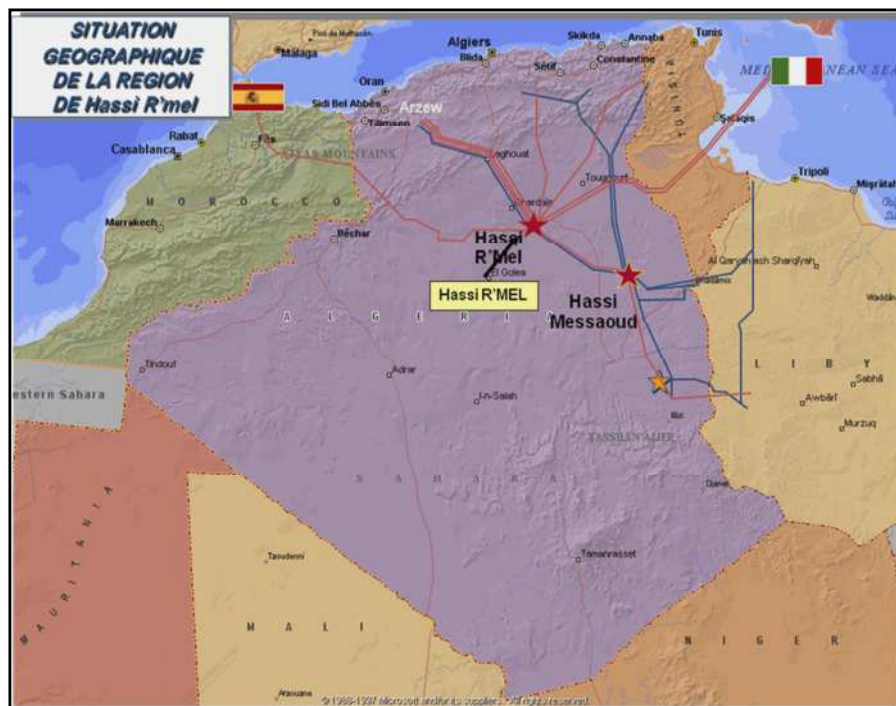


Figure (II-1) : Situation géographique du site de Hassi R'Mel.

Le gisement de Hassi R'mel est l'un des plus grands gisements de gaz à l'échelle mondiale. Il a une forme d'ellipse s'étale sur plus de **3500 km²**, **70 km** du nord au sud et **50 km** d'est en ouest, il se situe à une profondeur de **2200 m**, la capacité du gisement est de l'ordre de **3000** Milliards mètre cubes récupérables.

II-2.Historique du champ de HASSI R'MEL :

En s'intéressa à la région depuis 1951, le forage du premier puits d'exploitation a eu lieu en 1952 à quelques kilomètres de Berriane. Dans le champ de Hassi R'mel, le premier puits HR1 a été foré en 1956 sous le sommet de l'anticlinal que constitue le gisement de Hassi R'mel, ce puits a mis en évidence la présence du gaz riche en condensât dans le trias gréseux à une pression de 310 atmosphères et 90°C. La profondeur atteinte est de 2332 m, qui révéla la

présence d'un réservoir de gaz humide. De 1957 à 1960 furent forés 8 puits (HR2, HR3, HR4, HR5, HR6, HR7, HR8 et HR9) qui ont mis à jour l'existence de trois réservoirs.

Le champ de Hassi R'mel est une vaste étendue plus de 3500 km² (70 km de long sur 50 km de large), les réserves trouvées en place sont évaluées à plus de 2800 milliards m³[4].

II-3. La capacité de production actuelle :

Le développement final du champ a permis d'atteindre les capacités de production suivantes :

- 100 milliards de mètre cubes de gaz par an.
- 12 millions de tonne de condensât par an.
- 3.5 millions de tonnes de GPL par an.
- 700 milles de tonnes de pétrole brut par an.

Nous avons regroupé dans le tableau 1 ci-dessous les différentes zones du site de Hassi R'mel :

II-4. Spécifications des produits :

- a- Condensât :**
- ◆ Tension de vapeur Raid : 10 psi max.
 - ◆ Densité : 0.7017.
- b- GPL :**
- ◆ Teneur en éthane et plus légers (C₂⁻) : 3% molaire max.
 - ◆ Teneur en pentane et plus lourde (C₅⁺) : 0.4 % molaire.
- c- Gaz de vente :**
- ◆ Pression : 71 bar effectifs (min).
 - ◆ Température : 60°C (max).
 - ◆ Point de rosé : -6°C à 80.5 bars (max.).
 - ◆ Pentane et plus lourde (C₅⁺) : 0.5% molaire max.
 - ◆ Teneur en humidité : 50 ppm en volume (max).
 - ◆ Pouvoir calorifique supérieur : 9350-9450 kcal/sm³ (min). [3].

II-5. Installations gazières de HASSI R'MEL :

Le plan d'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi R'el est élaboré de façon à avoir une exploitation rationnelle du gisement et pouvoir récupérer le maximum de liquide. Les cinq modules de traitement de gaz (0, 1, 2, 3, et 4) sont disposés d'une manière alternée par rapport aux deux stations de compression tel que présenté sur la figure I.2 ci-dessous.

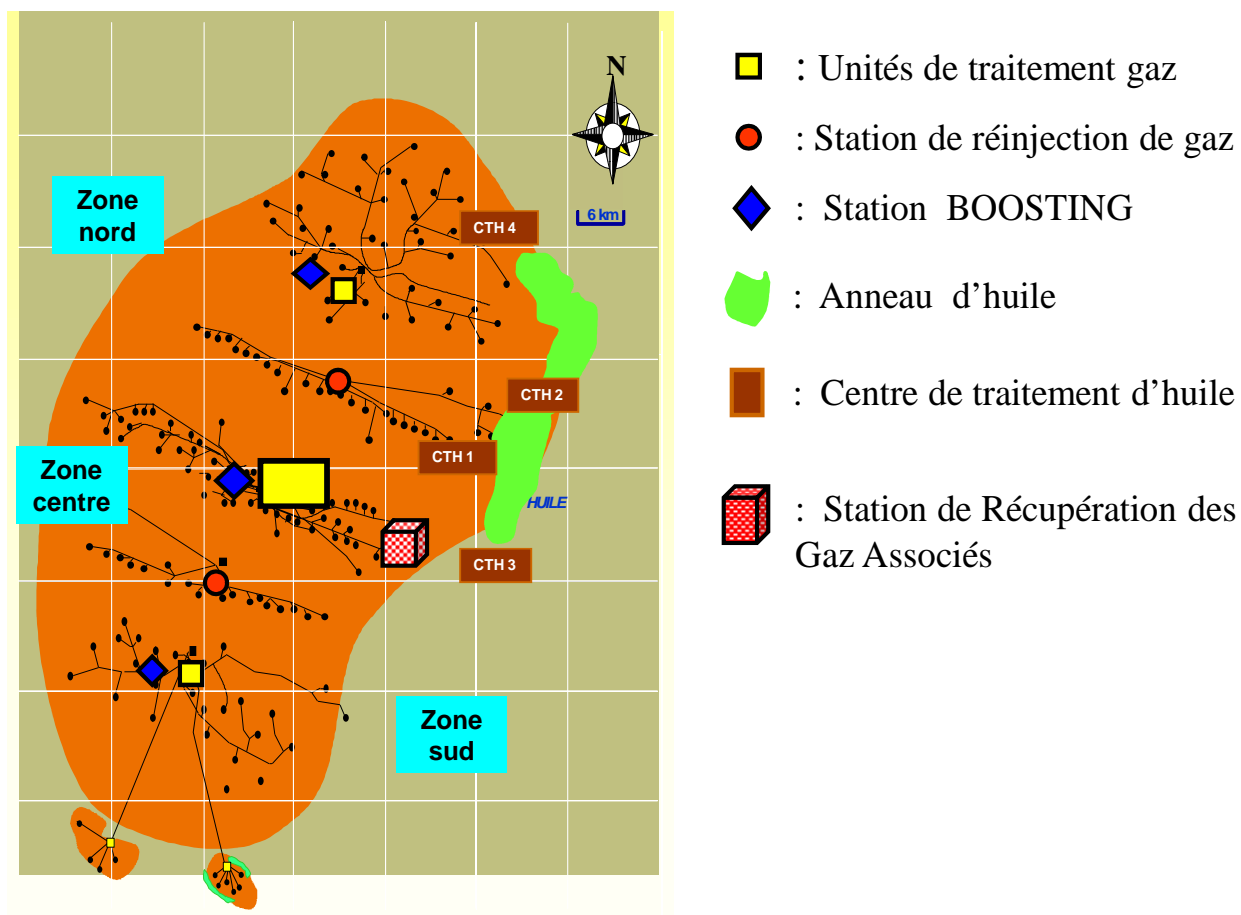


Figure (II-2) : Répartition des différentes installations sur le champ de Hassi R'Mel

II-6. Les modules de traitement de gaz sont reliés :

- Au centre CSTF pour le stockage des hydrocarbures liquides GPL et condensât.
- Au station de réinjection station de compression nord et sud de Capacité de 90 millions de m^3 /an chacune pour réinjection une partie des gaz secs GN dans le gisement système de récupération maximale de l'hydrocarbure liquide.
- Au CNDG (Centre Nationale de Dispatching du Gaz) situé à Hassi R'mel
- pour le transport par gazoducs du vente GN pour la partie commerciale.

Tableau (II-1) : Les différentes zones de Hassi R'Mel.

| Zone Centre | Zone Nord | Zone Sud |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Module de traitement de gaz 0, 1 et 4 et les installations communes (communs ou Phase B).- Station Boosting centre (SBC).- Centre de stockage et de transfert (CSTF).- Centre national de dispatching de gaz (CNDG).- Station de récupération des gaz associés (SRGA). | <ul style="list-style-type: none">- Module de traitement de gaz 3.- Station de compression nord (SCN). | <ul style="list-style-type: none">- Module de traitement de gaz 2.- Station de compression sud (SCS).- Centre de traitement de gaz CTG/Djebel-Bissa.- Centre de traitement de gaz CTG/HR-Sud. |

II- 7. Procédés de traitement du gaz :

Ils sont multiples et le choix de l'un des procédés se base sur les critères suivants :

- L'objectif de traitement.
- La faisabilité.
- Qualité de l'effluent brut.
- Le rendement.
- Coûts d'investissement.

Dans la région de Hassi-R'mel on utilise deux types de procédés :

a- Procédé Pritchard :

Utilisé dans les modules 0 et 1, il est basé sur le refroidissement du gaz par échange thermique et par des détentes avec l'utilisation d'une boucle de propane comme système de réfrigération afin d'atteindre des températures avoisinant -23°C .

b- Procédé Hudson :

Utilisé dans les modules 2,3, et 4, il est basé sur le refroidissement du gaz par échange thermique et par séries de détentes complètes.

Une détente au niveau de la vanne JOULE THOMSON qui permet d'atteindre une température de -15°C et une autre détente au niveau d'une machine dynamique appelée « TURBO- EXPENDER » où on aura une température de -35°C , ce dernier est plus performant car il nous permet une meilleure récupération des hydrocarbures liquides et dispose d'un système de refroidissement autonome. Ce dernier procédé est plus performant car il nous

permet une meilleure récupération des hydrocarbures liquides et dispose d'un système de refroidissement autonome.

Il se présente, actuellement, à une pression de 100 bars et une température de 64C°.

II-8.Presentation du MPP0: (module processing plant)

Le Module (0), désigne une installation de traitement de gaz. Il est le premier à être construit à Hassi R'mel par les français en 1961 avec deux unités seulement.

Le MPP (0) a connu plusieurs modifications, très importantes.

En 1971 à 1973 il y a la construction et mise en service de six unités identiques qui permettent, actuellement, de séparer le condensât et la récupération de gaz de vente.

Dés 1983 à 1986 il y a la construction et mise en service de la phase B par un contrat signé entre l'entreprise nationale SONATRACH et l'entreprise Japonaise JGC Corporation, qui permet de stabiliser le condensât et la récupération de GPL.

Le MPP (0) a une mission importante au niveau de la région de Hassi R'mel, comme tous les autres modules, car il traite en moyenne plus de 30 millions de m³/j de gaz brut.

Le MPP(0) est alimenté par 16 puits qui sont situés dans la zone centrale de Hassi R'mel et regroupés dans trois collecteurs : E₄(HR : 11,16,12,23 et 57), E₅(HR : 53,54,32,33,10 et 43) et W₇(HR : 15,18,19 et 20). A l'entrée du Module les collecteurs sont regroupés dans un MANIFOLD qui va aller vers le Boosting pour une augmentation de pression jusqu'à 110 bars en moyenne.

Pour le bon déroulement du procédé de séparation du gaz brut le MPP(0) est divisé en différentes zones qui sont :

- Zone de séparation de condensât.
- Zone de stabilisation de condensât et récupération du GPL.
- Zone de régénération du glycol (DEG).
- Zone de stockage intermédiaire du condensât et du brut des CTH.
- Zone des eaux huileuses (bourbier) et fosse de brûlage.
- Zone de torche.

Les utilités du MPP (0) viennent de la phase B (phases communes) telles que : propane liquide (HP et MP), eau de refroidissement. Fuel gaz, azote et air instrument.

II-8-a.Composition du gaz d'alimentation de la région :

Il est très riche en fraction liquide (condensât) contenant une faible proportion d'eau :

Tableau (II-2) : Composition du gaz d'alimentation de Hassi R'Mel

| N ⁰ | Composants | Formule | Fraction (%) |
|----------------|----------------------|----------------------------------|--------------|
| 1- | Anhydride carbonique | CO ₂ | 0.20 |
| 2- | Azote | N ₂ | 5.56 |
| 3- | Methane | CH ₄ | 78.36 |
| 4- | Ethane | C ₂ H ₆ | 7.42 |
| 5- | Propane | C ₃ H ₈ | 2.88 |
| 6- | i-butane | i-C ₄ H ₁₀ | 0.62 |
| 7- | n-butane | n-C ₄ H ₁₀ | 1.10 |
| 8- | i-pentane | i-C ₅ H ₁₂ | 0.36 |
| 9- | n-pentane | n-C ₅ H ₁₂ | 0.48 |
| 10- | Hexane | C ₆ H ₁₄ | 0.59 |
| 11- | Heptane | C ₇ H ₁₆ | 0.59 |
| 12- | Octane | C ₈ H ₁₈ | 0.45 |
| 13- | Nonane | C ₉ H ₂₀ | 0.37 |
| 14- | Décane | C ₁₀ H ₂₂ | 0.27 |
| 15- | Undécane | C ₁₁ H ₂₄ | 0.21 |
| 16- | Dodécane | C ₁₂ ⁺ | 0.57 |

N.B. :

Avec la chute de la pression des gisements, cette composition n'est plus la même.

II-8-b.Capacité de production :

Le module « 0 », a l'époque, produisait 30 millions de standard mètres cubes par jour de gaz de vente, la récupération de 5752 tonnes par jour de condensât et 1155 tonnes par jour de GPL à une pression d'alimentation en gaz brut de 140 bars.

Actuellement avec la chute de la pression d'alimentation à 83 bars, les installations permettront la récupération de 2300 tonnes par jour de condensât, 630 tonnes par jour de GPL et 30 millions de standard m³ de gaz de vente.

II-9. Description du processus :

Le procédé de traitement des gaz au niveau du module « 0 » est effectué dans une chaîne constituée de quatre zones :

II-9-a. Zone de séparation de condensât :

Le gaz brut provenant des puits de gaz passe à la station de Boosting centrale (SBC) afin d'augmenter la pression, après il pénètre dans les installations du module sous forme d'un mélange biphasique et avec une pression actuelle de 110 bars en moyenne et une température 65°C maximum. la phase gazeuse est distribuée par le ballon diffuseur **V-1001** aux six chaînes parallèles de séparation de condensât. On suivant une seule chaîne (six chaînes identiques), le gaz passe successivement par la vanne à fermeture rapide **UASV-1101** (vanne : tout et rien) et la vanne régulatrice de pression **PCV-1114**.

Les liquides provenant de **V-1101** sont détendus adiabatiquement dans le **V-1004/ABCD** jusqu'à **86 bars**. La **PCV1021** détendra l'excès de gaz dans le cas où la pression dépasse **90 bars**.

Le niveau dans le **V-1101** est régulé par la vanne **LCV-1101** et la **PCV-1004** assure la distribution de la charge des **V-1004/ABCD**.

Les vapeurs des **V-1004/ABCD** sont envoyés dans les séparateurs froids **V-1203** et **V-1303**, alors que les liquides sont détendus adiabatiquement dans le séparateur triphasique **1012/ABC** jusqu'à **30 bars**. L'eau est drainée vers le borbier par l'intermédiaire de la **LCV-1009**, les hydrocarbures vapeurs sont envoyés vers le ballon tampon **V-401** à travers la **PCV-1022** et les hydrocarbures liquides seront dirigés vers l'échangeur **E-411** à travers la **LCV-1008** avant de rejoindre le **V-401**.

Les vapeurs venues de séparateur **V-1001** sont simultanément séchées et refroidies dans l'échangeur gaz/gaz **HE-1101/ABCD**, l'échangeur gaz/liquide **HE-1102** et le chiller **E-401** utilisant le propane comme agent réfrigérant.

Les vapeurs sont ensuite détendus adiabatiquement à environ 82 bars et -13°C dans la vanne Joule Thomson PCV-1117 avant de rejoindre le séparateur froid V-1103 à travers le piège à hydrates V-1102. (Voir figure (II-3)).

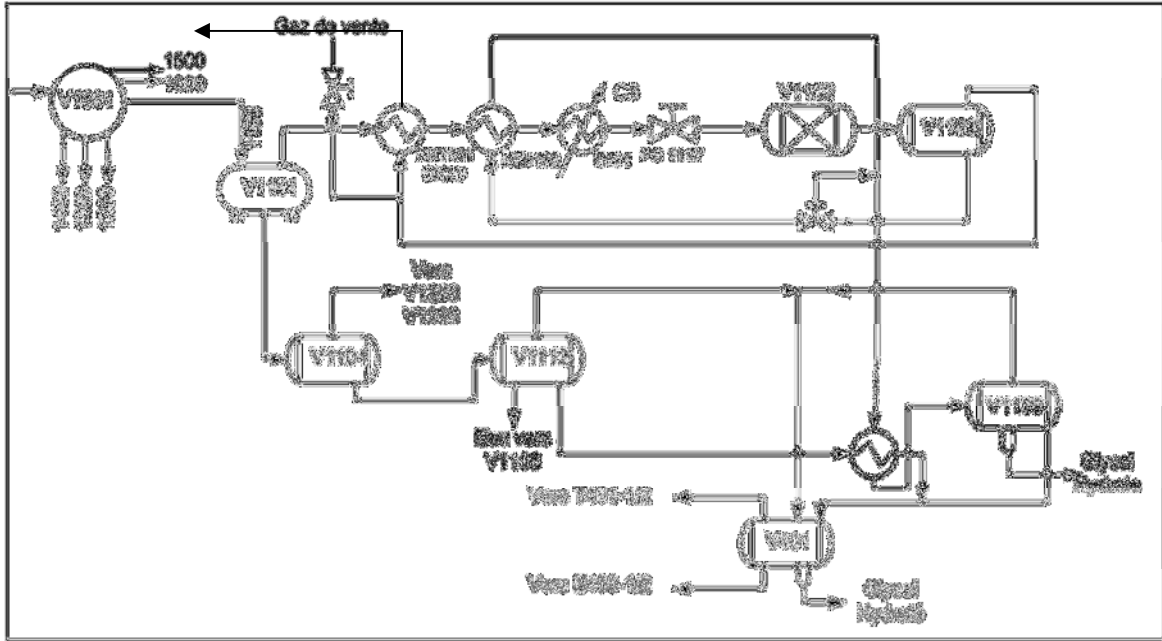


Figure (II-3) : Zone séparation du condensat

Le séchage du gaz brut s'effectue par l'injection d'une solution de di éthylène glycol dans la plaque tubulaire d'entrée de chaque échangeur afin d'éviter la formation d'hydrates.

Le gaz provenant du séparateur froid V-1103 sert à refroidir à contre courant le gaz brut dans le HE-1101/ABCD coté calandre et il passe à travers la vanne de contrôle de débit FRCV-1102 pour rejoindre le gaz des autres unités avant d'entrer dans le Manifold de sortie comme gaz de vente à une température de 60°C et une pression de 71 kg/cm^2 .

La température du V-1103 est contrôlée par la TCV-1101 qui by-pass une partie du gaz provenant du séparateur froid sur les échangeurs gaz/gaz HE-1101/ABCD coté calandre.

Les hydrocarbures liquides et le glycol sortent du fond de V-1103 à travers la vanne LCV-1105 pour traverser l'échangeur HE-1102 coté calandre et l'échangeur E-411 avant de rejoindre les séparateurs trisphasiques de glycol V-1009/ABC.

La **PCV-1025** assure la répartition des charges sur les **V-1009/ABC** et la **PCV-1023** maintiennent une contre pression de **28 bars** et permet au gaz de s'échapper vers le ballon tampon **V-401**.

Les hydrocarbures liquides des **V-1009/ABCD** s'écoulent vers le **V-401** par l'intermédiaire de la **LCV-1007**.

Le glycol hydraté sort des **V-1009/ABC** par la vanne **LCV-1006** envoyer vers le bac **T-3001** et puis vers le ballon **B-2401**.

II-9-b. Zone de stabilisation du condensât et récupération du GPL :

Cette zone a pour de stabiliser le condensat et de produit le GPL à partir des liquides récupérés du gaz brut dans la zone de la séparation du condensat.

La charge liquide (condensat) provenant de V401 à 12C° est préchauffée au niveau de E408 pour remonter sa température à 40C° avant son admission dans la colonne T401 (dééthaniseur). La charge liquide est pulvérisée au niveau de déflecteur de colonne pour la même niveau de déflecteur de colonne pour favorises le flash.

La charge gazeuse pénètre directement dans la colonne au même niveau que la charge liquide dans la zone de flash.

Au niveau de dééthaniseur, les légers remontent et les lourds descendent. Les légers(C2) remontant entraînent avec eux des constituants lourds. qui seront à leurs tour condensé par les reflux froids (principale et intermédiaire).

Les lourds en descendant entraînent avec eux une partie des légers qui seront pousser vers le sommet de la colonne par l'intermédiaire de rebouilleur (principale et auxiliaire).

Au sommet de la colonne sort le gaz constitue de C1 et C2 à une pression de 20,5 kgf /cm² et une température de 13C° et envoyer vers la compression pou remonter sa pression à 75 kgf/ cm² avant l'injection dans le gaz de vente.

Le fond de dééthaniseur est constitue de deux compartiment une partie est de coté four H401, c'est le rebouilleur principale et l'autre partie qui sera la charge de dé-butaniseur (condensat amoindrit de C2). (**Voir figure (II-4)**). [4].

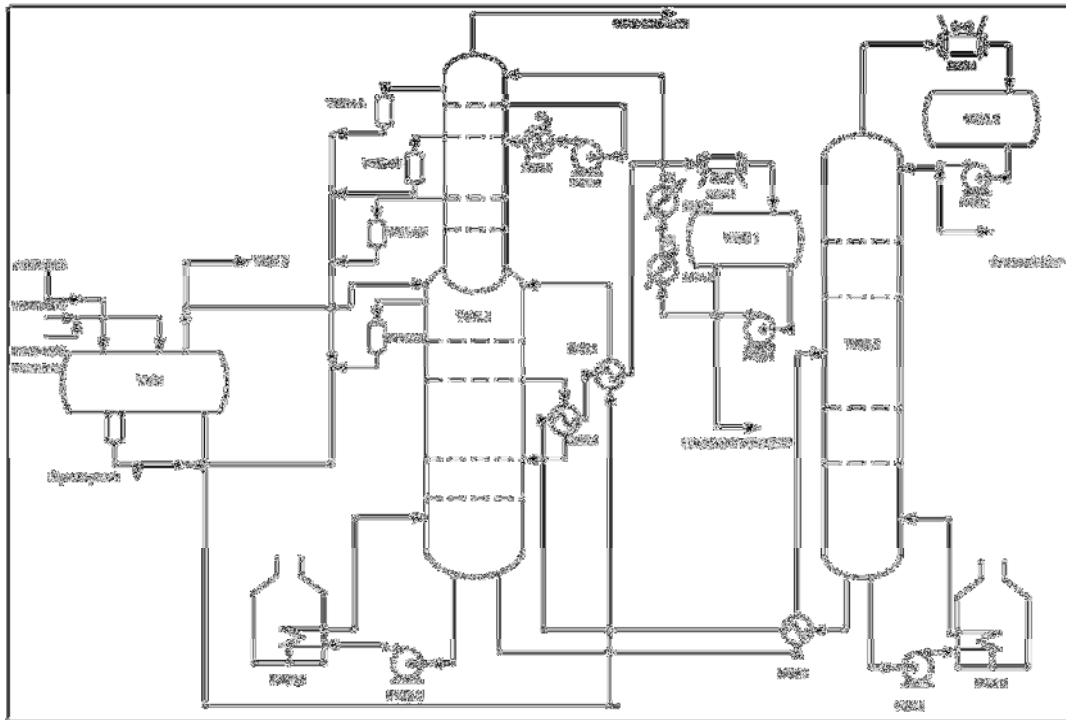


Figure (II-4) : Zone de stabilisation du condensat

La rectification des produits de tête et le fond se fait au niveau des plateaux, qui sont au nombre de 34 plateaux pour le dééthaniseur.

La charge de débutaniseur provenant de fond de dééthaniseur est préchauffée dans l'échangeur E409 à contre courant avec le fond de débutaniseur puis introduit au niveau du 28^{ème} plateau par l'intermédiaire de déflecteur.

En tête de la colonne, on récupère les vapeurs de C3 et C4, qui sont condensés dans les airoréfrigérant E407 (6) puis stockées dans le ballon V404. Une partie est envoyée vers le stockage final, et l'autre est utilisée comme reflux de tête T402.

Le produit de fond de débutaniseur constitué de condensat stabilisé, qui à son tour est refroidi dans les échangeurs E409, E402 et E408 ; puis les airoréfrigérant E403 (4) pour être ainsi envoyé vers le CSTF (stockage à 40 C° et une pression de 9kgf /cm²).

L'autre partie est récupérée dans le ballon de reflux V403, puis refroidi dans les chillers E404 et E405 avant son injection dans le T401 pour maintenir la température de tête à 13C°.

Le condensat stabilisé et le GPL sont dirigés vers les réservoirs on-spec lors que ces produits sont devenus conformes à la spécification.

Le GPL off-spec est envoyer vers les sphères de module 4 pour le traité, Le condensat off-spec est envoyer vers les bacs T3001/T3004/T3005 [5] .

II-9-c. Zone de régénération de glycol :

Cette section comprend **04** unités, trois semblables (**2100, 2400**). La **PK-420** et la **PK-440** qui se différent du point de vue procès, mais ils ont le même principe de fonctionnement en ramenant le Glycol d'une concentration de 70% à une autre de 80% avec élimination d'une quantité d'eau.

Le Glycol hydraté venant du ballon **B-2401** via le **T-3001** avec la pompe **P-2403** a chauffé dans un premier échangeur jusqu'à une température moyenne de 65C°, alimente ensuite la colonne de séparation l'eau de Glycol au-dessus d'un rebouilleur ou concentrateur à fuel gaz qui fournit une température de 118C°, à cette valeur on peut chasser la quantité d'eau afin d'augmenter la concentration du Glycol. La colonne est munie d'un système de reflux de tête avec un aérocondenseur et un ballon de reflux pour récupérer les pertes de Glycol en tête et aussi pour assurer un gradient de température le long de la colonne.

Le Glycol Régénéré au fond du concentrateur est refroidit dans l'échangeur coté tube contre courant avec le Glycol hydraté, ensuite envoyer au stockage dans le **T-2253**, ce dernier qui fournit le Glycol à 80C° de concentration aux unités de traitement de gaz avec les pompes **P-2025, P-2027, P-2035, P-2036, P 2037** à une pression supérieure à la pression de service des unités de **150** bars, le reste rejoint le **T-2253** avec la régulation de la vanne **PIC-19**.

Il y à une exception pour l'unité **PK440** ou le système de reflux n'utilise pas l'aéroréfrigérant et le ballon, mais la charge elle-même est utilisée comme reflux dans un serpent in le long de la colonne avant de rejoindre l'échangeur et le concentrateur.

Toutes les purges de Glycol et l'excédent des chaudières rejoignent le ballon souterrain **V-2002**, ce dernier qu'on le vide chaque fois vers le **T-2253** avec les pompes **P-2013**.

L'appoint en Glycol pur se fait suivant programme du **T-2252** avec la pompe **P-2252**. Un contrôle permanent est fait pour le PH (acidité) afin d'éviter les problèmes de corrosion. Pour cela on fait des appoints en M.E.A suivant les analyses.

NB : deux nouvelle unités de régénération de glycol (DEG) de capacité unitaire de 25 m³/h qui seront installées à l'usine dans le but d'éliminée les vapeurs d'eau dans le glycol hydraté.

II-9-d. Zone de stockage de brut :

Cette section contient trois bacs de stockage **T-3002, T-3003, T-3006** et les pompes d'expédition **P-3003 A, B, C, D, P 3002 A, B, C, P-3001, P-2404**. On reçoit le brut des « C T H » après stockage et temps de rétention l'eau est drainée du fond des bacs par la pompe **P 2404** vers bourbier, ensuite on fait l'expédition vers les stations de pompage avec les pompes **P-3003, P-3002,P-3001**, en gardant toujours un volume bien déterminer dans les bacs de 18 mètre de hauteur total [6].

CHAPITRE III

CHAPITRE III : GENERALITE SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR

III-1- Introduction

La grande majorité des opérations réalisées dans l'industrie du raffinage ou de la pétrochimie utilise la température comme une des variables opératoires principales. En effet, que ce soit pour vaporiser une coupe d'hydrocarbures lors d'une distillation ou pour faire réagir certaines molécules à transformer (avec ou sans catalyseur), il est toujours nécessaire d'ajuster la température au niveau requis pour l'opération à réaliser. Ainsi, les équipements qui permettent d'ajuster cette variable opératoire sont indispensables à de très nombreux points d'un procédé. L'échelle des températures à réaliser est très vaste, allant, si l'on considère les extrêmes, de la température de liquéfaction du méthane (-161°C) à environ 1000°C pour le craquage de cette molécule.

Pour réaliser tous ces ajustements, on dispose de deux types distincts d'équipements :

- Les fours, qui produisent, de la chaleur à température élevée.
- Les échangeurs de chaleurs, qui permettent de récupérer au maximum l'énergie thermique contenue dans les divers flux de la raffinerie et ainsi d'ajuster les niveaux de température en tous points des schémas de raffinage.

Le transfert de chaleur est le processus par lequel de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à la température différentes cette chaleur peut être transmise par Conduction, Convection ou Rayonnement.

III-2 - Modes de transfert de chaleur :

III-2-a- Conduction :

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule à molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission.

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides où entre corps solides contigus. La conduction intervient également dans les liquides et

Les gaz mais, sauf dans le cas des liquides très visqueux ou des gaz emprisonnés dans des matériaux poreux.

CHAPITRE III : GENERALITE SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR

Il ne faut pas confondre la conduction thermique et le chauffage par passage de courant électrique directement dans la pièce à chauffer, appelé chauffage par conduction électrique.

Le transfert de chaleur par conduction caractérise tous les transferts de chaleur qui s'effectuent dans les parois séparant deux corps à des températures différentes. C'est le cas des surfaces d'échange des échangeurs de chaleur, mais c'est aussi celui des murs et vitrages d'un bâtiment, des cuves contenant des liquides chauds ou froids, des parois des fours, etc.

Il est courant que les parois soient constituées de plusieurs matériaux ayant chacun un rôle spécifique (réfractaire, revêtement anticorrosion, isolant thermique, etc.) et qui sont des parois composites à travers lesquelles s'effectue le transfert de chaleur.

La loi fondamentale de la convection s'écrit comme suit :

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T$$

Avec :

Q : quantité de chaleur échangée.

λ : coefficient de conduction.

S : surface d'échange.

ΔT : différence de température.

III-2-b. Convection :

La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide, gaz ou liquide, dont les molécules sont en mouvement.

Imaginons un solide baignant dans un fluide en mouvement. Si le solide et le fluide ne sont pas à la même température, de la chaleur est échangée entre le solide et les particules fluides qui sont à son contact. Cet échange se fait par conduction. Mais la particule de fluide, dès qu'elle a échangé de la chaleur, se déplace et est remplacée, au contact du solide, par une autre particule.

Par ailleurs, la particule fluide initiale rencontre, au cours de son déplacement, d'autres particules fluides avec lesquelles elle échange de la chaleur par conduction.

Le mécanisme élémentaire de transfert de chaleur est la conduction thermique mais le phénomène global, qui est la convection thermique, résulte de la combinaison de cette conduction avec les mouvements du fluide qui obéissent à des lois spécifiques.

CHAPITRE III : GENERALITE SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR

Deux types de convection sont généralement distingués :

- ✓ la convection naturelle dans laquelle le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide ;
- ✓ La convection forcée dans laquelle le mouvement est provoquée par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques ; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide.

L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides.

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses pour que l'on puisse envisager de les citer toutes. Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz, qu'il s'agisse de faire bouillir de l'eau dans une casserole, du radiateur de chauffage central, du radiateur associé au moteur d'une voiture ou de l'échangeur dans un procédé, évaporateur ou condenseur.

La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques, voire des sècheurs à air chaud.

La loi fondamentale de la convection s'écrit comme suit :

$$Q = h \cdot A \cdot \text{DTLM}$$

Avec :

Q : quantité de chaleur échangée.

h : coefficient de transfert.

A : surface d'échange.

DTLM : différence de température logarithmique moyenne.

La similitude thermique est déterminée par les critères :

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$$

- **Critère de Nusselt:**

$$\text{Nu} = h \cdot d / \lambda$$

Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur par convection

- Critère de Prandtl :

$$Pr = C_p \cdot \mu / \lambda$$

Il caractérise les propriétés physiques des fluides

- Critère de Reynolds :

$$Re = \mu \cdot d / \nu$$

Avec :

μ : viscosité dynamique

d : longueur caractéristique de la géométrie

ν : viscosité cinématique

λ : conductibilité thermique

C_p : chaleur massique

Ces grandeurs étant exprimées dans un système d'unités cohérent.

III-2-c- Rayonnement :

Il est fondamentalement différent des deux autres types de transfert, ce sens que les substances qui échangent de la chaleur n'ont pas besoin d'être en contact l'une à l'autre, elles peuvent même être séparées par le vide.

Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé selon la théorie quantique.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

IV-1 .Introduction :

Les procédés utilisés dans l'industrie gazière et dans le raffinage des produits pétroliers demandent souvent que les fluides traités soient réchauffés ou refroidis, avec ou sans changement de phase ,au cours des diverses opérations auxquelles ils sont soumis .la chaleur mise en œuvre représente une importante dépense d'énergie ou dans certains cas un gisement d'énergie ,dont il est nécessaire de récupérer la plus grande quantité possible au profit de fluides du procédé ou d'utilités .De ce fait les échangeurs de chaleur constituent des appareillages importants et omniprésents dans toute unité de raffinage.

IV-2. Critère de classement des échangeurs de chaleur :

Plusieurs classifications de ces appareils ont été proposées, nous en retiendrons que celle de V.Ramme qui nous paraît la plus logique .d'après cette classification ; on peut diviser les appareils suivants : le mode de transfert et leur destination.

- Mode de transfert de chaleur :

On distingue :

- Les appareils à surface où les échangeurs de chaleur se font à travers une paroi qui sépare deux fluides à températures différentes.
- Les appareils à mélange où les fluides sont mélangés intimement .ces appareils exigent moins de métal et permettant un échange de chaleur plus efficace .bien entendu ; ils ne sont utilisables que si le contact direct des fluides est possible.

-Destination :

Bien qu'il n'y ait pas de véritable normalisation concernant le vocabulaire à adopter, la terminologie utilisée renseigne généralement sur la fonction de l'appareil.

- Echangeur : réchauffe un fluide du procédé et en refroidit un autre.
- Réfrigérant, cooler : refroidit des liquides ou des gaz (sans condensation) par circulation d'eau.
- Intercooler, aftercooler : termes réservés aux réfrigérants de gaz comprimés aux divers étages de compression.
- Aéroréfrigérants : le fluide réfrigérant est l'air.
- Chiller : refroidit un fluide du procédé par évaporation d'un fluide frigorigène.

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

- Réchauffeur, préchauffeur : réchauffe un fluide du procédé par la vapeur d'eau ou un fluide chaud du procédé.
- Condenseur : assure la condensation totale ou partielle des vapeurs simples ou complexes par circulation d'eau ou d'un fluide du procédé suffisamment froid.
- Aérocondenseur : a la même fonction que le précédent en utilisant l'air comme fluide froid.
- Subcooler : assure simplement la condensation de vapeurs et le refroidissement de condensats généralement par circulation d'eau.
- Vaporisateur : assure la vaporisation totale ou partielle d'un liquide du procédé, l'apport de calories étant fait par de la vapeur d'eau ou un fluide chaud de procédé éventuellement en condensation.
- Bouilleur, rebouilleur : vaporise tout ou une partie des produits de fonds de colonnes pour les renvoyer au fractionnement.
- Générateur de vapeur : produit de la vapeur par récupération de la chaleur contenue dans des fluides des procédés, des fumées de fours ou des lits catalytiques.
- Evaporateur : concentre les solutions aqueuses par évaporation d'eau.
- Surchauffeur : augmente la température d'une vapeur au-delà de sa température de condensation.

Quelle que soit leur fonction ; le principe de fonctionnement de tous ces appareils est celui des échangeurs de chaleur par surface interposée entre deux fluides ; il est basé sur les lois de transfert de chaleur.

IV-3. Les fonctions des échangeurs :

Les échangeurs de chaleurs souvent appelées **les échangeurs de températures**

Ces appareillages peuvent avoir à assurer des fonctions différentes, éventuellement simultanées relativement aux objectifs concernant l'un des fluides ou les deux fluides participent à l'échange.

En générale la terminologie utilisée renseigne sur la fonction principale de l'appareil ; sans prétendre supprimer toute ambiguïté ni fournir la liste exhaustive des différents termes utilisés, tant en langue française qu'en langue anglaise, une classification par fonction peut être établie.

IV-3 -a. La fonction réfrigération :

Les réfrigérants (coolers) refroidissent un liquide ou un gaz par circulation d'un fluide auxiliaire qui peut être un fluide de procédé ou de l'eau.

Associés au fonctionnement de compresseurs pour la réfrigération des gaz comprimés, ils sont qualifiés de réfrigérants intermédiaires (intercoolers) et de **réfrigérants finals** (aftercoolers) selon les divers étages de compression.

Les **Aéroréfrigérants** (air coolers) utilisent l'air en tant que fluide réfrigérant.

Les **trim coolers** (réfrigérants finals) terminent la réfrigération d'un produit jusqu'à un niveau requis ; il en est particulier des réfrigérants à eau qui assurent les conditions de sécurité requises pour le stockage des produits finis ou intermédiaires et par extension des associations aéroréfrigérants suivis de réfrigérants à eau utilisées pour cette fonction.

Les **chillers** refroidissent un fluide du procédé par évaporation d'un fluide frigorigène ou par de l'eau réfrigérée.

IV-3-b. La fonction réchauffage :

les réchauffeurs (heaters) réchauffent un fluide de procédé par de la vapeur d'eau ou un autre fluide chaud du procédé ; ces termes sont surtout employés dans le cas du réchauffage d'un produit stocké pour en assurer sa pompabilité dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes.

Les **préchauffeurs** (preheaters) préchauffent un fluide du procédé, la chauffe se poursuivant souvent dans un four en aval. Les réchauffeurs et préchauffeurs d'air sont les échangeurs, cycliques ou non, qui assurent la préchauffe de l'air de combustion d'une chaudière ou d'un four par récupération d'une partie de la chaleur contenue dans les fumées ou dans un autre fluide auxiliaire.

Les **économiseurs** (economizers) désignent les serpentins permettant la préchauffe de l'eau d'alimentation des chaudières par les fumées.

Les **surchauffeurs** (superheaters) amènent des gaz ou des vapeurs à une température supérieure à leur température de condensation.

IV-3-c. La fonction condensation :

Les condenseurs (condensers) assurent la condensation totale (condenseur total ou total condenser) ou partielle (condenseur partiel ou partial condenser) de vapeur par circulation d'eau ou de fluide du procédé suffisamment froid. Les aérocondenseurs assurent cette fonction en utilisant l'air comme fluide froid.

Les **subcoolers** assurent simultanément la condensation de vapeur et le refroidissement des condensats, le plus souvent par circulation d'eau.

IV-3-d. La fonction vaporisation :

Les **vaporiseurs** (vaporizers) assurent la vaporisation totale ou partielle d'un liquide du procédé, l'apport de chaleur étant fait par de la vapeur d'eau ou un fluide chaud du procédé éventuellement en condensation.

Les **bouilleurs** (boilers), les **rebouilleurs** (reboilers) vaporisent une partie des produits de fond de colonnes de distillation pour les renvoyer au fractionnement.

Les **générateurs de vapeur** (steam generators) produisent de la vapeur par combustion de gaz ou de liquides résiduels. Ils peuvent aussi récupérer de la chaleur sensible contenue dans les fluides des procédés. Des fumées de four ou encore dans les lits de catalyseurs et sont alors désignés waste heat boilers.

Les **évaporateurs** (evaporators) concentrent des solutions aqueuses par évaporation ; cependant, ils peuvent désigner aussi des vaporiseurs ou chillers.

IV-4. Les différents types d'échangeurs :

La réalisation technologique des échangeurs de chaleur peut de se faire :

-par des appareils tubulaires

- ✓ Echangeurs double-tube : constitués de 2 tubes concentriques
- ✓ Echangeurs à faisceaux et calandre
- ✓ Rigide à compensateur à dilatation thermique
- ✓ A tubes en U
- ✓ A tête flottante
- ✓ A tête fixe
- ✓ A tubes ailettes

- ✓ Echangeurs à plaques tubulaires ou non : les plaques peuvent être planes ou formées en spirale.
- ✓ Echangeurs à fluide changeant de phase :
 - ❖ Evaporateurs tubulaires
 - ❖ Condenseurs tubulaires
 - ❖ Evaporateurs et condenseurs à plaques
 - ❖ Condenseurs a faisceaux et calandre

IV-4-a. Les échangeurs tubulaires a faisceau et calandre :

La plupart des échangeurs à faisceau et calandre utilisés dans l'industrie du raffinage sont conçus dans le respect des normes Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association. Ils sont désignés succinctement en précisant les dimensions principales et le type, repéré par 3 lettres caractéristiques des éléments constitutif.

Exemple :

60 - 240 AES
23/37 – 193CKT

Les dimensions précisées indiquent successivement :

- le diamètre nominal de la calandre : diamètre intérieur exprimé en inches (ou autres unités) ; dans le cas d'une Kettle ; calandre de type K, ce diamètre est précédé du diamètre de l'ouverture offerte au faisceau.
- La longueur nominale : longueur des tubes exprimée en inches (ou autre unités) ; dans le cas de tubes en U la longueur droite seule est prise en compte .

Les trois 3 lettres caractérisent dans l'ordre :

- Le type de chambre de distribution
- Le type de calandre
- Le type de chambre où boîte de sortie ou de retour, dit encore plus communément fond de calandre.

Du point de vue du dimensionnement mécanique ; les échangeurs sont des appareils chaudronnés et à ce titre soumis aux règles imposées par les codes , codes différents selon les pays , constructeurs, sociétés d'ingénierie et clients concernés : ASME américain ; CODAP français , AD merkbllatter allemand ; BS 5500 anglais ...

Certains impératifs de construction sont différents selon la classe de l'appareil :

- Classe R : pour les exigences sévères des applications pétrolières
- Classe B : pour les services chimiques
- Classe C : dans le cas d'exigences modérés.

La détermination de la classe prend en compte les conditions de service ; en particulier importance des salissements, intensité et vitesse de corrosion.

IV-4-a- 1. Description d'un échangeur a faisceau et calandre :

Ce type d'appareil est le plus répandu en **raffinerie ou dans l'industrie gazière**. Il constitue près de 80% de tout l'appareillage d'échange de chaleur .Le principe du faisceau logé à l'intérieur d'une calandre a été retenu également dans la construction des condenseurs et rebouilleurs.

L'appareil est constitué par un faisceau de tubes montés sur deux plaques tubulaires et portant un certain nombre de chicanes. A chaque extrémité sont fixées les boîtes de distribution qui assurent la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en plusieurs passes. Le faisceau est logé dans une calandre ; munie de tubulures d'entrée et de sortie.

➤ **Calandre :**

L'acier au carbone est le matériau le plus couramment utilisé pour la construction des calandres ; pour un nominale inférieur à 24", la calandre est constituée par un tube d'acier i.p.s (Schedule 30 jusqu'à 12") et 1 cm d'épaisseur entre 12 et 24"), pour les pressions de service inférieures à 20 Kgf/cm².

Au-delà de 24", la calandre est réalisée à partir de plaques d'acier roulées et soudées. A chaque extrémité sont soudées les brides qui porteront le couvercle et la boîte de distribution .Les tubulures d'entrée et de sortie sont soudées avec plaque de renforcement ou non ; selon la pression de service .La calandre pourra être équipée d'anneaux pour le lavage et portera la plaque d'identité de l'appareil.

➤ **Faisceau :**

Les tubes constituant le faisceau forment une classe spéciale répondant aux spécifications. Le diamètre nominal correspond au diamètre extérieur pour lequel les tolérances sont sévères. Les épaisseurs de tubes sont normalisées selon le calibre BWG (Birmingham Wire Gage). On utilise le plus couramment les tubes 12 ,14 ou 16 BWG dans des longueurs de 8 ,12 ,16 et 20ft.

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

Les tubes sont fixés à chacune de leur extrémité par mandrinage (ou dudgeonnage) dans deux plaques tubulaires.

La perforation des trous dans ces plaques est normalisée, elle s'effectue selon une disposition soit au pas carré, soit au pas triangulaire .compte tenu de l'orientation du faisceau par rapport à la direction générale du fluide circulant dans la calandre, on obtient les quatre dispositions de la .

En raffinerie, on utilise surtout des faisceaux au pas carré. Le tableau présente les caractéristiques d'appareils les plus fréquemment rencontrés.

Le faisceau de tubes porte également des chicanes transversales qui ont pour but d'allonger le chemin du fluide circulant dans la calandre et d'améliorer ainsi le transfert à l'extérieur du tube par accroissement de la vitesse. Ces chicanes sont généralement constituées par un disque ayant un diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre et comportant un segment libre dont l'aire représente 20 à 45% de la section totale. Ces chicanes assurent en outre la rigidité du faisceau et sont solidaires de la plaque tubulaire fixe au moyen de tirants et entretoises qui occupent la place de tubes.

Dans certains cas, on utilise les chicanes longitudinales constituées par une simple tôle insérée au milieu du faisceau. Cette disposition oblige le fluide à effectuer un aller et retour dans la calandre et l'on a alors un appareil désigné par le terme « deux passes côte calandre ».

Enfin, au niveau de la bride d'entrée de la calandre, on soude généralement sur le faisceau une plaque perforée qui brise le jet liquide et réduit ainsi l'érosion des tubes.

L'introduction du faisceau dans la calandre détermine parfaitement la circulation du fluide à l'extérieur des tubes. La circulation dans le faisceau est assurée par l'adjonction d'une boîte de distribution, portant les brides d'entrée et de sortie et d'une boîte de retour .le classement de ces boîtes oblige le fluide à traverser successivement plusieurs sections du faisceau, ce qui a pour but d'accroître la vitesse et d'augmenter ainsi le coefficient de transfert à l'intérieur des tubes. Cette disposition correspond toujours à un nombre pair de passages ou passes dans le faisceau .l'étanchéité des cloisons des boîtes accolées aux plaques tubulaires est assurée par des joints ,de sorte qu'il faut supprimer certaines rangées de tubes pour ménager les portées du joint sur les plaques tubulaires .dans ces conditions, il est possible d'estimer le nombre de tubes pouvant être montés sur une plaque tubulaire donnée ,déduction faite des emplacements

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

des tirants et des potées de joint. Kern propose dans le tableau un décompte de tubes, établi en fonction du diamètre intérieur D_c de la calandre, du nombre de passes n_t dans le faisceau, du diamètre des tubes et de leur disposition.

Les boîtes de retour sont généralement constituées par un métal identique à celui des tubes alors que les boîtes de distribution sont toujours en acier au carbone et protégées intérieurement par des peintures plastifiées ou des revêtements d'époxyrésines lorsque la corrosion le nécessite.

❖ Plaques tubulaires :

Ce sont des plaques percées qui supportent les tubes à leurs extrémités. Leurs épaisseurs varient entre 5 et 10 cm. Les tubes généralement sont fixés par soudage.



Figure (IV-1) : Plaques tubulaires

❖ Chicane :

Les chicanes peuvent avoir deux rôles :

- Augmenter la rigidité du faisceau, pour éviter les phénomènes de vibration
- Augmenter la vitesse du fluide

Il existe deux types de chicanes :

• Chicanes transversales :

Sont généralement constituées par un disque ayant un diamètre légèrement inférieur à celui de la calandre et comportant un segment libre dont la surface représente 20 à 45% de la section totale. Ces chicanes ont pour but d'allonger le chemin du fluide circulant dans la calandre, et d'améliorer ainsi le transfert à l'extérieur du tube.

• Chicanes longitudinales :

Sont généralement constituées par une simple tôle insérée au milieu du faisceau cette disposition oblige le fluide à effectuer un aller et un retour dans la calandre.

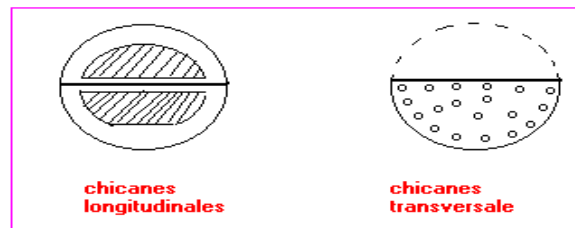


Figure (IV-2) :Chicanes longitudinales- transversales

IV-4-b. Autres échangeurs tubulaires :

IV-4-b-A. Échangeur double –tube ou à tubes coaxiaux échangeurs multi-épingles :

❖ Échangeurs double-tube d'épingle :

Ce sont des échangeurs constitués d'épingles en virolées dans les parties droites. une épingle est constituée de deux tubes droites reliés soit par un coude soudé ,soit par un raccord bridé .Le raccordement des deux tubes externes se fait par des tés soudés ou bridés.

Un autre dispositif est très souvent utilisé :

Une boîte de retour relie les deux tubes externes enveloppant le raccord de l'épingle et laissant ainsi à cette dernière toute liberté de dilatation .la boîte de retour permet de s'affranchir des problèmes posés par la mise en place de soufflets ou de presse-étoupe.

❖ Échangeurs multi-épingles ou multi-tubes :

Sur le même principe que celui des doubles tubes sont conçus les appareils multi-tubes composés de tubes en U, ailettes ou non, fixées à leurs extrémités sur une plaque tubulaire.

Les tubes sont logés dans deux calandres cylindriques reliées, soit par des coudes à 180C° enveloppant les coudes des épingles, soit par des boîtes de retour à couvercles plats ou bonnets. Chaque épingle peut se dilater indépendamment l'une de l'autre.

❖ Utilisation des échangeurs double-tube et multi-épingles :

Ces échangeurs conduisent à des solutions alternatives intéressantes à l'emploi des échangeurs tubulaires à faisceau et calandre conventionnels, en particulier dans les cas suivants :

- Pour de faibles surfaces d'échange requises, de l'ordre de 50 m² et moins.
- Pour des hautes pressions.
- Dans le cas de croisement important des températures de sortie accompagné le plus souvent d'approches faible

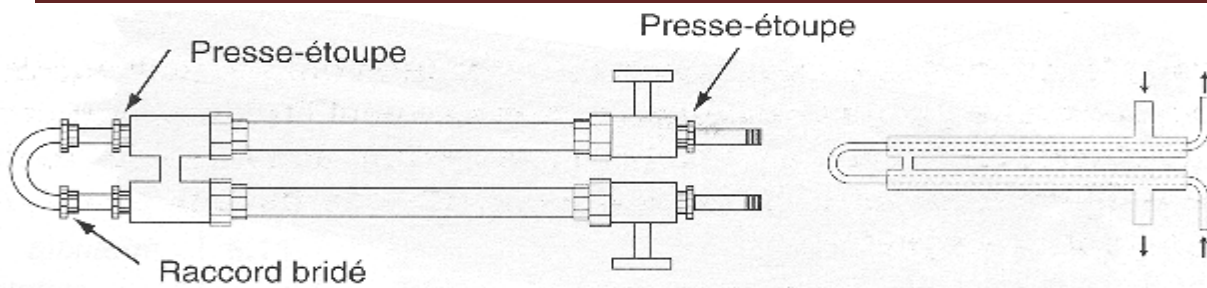


Figure (IV-3) : Échangeur double –tube ou à tubes coaxiaux échangeurs multi-épingles

IV-4-b-B. Réchauffeur :

Ces échangeurs sont utilisés pour maintenir des produits stockés à un niveau thermique adéquat, ceci pour éviter des comportements au froid préjudiciables ou, dans le cas de produits visqueux, pour assurer leur pompabilité dans des conditions économiques.

IV-4-b-C. Echangeurs en ligne :

Ces appareils sont similaires dans leur conception, matériaux et fabrication aux réchauffeurs d'aspiration, si ce n'est que leurs deux extrémités côté calandre sont bridées sur les tuyauteries. Les tubes ailetés sont favorables à leur utilisation pour réchauffer ou refroidir des liquides visqueux ou des gaz .ils sont installés en ligne sur des tuyauteries pour compenser les pertes thermiques, pour préchauffer des produits à une température désirée, pour refroidir des gaz après compression.

IV-4-b-D. Echangeurs à baïonnettes :

Ce sont des échangeurs tubulaires particuliers à faisceau et calandre .le faisceau est constitué de paires de tubes concentriques appelées baïonnettes.

Côté tubes l'alimentation du fluide est effectuée dans le tube central et son retour assuré dans l'espace annulaire de la baïonnette.

IV-4-b-E. Echangeurs bobinés :

Ce sont d'échangeurs tubulaires de conception spéciale permettant d'installer une grande surface d'échange avec un encombrement réduit.

❖ Utilisation :

- Un écart de température important entre l'entrée et la sortie des fluides circulant côté calandre ou côté tubes (différence de l'ordre de 100C°)

- Un croisement de température important entre le fluide chaud et le fluide froid s'accompagnant le plus souvent d'approches faibles ou de « pincement » de températures serré.
- Un potentiel de température réduite entre les fluides chauds et froids (de l'ordre de quelques degrés).
- Des puissances thermiques requises très importantes

IV-4-c. Echangeurs compacts non tubulaires :

Comme leur nom l'indique, ce sont des échangeurs de chaleur présentant une grande surface d'échangeur par unité de volume, environ 700 à $1000\text{m}^2/\text{m}^3$. Alors que l'échangeur tubulaire conventionnel présente une capacité de l'ordre de 100 à $200\text{m}^2/\text{m}^3$.

IV-4-c-A. Echangeurs à plaques à joints :

Ils sont constitués d'un ensemble de plaques maintenues serrés entre deux plateaux, un plateau fixe ou bâti sur lequel se trouvent généralement les raccords et un plateau de serrage mobile. Selon les constructeurs, la hauteur des plaques peut varier de 0.2 à 3m pour une largeur de 20 à 40% de la hauteur.

❖ Utilisation :

La facilité de montage et de démontage des plaques permet une accessibilité totale et rapide pour inspection et nettoyage manuel ; ainsi qu'une adaptabilité des performances en exploitation par modification de la surface d'échange (adjonction ou retrait de plaques) ou de l'efficacité (changement de l'arrangement des circuits).

IV-4-c-B. Echangeurs à plaques brasées :

Le principe de leur conception est assez comparable à celui des échangeurs à plaques à joints : la surface d'échange est constituée de plaques ondulées empilées et réunies entre elles par brassage. Les interstices entre les plaques forment des canaux dans lesquels les fluides circulent à contre-courant. Une soudure sur le pourtour de chaque plaque assure l'étanchéité. L'ensemble des plaques est disposé entre deux plaques extérieures de protection.

Les plaques sont généralement en acier inoxydable, alors que le matériau de brassage peut être du cuivre ou du nickel.

Les surfaces d'échange disponibles sont relativement réduites (quelques dizaines de mètres carrés), les pressions et températures d'utilisation sont limitées, respectivement à 30bar et 200C° environ.

Ce type d'échangeur est surtout utilisé dans des cycles frigorifiques et tout particulièrement en génie climatique, par exemple en climatisation de salles de contrôles.

IV-4-c-C. Echangeurs à plaques soudées :

Il existe une très grande variété d'échangeurs à plaques soudées qu'il n'est pas possible de présenter dans ce domaine.

- Echangeurs ALFA-REX
- Echangeurs « platulaires »
- Echangeurs Compabloc
- Echangeurs Packinox

IV-4-c-D. Echangeurs à plaques ailetées :

Un échangeur à plaques ailetées est constitué par l'assemblage de plaques ondulées séparées par des tôles plates formant des passages ou des canaux offerts à la circulation des fluides.

Il existe deux types d'échangeurs :

- Echangeurs à plaques ailetées brasées
- Echangeurs à plaques ailetés soudés

IV-4-c-E. Echangeurs à circuit imprimé :

Il s'agit d'échangeurs à plaques non ailetées dont la technique de fabrication des canaux rappelle celles des circuits imprimés dans le domaine de l'électronique.

IV-4-c-F. Echangeurs à plaques circulaires :

Ces échangeurs mettent en œuvre des plaques circulaires nervurées, soudées par paires et empilées pour constituer un faisceau inséré dans une virole cylindrique.

IV-4-c-G. Echangeurs à plaques en spirale :

Un échangeur à plaque en spirale est construit à partir d'un assemblage de deux tôles formant une paire de passage spiralés concentriques. Tout matériau pouvant être roulé à froid et soudé peut être utilisé (acier au carbone, acier inoxydable ...). L'enroulement des passages conduits à obtenir le corps de l'échangeur.

IV-5. Principe de fonctionnement :

Généralement, sauf cas très particuliers d'échange fluide-solide (ou assimilé), les échangeurs permettent un échange de chaleur entre deux fluides en mouvement .ils sont dits :

- à **surface** les deux fluides sont séparés par une paroi.
- à **contact direct** ou à **mélange** lorsque les deux fluides sont mélangés.

IV-5- a. Les échangeurs à surface :

L'échange de chaleur entre deux fluides séparés par une paroi est caractérisé localement par la figure suivante

- Le **potentiel thermique** local $\Delta\theta$, différence de température entre les deux fluides.
- L'élément de **surface d'échange** da mis en œuvre.
- La **résistance** au transfert R, résultante de diverses résistances en série et correspondant :
 - au transfert par **convection** entre le fluide chaud et la paroi.
 - Au transfert par **conduction** à travers la paroi.
 - Au transfert par **convection** entre la paroi et le fluide froid.
 - Au **salissement** éventuel de chaque côté de la paroi.

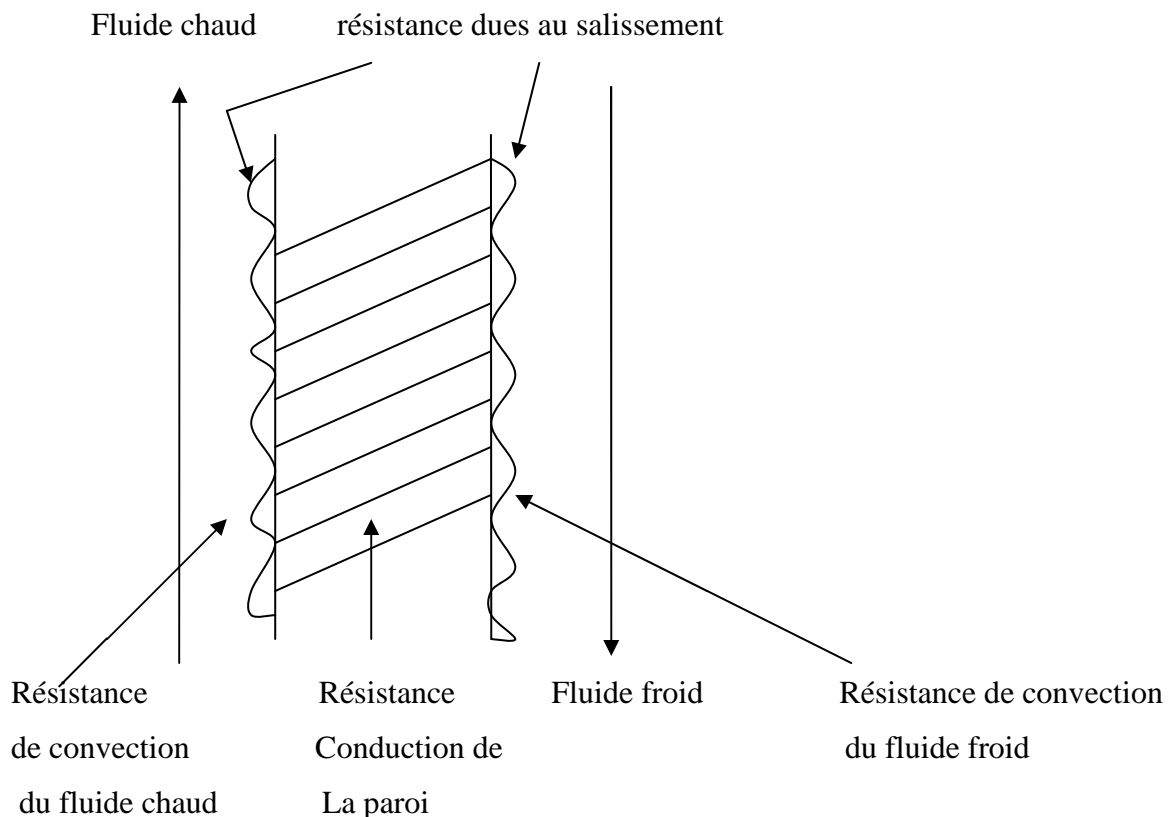


Figure (IV-4) : Résistance au transfert

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

En régime permanent la loi de transfert caractérisant l'échange s'exprime sous la forme flux = potentiel/ résistance, le flux Φ étant le débit de chaleur par unité de surface d'échange, soit :

$$\Phi = dQ / dA = \Delta \theta / R = U \Delta \theta$$

IV-5-b. Les échangeurs à contact direct (ou à mélange) :

Aucune paroi ne sépare les deux fluides qui sont alors mélangés ; les applications dans le domaine du raffinage se trouvent en conséquence limitées .Toutefois, lorsque les deux fluides peuvent être séparés facilement et que la contamination n'est pas un problème majeur, les échangeurs à mélange peuvent être utilisés ; c'est en particulier le cas de l'échange entre une phase liquide et une phase gazeuse, le transfert de chaleur étant lié au phénomène de transfert de masse entre phases.

IV-6. Mode de circulation des fluides :

Il existe plusieurs schémas de circulation d'un fluide dans les échangeurs.

IV-6-a. Circulation à co-courant (ou à courants parallèles) et circulation à contre- courant :

Les deux fluides circulent soit dans le même sens, soit en sens contraire de chaque côté de la paroi.

1. Echange à contre-courant

Les entrées et les sorties de chaque produit sont respectivement à l'opposé l'une de l'autre, de sorte que les produits se croisent.

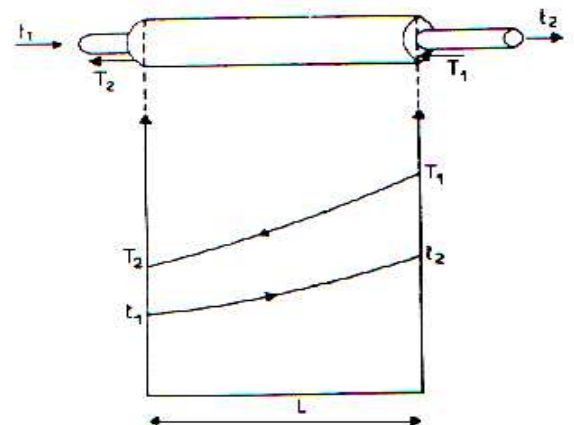


Figure (IV-5): Echange à contre-courant

$$\Delta T_1 = T_1 - t_2$$
$$\Delta T_2 = T_2 - t_1$$

Où :

T_1 et T_2 : températures initiale et finale du produit chaud.

t_1 et t_2 : températures initiale et finale du produit froid

2. Echange à co-courants

Les deux entrées, sont du même côté de l'échangeur (Fig-IV-10) et les deux sorties à l'autre extrémité de sorte que les produits cheminent parallèlement de chaque côté de la surface d'échange.

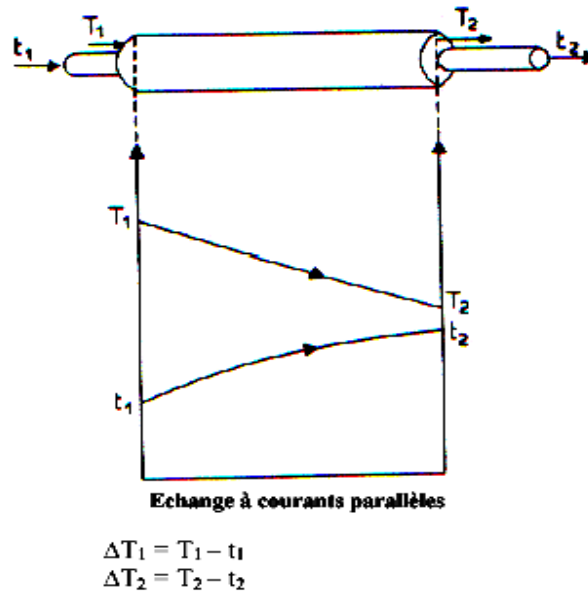


Figure (IV-6) Echange à co-courants

La réalisation technologique peut se faire :

- Par des appareils tubulaires dits :
 - double-tube : constitués de 2 tubes concentriques ; un fluide s'écoule dans le tube intérieur, l'autre dans la section annulaire.
 - A faisceau et calandre : un fluide passe à l'intérieur des tubes parallèles constituant un faisceau logé dans une calandre cylindrique, l'autre passe à l'extérieur des tubes du côté de la calandre

- Par des appareils à plaques : les plaques peuvent être planes ou formées en spirale.
- Par des appareils à lamelles : ces appareils peuvent être considérés comme des variantes des appareils à faisceau et calandre ; un assemblage de lamelles constitue le faisceau.

Remarque :

La circulation à contre-courant est un procédé le plus désiré .par contre la circulation à courant parallèle est un procédé à éviter.

IV-6-b. Circulation associant co-courant et contre- courant :

Ce type de circulation est réalisé le plus souvent dans des appareils tubulaires à faisceau et calandre cylindrique :

Appareils à 1passe côté calandre et 2ou4ou6 ; etc.

Le nombre de passe côté tubes est pair, souvent égal à 2, 4 parfois à 6, rarement égal ou supérieur à 8 en raison des contraintes de perte de charge.

C'est la circulation la plus répandue à l'échelle industrielle

IV-6-c. Circulation à courants croisés :

L'écoulement des 2 fluides se fait dans 2 directions perpendiculaires.

La réalisation peut se faire :

- Par des appareils tubulaires : le faisceau peut être logé dans une calandre cylindrique ou dans un caisson parallélépipédique avec une ou plusieurs passes côté tubes.
- Par des appareils à plaques éventuellement spiralées.

IV-7.Recommandation sur le choix des paramètres de l'échangeur :

IV-7-a. Choix du diamètre des tubes :

Pour une même vitesse du fluide, la diminution du diamètre des tubes permet d'augmenter le nombre de ces derniers dans le faisceau et par conséquent de diminuer l'encombrement de l'appareil. Toute fois, l'augmentation du nombre de tubes pose des problèmes supplémentaires (beaucoup d'assemblage des tubes sur les plaques tubulaires, risque de coulage aux mandrinages, résistances hydrauliques supplémentaire, complication de nettoyage des tubes...etc.)

Les diamètres extérieurs des tubes couramment employés dans l'industrie sont 22, 25, 32 et 38 mm. Les petits diamètres sont appliqués pour les produits purs et peu visqueux.

IV-7-b. Choix de la vitesse dans les tubes :

L'augmentation de la vitesse d'écoulement du fluide dans les tubes améliore le coefficient correspondant de transfert de chaleur et mène la diminution de la surface d'échange de l'appareil.

Etant donné que les pertes de charge dans l'appareil sont proportionnelles à la vitesse d'écoulement, la valeur maximale de cette dernière est conditionnée par les pertes de charge admissibles.

Remarque :

- Le coefficient global K augmente avec la vitesse .Si le coefficient local α dans la calandre est suffisamment élevé et les résistances thermiques $\sum \delta_i / \lambda_i$ sont petites.
- Si le coefficient local dans la calandre est beaucoup plus petit que celui qui se trouve dans les tubes (exp. le gaz circule dans la calandre et le liquide passe à travers les tubes) Alors l'augmentation de la vitesse dans les tubes n'influe pratiquement pas sur K .

IV-7-c. Choix de la longueur des tubes :

Habituellement, la détermination de la longueur des tubes est l'objet du calcul.

Étant donné que dans les échangeurs on utilise les tubes standardisés, la longueur calculée doit être arrondie.

Les longueurs des tubes utilisés industriellement sont (en mm) : 1000 ; 1250 ; 1500 ; 2000 ; 2500 ; 3000 ; 3500 ; 4000 ; 4500 ; 5000 ; 6000 ; 7000.

IV-7-d. Critères de choix de la circulation des fluides :

Les fluides considérés comme sales ; corrosifs, polluants, visqueux et chauds ; lourds ; passent côté faisceau à l'intérieur des tubes .Ceci pour faciliter le changement des tubes afin d'éviter les émanations de gaz.

Les fluides clairs, propres passent côté calandre.

IV.7.d. A Organisation de la circulation côté tubes/côté calandre :

Il est des cas particuliers pour lesquels la circulation s'impose : dans un kettle le fluide à vaporiser est côté calandre ; il en est de même pour le fluide à condenser dans un condenseur à eau horizontal.

Sinon, le **côté tubes** est de préférence affecté au :

- Fluide sous la plus haute pression : un tube résiste mieux à la pression intérieur qu'à la pression extérieur ; une plus grande épaisseur de paroi ne s'applique qu'aux chambres de distribution et de retour de dimensions plus modestes que celle de la calandre ;
- Fluide à température élevée : à plus haute température le taux de travail admissible pour le matériau diminue, nécessitant une plus grande épaisseur ; cela peut conduire à prendre un acier pour lequel la contrainte admissible est supérieur ; par ailleurs les pertes thermiques sont limitées ;
- Fluide corrosif : le coût des matériaux à mettre en oeuvre ne se répercute pas côté calandre

- Fluide salissant : le nettoyage mécanique de l'intérieur des tubes est plus facile que celui du faisceau côté calandre ;
- Fluide entraînant dépôts et sédiments : l'entraînement et le nettoyage sont plus faciles

Le coté calandre est généralement réservé au :

- fluide visqueux pour lequel il est plus facile de régler la vitesse de circulation, donc transfert et perte de charge, en jouant sur le type et le nombre de chicanes transversales ;
- fluide de plus haut débit pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment.

Par ailleurs, il faut prendre en compte d'éventuels impératifs de sécurité face aux risques de ruptures et aux risques de fuites (dont le sens doit être apprécié selon les niveaux de pression) dans le cas de fluide inflammable, toxique, polluant pour l'environnement ou l'autre fluide, ou encore susceptible de réaction chimique avec l'autre fluide.

Dans certains cas, il y a « compétition » entre les fluides ; par exemple, lorsque du gaz naturel sous haute pression est refroidi par de l'eau de mer, les deux fluides sont justiciables du côté tubes, ce qui amène, sauf choix du titane très onéreux, à utiliser un circuit intermédiaire d'eau de réfrigération traitée pour échapper à la problématique.

IV-8. Paramètres influençant la performance d'un échangeur :

La performance d'un échangeur dépend de la qualité du transfert de chaleur entre les deux fluides et du mode de circulation utilisé.

Il ne s'agit pas ici d'aborder les différentes méthodes de calcul permettant de déterminer les coefficients de transfert globaux, ainsi que les lois d'échange pour chaque mode de circulation rencontrée .toutefois, une approche qualitative de l'influence des différents paramètres est faite dans la mesure où elle éclaire sur le choix des solutions technologiques appropriées.

IV-8-a .La qualité de transfert local :

Les échangeurs par convection entre fluides et paroi et par conduction à travers la paroi sont caractérisés par des résistances spécifiques auxquelles s'ajoutent celles dues au salissement éventuel introduit par chacun des deux fluides.

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

IV.8.a.A Transfert par convection- coefficient de « film » :

Les lois de transfert par convection sont très complexes car elles sont liées aux lois de l'écoulement ; le régime hydrodynamique jouant un rôle essentiel dans le mécanisme des échangeurs thermiques, ainsi qu'aux lois de la conduction intervenant au niveau de la paroi.

Ceci conduit à des lois différents selon que l'échange se fait sans ou avec changement de phase de l'un et (ou) l'autre des deux fluides, que la convection est naturelle ou forcée, que l'écoulement est laminaire ou turbulent, horizontal ou vertical (ascendant ou descendant), soumis à une force centrifuge

(Serpentin) ; plus ou moins perturbée par la paroi etc. ...

Malgré cette diversité, on cherche à exprimer la loi de transfert local sous la forme :

$$\Phi = \Delta\theta / R = h \Delta\theta$$

Avec :

$\Delta\theta$ = potentiel thermique local

R = la résistance au transfert

h = le coefficient de transfert global (coefficient de film)

IV.8.b. B. Convection sans changement de phase (écoulement monophasiques) :

Les différents paramètres sont de trois types :

- Les caractéristiques géométriques
- Les conditions opératoires
- Les caractéristiques du fluide

Quelques soit la spécificité de la convection, ces paramètres interviennent toujours sous la forme générale de la relations entre des nombres sans dimension tels que :

- Nu : Nombre de Nusselt :

$$Nu = h D / \lambda$$

- Re : Nombre de Reynolds :

$$Re = u D \rho / \mu = D G / \mu = u D / \nu$$

- Pr : Nombre de Prandtl :

$$Pr = C_p \mu / \lambda$$

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

➤ **St** : Nombre de Stanton :

$$\mathbf{St} = \mathbf{Nu} / \mathbf{Pe} = \mathbf{h} / \mathbf{CG}$$

➤ **Pe** : Nombre de Péclet :

$$\mathbf{Pe} = \mathbf{Re} \cdot \mathbf{Pr} = \mathbf{DCG} / \lambda$$

Avec :

D : longueur caractéristique de la géométrie

u : vitesse moyenne

G = ρ u : vitesse massique

C : chaleur massique

μ : viscosité dynamique

v = μ / ρ : viscosité cinématique

λ : conductibilité thermique

Ces grandeurs étant exprimées dans un système d'unités cohérent.

Par exemple, en négligeant certaines corrections mineures, le coefficient de film interne en convection forcée à l'intérieur d'un tube pour des gaz ou liquides organiques peut s'évaluer par :

$$\mathbf{Nu} = 1,86 \left(\frac{di}{l} \cdot \mathbf{Re} \cdot \mathbf{Pr} \right)^{1/3}$$

En régime laminaire (**Re < 2100**), et

$$\mathbf{Nu} = 0,023 \mathbf{Re}^{0,8} \mathbf{Pr}^{1/3}$$

En régime turbulent (**Re > 10 000**).

di et **l** sont respectivement le diamètre intérieur et la longueur du tube.

IV-8-b. Influence des caractéristiques géométriques :

Le choix se fait au niveau de la conception des appareils ; en particulier on cherche à obtenir des vitesses de circulation permettant un écoulement en régime turbulent, ce qui n'est pas toujours possible pour les produits très visqueux ; par ailleurs les vitesses sont limitées par différentes contraintes :

- Risques d'érosion et de vibration
- Pertes de charges admissibles ou économiques

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

En particulier, la conception d'un échangeur ou un arrangement d'échangeur est presque toujours le résultat d'un compromis transfert de chaleur-pertes de charges. Dans le cas de pertes de charges allouées, il y a intérêt à les saturer pour assurer le meilleur transfert, sous réserve de la prise en compte d'autres contraintes évoquées précédemment

Pour des faisceaux multi-passes devant être logés dans des calandres cylindriques le nombre de passes est généralement pair. Ils permettent des solutions technologiques simples pour l'organisation de la distribution et du retour du fluide. Pour 4 passes côté tubes.

Pour un même faisceau et en supposant que les régimes d'écoulement soit turbulent, le passage de 1 à 2 passes côté tubes se traduit par :

- Un doublement de la vitesse
- Une multiplication du coefficient de film interne par $(2)^{0.8} = 1,74$
- Une multiplication de la perte de charge par $(2)^2 \times 2 = 8$

Le nombre de passes côté tubes permet ainsi de régler le coefficient de film interne, les pertes de charge admissibles ou économiques imposant la limite ; ces ajustements ne peuvent être faits que de manière discrète.

Le fluide est obligé à un écoulement transversal au faisceau entre deux chicanes consécutives et à un mouvement horizontal dans l'ouverture de la fenêtre de chacune des chicanes. Bien entendu la perte de charge est d'autant plus grande que le nombre de chicanes est important et que la segmentation est faible ; lorsqu'elle est prohibitive des solutions dérivées peuvent être envisagées

Telles que double ou triple segmentation et disks and doughnuts (disques et couronnes) .

A titre indicatif, les vitesses moyennes de circulation sont les suivantes :

Pour les liquides : 1 à 2,5 m/s côté tubes

0,3 à 1 m/s côté calandre

Pour les gaz : 45 à 80 m/s sous vide

12 à 30 m/s sous pression atmosphérique

6 à 12 m/s sous pression > pression atmosphérique

Les vitesses permises étant d'autant plus grandes que la masse volumique est plus faible.

Par ailleurs, des turbulences localisées peuvent être obtenues par l'utilisation de géométries particulières ; telles que tubes torsadés ou moletés en spirale « Corrugées », ondulations crénelées ou plaques cannelées dans les échangeurs « compacts ».

IV-8-c. Influence des conditions opératoires :

Les géométries étant fixées, le coefficient de convection dépend du débit de fluide ; une modification du débit peut être due à une adaptation de la capacité de l'unité concernée aux besoins de production ou à des changements de conditions opératoires de température et de pression du procédé.

En opération, une modification de débit peut être également un moyen de réglage, la régulation de température de sortie d'un fluide de procédé étant assurée par adaptation du débit de fluide de réfrigération ou de réchauffage.

IV-8-d. Influence des caractéristiques du fluide :

Comme indiqué plus haut, les caractéristiques intervenant sont :

- la viscosité
- la conductibilité thermique
- la chaleur massique

IV-9. Impératifs à prendre en compte dans le choix du type et de la conception technologique des échangeurs de chaleur :

Pour une application thermique spécifique, le choix du type d'échangeur de chaleur et de sa conception dépend de nombreux facteurs plus ou moins interdépendants .les éléments de choix sont basés essentiellement sur les considérations suivantes.

IV-9-a. Condition de fonctionnement :

IV-9-a.-A. données procédés de base :

Elles sont indispensables pour le dimensionnement thermique, hydraulique, mécanique, et orientent la conception des types d'échangeurs, induisent des choix de matériaux, etc. ; elles sont notées sur des feuilles de spécification de procédé constituant en fait un véritable cahier des charges relatif à l'équipement thermique requis.

Les bases d'études concernent les températures et les pression de fonctionnement ,températures et pressions de calcul ,pertes de charge allouées ,nature des fluides et

CHAPITRE IV GENERALITE SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR

particularités(encrassement ,tenue au froid, stabilité thermique, comportement newtonien ou non) ,propriétés thermiques des fluides propriétés thermodynamiques et diagramme température-débit de chaleur échangée, changement d'état éventuel(écoulement monophasique liquide ou gaz ou écoulement diphasique avec vaporisation ou condensation) ,conditions particulières de fonctionnement (débits mini et maxi, différents cas de marche,...),etc.

Les quelques exemples ci-dessous illustrent l'influence de certaines données procédés :

- Si l'un des fluides est chargé de particules en suspension capables de précipiter, il est nécessaire de choisir un échangeur démontable et conçu pour faciliter l'entraînement des particules.
- Si un échangeur véhicule des fluides avec des débits volumiques importants de vapeur (cas de condenseurs sous vide par exemple) avec de très faibles pertes de charge allouées,le choix d'un type d'échangeur s'oriente vers une conception adaptée technologiquement (ceinture de distribution ,écoulement divisé,...).

Offrant de grandes sections de passage à l'écoulement, éliminant de fait l'emploi de certains échangeurs compacts à plaques dont les canaux sont très étroits.

IV-9-a-B. impératifs de nettoyage :

Selon l'importance et la nature de l'encrassement, un nettoyage chimique ou mécanique peut être imposé ; si un nettoyage mécanique rigoureux est impératif, l'échangeur doit être démontable pour permettre l'accès aux différentes parties sur lesquelles l'encrassement se dépose.

Par ailleurs, les vitesses de circulation des fluides ont une influence sur l'importance des dépôts ; à titre d'exemple, une vitesse de circulation minimum de 1 ,5m/s est généralement recommandée pour de l'eau de réfrigération en circulation dans un faisceau tubulaire.

Les dépôts de saletés qui se forment sur les parois des tubes mènent à la diminution du coefficient de transfert de chaleur et à l'augmentation des pertes de charge d'où la nécessité des nettoyages périodiques. La fréquence de nettoyage dépend des conditions de service auxquelles l'échangeur est exposé et en particulier de la nature des produits qui y circulent.

IV-9-a-C. Niveau thermique des parois :

Le comportement des fluides aux températures de parois doit être analysé en prévention de risques éventuels : figeage, cristallisation, dégradation, accroissement de l'encrassement, corrosion potentielle, etc.

IV-9-a-D. Temps de rétention des fluides dans l'échangeur :

Un échangeur offrant des temps de séjours courts relatifs aux fluides véhiculés est favorable à un régime rapide ; à contrario, des temps de séjour importants conduisent à des échangeurs à grande inertie thermique.

IV-9-1-E. Conditions d'opération pendant les phases transitoires de fonctionnement :

Il peut s'agir de démarrage, d'arrêt, de dépressurisation, de bipasse d'un circuit, de recyclage, etc...C'est une considération très importante pour la conception de l'échangeur puisque, sur le plan mécanique, des phases transitoires de régime opératoire ou cyclique peuvent induire des contraintes mécaniques importantes entre les divers constituants de l'échangeur en cas de gradient thermique élevé. Des défauts d'étanchéité, des déformations permanentes, voire des ruptures des équipements peuvent en résulter ; aussi toutes les conditions de marche exceptionnelles doivent être bien définies.

IV-9-b. Conditions de tenue mécanique :

IV-9-b-A. résistance aux pressions et aux températures de fonctionnement :

Toutes les phases possibles d'exploitation doivent bien être prises en compte. Les codes, les standards, les réglementations à appliquer doivent être clairement spécifiés, dans la mesure où ils sont applicables (problème des échangeurs spéciaux). Bien évidemment, les conditions de tenue mécanique influencent directement le choix du type et de la conception de l'échangeur.

Par exemple, un échangeur tubulaire à tête flottante s'impose en cas de dilatation différentielle importante entre faisceau et calandre ; par ailleurs, un échangeur démontable à plaques à joints ne peut s'envisager pour un service haute pression-haute température.

IV-9-b-B. Résistance à la corrosion :

Ce facteur intervient directement sur la nature des matériaux à installer donc sur le choix de la conception technologique et les coûts.

IV-9-c. C. Résistance à l'érosion :

L'érosion s'est souvent couplée à la corrosion. L'érosion se manifeste quand la vitesse linéaire du fluide dans un circuit est trop élevée et génère de fortes turbulences. Des valeurs limitantes de vitesse de circulation ou d'énergie cinétique correspondantes, sont définies dans des guides spécialisés.

Pour des fluides chargés de particules, les vitesses doivent être inférieures et adaptées à la nature, la taille et la densité des particules.

IV-9-b-D. Tenue aux vibrations induites par l'écoulement des fluides :

Cette considération s'applique essentiellement à l'écoulement des fluides côté calandre des échanges tubulaires ; cet écoulement génère des turbulences, des tourbillons, qui conduisent à des sollicitations mécaniques de tubes (flexion alternée) et dont la fréquence correspond à la fréquence d'excitation des tubes.

Un tube en vibration supporté par des chicanes, se comporte comme une poutre sur un appui, soumis à des vibrations.

S'il y a couplage de la fréquence d'excitation due aux turbulences avec la fréquence naturelle du tube, des phénomènes de résonances peuvent se produire, ce qui peut entraîner de graves détériorations des tubes par les phénomènes vibratoires les dommages qui peuvent être rencontrés sont les suivants :

- perte d'épaisseur par battage et rupture suite à des collisions répétées
- cisaillement des tubes à la traversée des chicanes
- fatigue des tubes
- cisaillement des tubes à l'encastrement dans les plaques tubulaires
- bruit par résonance acoustique si couplage avec fréquence acoustique de la calandre.

Les risques potentiels de vibrations de tubes induits par des écoulements sont appréhendés de mieux en mieux ; des méthodes de calcul relativement fiables sont disponibles (TEMA).a la construction, des mesures préventives peuvent être prises :

Choix de faisceau NTIW (N° tube in window), mise en place chicanes anti-résonantes acoustiques, de plaques supports, ...

IV-9-b. E. étanchéité relative ou absolue des circuits :

Cette contrainte peut être déterminante pour la conception de l'échangeur et justifier le rejet de certains types.

Pour des échangeurs tubulaire, le type TEMA peut être choisi en vue de limiter le nombre de brides comportant des joints sources de fuite ; éventuellement pour limiter les risques de contaminations de fluides, des échangeurs démontables à plaques à joints.

IV-9-c. Conditions de maintenance :

Les facilités de maintenance (nettoyage et réparation) sont liées au poids et à l'encombrement des échangeurs, ainsi qu'à leur accessibilité ; ce sont des facteurs quelques fois prédominants. Ceci est particulièrement vrai pour les échangeurs montés sur des plates –forme offshore ; dans ce cas, les échangeurs compacts à plaques présentent beaucoup d'intérêt dans la mesure où les conditions opératoires permettent leur emploi.

IV-8-d. Impératifs économiques :

Compte tenu de la multiplicité des conceptions d'échangeurs (échangeurs tubulaires ; échangeurs à plaques divers,...) et des affectant les coûts, il n'est pas aisé d'estimer les coûts de différentes solutions techniquement envisageables sans recourir à des méthodes d'estimation élaborées ou à des résultats.

Toutefois le prix d'un échangeur est lié directement à sa conception, à son poids, à sa surface d'échange et à la nature des matériaux constitutifs.

Par exemple, pour des échangeurs tubulaires à faisceau et calandre très usuels, constitués de tubes de diamètre extérieur $\frac{3}{4}$ inch et de longueur 20 ft, calandre et tubes en acier au carbone, le coût d'investissement est de l'ordre de 100 F/ m² en 1997 (prix départ usine de construction) ,pour des surfaces d'échanges supérieures à 500m² .

Le même échangeur avec un faisceau en titane coûte environ 6000 F/m², alors qu'un échangeur à plaques à joint du même métal nécessite une surface d'échange moindre à un coût de 1000 F/m².

Toute comparaison économique doit tenir compte aussi :

- Des frais de transport et d'installation de l'échangeur (tuyauteries, génie civil, etc...).
- Des coûts énergétiques (investissement et frais opératoires) : puissance de pompage ou de compression liée à la perte de charge autorisée sur les divers fluides, puissance de ventilation et consommation électrique des ventilateurs d'évaporateur, utilités (eau de réfrigération ;...), etc.

Nomenclature des composants des échangeurs

(Extrait Norme TEMA)

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Extrémité fixe – Virole de boîte à fond plat. 2. Extrémité fixe – Virole de boîte à fond bombé monobloc. 3. Bride d'extrémité fixe sur boîte à fond plat ou à fond bombé monobloc. 4. Fond plat de boîte d'extrémité. 5. Tubulure de boîte d'extrémité fixe. 6. Plaque tubulaire fixe. 7. Tubes. 8. Virole de calandre ou corps. 9. Fond de calandre ou corps. 10. Bride de calandre ou corps, extrémité fixe. 11. Bride de calandre ou corps, extrémité arrière. 12. Tubulure de calandre ou corps. 13. Bride de fond de calandre ou corps. 14. Soufflet de dilatation. 15. Plaque tubulaire de tête flottante. 16. Fond de tête flottante. 17. Bride de tête flottante. 18. Contre-bride de tête flottante. 19. Anneau fendu. | <ol style="list-style-type: none"> 20. Contre-bride slip-on. 21. Fond extérieur de tête flottante. 22. Jupe de plaque tubulaire de tête flottante. 23. Boîtier de garniture. 24. Garniture. 25. Couvercle presse-garniture. 26. Anneau-lanterne. 27. Tirants et entretoises. 28. Chicanees transversales ou plaques-supports. 29. Déflecteur de protection contre l'impact. 30. Chicane longitudinale. 31. Plaque de séparation de passe. 32. Purge de gaz. 33. Purge de liquide. 34. Raccord d'instrument de mesure. 35. Berceau-support. 36. Anneau de levage. 37. Console-support. 38. Déversoir. 39. Prise de niveau de liquide. |
|--|--|

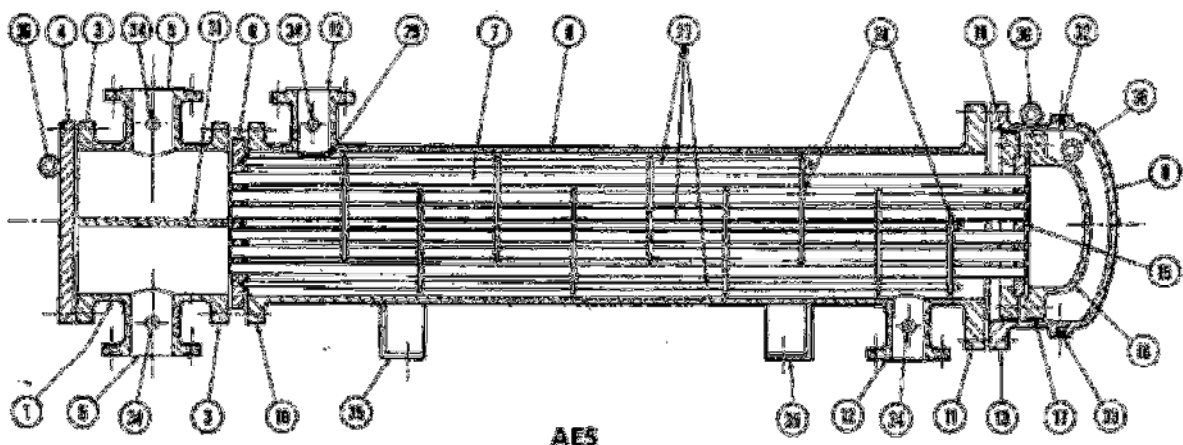


Figure (IV-6) :Nomenclature des composants des échangeurs

CHAPITRE V

CHAPITRE V : SIMULATION

V-1. Généralités sur la simulation :

La simulation est une forme particulière de l'expérience, dans une expérience ordinaire (au laboratoire), l'expérimentateur exerce une action directe sur l'objet à étudier, par contre, dans la simulation, ce contact n'existe pas en ce sens que l'expérimentateur n'agit pas directement sur l'objet, mais sur son modèle mathématique.

La simulation est l'utilisation d'un modèle mathématique adéquat pour étudier le comportement d'un système physique.

Un modèle mathématique est un ensemble d'équations qui décrivent le comportement d'un système à étudier (opération unitaire). Ces équations sont souvent des relations de conservation de masse, d'énergie et des équations de conservation de quantité de mouvement.

En utilisant cet aspect mathématique de raisonnement, la simulation offre un avantage majeur et important, car elle fournit une bonne approche du comportement du système réel. De nos jours, vu le développement considérable de logiciels informatiques, la simulation est devenue un outil de travail indispensable pour l'ingénieur de génie chimique.

Le fonctionnement d'un simulateur est basé essentiellement sur le choix d'un modèle thermodynamique représentant mieux le système à étudier.

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

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

Et pour la réalisation de celles-ci, un simulateur doit contenir :

- ✓ Une bibliothèque de modèle de calcul des propriétés physiques et thermodynamique des corps purs et des mélanges, couplée à une banque de données de corps purs.
- ✓ Une bibliothèque de modules standards de simulation des opérations unitaires les plus couramment présentées dans un procédé de fabrication.
- ✓ Une bibliothèque de modules de méthodes numériques algébriques.
- ✓ Une bibliothèque de modules de génération de diagnostics.

V-2. Le choix du modèle thermodynamique :

Les logiciels de simulation donnent accès à plusieurs modèles thermodynamiques pour la prédiction de l'équilibre liquide-vapeur, d'enthalpie et d'entropie ainsi que les propriétés de transports.

La réussite de la simulation dépend du choix du modèle thermodynamique, parce que ce dernier est établi pour une classe de fluide et un domaine de conditions P et T recommandé en utilisant des hypothèses et des suppositions pratiques. On peut distinguer :

V-2-a. Modèles d'activité :

Ces modèles sont surtout utilisés pour les systèmes qui présentent une forte polarité. Parmi ces modèles : le modèle de MARGULES et le modèle UNIQUAC.

V-2-b. Modèles hétérogènes :

Ces modèles sont recommandés pour les systèmes de constituants présentant une forte polarité (forte déviation à l'idéalité, azéotropiques...). Dans ces modèles les phases vapeurs sont représentées par les équations d'états, et les phases liquides par des corrélations pour le calcul des coefficients de fugacité.

Leurs utilisations restent limitées à cause de la nature empirique des corrélations proposées et qui nécessitent des extrapolations en dehors des conditions expérimentales.

V-2-c. Modèles basés sur les équations d'état :

Les modèles thermodynamiques basés sur les équations d'état sont utilisés pour le calcul des systèmes d'hydrocarbure et des systèmes de faible idéalité. Ils peuvent être utilisés pour calculer des propriétés thermodynamiques tel que : le constant d'équilibre K, l'entropie, l'enthalpie et la densité.

Leurs supériorités par rapport aux autres modèles résident dans le fait de l'utilisation des coefficients d'interaction binaires.

V-3. Equations d'état :**V-3-a. Equation de SOAVE et de PENG-ROBINSON :**

Les équations de SOAVE (1972) et PENG-ROBINSON (1976) diffèrent de l'équation de REDKICH-KWONG par l'introduction d'une fonction $a(T)$ qui dépend du facteur acentrique.

L'équation de SOAVE est de la même forme générale que l'équation (1)

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \dots\dots\dots (1)$$

SOAVE a introduit les relations suivantes pour exprimer la fonction $a(T)$:

$$a(T) = a_c \alpha(T_R) \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

$$\alpha(T_R) = \left[1 + m(1 - \sqrt{T_R}) \right]^2 \dots\dots\dots (3)$$

Le coefficient m est calculé en fonction du facteur acentrique ω :

$$m = 0.480 + 1.574\omega - 0.176\omega^2 \dots\dots\dots (4)$$

L'équation de PENG-ROBINSON diffère de l'équation de SOAVE par l'expression du terme d'attraction. Elle a été introduite en vue d'améliorer les résultats obtenus par l'équation de SAOVE, notamment en ce qui concerne le calcul des densités en phase liquide, sans modifier le nombre de paramètres :

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b) + b(V-b)} \dots\dots\dots (5)$$

Les termes $a(T)$ et b sont définis comme suit :

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \alpha(T_R) \dots\dots\dots (6)$$

Le terme $\alpha(T_R)$ présente la même forme générale que dans le cas de l'équation de SOAVE. Il suit la relation (3), mais la fonction reliant le paramètre m au facteur acentrique ω est différente :

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \dots (7)$$

$$b = 0.0778 \frac{RT_c}{P_c} \dots\dots\dots (8)$$

Ces équations sont très largement utilisées dans les modèles de simulation, en production et traitement de gaz.

L'équation la plus recommandée pour les systèmes d'hydrocarbures est l'équation de PENG ROBINSON, car elle résout correctement les problèmes d'équilibre et permet de prédire des densités liquides plus en accord avec les valeurs réelles que les autres équations.

✓ Domaines d'applications de l'équation de PENG ROBINSON (Tableau- V-1) :

Tableau (V-1) Domaines d'applications de l'équation de PENG ROBINSON

| Equation | Température °C | Pression Kpa |
|----------|----------------|-----------------|
| PR | >-271 | 100000(10E3bar) |

V-4. Les équations les plus utilisées :

On peut également citer :

- ✓ L'équation de BENEDICT, WEBB et RUBIN (BWR).
- ✓ L'équation de SBR.
- ✓ L'équation de CARNAHAN et STARLING (1969).
- ✓ L'équation de BACK présente par CHEN et KREGLEWSKI (1977).
- ✓ L'équation de PHCT proposé par BERET et PRAUSNITZ (1975).
- ✓ L'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK).
- ✓ L'équation de SRK-KABADI-DANNER (SRKKD).
- ✓ L'équation de SRK-HURON-VIDAL (SRKH).
- ✓ L'équation de SRK-PANAGIOTOPOULOS-REID (SRKP).
- ✓ L'équation de SRK-MODIFIED PANAGIOTOPOULOS-REID (SRKM).
- ✓ L'équation de SRK-SIMSCI (SRKS).
- ✓ L'équation de SRK-HEXAMER (HEXAMER).
- ✓ L'équation de PR-HURON-VIDAL (PRH).
- ✓ L'équation de PR-PANAGIOTOPOULOS-REID (PRP).

V.5. Description du simulateur HYSYS :

Le HYSYS est un logiciel de simulation des procédés de génie chimie, développé par la société canadienne HYPROTECH. Il a été conçu pour permettre le traitement d'une vaste gamme de problèmes allant de la séparation bi, tri phasique simple jusqu'à la distillation et la transformation chimique.

Le logiciel HYSYS est un outil de dimensionnement utilisé pour s'assurer que les conceptions optimales sont identifiées. Il est aussi utilisé pour modéliser les unités existantes et assurer que les équipements sont par spécification performants, ainsi évaluer et améliorer les procédés existants. Les ingénieurs engagés dans l'engineering de design utilisent le logiciel HYSYS pour faire des calculs rapides en utilisant des modèles efficaces et des techniques optimales.

La simulation par HYSYS réduit les coûts de l'engineering par :

- ✓ Des calculs rapides de différents designs en utilisant des modèles efficaces et des techniques optimales pour s'assurer que les équipements du procédé sont correctement spécifiés afin de délivrer les caractéristiques du produit voulues aux rendements de la production désirés.
- ✓ Création de modèles qui peuvent être appliqués durant le fonctionnement de l'unité à partir du design de conception jusqu'aux détails : Estimation, formation et optimisation.

Le HYSYS demande, pour définir ces corps, de remplir un tableau de valeurs à utiliser lors des calculs. En outre, pour caractériser les mélanges d'hydrocarbures complexes, il est possible d'utiliser les résultats d'analyses normalisées telles que TBP, ASTM, Kuop...etc.

Le HYSYS va par la suite utiliser ces données pour générer un nombre fini (choisi par l'utilisateur) de pseudo corps repérés par leurs points d'ébullition normaux pour représenter ces mélanges. En option, le simulateur peut lire d'autres banques de données telles que la DDB, DIPPR, API, GPA, etc. Cette option permet aussi d'utiliser les propriétés physiques déjà stockées dans la banque de données de HYSYS [8].

CHAPITRE VI

CHAPITRE VI : PARTIE CALCUL**Problématique :**

Au module '0', il se produit au niveau des communs, pendant certaines périodes de l'année un givrage accentué, allant jusqu'au bouchage des conduits. Ce phénomène est localisé au niveau des parties basses températures soit au niveau du E-411 ; lignes vers V401 et même les lignes d'alimentation liquide des trains. Cette situation pousse les exploitants à injecter du méthanol pour déboucher les parties obturées comme solution urgente. On procède également au régime chaud des unités de traitement de gaz ce qui influe sur :

- La conformité du gaz produit (point de rosée haut)
- Le taux de récupération d'hydrocarbures liquides particulièrement le GPL.
- Risque sur la sécurité des installations.

Dans ma présente étude, j'ai essayé de comprendre ce problème et les causes qui l'ont engendré et de porter les solutions qui s'imposent.

VI-1. Calcul De vérification :

Dans cette partie on va procéder à un calcul de vérification du cas design de l'E411 en utilisant la méthode de kern.

VI-1-a. Caractéristiques des fluides :

A- Coté tube :

❖ Composition de la charge :

Tableau VI-1 : Composition de la charge (coté tube)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | Fraction molaire (X_i) |
|----------------------------------|------------------------|----------------------------|
| N ₂ | 6.1 | 0.0131 |
| CO ₂ | 1.1 | 0.0020 |
| CH ₄ | 227.7 | 0.4225 |
| C ₂ H ₆ | 77.2 | 0.1432 |
| C ₃ H ₈ | 62.9 | 0.1167 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 20.2 | 0.0374 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 40.6 | 0.0753 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 15.7 | 0.0291 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 21.6 | 0.0400 |
| C ₆ H ₁₄ | 24.7 | 0.0458 |
| C ₇ H ₁₆ | 18.4 | 0.0341 |
| C ₈ H ₁₈ | 10.2 | 0.0189 |
| C ₉ H ₂₀ | 5.5 | 0.0102 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 2.5 | 0.0046 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 1.5 | 0.0027 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 3 | 0.0055 |
| TOTAL | 538.9 | 1 |

❖ Calcul de L'enthalpie h :

L'enthalpie est déterminée par la formule suivante :

$$h^t = \left(\frac{1}{\sqrt{\rho_{15}^{15}}} \right) (0.403 t + 0.000405 t^2) \quad \text{Kcal /kg}$$

$$\rho_{15}^{15} = \rho_{4moy}^{20} + 5\alpha$$

$$\rho_{4moy}^{20} = \frac{1}{\sum X'_{D,i} / \rho_{4,i}^{20}}$$

$$\alpha = 0.182330 - 0.00132 \rho_{4moy}^{20}$$

Où :

ρ_{15}^{15} : Masse volumique relative

ρ_4^{20} : Masse volumique relative

t : Température en degré °C

α : Constante dont la valeur est déterminée par la formule

X'_i : Concentration molaire de l'élément i

* $t_e = -2$ °C \longrightarrow $h_1 = -697.8$ Kcal/kg

* $t_s = 18$ °C \longrightarrow $h_2 = -681.6$ kcal/kg

❖ conditions opératoires :

Tableau VI-2 : Conditions opératoires (coté tube)

| | entrée | Sortie |
|---|-----------------------|--------|
| Température (°C) | -2 | 18 |
| Pression (Kg/cm ²) | 33 | 33 |
| Débit massique (Kg/h) | 132600 | 132600 |
| Viscosité coté tube (μ_t) | $4.743 \cdot 10^{-2}$ | / |
| la masse volumique moyenne (Kg/m ³) | 588.3 | / |

B- Coté calandre :

❖ Composition de la charge :

Tableau VI-3 : Composition de la charge (coté calandre)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | Fraction molaire (X _i) |
|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| N ₂ | 2.10 | 0.0010 |
| CO ₂ | 1.50 | 7.2369e-4 |
| CH ₄ | 209.90 | 0.1012 |
| C ₂ H ₆ | 131.60 | 0.0634 |
| C ₃ H ₈ | 129.00 | 0.0622 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 51.50 | 0.0248 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 112.70 | 0.0543 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 56.40 | 0.0272 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 85.20 | 0.0411 |
| C ₆ H ₁₄ | 159.40 | 0.0769 |
| C ₇ H ₁₆ | 200.20 | 0.0965 |
| C ₈ H ₁₈ | 193.80 | 0.0935 |
| C ₉ H ₂₀ | 178.80 | 0.0862 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 139.80 | 0.0674 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 111.40 | 0.0537 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 309.20 | 0.1491 |
| TOTAL | 2072.50 | 1 |

❖ Calcul de L'enthalpie H :

D'après les formules précédentes :

$$*T_1=60.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \longrightarrow \quad H_1= -518.7 \text{ Kcal/kg}$$

$$* T_2=35 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \longrightarrow \quad H_2= -529.47 \text{ kcal/kg}$$

❖ conditions opératoires :

Tableau VI-4 : Conditions opératoires (coté calandre)

| | entrée | Sortie |
|---|-----------------------|--------|
| Température (°C) | 60.8 | 35 |
| Pression (Kg/cm ²) | 26.0 | 25.7 |
| Débit massique (Kg/h) | 201366 | 201366 |
| Viscosité coté tube (μ_c) | $5.077 \cdot 10^{-1}$ | / |
| la masse volumique moyenne (Kg/m ³) | 635.7 | / |

VI-1-b.Caractéristique d'échangeur : [8].

D'après la fiche technique [6] :

A- Coté tube :

- ✓ diamètre extérieur des tubes : $d_e = 1.9 \cdot 10^{-2}$ m
- ✓ diamètre intérieur des tubes : $d_i = 1.478 \cdot 10^{-2}$ m
- ✓ longueur des tubes : $L = 9.3$ m
- ✓ pas triangulaire : $P = 2.5 \cdot 10^{-2}$ m
- ✓ Epaisseur des tubes : $e = 2.11 \cdot 10^{-2}$ m
- ✓ Coefficient de transfert global : $U = 130.3$ W/m² .°C

B-Coté calandre :

- ✓ Diamètre de la calandre : $D_c = 85.6 \cdot 10^{-2}$ m
- ✓ Nombre de chicanes : $N_c = 16$
- ✓ Espacement entre les chicanes : $B = 53 \cdot 10^{-2}$ m
- ✓ $X = 20\%$

VI-1-c.Calcul de la quantité de chaleur échangée [9]:➤ **Fluide chaud : condensat (coté calandre)**

$$Q_c = M \cdot \Delta H = M \cdot (H_1 - H_2)$$

$$Q_c = 201366 \cdot (-518.7 + 529.47) = 2168711.82 \text{ Kcal/h}$$

On a $1\text{Cal/s} = 4.18\text{ W}$

$Q_C = 2.48 \cdot 10^6 \text{ W}$

➤ **Fluide froid : condensat+glycol (coté tube)**

$Q_f = m \cdot \Delta h = m (h_2 - h_1)$

$Q_f = 132600 \cdot (-681.6 + 697.8) = 2.158 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}$

$Q_f = 2.506 \cdot 10^6 \text{ W}$

H₁ et H₂ : les enthalpies d'entrée et de sortie de fluide chaud (Kcal/Kg)

h₁ et h₂ : les enthalpies d'entrée et de sortie de fluide froid (Kcal/Kg)

M, m : Débit massiques des deux fluides (Kg/h)

VI-1-d. Calcul de DTLM (différence de la température logarithmique moyenne) :

$$\Delta TLM = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2.3 \text{Log} \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$\Delta t_1 = T_1 - t_2 = 60.8 - 18 = 42.8 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\Delta t_2 = T_2 - t_1 = 35 + 2 = 37 \text{ } ^\circ\text{C}$

Le rapport :

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{42.8}{37} = 1.56 < 2$$

Donc :

$$\Delta TLM = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} = \frac{42.8 + 37}{2}$$

$\Delta TLM = 39.9 \text{ } ^\circ\text{C}$

DTLM = 39.9 °C

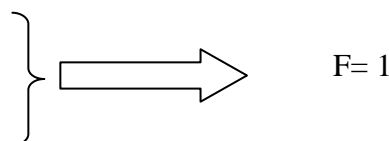
DTM = DTLM . F

F : facteur de correction.

Dans le cas :

Nombre de passe coté tube = 1

Nombre de passe coté calandre = 1



DTM = 39.9 °C

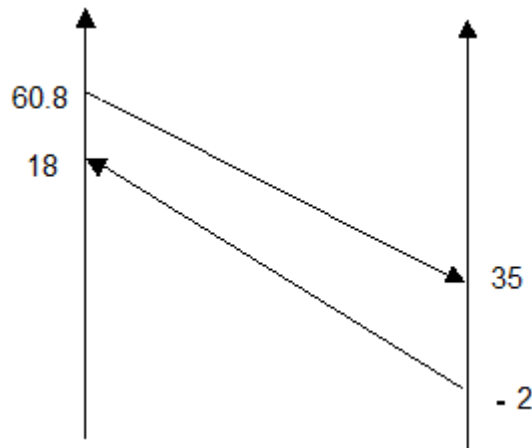


Figure VI-1- Diagramme des températures.

VI-1-e. Calcul de surface d'échange globale A :

D'après la fiche technique, le coefficient de transfert global $U=130.2 \text{ W/m}^2\text{°C}$

$$A = \frac{Q_c}{U * DTM}$$

$$A = \frac{2480829.12}{130.2 * 39.9} = 459.20$$

$$A = 459.20 \text{ m}^2$$

VI-1-f. Calcul le nombre des tubes :

$$N_t = \frac{A}{a_t}$$

a_t : surface de contact d'un tube

$$a_t = \pi * d_e * L$$

$$a = 3.14 * 0.019 * 9.3 = 0.5548 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow N_t = \frac{459.2}{0.5548} = 820.47 \approx 821 \text{ tubes}$$

VI-1-g. Calcul les pertes de charge :

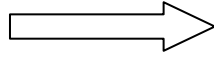
A-Coté tubes :

➤ La vitesse massique G_t :

$$G_t = \frac{4 * n_t * m}{\pi * N_t * d_i^2} \quad \Rightarrow \quad G_t = \frac{4 * 1 * 132600}{3.14 * 821 * (1.478 * 10^{-2})^2}$$

n_t : nombre de passe coté tube ($n_t=1$).

m : débit massique = 132600 kg/h



$$G_t = 257.42 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

➤ **Nombre de Reynolds Re :**

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

$$Re = \frac{1.478 \cdot 10^{-2} \cdot 257.42}{4.743 \cdot 10^{-5}} = 80216.69$$

$Re > 2100$ (le régime est turbulent)

➤ **La perte de charge coté tube ΔP_t :**

$$\Delta P_{tube} = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L}{d_i \cdot \rho \cdot \phi_t}$$

$$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0.14} \approx 1$$

f : Coefficient de friction en fonction de nombre de Reynolds est donné par l'expression suivante :

- Régime laminaire ($Re < 2100$) $f = \frac{32}{Re}$

- Régime turbulent ($Re > 2100$)

1-tubes lisses : $f = 0.00280 + 0.250 \cdot Re^{-0.32}$

2-tubes rugueux : $f = 0.0070 + 0.528 \cdot Re^{-0.32}$

Dans notre cas : $f = 0.0070 + 0.528 \cdot Re^{-0.32}$

⇒ $f = 0.0070 + 0.528 \cdot 80216.69^{-0.32}$

$$\Delta P_{tube} = \frac{0.021 \cdot 9.3 \cdot 257.42^2}{1.478 \cdot 10^{-2} \cdot 588.3} = 14883.91 Pa$$

➤ **Perte de charge dans la boîte de distribution :**

$$\text{Avec : } \Delta P_B = \frac{2 * n_t * G_t^2}{\rho}$$

$$\Delta P_B = \frac{2 * 257.42^2}{588.3} = 1068.79 Pa$$

➤ **Perte de charge totale :**

$$\Delta P_{\text{total tube}} = \Delta P_t + \Delta P_B$$

$$\Delta P_{\text{total tube}} = 14883.91 + 1068.79 = 15952.7 Pa$$

$$\Delta P_{\text{total tube}} = 15952.7 Pa = 0.16 \text{ Kg/cm}^2$$

B-Coté calandre :

➤ **Perte de charge longitudinale :**

$$\text{Avec : } \Delta P_{CL} = \frac{G_{CL}^2}{\rho \cdot \phi_c}$$

$$\phi_c = \left(\frac{\mu}{\mu_c} \right)^{0.14} \approx 1$$

$$G_{CL} = \frac{4 * M}{\pi \left(D_c^2 - N_t * d_e^2 \right) * X}$$

$$G_{CL} = \frac{4 * 201366}{3.14 * 3600 \left(0.856^2 - 821 * 0.019^2 \right) * 0.2} = 816.47 \text{ Kg / m}^2 \text{ s}$$

$$\Delta P_{CL} = \frac{816.47^2}{635.7 * 1} = 1192.37 Pa$$

➤ **Perte de charge transversale :**

$$\Delta P_{CT} = \frac{n_c \cdot f_{CT} \cdot G_{CT}^2}{\rho \cdot \phi_c}$$

$$G_{CT} = \frac{M}{a_{CT}}$$

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

$$a_{CT} = \frac{2 * 0.856}{0.025 * \sqrt{3}} * (0.025 - 0.019) * 0.53 = 0.1257 m^2$$

$$G_{CT} = \frac{201366}{3600 * 0.1257} = 444.99 \approx 445 \text{ Kg} / \text{m}^2 * \text{s}$$

Avec :

$$\text{Re} = \frac{G_{CT} * D_e}{\mu_c} \quad \mathbf{D_e : Diamètre hydraulique}$$

$$D_e = \frac{3.464 * p^2}{\pi * d_e} - d_e$$

$$D_e = \frac{3.464 * 0.025^2}{3.14 * 0.019} - 0.019 = 1.727 * 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$\text{Re} = \frac{1.727 * 10^{-2} * 445}{5.077 * 10^{-4}} = 15162.02$$

Re > 2100 (**Régime turbulent**)

$$f_{CT} = 1,50 \left(\frac{d_e}{(P - d_e) \text{ Re}} \right)^{0.2}$$

$$f_{CT} = 1,50 \left(\frac{0,019}{(0,025 - 0,019) * 15162.02} \right)^{0.2} = 0,27546$$

$$\Delta P_{CT} = \frac{1}{635.7} \cdot \frac{0,27546 * (445.73)^2}{1} = 95.48 \text{ Pa.}$$

➤ **La perte de charge totale coté calandre :**

$$\Delta P_{c\text{total}} = (N_C + 1) \cdot \Delta P_{CT} + \Delta P_{CL} \cdot N_C$$

$$\Delta P_{c\text{total}} = (17 * 95.48) + (16 * 1192.37) = 20701.08 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{c\text{total}} = 20701.08 \text{ Pa}$$

VI-1-h. Résume les résultats :**Tableau VI-5.les résultats de calcul.**

| Caractéristiques | Résultats de calcul |
|--|---------------------|
| Chaleur échangée (W) | 2480829.12 |
| Surface d'échange (m ²) | 459.2 |
| DTLM=DTM (°C) | 39.9 |
| Nombre des tubes | 821 |
| $\Delta P_{\text{calandre totale}}$ (Pa) | 20701.08 |
| $\Delta P_{\text{tube totale}}$ (Pa) | 15952.70 |

Interprétation de résultat :

Dans le cas design, la surface d'échange ($A= 459.2$) suffisante pour effectuer le transfert thermique désiré, avec des pertes de charge acceptable (perte de charge admissible est $0.7\text{bar} = 70000\text{Pa}$).

Remarque :

Dans le cas design on a la source de condensat qui aliment le séparateur V1012 puis vers l'entrée coté calandre de l'échangeur E411 c'est le condensat chaud qui arrive de séparateur V1101.

Mais actuellement la source de ce condensat c'est le Boosting (SBC) mais ce n'est pas la même température.

Donc : j'ai fait un calcul de vérification avec le logiciel (simulateur Hysys) la température de sortie E411 dans les deux coté (tube et calandre) en hiver et en été.

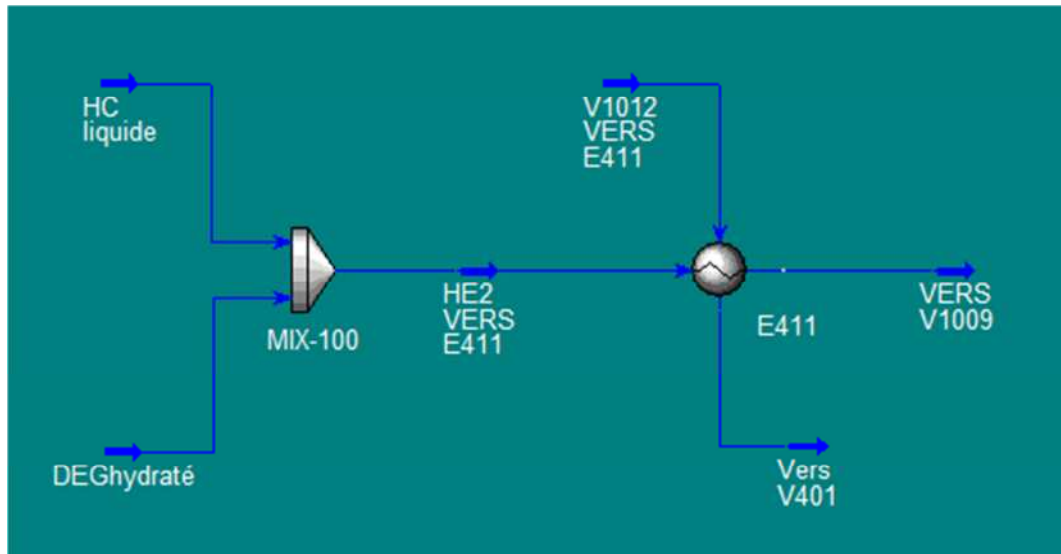
VI-2. Calcul la température de sortie par le logiciel HYSYS :**VI-2-a. Représentation du PFD sur HYSYS :**

Figure VI-2.schéma de hysys

VI-2-b.Cas Design :**➤ Hydrocarbure Liquide (entrée E411 coté tube) :****- Paramètre :**

- ✓ Température : -2°C .
- ✓ Pression : **3138 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **559.6 Kmol/h.**

- Propriété :

- ✓ Densité : **133.0 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-3137 Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **3.010 Kj/Kg⁰C.**

- Composition :

Tableau VI-6 : Composition de la charge (hydrocarbure liquide)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------|
| H₂O | 20.667 | 0.0369 |
| N₂ | 6.1 | 0.0109 |
| CO₂ | 1.1 | 0.0020 |
| CH₄ | 227.7 | 0.4069 |
| C₂H₆ | 77.2 | 0.1380 |
| C₃H₈ | 62.9 | 0.1124 |
| i-C₄H₁₀ | 20.2 | 0.0361 |
| n-C₄H₁₀ | 40.6 | 0.0726 |
| i-C₅H₁₂ | 15.7 | 0.0281 |
| n-C₅H₁₂ | 21.6 | 0.0386 |
| C₆H₁₄ | 24.7 | 0.0441 |
| C₇H₁₆ | 18.4 | 0.0329 |
| C₈H₁₈ | 10.2 | 0.0182 |
| C₉H₂₀ | 5.5 | 0.0098 |
| C₁₀H₂₂ | 2.5 | 0.0045 |
| C₁₁H₂₄ | 1.5 | 0.0027 |
| C₁₂H₂₆ | 3 | 0.0054 |
| TOTAL | 559.5670 | 1 |

➤ **DEG Hydraté (entrée E411 coté tube) :**- **Paramètre :**

- ✓ Température : -2°C .
- ✓ Pression : **3138 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **433.5 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **1130 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-7723 Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **0.8018 Kj/Kg⁰C.**

- **Composition :**

Tableau VI-7 : Composition de la charge(DEG)

| Constituants | Débit molaire (kmol/h) | (X _i) |
|-----------------------|------------------------|-------------------|
| DEG | 187.547 | 0.4326 |
| H₂O | 245.963 | 0.5674 |
| TOTAL | 433.511 | 1 |

➤ **Entrée E411 coté tube (Mélange DEG hydraté+hydrocarbure liquide) :**- **Paramètre :**

- ✓ Température : -2°C .
- ✓ Pression : **3138 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **993.1 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **247.1Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-5519 Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **1.868 Kj/Kg⁰C.**

- **Composition :**

Tableau VI-8 : Composition de la charge (entrée tube)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|----------------------------------|------------------------|-------------------|
| DEG | 187.5476 | 0.1889 |
| H ₂ O | 266.6305 | 0.2685 |
| N ₂ | 6.1 | 0.0061 |
| CO ₂ | 1.1 | 0.0011 |
| CH ₄ | 227.7 | 0.2293 |
| C ₂ H ₆ | 77.2 | 0.0777 |
| C ₃ H ₈ | 62.9 | 0.0633 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 20.2 | 0.0203 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 40.6 | 0.0409 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 15.7 | 0.0158 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 21.6 | 0.0218 |
| C ₆ H ₁₄ | 24.7 | 0.0249 |
| C ₇ H ₁₆ | 18.4 | 0.0185 |
| C ₈ H ₁₈ | 10.2 | 0.0103 |
| C ₉ H ₂₀ | 5.5 | 0.0055 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 2.5 | 0.0025 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 1.5 | 0.0015 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 3 | 0.0030 |
| TOTAL | 933.0781 | 1 |

➤ **Entrée calandre (V1012 vers E411) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **60 °C.**
- ✓ Pression : **2550 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **3073 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **655.5 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-2145 Kj/Kg.**

✓ Entropie : **1.449 KJ/Kg⁰C.**

- **Composition :**

Tableau VI-9 : Composition de la charge (entrée calandre)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|----------------------------------|------------------------|-------------------|
| N ₂ | 2.1 | 0.0007 |
| CO ₂ | 1.5 | 0.0005 |
| CH ₄ | 209.90 | 0.0683 |
| C ₂ H ₆ | 131.6 | 0.0428 |
| C ₃ H ₈ | 129.0 | 0.0420 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 51.5 | 0.0168 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 112.7 | 0.0367 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 56.4 | 0.0184 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 85.2 | 0.0277 |
| C ₆ H ₁₄ | 159.4 | 0.0519 |
| C ₇ H ₁₆ | 200.2 | 0.0652 |
| C ₈ H ₁₈ | 1193.8 | 0.3885 |
| C ₉ H ₂₀ | 178.8 | 0.0582 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 139.8 | 0.0455 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 111.4 | 0.0363 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 309.2 | 0.1006 |
| TOTAL | 3072.5 | 1 |

➤ **Sortie tube (Vers V1009) :**

- **Paramètre :**

✓ Température : **32.62 °C.**

✓ Pression : **3089 KPa.**

✓ Débit molaire : **993.1 Kgmol/h.**

- **Propriété :**

✓ Densité massique : **180.3 Kg/m³.**

- ✓ Enthalpie : **-5412Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **2.177 Kj/Kg⁰C.**

➤ **Sortie calandre (E411 vers V401) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **35.20 °C.**
- ✓ Pression : **25.70 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **3073 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **679.6 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-2161 Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **1.463 Kj/Kg⁰C.**

- Les principaux résultats de cette simulation sont donnés en annexe (I).

Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenues (la température et la pression) j'ai constaté que :

- Une très bonne échange thermique entre les deux coté tube et calandre.
- Bonne séparation du mélange (DEG hydraté-condensat) au niveau de séparateur V1009.

VI-2-c.Cas actuel en été :

Vu l'impossibilité de faire l'analyse chromatographique du condensat sur site, on a considéré les analyses design existantes.

➤ **Hydrocarbure Liquide (entrée E411 coté tube) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **-1 °C.**
- ✓ Pression : **2736 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **548.4 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **109.3 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-3012 Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **3.059 Kj/Kg⁰C.**

- **Composition :**

Tableau VI-10 : Composition de la charge (Hydrocarbure liquide)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|----------------------------------|------------------------|-------------------|
| H ₂ O | 9.50 | 0.017 |
| N ₂ | 6.1 | 0.01 |
| CO ₂ | 1.10 | 0.002 |
| CH ₄ | 227.7 | 0.415 |
| C ₂ H ₆ | 77.2 | 0.140 |
| C ₃ H ₈ | 62.9 | 0.114 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 20.2 | 0.036 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 40.6 | 0.074 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 15.7 | 0.028 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 21.6 | 0.039 |
| C ₆ H ₁₄ | 24.7 | 0.045 |
| C ₇ H ₁₆ | 18.4 | 0.033 |
| C ₈ H ₁₈ | 10.2 | 0.015 |
| C ₉ H ₂₀ | 5.5 | 0.010 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 2.5 | 0.004 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 1.5 | 0.002 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 3.0 | 0.005 |
| TOTAL | 548.4 | 1 |

➤ **DEG Hydraté (entrée tube) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : -1 °C.
- ✓ Pression : 2736 KPa.
- ✓ Débit molaire : 208 Kmol/h.

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : 1129 Kg/m³.
- ✓ Enthalpie : -7898 Kj/Kg.
- ✓ Entropie : 0.8733 Kj/Kg⁰C

- **Composition :**

Tableau VI-11 : Composition de la charge (DEG hydraté)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|------------------|------------------------|-------------------|
| DEG | 84.103 | 0.404 |
| H ₂ O | 123.86 | 0.596 |
| TOTAL | 207.959 | 1 |

➤ **Entrée E411 coté tube (Mélange DEG hydraté+hydrocarbure liquide) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **-1 °C.**
- ✓ Pression : **2736 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **756.4 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **731 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-2574 Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **1.286 Kj/Kg⁰C.**

- **Composition :**

Tableau VI-12 : Composition de la charge (entrée tube)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (Xi) |
|--------------------------------------|------------------------|--------|
| DEG | 84.103 | 0.111 |
| H₂O | 133.36 | 0.176 |
| N₂ | 6.2 | 0.008 |
| CO₂ | 1.1 | 0.0007 |
| CH₄ | 227.7 | 0.301 |
| C₂H₆ | 77.2 | 0.083 |
| C₃H₈ | 62.9 | 0.026 |
| i-C₄H₁₀ | 20.2 | 0.0536 |
| n-C₄H₁₀ | 40.6 | 0.020 |
| i-C₅H₁₂ | 15.7 | 0.032 |
| n-C₅H₁₂ | 21.6 | 0.024 |
| C₆H₁₄ | 24.7 | 0.013 |
| C₇H₁₆ | 18.4 | 0.007 |
| C₈H₁₈ | 10.2 | 0.003 |
| C₉H₂₀ | 5.5 | 0.001 |
| C₁₀H₂₂ | 2.5 | 0.003 |
| C₁₁H₂₄ | 1.5 | 0.0015 |
| C₁₂H₂₆ | 3.0 | 0.0030 |
| TOTAL | 756.35 | 1 |

➤ **Entrée calandre (V1012 vers E411) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **27 °C.**
- ✓ Pression : **2442 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **1973 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **655.1 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-2246 Kj/Kg.**

✓ Entropie : 1.630 Kj/Kg⁰C.

- Composition :

Tableau VI-13 : Composition de la charge (entrée calandre)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|----------------------------------|------------------------|-------------------|
| N ₂ | 2.1 | 0.001 |
| CO ₂ | 1.5 | 0.0007 |
| CH ₄ | 209.90 | 0.101 |
| C ₂ H ₆ | 131.6 | 0.063 |
| C ₃ H ₈ | 129.0 | 0.062 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 51.5 | 0.024 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 112.7 | 0.054 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 56.4 | 0.027 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 85.2 | 0.0411 |
| C ₆ H ₁₄ | 159.4 | 0.076 |
| C ₇ H ₁₆ | 200.2 | 0.096 |
| C ₈ H ₁₈ | 1193.8 | 0.093 |
| C ₉ H ₂₀ | 178.8 | 0.086 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 139.8 | 0.067 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 111.4 | 0.053 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 309.2 | 0.149 |
| TOTAL | 2072.5 | 1 |

➤ Sortie tube (Vers V1009) :

- Paramètre :

✓ Température : 11.12 °C.

✓ Pression : 2648 KPa.

✓ Débit molaire : 756.4 Kmol/h.

- Propriété :

- ✓ Densité massique : **134.5 Kg/m³**.
- ✓ Enthalpie : **-4602 Kj/Kg**.
- ✓ Entropie : **2.46 Kj/Kg⁰C**.

➤ **Sortie calandre (E411 vers V401) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **24 ⁰C**.
- ✓ Pression : **2354 KPa**.
- ✓ Débit molaire : **2072.5 Kmol/h**.

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **649.7 Kg/m³**.
- ✓ Enthalpie : **-2253 Kj/Kg**.
- ✓ Entropie : **1.609 Kj/Kg⁰C**.

- Les principaux résultats de cette simulation sont donnés en annexe (II).

❖ **Température de formation des hydrates :**

La densité est donnée par la formule :

$$d_{liquide} = \frac{M_{liquide}}{M_{H2O}}$$

Ou : $M_{liquide}$: masse volumique de liquide

M_{H2O} : masse volumique de l'eau

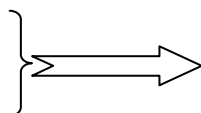
-Application numérique :

$$M_{liquide} = \frac{201740.70Kg / h}{300.5m^3 / h} = 671.35Kg / m^3 \quad M_{H2O} = 1000 Kg/m^3$$

$$d_{liquide} = \frac{671.35}{1000} \Rightarrow d_{liquide} = 0.671$$

$$d_{liquide} = 0.671$$

$$P = 2345 kPa = 23.45 bar$$



D'après la figure de l'annexe (IV)

$$TFH = 10 \text{ }^{\circ}\text{C} < 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenues (la température et la pression) j'ai constaté que :

- Une mauvais échange thermique au niveau d'échangeur E411.
- Une mauvaise séparation du mélange (DEG hydraté-condensat) au niveau de séparateur V1009.
- la température de sortie hors le domaine de formation des hydrates.

Donc en été, on n'a pas le problème de givrages.

VI-2-d.Cas actuel en hiver :

- **Hydrocarbure Liquide (entrée E411 coté tube) :**
 - **Paramètre :**
 - ✓ Température : **0 °C.**
 - ✓ Pression : **2736 KPa.**
 - ✓ Débit molaire : **548.4 Kmol/h.**
 - **Propriété :**
 - ✓ Densité massique : **108.3 Kg/m³.**
 - ✓ Enthalpie : **-3009 Kj/Kg.**
 - ✓ Entropie : **3.070 Kj/Kg⁰C.**
 - **Composition :**

Tableau VI-14 : Composition de la charge (Hydrocarbure liquide)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|----------------------------------|------------------------|-------------------|
| H ₂ O | 9.50 | 0.017 |
| N ₂ | 6.1 | 0.01 |
| CO ₂ | 1.10 | 0.002 |
| CH ₄ | 227.7 | 0.415 |
| C ₂ H ₆ | 77.2 | 0.140 |
| C ₃ H ₈ | 62.9 | 0.114 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 20.2 | 0.036 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 40.6 | 0.074 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 15.7 | 0.028 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 21.6 | 0.039 |
| C ₆ H ₁₄ | 24.7 | 0.045 |
| C ₇ H ₁₆ | 18.4 | 0.033 |
| C ₈ H ₁₈ | 10.2 | 0.015 |
| C ₉ H ₂₀ | 5.5 | 0.010 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 2.5 | 0.004 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 1.5 | 0.002 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 3.0 | 0.005 |
| TOTAL | 548.4 | 1 |

➤ **DEG Hydraté (entrée E411 coté tube) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **0 °C.**
- ✓ Pression : **2736 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **208 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **1128 Kg/m³.**
- ✓ Enthalpie : **-7895 Kj/Kg.**

✓ Entropie : **0.8803 KJ/Kg⁰C**

- **Composition :**

Tableau VI-15 : Composition de la charge (DEG hydraté)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|-----------------------|------------------------|-------------------|
| DEG | 84.103 | 0.404 |
| H₂O | 123.86 | 0.596 |
| TOTAL | 207.959 | 1 |

➤ **Entrée E411 tube (Mélange DEG hydraté +hydrocarbure) :**

- **Paramètre :**

✓ Température : **0.2947 °C.**

✓ Pression : **2736 KPa.**

✓ Débit molaire : **756.4 Kmol/h.**

- **Propriété :**

✓ Densité massique : **155.5 Kg/m³.**

✓ Enthalpie : **-4638 KJ/Kg.**

✓ Entropie : **2.343 KJ/Kg⁰C.**

- **Composition :**

Tableau VI-16 : Composition de la charge (entrée tube)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------|
| DEG | 84.103 | 0.111 |
| H₂O | 133.36 | 0.176 |
| N₂ | 6.2 | 0.008 |
| CO₂ | 1.1 | 0.0007 |
| CH₄ | 227.7 | 0.301 |
| C₂H₆ | 77.2 | 0.083 |
| C₃H₈ | 62.9 | 0.026 |
| i-C₄H₁₀ | 20.2 | 0.0536 |
| n-C₄H₁₀ | 40.6 | 0.020 |
| i-C₅H₁₂ | 15.7 | 0.032 |
| n-C₅H₁₂ | 21.6 | 0.024 |
| C₆H₁₄ | 24.7 | 0.013 |
| C₇H₁₆ | 18.4 | 0.007 |
| C₈H₁₈ | 10.2 | 0.003 |
| C₉H₂₀ | 5.5 | 0.001 |
| C₁₀H₂₂ | 2.5 | 0.003 |
| C₁₁H₂₄ | 1.5 | 0.0015 |
| C₁₂H₂₆ | 3.0 | 0.0030 |
| TOTAL | 756.35 | 1 |

➤ **Entrée E411 coté calandre (V1012 vers E411) :**

- **Paramètre :**

- ✓ Température : **11 °C.**
- ✓ Pression : **2442 KPa.**
- ✓ Débit molaire : **2073 Kmol/h.**

- **Propriété :**

- ✓ Densité massique : **693.2 Kg/m³.**

- ✓ Enthalpie : **-2280Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **1.513 Kj/Kg⁰C.**
- **Composition :**

Tableau VI-17 : Composition de la charge (entrée calandre)

| Constituants | Débit molaire (Kmol/h) | (X _i) |
|----------------------------------|------------------------|-------------------|
| N ₂ | 2.1 | 0.001 |
| CO ₂ | 1.5 | 0.0007 |
| CH ₄ | 209.90 | 0.101 |
| C ₂ H ₆ | 131.6 | 0.063 |
| C ₃ H ₈ | 129.0 | 0.062 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 51.5 | 0.024 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 112.7 | 0.054 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 56.4 | 0.027 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 85.2 | 0.0411 |
| C ₆ H ₁₄ | 159.4 | 0.076 |
| C ₇ H ₁₆ | 200.2 | 0.096 |
| C ₈ H ₁₈ | 1193.8 | 0.093 |
| C ₉ H ₂₀ | 178.8 | 0.086 |
| C ₁₀ H ₂₂ | 139.8 | 0.067 |
| C ₁₁ H ₂₄ | 111.4 | 0.053 |
| C ₁₂ H ₂₆ | 309.2 | 0.149 |
| TOTAL | 2072.5 | 1 |

- **Sortie E411 coté tube (Vers V1009) :**
- **Paramètre :**
 - ✓ Température : **7.794 °C.**
 - ✓ Pression : **2648 KPa.**
 - ✓ Débit molaire : **756.4 Kmol/h.**
- **Propriété :**
 - ✓ Densité massique : **138.6 Kg/m³.**

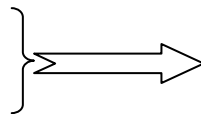
- ✓ Enthalpie : **-4612 Kj/Kg.**
- ✓ Entropie : **2.427Kj/Kg⁰C.**
- **Sortie E411 coté calandre (E411 vers V401) :**
- **Paramètre :**
 - ✓ Température : **9 ⁰C.**
 - ✓ Pression : **2354 KPa.**
 - ✓ Débit molaire : **2073 Kmol/h.**
- **Propriété :**
 - ✓ Densité massique : **695.0 Kg/m³.**
 - ✓ Enthalpie : **-2285 Kj/Kg.**
 - ✓ Entropie : **1.499 Kj/Kg⁰C.**

- Les principaux résultats de cette simulation sont donnés en annexe (III).

❖ La température de formation des hydrates :

$$d_{\text{gaz}} = 0.671$$

$$P = 2354 \text{ kg/cm}^2 = 23.54 \text{ bar}$$



D'après la figure de l'annexe 1

$$\text{TFH} = 10 \text{ } ^{\circ}\text{C} > 9 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenu (la température et la pression) j'ai constate que :

- Très mauvais échange thermique au niveau d'échangeur E411.
- Une mauvaise séparation du mélange (DEG hydraté-condensat) au niveau de séparateur V1009.
- la température de sortie dans le domaine la de formation des hydrates.

Donc en hiver, on a le problème de givrage.

CONCLUSION

Le stage que je effectué, au niveau du MPP-0- (module processing plant) à la région de Hassi R'Mel , consiste resolution le problème de givrage au niveau de l'échangeur E-411.Pour cela,j'ai procédé au calcul de vérification des paramètres du sortie de l'échangeur E411.

L'échangeur E-411c'est un échangeur permettant le préchauffage du condensat froid et glycol hydraté coté tubes avec le condensat chaud venant du boosting (coté calandre).Ceci pour obtenir une interface dans les séparateurs froid V1009 A/B/C afin de faciliter la séparation du melange (DEG hydraté-condensat) et permet également d'homogénéiser la température du condensat entrant dans le ballon d'alimentation des trains le V401.

Ily'a une grande quantité d'eau dans le condensat chaud venant du boosting.Cette eau est purgée périodiquement par les opérateurs au niveau des séparateurs V1012 A/B/C mais ça ne peut empêcher l'entraînement d'une partie de cette eau dans l'E-411, qui à certaines conditions entraine une formation d'hydrates.

D'après le calcul que j'ai effectué, je remarque dans le cas hiver : la température de sortie coté calandre même coté tube se trouve dans le domaine de formation des hydrates (problème de givrage dans la calandre et dans la conduite de sortie vers le ballon tampon V401).

Ceci est du à l'effet de la température ambiante en hiver et surtout à l'éloignement du boosting d'où vient la charge chaude influe sur la température d'entrée calandre de l'échangeur E-411 .

Donc pour résoudre ces problèmes je propose les solutions suivantes :

- ✓ Calorifugeage la conduite de condensat du boosting jusqu'aux séparateurs V1012A/B/C distance de plus d'un Kilomètre.
- ✓ Installer un traçage électrique sur les lignes vers l'échangeur E-411.
- ✓ Calorifuger des séparateurs V1012 A/B/C.
- ✓ Régler le problème des vannes automatiques de drainage d'eau des V1012, LCV 1009 A/B/C (étanchéité) pour limiter les entraînements d'eau avec le condensat.

ملخص :

في هاده الدراسة حاولت أن أفهم مشكلة الجليد في وحدة المبادلات (E411) و الاسباب المؤدية لذلك و في الاخير تقديم الحلول اللازمة

لذلك قمت بحساب يدوي لوحدة المبادلات (E411) ، وحساب درجة الحرارة في الصيف والشتاء وذلك بمساعدة برنامج المحاكات HYSYS.

Résumé :

Dans ma présente étude, j'ai essayé de comprendre le problème de givrage au niveau de l'échangeur E411 au module 0 ,et les causes qui l'ont engendré et de porter les solutions qui s'imposent .

Donc je présente un calcul manuel de vérification d'un échangeur (E411) et un calcul avec le simulateur HYSYS les paramètres de sortie dans le cas design et dans le cas actuel (en été et en hiver).

Abstract :

In my present study, I tried to understand the icing problem at the exchanger E411 module 0, and causes that begat and bring the necessary solutions.

So I present a manual calculation verification of an exchanger (E411) and a calculation with the HYSYS simulator output parameters in the design case and in the present case (summer and winter).

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: **Revue Sonatrach. « Gaz naturel dans le monde. »**
- [2]: **Gaz naturel, production, traitement et transport.**
- [3]: **Publication de IFP. Editions Technip. Revue trimestrielle de Sonatrach. Revue n°15.Décembre 2002**
- [4]: **Rapport du Centre de formation de Hassi R'mel**
- [5]: **Manuel opératoire du module 0.**
- [6]: **Fiche de sécurité des produits du module 0**
- [7]: **Fiche technique de l'échangeur E411.**
- [8]: **Manuel du Hysys .Hyprotech.2006.5**
- [9]: **P-WUITHIER /Le pétrole : le raffinage et génie chimique, tomeII, Edition technip, Paris 1972**