



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : **Bedj Mounira**

Bahi Sarah

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Hydrocarbures

OPTION : Génie Gazier

Thème

**Etude de l'impact de la contamination du réfrigérant
MCR sur la production du GNL (Complexe GL2/Z).**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
MERIGUI Khaled	MAA	Président
GHALEM Khaled	MAA	Examineur
ABDELMOUIZ Ahmed	MCB	Rapporteur

Promotion : JUIN 2022

عنوان المذكرة: دراسة تأثير تلوث مبرد MCR على إنتاج الغاز الطبيعي المسال (GL2 / Z المركب)

اللقب : بيج باهي ; الإسم : منيرة سارة ; المؤطر: عبد المعز أحمد
ملخص :

يعرض هذا العمل دراسة مشكلة اضطراب المبردات في MCR وتأثيرها على إنتاج الغاز الطبيعي المسال (LNG) . يتعرض مجمع GL2 / Z لمشكلة اضطرابات كبيرة في تكوين مادة التبريد (MCR) ولقد بحثنا عن الأسباب المحتملة التي يمكن أن تسبب اضطرابًا في تركيبة MCR ، والتي ترجع بشكل أساسي إلى خلل في عمود إزالة التغيير وتلوث حلقة البروبان. لقد قمنا بمحاكاة حلقة MCR لتوضيح تأثير هذه المشكلة على درجة حرارة LNG عند مخرج المبادل الرئيسي. الطاقة المستهلكة بواسطة ضواغط MCR1 و MCR2 ودرجة حرارة الشفط لضغط MCR1 ومعامل أداء (COP) لحلقة MCR. أخيرًا اقترحنا توصيات لتحقيق الاستقرار في تكوين MCR.

الكلمات المفتاحية: مجمع Z/GL2 ، غاز طبيعي مسال (LNG) ، عملية APCI ، MCR مبرد متعدد المكونات

Memory title: Study of the impact of the contamination of the MCR refrigerant on the production of LNG (Complex GL2/Z)

Name: Bedj Bahi ; First name: Mounira Sarah ; Diected by: Abd Elmouiz Ahmed

Abstract:

This work presents the study of the MCR refrigerant disturbance problem and its impact on the production of Liquefied Natural Gas (LNG) production. The GL2/Z complex is exposed to the problem of significant disturbances in the composition of the refrigerant (MCR) .We looked for the probable causes that can cause the disturbance of the MCR composition, which is mainly due to the malfunction of the de-éthanization column and contamination of the propane loop. We have simulated the MCR loop to illustrate the impact of this problem on the LNG temperature at the outlet of the main exchanger. The power consumed by the MCRI and MCRII compressors, the suction temperature of the MCRI compressor and the coefficient of performance of the MCR loop (COP). Finally, we proposed recommandations to stabilize the MCR composition.

Keywords:GL2Z Complex, Liquefied Natural Gas (LNG), APCI Process, MCR (Multi component Refrigerant).

Titre du mémoire: Etude de l'impact de la contamination du fluide frigorigène MCR sur la production de GNL (Complexe GL2/Z)

Nom : Bedj Bahi ; Prénom : Mounira Sarah ; Encadreue : Abd Elmouiz Ahmed

Ce travail présente l'étude du problème de perturbation du réfrigérant MCR et son impact sur la production du Gaz naturel liquéfié (GNL). Le complexe GL2/Z est exposé au problème de perturbations importantes de la composition du réfrigérant (MCR) ,Nous avons cherché les causes probables qui peuvent engendrer la perturbation de la composition du MCR, qui est due principalement aux le disfonctionnement de la colonne de dé-éthanisation et Contamination de la boucle propane. nous avons simulé la boucle MCR pour illustrer l'impact de ce problème sur la température du GNL à la sortie de l'échangeur principal. La puissance consommée par les compresseurs MCRI et MCRII, température d'aspiration du compresseur MCRI et le coefficient de performance de la boucle MCR(COP). En dernier, nous avons proposé des recommandations pour stabiliser la composition du MCR.

Mots Clés : Complexe GL2Z, Gaz naturel liquéfié (GNL), Procédé APCI, MCR (Multi component Réfrigérant).

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicases

Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père et ma mère. Je leur dis merci papa du fond de mon coeur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce tu m'as fait et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur.

Je te dis merci et mille fois merci maman pour ta patience, ton courage et ton sacrifice pour moi.

Avec toute ma fidélité et tout mon amour pour vous, mes parents, je ne pourrai jamais égaler votre mérite.

A mon chère soeur Rihab et mes chers frères Youcef , ABD El Hadi , Mohamed El Habib et Younes .

Et à mon binôme qui a travaillé tout le temps pour finaliser ce travail.

A la fin je dédie tout ce qu'ils ont m'aider dans mon parcours scolaire de proche ou de loin.

Mounira

Dédicases

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la
flamme*

*de mon cœur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir
réussir, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien
moral et Source de joie et de bonheur, à toi mon mari.*

*A ma sœur et mes frères, ma famille mes proches et à ceux
qui*

me donnent de l'amour et de la vivacité.

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui
étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont soutenu dans les
moments les plus difficiles de ma vie, a mes aimables amis*

Sarah

Remerciements

Toute notre parfaite gratitude, grâce et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre encadreur Dr Abdelmouiz.Ahmed à son aide précieuse, ses conseils, son sollicitude, son patience et son période apportés au cours de l'élaboration de ce projet de fin d'étude.

Nous remercions également les membres de jury qui nous faisons L'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Ainsi que a l'ensemble de nos enseignants de département de génie des procédés et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicases

Remerciements

SOMMAIR

Introduction générale.....1

Chapitre I: Liquéfaction et système MCR

I.1.gaz naturel.....	3
I.1.1. Composition du gaz naturel.....	3
I.1.2.Gaz naturel en Algérie.....	3
I.1.3.Liquéfaction de gaz naturel.....	4
I.2. Introduction de cycle de refroidissement.....	6
I.2.1.Coefficient de performance.....	7
I.3.Technologie et différent procédé de liquéfaction.....	8
I.3.1. Procédé d'Optimisation à Cascade Phillips.....	8
I.3.2. Procédé Black & Veatch PRICO.....	9
I.3.3. Procédé APCI avec un Réfrigérant Mixte et du Propane Pré réfrigérant (MCR).....	10
I.3.4. Procédé AP-X	12
I.3.5. Procédé à Cascade du Fluide Mixte StatOil/Linde (MFCP).....	12
I.3.6. Procédé Axens Liquefin TM	13
I.3.7.Procédé de réfrigérant mixte double (DMR).....	14
I.4. Description du procédé actuel.....	15
I.4.1. Le cycle propane.....	16
I.4.2. Le cycle MCR.....	16
I.4.3. Description générale de boucle MCR.....	17

Chapitre II : Problématique et analyses

II.1. Dysfonctionnement de réfrigération de la boucle MCR.....	23
II.1.1. Contamination du référérent Propane, influençant la boucle MCR.....	23
II.1.2. contamination du multi-réfrigérant (boucle MCR).....	25

II.2. Colonne de dééthanisation.....	26
II.2.1. principe de la distillation.....	26
II.2.2. Ballon tamponX51-F.....	28
II.2.3. DééthaniseurX51-E.....	28
II.2.4. Condenseur de tête X51-C.....	28
II.2.5. Ballon de refluxX52-F.....	28
II.2.6. Rebouilleur X52-C.....	29
II.3. Suivi du fonctionnement du dééthaniseur.....	29
II.3.1. Variation de la pression dans le ballon tampon.....	30
II.3.2. Variation de la température dans le dééthaniseur.....	30
II.3.3. Variation du débit dans le ballon de reflux.....	31
II.3.4. Interprétation.....	31
II.4. Impact de la composition du MCR.....	32

Chapitre III/ Simulation et résultats

III.1. Simulation.....	35
III.1.1. Le simulateur HYSYS.....	35
III.2. Simulation du dysfonctionnement de la boucle MCR.....	37
III.2.1. Résultats et interprétation.....	38
III.2.1.a. Variation de la température du GNL sorti de l'échangeur principal.....	38
III.2.1.b. Variation des puissances consommées par les deux compresseurs.....	39
III.2.1.c. Variation de la température du MCR sorti de l'échangeur principal (X16-C)....	40
III.2.1.d. Variation du coefficient de performance (COP).....	40
III.3. Effet des variations de la composition du MCR dans le cycle.....	41
Conclusion générale.....	45

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Références et bibliographiques

Liste des figures

Figure (I.1)-Schéma de procédé d'un train de liquéfaction.	5
Figure (I.2)-Le cycle de compression de vapeur avec le diagramme pression-enthalpie correspondant.	6
Figure (I.3)-Courbes de refroidissement des fluides frigorigènes purs et mixtes par rapport au gaz naturel	8
Figure (I.4)-Procédé d'Optimisation à Cascade (Typique)	9
Figure (I.5)-Procédé Black & Veatch PRICO	9
Figure (I.6)-Procédé APCI(MCR)	10
Figure (I.7)-Procédé AP-X	12
Figure (I.8)- Procédé à Cascade du Fluide Mixte Stat Oil/Linde (MFCP)	13
Figure (I.9)-Procédé Axens Liquefin TM	14
Figure (I.10)-Procédé GNL Air Products AP-DMR TM	15
Figure (I.11)-schéma de la boucle MCR	19
Figure (II.1)- Contamination de la boucle propane	23
Figure (II.2)- variation de la température de MCR sorti des chillers	24
Figure (II.3)- Contamination de la boucle MCR par le propane	25
Figure (II.4) - Section de Dééthanisation	27
Figure (II.5)- Variation de la pression dans le ballon tampon X51-F	30
Figure (II.6)- Variation de la température du produit de tête de dééthaniseur X51-E	30
Figure (II.7)- Variation de la température du produit de fond du dééthaniseur X51-E	31
Figure (II.8)- Variation du débit du ballon de reflux X52-F	31
Figure (II.9)-Variation de la température du GNL sorti de l'échangeur principalX16-C	32

Figure (II.10)-Variation de la température d'aspiration du compresseur MCR I (X02-J)	33
Figure(III.1)-Température du GNL sorti de l'échangeur principal X16-C	38
Figure(III.2)-Puissance consommée par le compresseur MCRI	39
Figure (III.3)-Puissance consommée par le compresseur MCRII	39
Figure(III.4)-Température de MCR sorti du X16-C en fonction de sa composition	40
Figure (III.5)-Variation du COP en fonction de la composition du MCR	41
Figure (III.6) - Température de MCR sorti du X16-C en fonction de sa composition	42
Figure (III.7)-Température de sortie du GNL de l'échangeur principal	42
Figure(III.8)- Puissance du compresseur MCR I	43
Figure(III.9)-Puissance du compresseur MCR II	43
Figure(III.10)-Température d'aspiration du compresseur MCR I	44
Figure (III.11)-Variation du COP en fonction de la composition du MCR	44

Liste des tableau

Tableau (I-1)- différentes sections de l'échangeur principal	20
Tableau (I-2)- Les différents équipements intervenants dans la boucle MCR	20
Tableau (II-1)- Composition moyenne de la boucle Propane réfrigérant	24
Tableau (II-2) - Analyse de la composition du MCR	25
Tableau (II-3)- Conditions de fonctionnement Design des équipements	29
Tableau (III-1) - Les différentes données Design	36
Tableau (III-2)- Composition du gaz naturel traité entrant dans l'échangeur principal	36
Tableau (III-3a)- Paramètres de fonctionnement des équipements	36
Tableau (III-4b)- Paramètres de fonctionnement des équipements	37
Tableau (III-5) – Erreur relative entre résultats réels et de design	37
Tableau (III-6)- Différentes compositions de MCR, réelles et de Design	38
Tableau (III-7) - Valeurs du coefficient de performance (COP)	41
Tableau (III-8)- Appoints de C2 et C3 dans MCR	42

Liste des abréviations

MCR : Multi Composant Réfrigérant

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

GPL : gaz pétrole liquéfié

APCI: Air Product Chemical Engineering

EDM : Eau De Mer

MEA: Mono-Ethanol-Amine

JT: Joule-thomson

CWHE: Coil Wound Heat Exchanger (échangeur de chaleur a spiral serpentin)

PFHE : Plates Fin Heat Exchanger (échangeur thermique à ailettes en plaques)

MCHE: Micro Channel Heat Exchangers - Product Range.

MFCP: Procédé Cascade Fluid Mixt.

SWHE: Spiral Wound Heat Exchangers.

DMR: Réfrigérant Mixt Double

DCS: Disturbed Control System

COP: coefficient of performance

PFD: Process Flow Diagram

WMR: warm mixed réfrigérant



Introduction générale

Le gaz naturel est la source d'énergie fossile qui a connu la plus forte progression depuis les années 70. En effet, elle représente le cinquième de la consommation énergétique mondiale.

En raison de ses avantages économiques et écologiques, le gaz naturel devient chaque jour plus attractif pour beaucoup de pays. Les propriétés de ce produit, comme par exemple le faible intervalle de combustion le caractérisant, en font l'une des sources les plus utilisées fiables connues à ce jour actuellement, Il représente la troisième place en production de l'énergie primaire dans le monde. [1]

Le gaz est rendu liquide par refroidissement à une température de -162°C , son volume est alors réduit de 600 fois, il est ensuite transporté par des navires citernes spéciaux dits méthaniers pour être acheminé aux terminaux de regazéification, exposé à la température ambiante et ramené à l'état gazeux par un processus de vaporisation, c'est sous cette forme qu'il est finalement distribué dans le réseau international.

La capacité mondiale de liquéfaction du gaz naturel a atteint les 290 millions de tonnes à la fin de l'année de 2013. En Algérie la capacité nominale de liquéfaction était de 24.3 millions de tonnes par an [2].

Le but de cette étude est d'étudier la problématique relative à la contamination du réfrigérant MCR et son impact sur la production du GNL au niveau de complexe GL2/Z

Après avoir effectué des recherches pour élucider les causes probables pouvant engendrer la perturbation de la composition du MCR et analyser l'impact de cette perturbation sur plusieurs paramètres, nous avons simulé la boucle MCR au moyen du simulateur Aspen Hysys.

Finalement des solutions ont été proposées pour stabiliser la composition du multi réfrigérant MCR L'étude est répartie selon le plan suivant :

- ❖ Recherche des causes probables pouvant engendrer la perturbation de la composition du MCR.
- ❖ Etude des effets de cette perturbation sur toute la boucle.
- ❖ Simulation de la boucle MCR et l'étude de l'impact de la variation de sa composition sur les différents paramètres du procédé et son rendement.
- ❖ Proposition des solutions pour stabiliser la composition.
- ❖ Conclusion et recommandations.



Chapitre I:

Liquéfaction et système

MCR

La distribution de gaz naturel sous forme gazeuse par gazoducs n'est parfois pas possible (que ce soit pour des raisons politiques, géographiques ou économiques) Le gaz naturel doit être liquéfié et son volume réduit d'un facteur 600:1 pour être converti en gaz naturel liquéfié (GNL). Les sociétés qui commercialisent le gaz naturel utilisent généralement des usines de liquéfaction de GN pour liquéfier et transporter le gaz naturel. Le gaz naturel est un carburant zéro déchet et plus efficace que le charbon, par exemple. L'obtention de gaz naturel grâce au GNL pour les pays qui ne disposent pas de leurs propres sources de gaz naturel peut améliorer la qualité de l'air lors de la combustion de gaz naturel par rapport à des sources d'énergie moins vertes.

I.1) Le gaz naturel :

Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures légers comprenant du méthane, de l'éthane, du propane, des isomères du butane et des isomères du pentane. D'autres composés tels que le CO₂, l'hélium, le sulfure d'hydrogène et l'azote peuvent également être trouvés. La composition du gaz naturel n'est jamais la même. Cependant, on peut dire que son composant principal est le méthane .

Le gaz naturel est considéré comme un combustible propre. Sous sa forme commercialisable, il ne contient presque pas de soufre et ne produit pratiquement aucun dioxyde de soufre (SO₂). Ses émissions d'oxydes d'azote (NO₂) sont plus faibles que celles du pétrole ou du charbon et celles de gaz carbonique (CO₂) inférieures à celles des autres combustibles fossiles (selon Euro gas de 40 à 50% de moins que le charbon et de 25 à 30% de moins que le pétrole) [3]

I.1.1) Composition du gaz naturel:

Le gaz naturel est le combustible fossile le moins polluant, il est composé principalement de méthane (95 %) et d'éthane (2 %) avec un peu d'inerte : CO₂ (< 2 %) et N₂ (< 3%). La forme gazeuse du gaz naturel, lors de la combustion, libère une importante quantité de chaleur. La teneur maximale en inerte est réglementée mais pas la composition en hydrocarbure, c'est le pouvoir calorifique qui est réglementé [3]

I.1.2) Gaz naturel en Algérie :

Plus qu'un pays producteur de pétrole, l'Algérie est avant tout un pays exportateur de gaz. Avec des réserves estimées à plus de 3 trillions de m³, l'économie algérienne s'appuie sur un portefeuille énergétique où le gaz naturel prédomine, 61% des réserves récupérables contre 15% pour le pétrole brut. Il existe deux types de gaz .

Le gaz humide, riche en fractions condensables, et le gaz dit sec essentiellement composé de Méthane. Pour le gaz sec, le traitement consiste simplement à éliminer les impuretés avant de

le commercialiser. Le gaz humide, découvert en même temps qu'un gisement de pétrole, est qualifié de gaz associé. Mais ce gaz humide peut aussi se trouver uniquement dans des gisements de gaz. Il est alors appelé gaz humide non associé.

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et les liquides de gaz naturel (GNL) sont très recherchés par les raffineurs et sont principalement utilisés comme matière première dans la pétrochimie. HASSI R'mel, avec une teneur en hydrocarbures liquides d'environ 220 grammes par mètre cube de gaz[4].

I.1.3) Liquéfaction de gaz naturel:

Le procédé de liquéfaction du gaz naturel consiste à le refroidir et le liquéfier afin de produire du gaz naturel liquéfié. L'opération de liquéfaction n'est possible que si le gaz est refroidi à une température inférieure à celle de son point de rosée. Cette température est en fonction de la pression. Pour un corps pur à pression fixe, la température du point de rosée est égale à la température du point de bulle, et il est possible de liquéfier le gaz en assurant une réfrigération suffisante pour atteindre sa température de rosée. Pour un mélange, tel que le gaz naturel, la condensation a lieu sur un intervalle de température compris entre le point de rosé et le point de bulle; il faut donc plusieurs réfrigérants pour atteindre cet objectif. En règle générale, un réfrigérant unique permet de réaliser le refroidissement dans un intervalle de -60 à -90°C. Etant donné qu'une unité de liquéfaction nécessite un niveau de réfrigération d'au moins -162°C (température à laquelle le méthane se liquéfie sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique), deux boucles frigorifiques fermées sont utilisées, une de propane et l'autre d'un réfrigérant à composants mixtes (MCR).

Ces dernières sont été conçues sur la base du cycle frigorifique de Carnot, dans ce dernier, la réfrigération est assurée par une compression, un refroidissement, une détente et une évaporation.

La figure (I.1) montre un schéma synoptique d'un train de procédé dans le complexe GL2Z

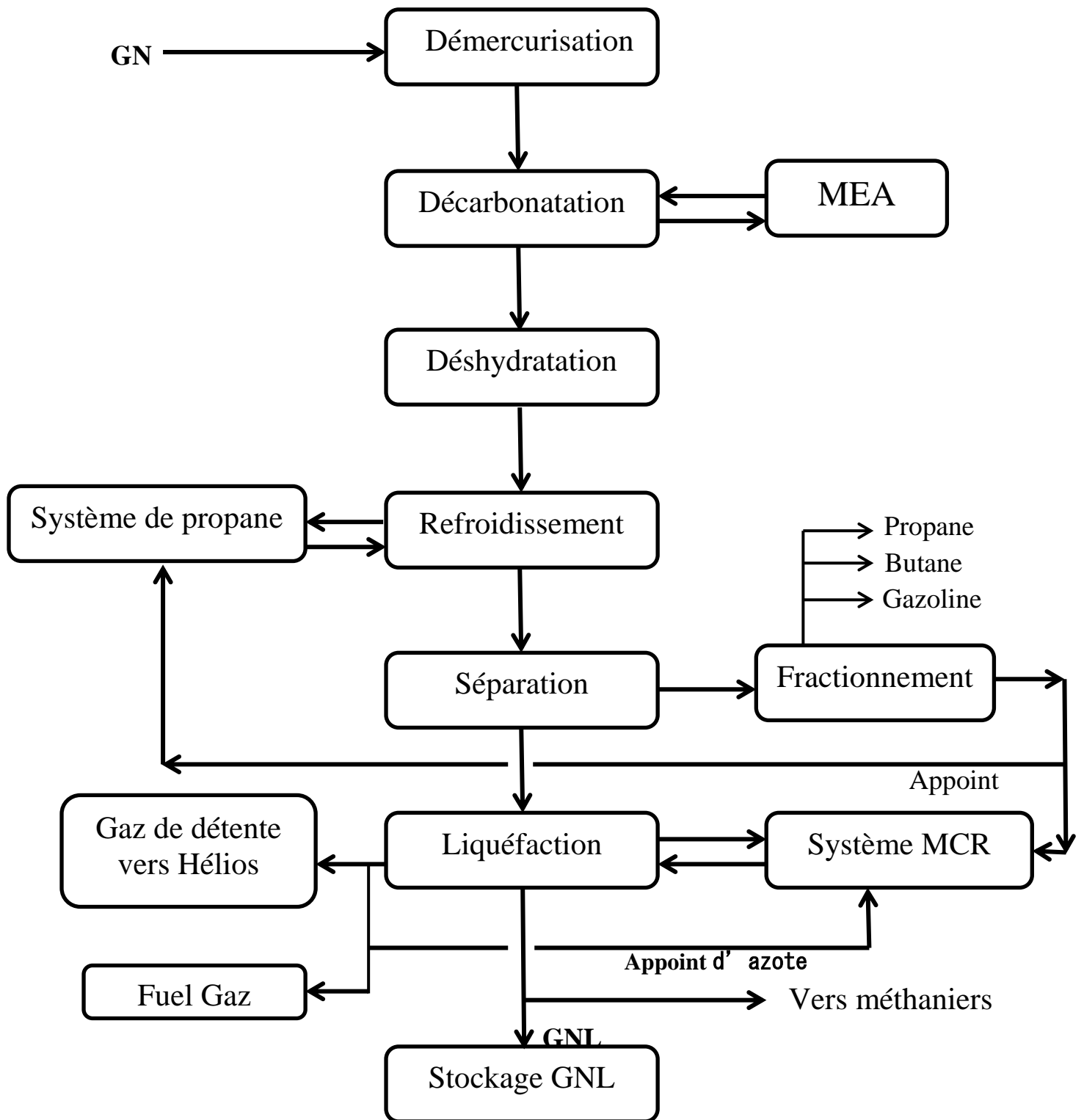


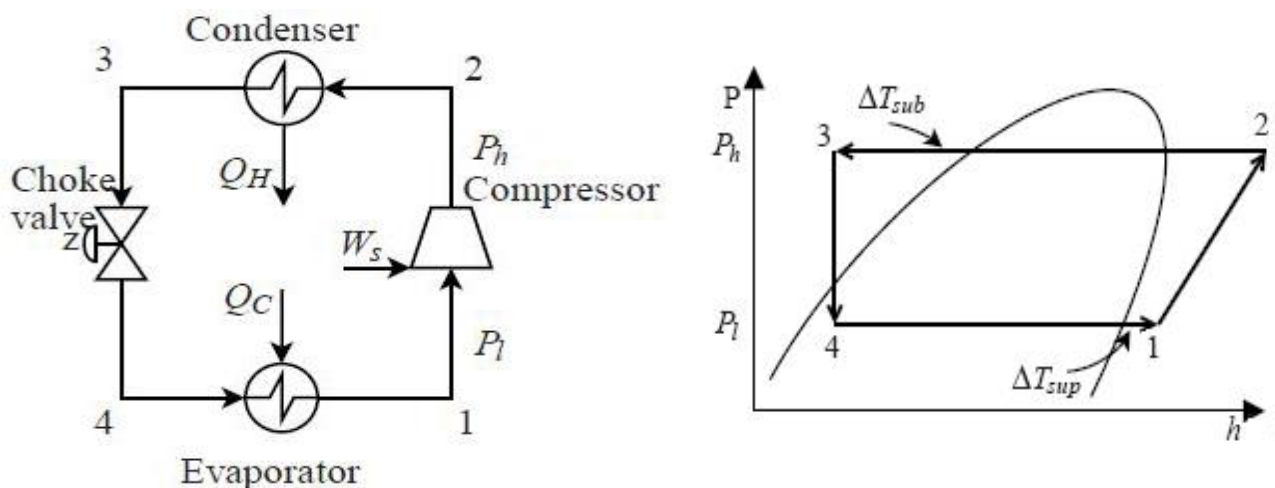
Figure (I.1). Schéma de procédé d'un train de liquéfaction.

I.2) Introduction de cycle de refroidissement :

Les réfrigérateurs et climatiseurs domestiques conventionnels transfèrent la chaleur d'une zone à basse température vers une zone à température plus élevée. Le processus le plus courant pour ces applications familières est le cycle de compression de vapeur. Des variantes du même processus sont utilisées dans l'industrie afin de refroidir les flux de processus à une température inférieure à celle du refroidissement facilement disponibles, par exemple, l'eau de mer.

Le cycle de compression de vapeur est assez simple et se compose de seulement quatre composants : compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur. Un diagramme de processus simple et le correspondant.

Les diagrammes pression-enthalpie sont illustrés à la figures 2. Le cycle a quatre états thermodynamiques qui sont indiqués dans les figures et sont expliqués ci-dessous. [5]



Figure(I.2). Le cycle de compression de vapeur avec le diagramme pression-enthalpie correspondant.

Le fluide, ou réfrigérant, est évaporé à basse pression (P_l) à l'étape 4- 1 par échange de chaleur avec la source froide (c'est-à-dire le système à refroidir). Comme indiqué dans le diagramme pression-enthalpie, la vapeur peut être surchauffée afin de s'assurer qu'aucun liquide n'est alimenté. le compresseur suivant. Le degré de surchauffe, T_{sup} , est la différence de température entre la température à la sortie de l'évaporateur et le point d'ébullition du fluide frigorigène. à la pression donnée. La vapeur est comprimée à une pression plus élevée (P_h) à l'étape 1 - 2 et refroidi, condensé et sous-refroidi par échange de chaleur avec le dissipateur chaud (par exemple. air ambiant ou eau de refroidissement) à l'étape 2 - 3.

I.2.1) Coefficient de performance :

Le degré de sous-refroidissement, (ΔT_{sub}), est défini de la même manière que le degré de surchauffe, à savoir la différence entre la température du liquide et la température de saturation (point d'ébullition). Le liquide est détendu à travers une vanne d'étranglement vers la basse pression (P_1) afin de fournir un mélange biphasique à basse température qui est envoyé à l'évaporateur.

L'efficacité d'un cycle de réfrigération est mesurée par un coefficient de performance (COP) défini dans l'équation 2.1.

$$COP = \frac{|Q_C|}{W_s} \quad (2.1)$$

Q_C : représente la chaleur retirée du système par le réfrigérant ($h_1 - h_4$),

W_s : représente le travail du compresseur ($h_2 - h_1$).

Le **COP** pour un cycle de réfrigération est limité par l'efficacité de Carnot comme indiqué dans les équations 2.2, 2.3 et 2.4.

Pour un procédé Carnot réversible :

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C} \quad (2.2)$$

Aussi:

$$W_s = Q_H - Q_C = \left(\frac{T_H}{T_C} - 1 \right) Q_C \quad (2.3)$$

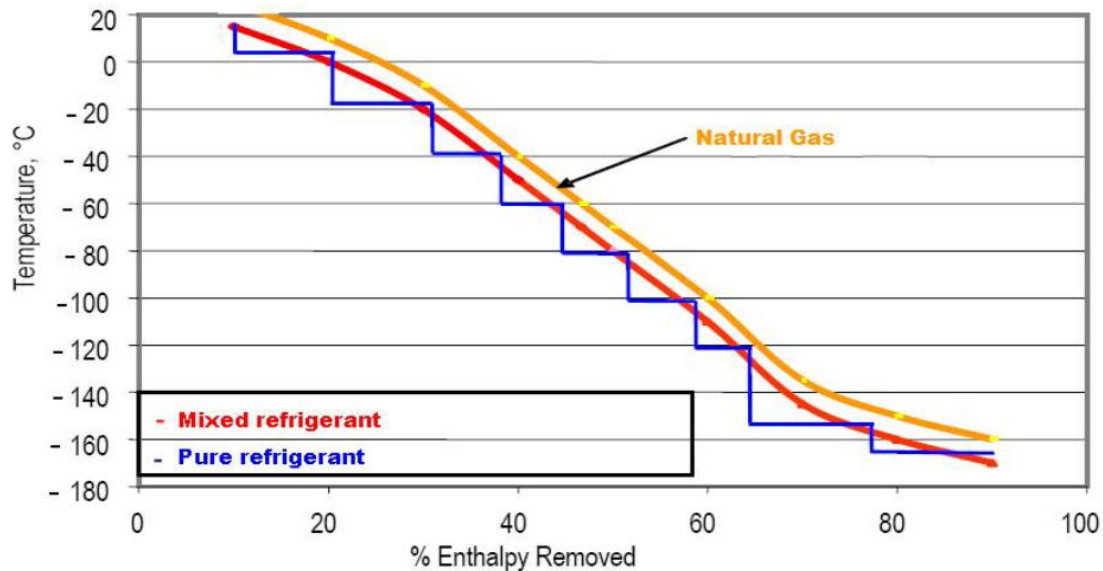
Remplacé dans l'équation 2.1:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (2.4)$$

Ainsi, un processus de réfrigération est favorisé par une petite différence entre T_H et T_C

-Les procédés de GNL peuvent être exploités avec des réfrigérants purs ou mixtes, bien que les réfrigérants mixtes aient l'avantage de fournir une courbe de refroidissement beaucoup plus ajustée dans l'échange de chaleur avec le gaz naturel. Ceci est illustré à la figure(I.3). Un réfrigérant pur donne une grande différence de température dans l'extrémité chaude de l'échangeur de chaleur et donc un faible COP. Il est nécessaire d'utiliser plusieurs cascades de cycles de réfrigérants purs pour obtenir des résultats comparables à ceux des réfrigérants mixtes.

Le procédé de réfrigérant mixte pré-refroidi au propane (C3MR) implique un seul cycle de réfrigérant mixte. Cependant, comme son nom l'indique, le processus consiste également en un cycle de pré-refroidissement au propane. Ce réfrigérant à composant unique facilite le devoir du réfrigérant mixte en refroidissant le naturel.



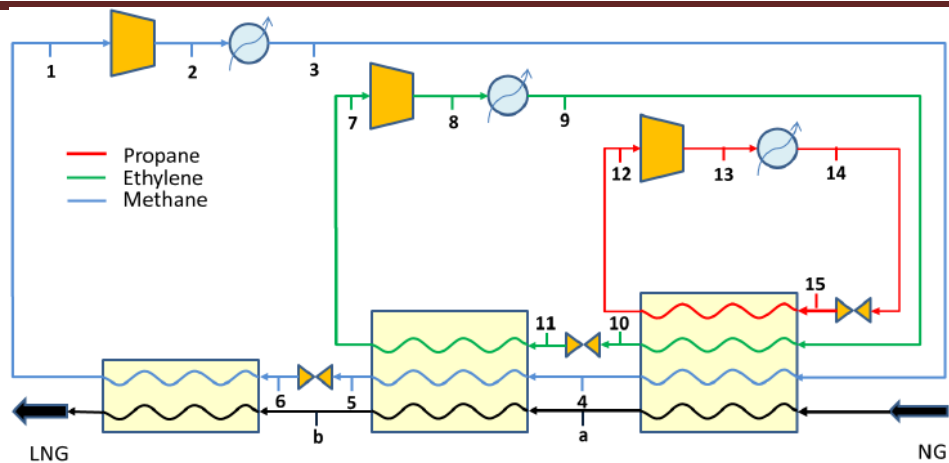
Figure(I.3). Courbes de refroidissement des fluides frigorigènes purs et mixtes par rapport au gaz naturel

I.3) Technologie et différent procédé de liquéfaction:

La section de réfrigération et de liquéfaction est l'élément clé de l'usine GNL. Beaucoup de procédés, sous licence, sont disponibles et à différents degrés d'application et d'expérience. D'autres sont proposés ou en cours de développement. Les principaux procédés de liquéfaction disponibles sont :

I.3.1) Procédé d'Optimisation à Cascade Phillips :

Ce procédé, une version modifiée du procédé utilisé dans une usine en Alaska pendant les 1960s, était utilisé pour l'usine Atlantic LNG à Trinidad. Les capacités du Train jusqu'à 3.3 millions tonnes/an ont été construites avec des trains plus grands en développement. Ce procédé est illustré dans la Figure I.4. [6]



Figure(I.4). Procédé d'Optimisation à Cascade (Typique)

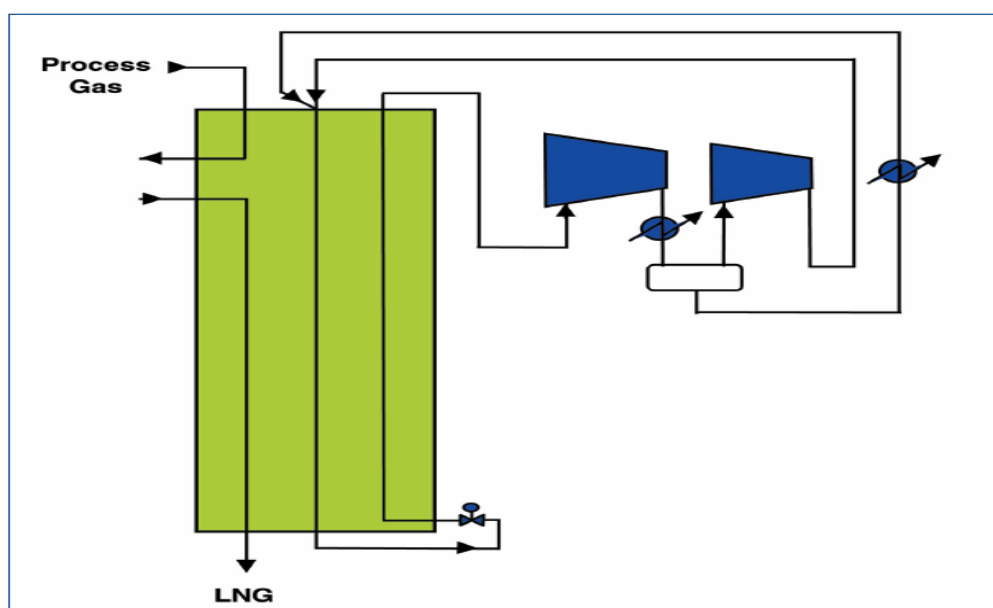
La réfrigération et la liquéfaction du gaz de procédé sont obtenus par un procédé à cascade en utilisant trois composants réfrigérants purs; le propane, l'éthylène et le méthane, chacun à deux ou trois niveaux de pression.

Ceci est effectué dans une série d'aluminium brasé de PFHE (Plates Fin HeatExchanger (échangeur thermique à ailettes en plaques)) disposé dans des boîtes verticales froides. Le Pré-refroidissement pourrait être effectué dans un échangeur thermique à noyau intégré.

Les réfrigérants sont mis en circulation en utilisant les compresseurs centrifuges. Chaque réfrigérant a des trains de compression parallèle. [6]

I.3.2) Procédé Black & Veatch PRICO :

Ceci est un procédé du réfrigérant mixte simple qui a été déjà utilisé sur une autre installation en Algérie. La capacité du Train a été augmentée à 1.3 t/an. Il est illustré dans la Figure (I.5)



Figure(I.5). Procédé Black& Veatch PRICO

Le réfrigérant mixte se compose d'azote, de méthane, éthane, propane et iso-pentane. Le refroidissement et la liquéfaction est effectué à plusieurs niveaux de pression, dans les boîtes froides de PFHE (Plates Fin HeatExchanger (échangeur thermique à ailettes en plaques)). Le réfrigérant est comprimé et fait circuler en utilisant un train à compression simple. Dans l'usine Algérienne étaient utilisés les compresseurs de type axial actionnés par les turbines à vapeur. [6]

I.3.3) Procédé APCI avec un Réfrigérant Mixte et du Propane Pré réfrigérant (MCR) :

Ce procédé représente une part très importante de la capacité de production d'une installation de base GNL dans le monde. Les capacités des trains jusqu'à 4.7 millions tonnes/an ont été construits ou sont en construction. Dans la Figure suivante il est illustré en qualité de partie intégrante du schéma de flux de l'usine GNL.

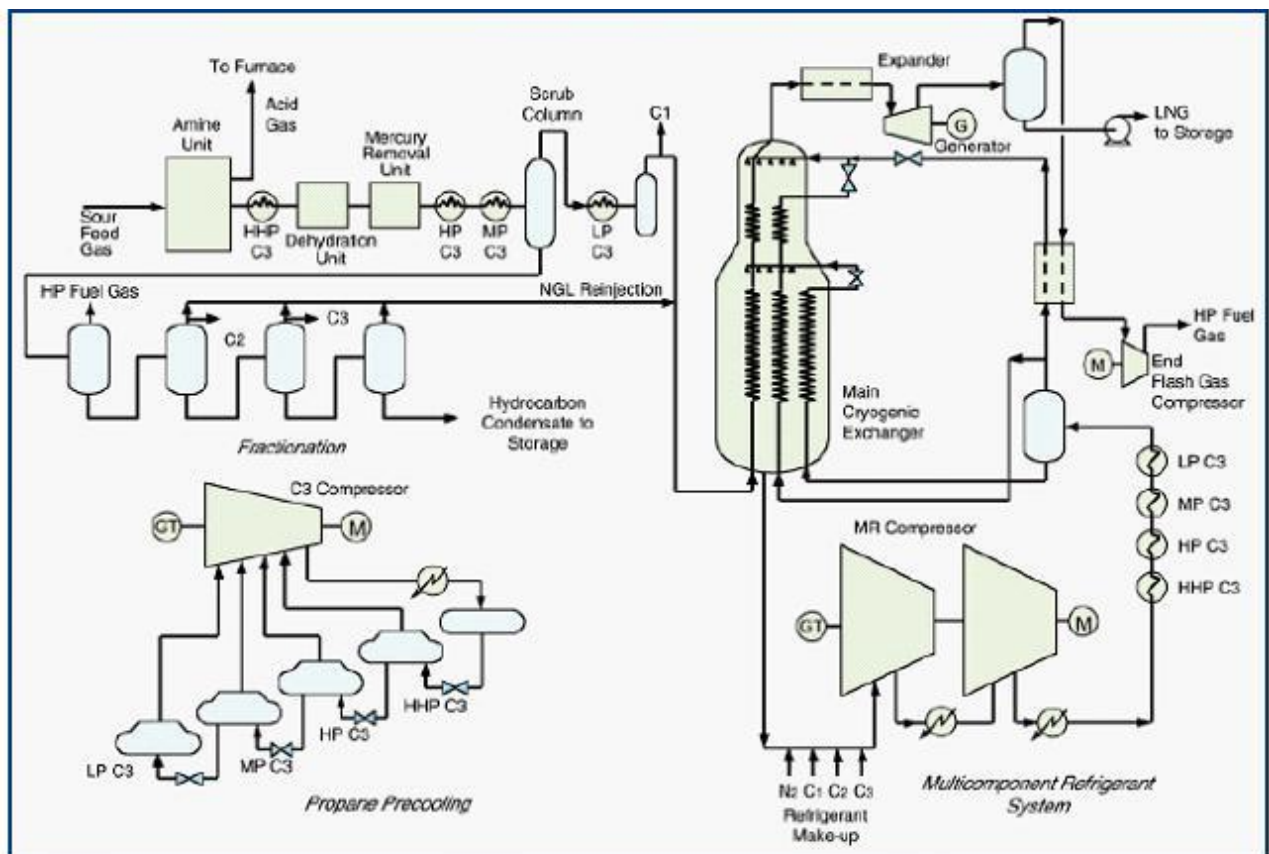


Figure (I.6). Procédé APCI (MCR)

Il y a deux cycles principaux de réfrigérant. Le cycle de pré refroidissement utilise un composant pure, le propane. Le cycle de liquéfaction et sous-refroidissement utilise un réfrigérant mixte (MR) composé d'azote, méthane, éthane et propane. [6]

Le cycle de pré refroidissement utilise le propane et trois ou quatre niveaux de pression et peut refroidir le gaz de procédé jusqu'à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il est aussi utilisé pour refroidir et liquéfier partiellement le MCR. Le refroidissement est achevé dans des échangeurs du type kettle avec le réfrigérant propane qui bouille et s'évapore dans un bassin sur le côté calandre, et avec les écoulements de procédé s'écoulant dans les passages de tube immergés.

Un compresseur centrifuge avec des écoulements latéraux récupère les écoulements C_3 évaporés et comprime la vapeur jusqu'à 15 - 25 bar qu'elle faut condenser contre l'eau ou l'air et recycler vers les kettles au propane.

Dans le cycle MCR, le réfrigérant partiellement liquéfié est divisé en écoulements de vapeur et en écoulements liquides qui sont utilisés pour liquéfier et sous-refroidir l'écoulement de procédé de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ceci est effectué dans un échangeur à spiral breveté, le principal échangeur de chaleur cryogénique (MCHE).

Le MCHE se compose de deux ou trois faisceaux de tubes disposés dans une calandre verticale, avec le gaz de procédé et les réfrigérants qui entrent du fond des tubes et après s'écoulent vers le haut sous pression.

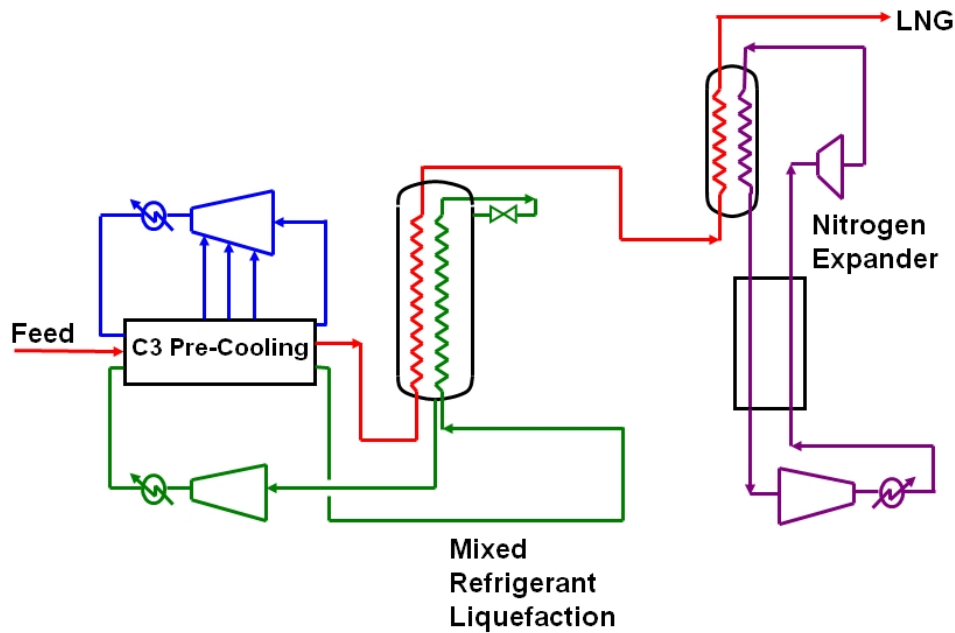
Le gaz de procédé passé à travers tous les faisceaux pour faire sortir le gaz liquéfié au sommet. Le liquide d'écoulement MCR est extrait après le faisceau chaud ou tiède et il est détendu à travers une vanne de type Joule Thomson ou un expander hydraulique sur le côté calandre. Il s'écoule vers le bas et s'évapore, en fournissant un bulbe de refroidissement pour les faisceaux inférieurs. La vapeur de l'écoulement MCR passe vers le sommet (faisceau froid) et il est liquéfié et sous-refroidi, et il est séparé à travers la vanne JT dans le côté calandre au-dessus du faisceau froid. Il s'écoule en bas pour fournir le service de refroidissement pour le faisceau du sommet et, après avoir mélange avec le liquide MCR, une partie de la puissance pour les faisceaux inférieurs.

L'écoulement total du MCR vaporisé provenant du fond du MCHE est récupéré et comprimé par le compresseur du MCR de 45 à 48 bar. Il est refroidi et partiellement liquéfié d'abord par l'eau ou l'air et après par le réfrigérant propane, et recyclé vers le MCHE[6]

Ce dernier est utilisé pour la liquéfaction du gaz naturel dans le complexe GL2/Z

I.3.4) Procédé AP-X :

Le cycle du procédé AP-XTM est illustré ci-dessous dans la figure (I.4) Comme c'est le cas avec le procédé C₃-MR, le propane est utilisé pour fournir un refroidissement à une température d'environ -30 °C. La charge est ensuite refroidie et liquéfiée par un réfrigérant mixte, sortant du MCHE (Micro Channel Heat Exchangers - Product Range) à une température d'environ -120 °C. Le sous-refroidissement final du GNL est effectué à l'aide d'azote gazeux froid provenant du détendeur d'azote. La figure (I.7) montre la disposition des équipements pour les sections de liquéfaction et de sous-refroidissement d'un train AP-XTM. Des échangeurs de chaleur bobinés sont utilisés pour liquéfier et sous-refroidir le GNL, tandis que l'économiseur d'azote utilise des échangeurs de chaleur à plaques et ailettes en aluminium brasé.



Figure(I.7). Procédé AP-X

I.3.5) Procédé à Cascade du Fluide Mixte StatOil/Linde (MFCP) :

Dans ce procédé trois réfrigérants mixtes sont utilisés pour fournir le service de refroidissement et liquéfaction. Il s'agit d'un train simple 4 million t/a de l'usine GNL. Le procédé est illustré dans la Figure suivante :

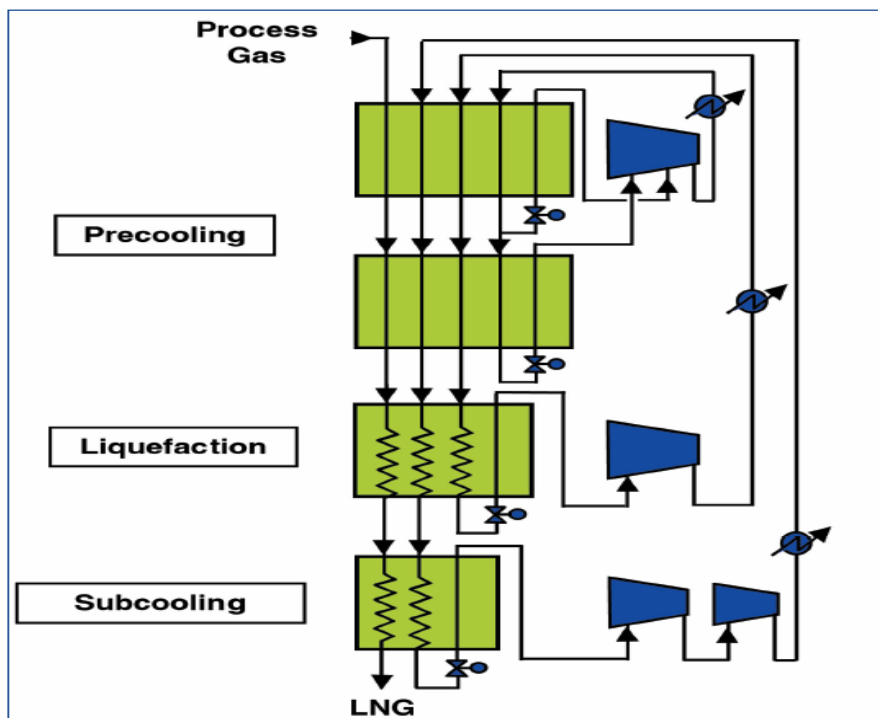


Figure (I.8). Procédé à Cascade du Fluide Mixte StatOil/Linde (MFCP)

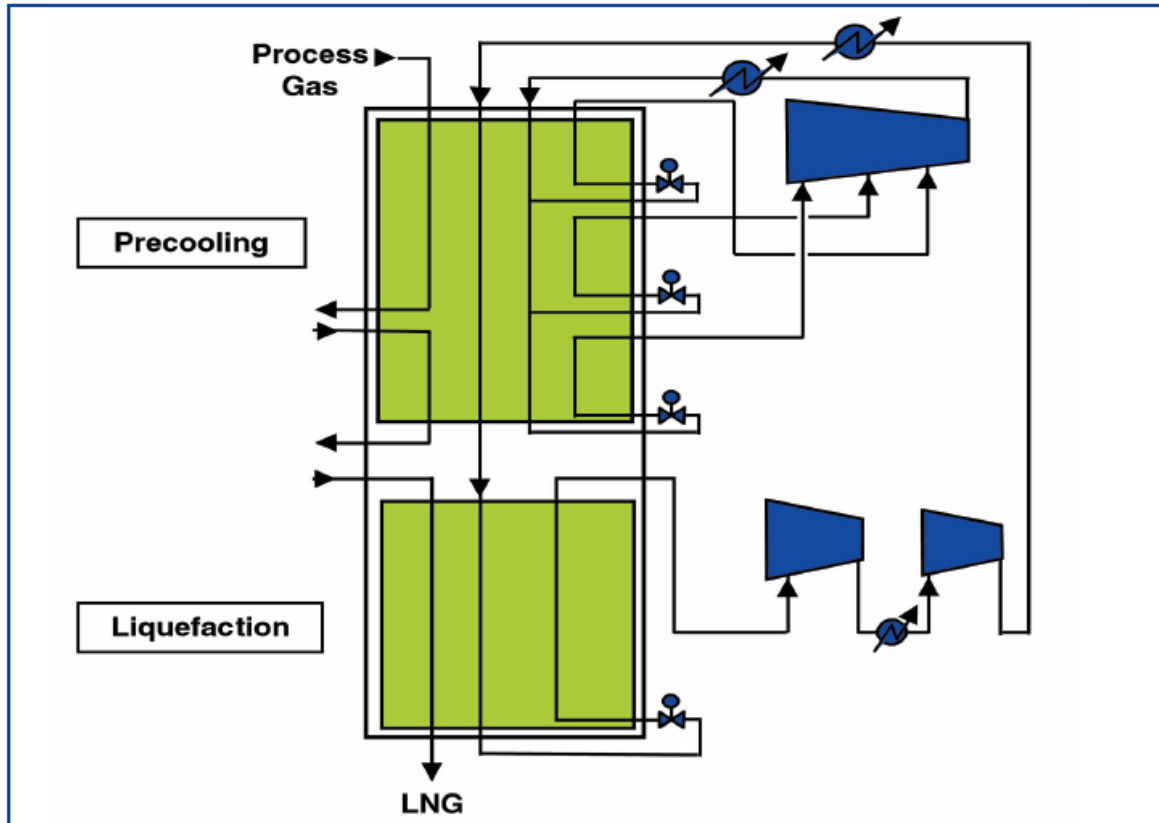
Le pré-refroidissement est effectué dans PFHE par le premier réfrigérant mixte, et la liquéfaction et le sous-refroidissement sont effectués dans des échangeurs bobinés (SWHE) (Spiral Wound Heat Exchangers.) par d'autres deux réfrigérants. Le SWHE est un échangeur breveté produit par Linde. Il peut être aussi utilisé pour le stade de pré-refroidissement. Les réfrigérants se composent de composants sélectionnés provenant du méthane, éthane, propane et azote.

Les trois systèmes de compression du réfrigérant peuvent avoir des moteurs séparés ou intégrés pour aboutir à deux stades de compression. Les turbine à gaz Frame 6 et Frame 7 ont été proposées pour des trains plus grands de GNL (> 4 millions t/a).

Le même SWHE a été installé avec d'autres procédés de liquéfaction, dans des nouveaux projets d'expansion ou comme remplacement des vieux échangeurs cryogéniques. [6]

I.3.6) Procédé Axens LiquefinTM :

Il s'agit d'un procédé de deux réfrigérants mixtes, qui a été proposé pour quelques nouveaux projets de train d'une installation de base GNL jusqu'à 6 millions t/a. Il est illustré dans la Figure suivante :



Figure(I.9). Procédé Axens Liquefin™

Tout ce qui a été refroidi et liquéfié est acheminé dans le PFHE et disposé en boîtes froides. Les réfrigérants se composent de composants comme provenant du méthane, éthane, propane, butane et azote. Le premier réfrigérant mixte est utilisé à trois niveaux de pression différents pour pré refroidir le gaz de procédé et pré refroidir et liquéfier le deuxième réfrigérant mixte. Le deuxième réfrigérant mixte est utilisé pour liquéfier et sous refroidir le gaz de procédé. En utilisant un réfrigérant mixte pour le stade de pré-refroidissement permet d'atteindre une température plus basse (par exemple, -60°C) selon la composition du réfrigérant.

I.3.7) Procédé de réfrigérant mixte double (DMR) :

Il s'agit d'un procédé de réfrigérant mixte double, qui a été appliqué dans le projet Sakhalin Island avec une capacité de 4.8 millions t/a par train.

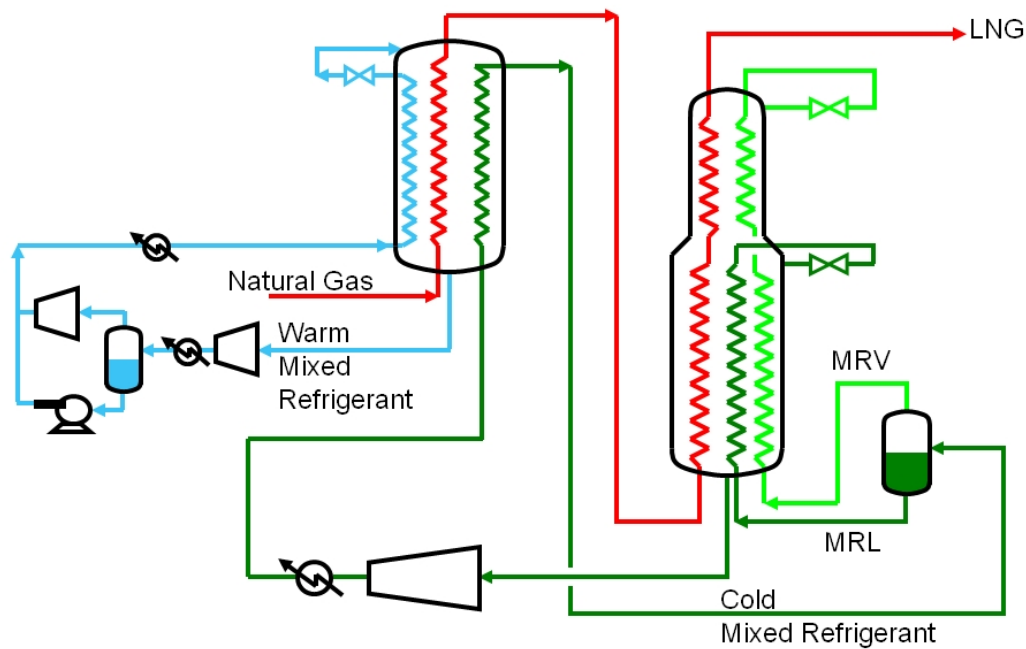


Figure (I.10). Procédé GNL Air Products AP-DMR™

AP-DMR utilise deux étapes de compression WMR(warm mixed refrigerant). La décharge du premier étage est partiellement condensée et la partie liquide est pompée autour de la compression du deuxième étage. Le WMR est totalement condensé après la compression du deuxième étage, refroidi dans le prérefroidisseur CWHE(Coil Wound HeatExchanger (échangeur de chaleur a spiral serpentín) et flashé à un seul niveau de pression pour fournir une réfrigération de prérefroidissement. D'autres configurations de compression et de prérefroidisseur sont possibles, avec divers avantages et inconvénients. Le processus peut donc être configuré et optimisé pour répondre aux exigences du projet.

- **D'autres procédés :**

Les procédés ci-dessus sont utilisés dans les usines actuelles de GNL ou sont appliquées dans le projet GNL en cours. Il y a d'autres procédés développés ou en cours de développement pour les applications de base de charge GNL, qui peuvent ou sont considérés dans les études de faisabilité ou pour des projets futurs.

I.4) Description du procédé actuel :

Le procédé utilisé pour la liquéfaction du gaz naturel au complexe GL2/Z est le procédé APCI (MCR). Ce procédé est basé sur deux cycles :

- un cycle à propane pour le pré refroidissement du GN et du MCR
- un cycle de MCR pour le refroidissement et la liquéfaction du GN.

I.4.1) Le cycle propane :

Le réseau propane assure le refroidissement du circuit de gaz d'alimentation, du circuit du multi- réfrigérant et du système de séparation des fractions légères.

La réfrigération est assurée par l'évaporation du propane. Les vapeurs récupérées sont aspirées par le compresseur à propane. Après la compression, une majeure partie de la chaleur produite est évacuée par l'eau de mer qui continue à refroidir le propane jusqu'à la condensation.

Le réfrigérant condensé est disponible sous trois (03) niveaux de pression (haute, moyenne et basse), où chaque niveau est obtenu après une détente J-T. Le réfrigérant à haute pression pré-refroidi en première étape le gaz naturel jusqu'à une température d'environ -32°C et condense partiellement le MCR.

I.4.2) Le cycle MCR :

La réfrigération nécessaire pour effectuer le refroidissement final et la liquéfaction du gaz d'alimentation est fournie par le réfrigérant à composants multiples, appelé MCR. Celui-ci est un mélange d'azote, de méthane, d'éthane et de propane.

Le MCR est comprimé par deux (02) compresseurs centrifuges en série :

- le premier comprime le MCR de 2,72 bars(a) jusqu'à 13,57 bars(a) où la température passe de -34 à $+75,5^{\circ}\text{C}$.
- Le second comprime le MCR à une pression de 44 bars(a) et atteint la température de $+130^{\circ}\text{C}$.

Après chaque compression, la température est abaissée par l'eau de mer à $+32^{\circ}\text{C}$

pour les deux cas. Le MCR dont la pression est de 44 bars(a) et une température de $+32^{\circ}\text{C}$ venant du compresseur 2^{ème} étage, subit une condensation partielle en traversant les échangeurs au propane (moyenne, et basse pression) dans lesquels la température est diminuée jusqu'à atteindre $-29,4^{\circ}\text{C}$. Le mélange ainsi obtenu dans le ballon séparateur, est distribué en phase vapeur et liquide dans les faisceaux allant vers l'échangeur principal.

Les compositions du gaz et du liquide à la sortie du séparateur sont différentes :

- La phase liquide contenant plus de constituants lourds (C_2 et C_3) appelée charge lourde.

- La phase vapeur contenant plus de constituants légers (N_2 et C_1) appelée charge légère.

Dans un procédé de liquéfaction avec pré-refroidissement au propane, le MCR (Réfrigérant à composant multiples ou mixtes) se compose de quatre constituants :

$$N_2 = 2.2\% \quad ; \quad C_1 = 40.2\% \quad ; \quad C_2 = 54.4\% \quad ; \quad C_3 = 3.2\%$$

L'azote est le composant le plus léger qui permet d'obtenir une ΔT suffisante lors de son passage à travers la vanne Joule Thomson à l'extrémité froide de l'échangeur principal X16-C. Le propane est le composant le plus lourd qui permet d'établir un point de rosé dans la calandre, donc une ΔT à l'extrémité chaude du X16-C. Quant aux composants C_1 et C_2 , qui constituent le plus grand pourcentage dans le MCR, assurant une ΔT entre les fluides côté tube et calandre du X16-C. [7]

➤ Rôle de la boucle MCR :

Le MCR fournit à l'échangeur principal la quantité de froid nécessaire à la liquéfaction du GN et la condensation des vapeurs de tête de la tour de lavage. Le principe utilisé est celui d'une boucle frigorifique classique basée sur le cycle « CARNOT »

I.4.3) Description générale de boucle MCR :

Le courant de MCR sort du fond (calandre) du X16-C sous forme vapeur et pénètre dans le ballon d'aspiration X06-F où il sera acheminé vers le compresseur MCR (1^{er} étage) X02-J. Après compression, le MCR entre dans le refroidisseur intermédiaire X10-C où il sera refroidi par l'EDM. A la sortie, il est dirigé vers le ballon X07-F puis vers le compresseur X03-J (2^{ème} étage). Afin d'éliminer la chaleur de compression, il sera refroidi dans le X11-C (refroidisseur Complémentaire).

Le MCR à haute pression (45 bars) sera refroidi et partiellement condensé au propane à travers les échangeurs (X12-C, X13-C, X14-C, X15-C) Les courants MCR à haute pression et à deux phases sont dirigés vers le ballon de séparation 109-F dans lequel aura lieu la séparation entre les deux phases.

Le courant de vapeur MCR en tête du X09-F se sépare en deux : le petit courant se dirige vers le X17-C (échangeur de rejet) où il sera condensé et sous refroidi à contre-courant par l'intermédiaire des vapeurs de tête des X10-F et X02-E et détendu par une vanne de détente (TV 514), l'autre partie de courant MCR vapeur du X09-F se dirigera vers le faisceau chaud de l'échangeur principale X16-C où elle sera totalement condensée et sous refroidit avant

d'être acheminée vers le faisceau froid pour y être sous refroidit complètement .(voir FigureI.11)

Le MCR sortira sous forme de liquide à l'extrémité froide (en tête) du X16-C.

Sa pression sera alors réduite par la JT froide (PV 567). Après détente, les deux courants se combinent et entrent de nouveau dans la calandre du X16-C .pour être distribués dans la calandre de manière à fournir les frigories au faisceau froid.

Le MCR liquide du fond du X09-F sera acheminé dans le faisceau chaud où il sera sous refroidi lors de son passage à travers le faisceau central, sa pression subit une détente à travers la JT chaude installée à l'extérieur du X16-C .Ce courant dont la pression et par conséquent la température ont été réduites, pénètre à nouveau dans la calandre du X16-C.

Le liquide et les vapeurs formées par la détente, se mélangent avec le liquide et les vapeurs descendants le long de la calandre depuis le faisceau froid .Le liquide se vaporise par écoulement sur les tubes des faisceaux centrale et chaud, assurant ainsi la réfrigération des deux faisceaux tubulaire

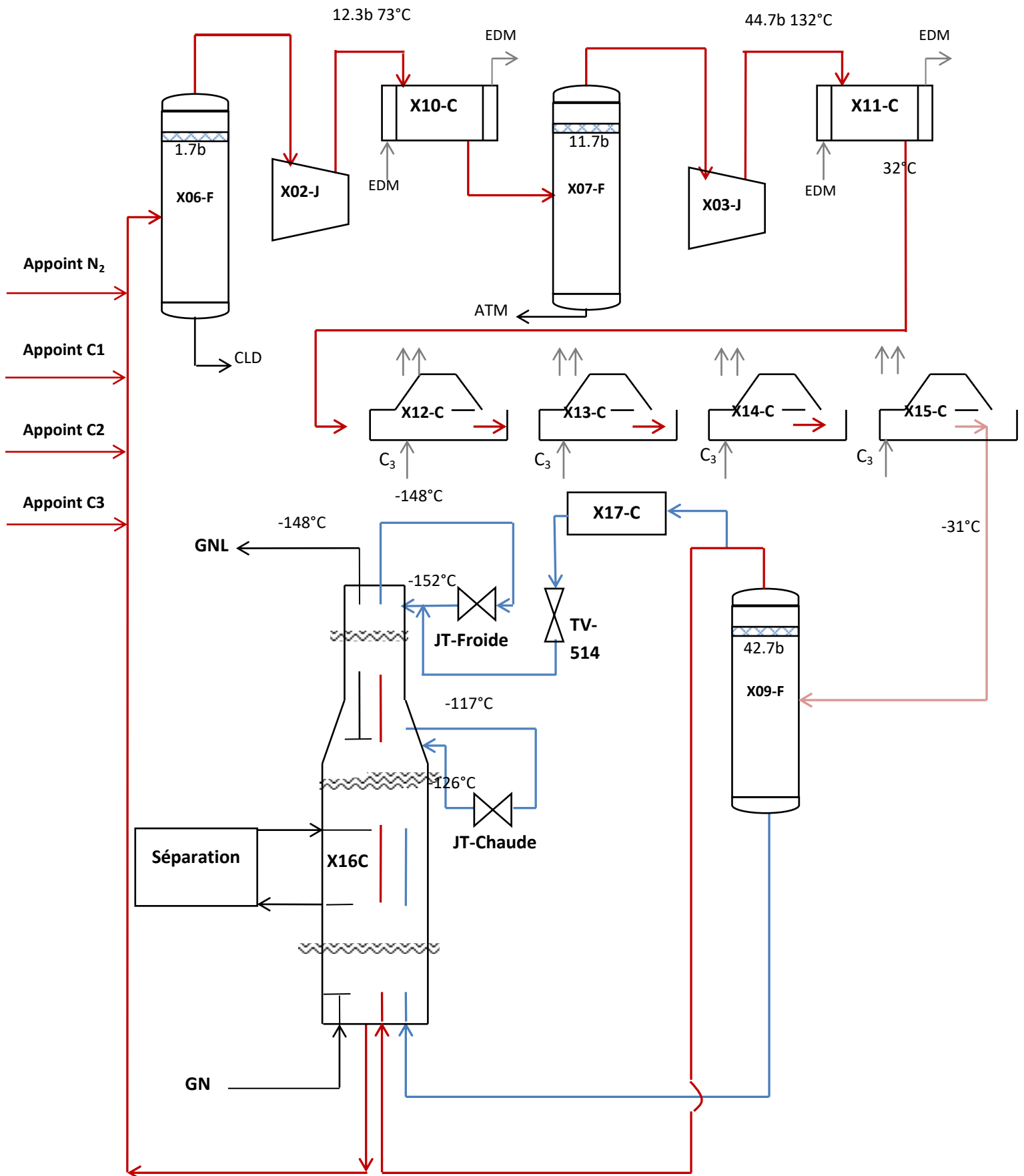


Figure (I.11). schéma de la boucle MCR

Tableau (I.1) - Différentes sections de l'échangeur principal

Section chaude (Echangeur à plaques 4 passes)	Coté tube du MCR liquide Coté tube du MCR vapeur Coté tube du GN à refroidir MCR venant de la section centrale
Section centrale (Echangeur à plaques 4 passes)	Coté tube du MCR liquide sortant de la section chaude. Coté tube du MCR vapeur Coté tube GNT à liquéfier Coté calandre du MCR liquide venant de la JT chaude + MCR vapeur venant de la section froide.
Section froide (Echangeur à plaques 3 passes)	Coté tube MCR vapeur Coté tube GN à refroidir Coté calandre MCR vapeur venant de la JT froide
JT chaude	Vanne Joule-Thomson située dans le faisceau chaud de l'échangeur principal
JT froide	Vanne Joule-Thomson située dans le faisceau froid de l'échangeur principal

Tableau (I.2)- Les différents équipements intervenant dans la boucle MCR

Compresseur MCRI (1er étage)	X02-J
Compresseur MCR II (2ème étage)	X03-J
Echangeur de chaleur à eau de mer	X10-C
	X11-C
Echangeur à propane	X12-C
	X13-C
	X14-C
	X15-C
Echangeur de rejet	X17-C
Ballon séparateur	X06-F
	X07-F
	X09-F
Ballon de reflux de la tour de lavage	X08-F



Chapiter II

PROBLĒMATIQUE ET ANALYSE

PROBLÉMATIQUE ET ANALYSE

Les systèmes de réfrigération jouent un rôle important et essentiel dans la technologie de liquéfaction du gaz naturel. Dans le complexe GL2/Z, deux boucles de réfrigération sont mises en œuvre :

- Un circuit de réfrigération au propane
- Un réfrigérateur multi-composants (MCR).

La boucle de propane est utilisée pour condenser une partie du MCR et pré-refroidir le gaz naturel pour séparer facilement ses composants lourds et éviter un éventuel colmatage après le processus de liquéfaction. Le circuit MCR est utilisé pour la liquéfaction et le sous-refroidissement du gaz naturel, ce fluide frigorigène est composé de quatre composants :

$$C_1 : 40,2\% \quad C_2 : 54,4\% \quad C_3 : 3,2\% \quad N_2 : 2,2\%$$

Cette composition est contrôlée en permanence pour assurer une régularité constante, car l'efficacité du circuit est très sensible aux variations de la composition du fluide frigorigène. Afin d'atteindre le rendement le plus élevé, le réfrigérant doit avoir une composition aussi proche que possible de celle-ci. De conception Le complexe GL2/Z est confronté au problème des perturbations importantes de la composition du fluide frigorigène (MCR), qui conduisent à une diminution du rendement.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous abordons la problématique liée aux perturbations de la boucle MCR au niveau du complexe GL2/Z en suivant les étapes ci-dessous :

- Trouver les causes de ces perturbations et leurs conséquences.
- Simulation du circuit de refroidissement (MCR) avec le simulateur Hysys pour étudier l'impact de ces perturbations sur le circuit de refroidissement
- proposer des solutions pour minimiser ces perturbations.

Cependant, le circuit MCR est théoriquement un circuit supposé fermé et, du fait des différentes fuites au niveau du circuit, il est nécessaire de faire l'appoint quotidiennement pour compenser les pertes de composants et réguler la valeur correspondante. Après une collecte de données dans le laboratoire d'analyse de niveau et une comparaison entre les paramètres de fonctionnement au niveau du DCS avec les paramètres de conception, nous avons constaté des écarts entre la conception réelle et le principalement dus à la "contamination" des fluides frigorigènes MCR et propane. L'objectif de l'étude est d'élucider les raisons de ces écarts, d'étudier puis d'analyser l'impact de ces changements sur la qualité à froid du circuit MCR.

Le but de l'étude est d'élucider les raisons de ces écarts, étudier puis analyser l'impact de ces changements sur la qualité de réfrigération de la boucle MCR.

II.1) Dysfonctionnement de réfrigération de la boucle MCR

II.1.1) Contamination du réfèreent Propane (Boucle propane), influençant la boucle MCR:

Sachant qu'il y a une relation entre les deux boucles MCR et propane, le mauvais fonctionnement de la boucle propane (contamination de cette boucle par les incondensables (éthane) ; d'après l'analyse illustrée dans le tableau ci-dessous (II-1)) influe sur le fonctionnement de la boucle MCR (voir figure II.1)

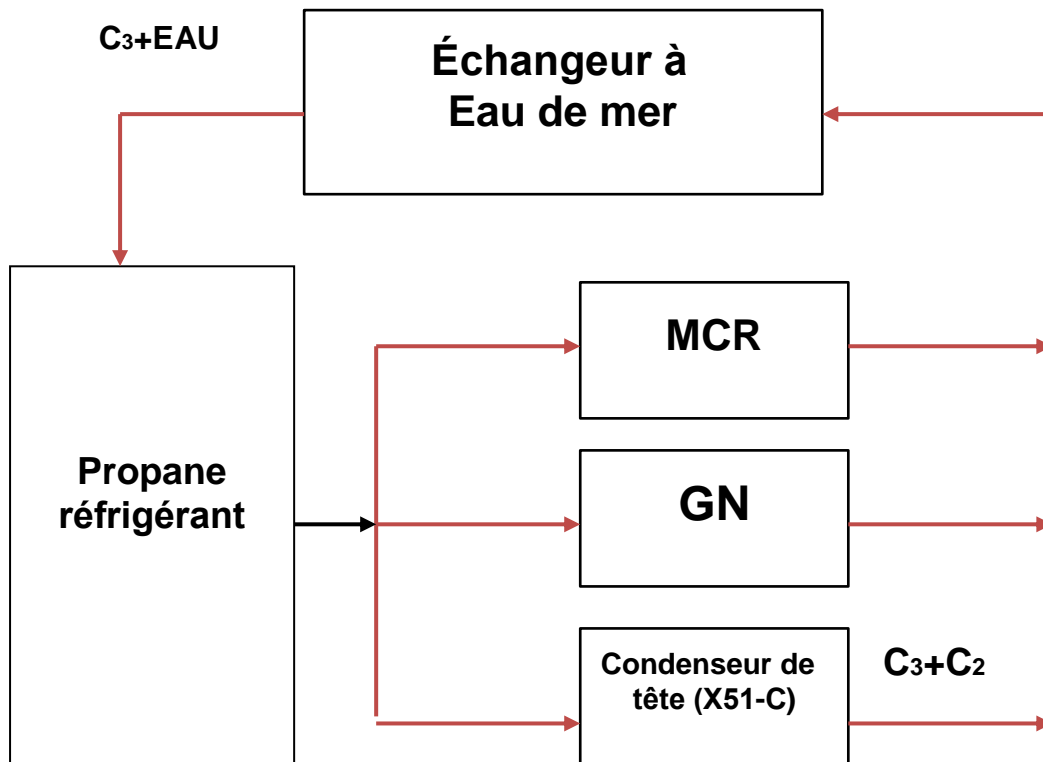
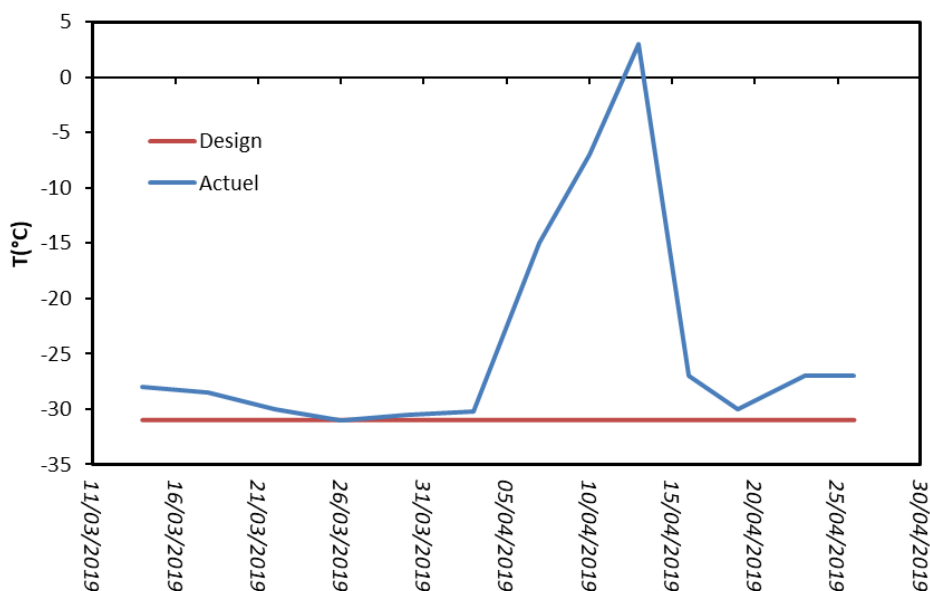


Figure (II.1)-Contamination de la boucle propane

Tableau (II-1)- Composition moyenne de la boucle Propane réfrigérant (du 10 jusqu'au 16 /04/2019)

Composant	% actuelle	% Design
C ₁	1,128	0
C ₂	4,993	0
C ₃	93,066	100
iC ₄	0,334	0
nC ₄	0,31	0
N ₂	0,169	0

Le graphe de la figure (II.1) représente la variation de la température du multi-réfrigérant MCR sorti des Schillers (où s'effectue le contact indirect entre propane et MCR), cet enregistrement a été réalisé au niveau du train 100 par l'indicateur de température TI-1-310 pendant la période du 11/03/2019 jusqu'au 30/04/2019



Figure(II.2) variation de la température de MCR sorti des chillers

Le graphe montre une augmentation de la température du réfrigérant MCR par rapport à celle du design qui reste invariable et égale à -31°C, le multi-réfrigérant perd de son efficacité à cause de sa température qui dépasse 5°C, ceci est dû à la présence des incondensables dans la

boucle propane (voir tableau (II-1)). Le percement au niveau des échangeurs à eau de mer provoque une déperdition du propane vers l'eau de mer ; aussi l'endommagement du condenseur X51-C en tête du dééthaniseur contamine la boucle C₃ par l'éthane C₂.

II.1.2) Contamination de la composition du réfrigérant MCR:

Le multi-réfrigérant MCR renferme des constituants (N₂, C₁, C₂ et C₃) provenant de différentes sources comme le méthane qui provient du ballon de reflux de la tour de lavage X08-F, l'éthane du dééthaniseur X51-E (voir figure II.3), le propane du dépropaniseur X52-E et l'azote du déazoteur X02-E. L'analyse de la composition du MCR, effectuée dans la journée du 14-04-2019, au niveau du train 100, est détaillée dans le tableau (II-2) où des différences remarquables ont été constatées.

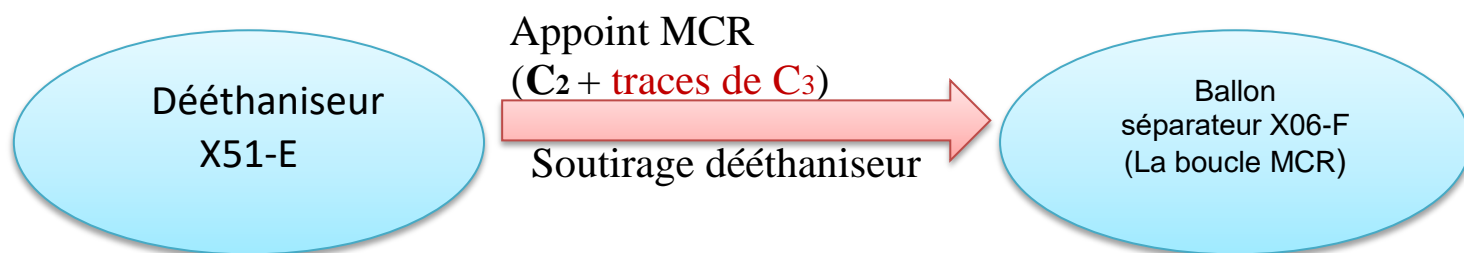


Figure (II.3)- Contamination de la boucle MCR par le propane

Tableau (II-2) -Analyse de la composition du MCR [8]

composants		N ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₃	nC ₄	iC ₅	Total
MCR (%) molaire	Design	2,7	40,7	54 ,4	2,2	-	-	-	100
	Ttrain 100	2,282	38,018	52,497	7,143	0,056	0,004	-	100
X51-E (%) molaire (soutirage dééthaniseur)	Design	0,02	10,89	88,27	0,81	0,001	0	-	100
	Train 100	0,083	4,728	76,038	19,157	-	-	-	100

D'après les résultats de l'analyse on constate que :

- ✓ La quantité importante de propane dans la boucle MCR par rapport au cas design, sachant qu'il s'agissait d'un appoint d'éthane et non de propane.
- ✓ Le dééthaniseur 151-E produit de l'éthane accompagné de propane (19,157% de C_3 au lieu de 0,81%)

Ainsi, dans la suite de l'étude, nous réalisons des investigations au niveau du dééthaniseur afin de détecter les paramètres responsables de ce dysfonctionnement. Pour se faire nous allons tout d'abord décrire la section de dééthanisation

II.2) Colonne de dééthanisation [7]

II.2.1) Principe de la distillation :

La vaporisation d'un mélange permet d'obtenir deux phases :

- une phase vapeur riche en légers mais contenant encore des traces de lourds.
- Une phase liquide riche en lourds mais contenant encore des légers.

Ces distillations successives se font dans des colonnes munies de plateaux. Le courant de vapeur est ascendant, alors que le liquide provenant de la condensation partielle des vapeurs, circule par gravité des plateaux supérieurs vers les plateaux inférieurs. Des échanges de chaleur sont réalisés entre les fluides eux-mêmes (vapeurs et condensats), la phase vapeur émise au plateau inférieur est plus chaude que la phase liquide du plateau suivant. La dééthanisation consiste en la séparation en deux coupes (C_1, C_2) et (C_3, C_4, C_5^+) de la charge venant du fond de la tour de lavage (voir figure (II.3)). La séparation du C_2 s'effectue par condensation partielle dans le condenseur de tête.

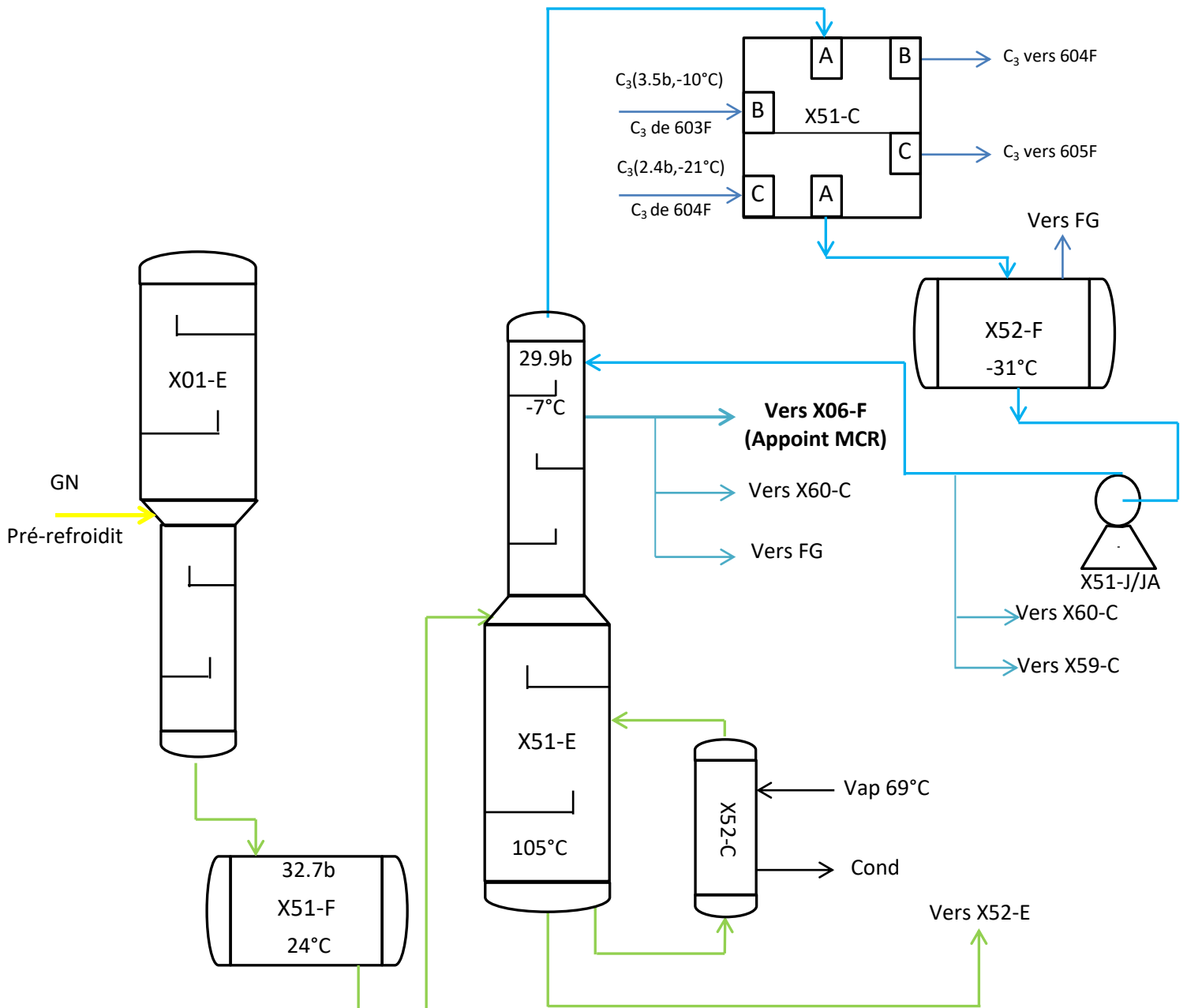


Figure (II.4)-Section de Dééthanisation

II.2.2) Ballon tampon X51-F

Le produit de fond de la tour de lavage X01-E étant sujet à des variations de débit, composition, de température et de pression dues à des variations de débit et de composition de la charge GN à l'entrée des trains de liquéfaction. Ce ballon évite que ces variations ne se répercutent de façon brusque sur le dééthaniseur (ce qui serait préjudiciable à la stabilisation des 3 colonnes du fractionnement) et il constitue également une réserve de liquide d'alimentation aux trois colonnes, d'une capacité utile de liquide d'environ 44 m³. Cette réserve correspond à une autonomie de fonctionnement de 40 minutes.

II.2.3) Dééthaniseur X51-E

C'est une colonne de 32 m de hauteur ; elle est constituée d'un ensemble de 48 plateaux. Des plateaux perforés à déversoir latéral et intercalés avec des plateaux à déversoir central. La pression est de 31 bars et une température propre à chaque plateau variant de -6°C en tête à 112°C au fond de colonne. Les vapeurs en tête sont dirigées vers le condenseur de tête X51-C pour y être condensées partiellement. Une conduite sur la ligne des vapeurs en tête permet d'évacuer en cas de nécessité une partie des vapeurs vers torche froide. Les produits de fond sont dirigés vers le dépropaniseur X52-E par la vanne FV413 sous contrôle de niveau. Un soutirage de vapeur se fait au niveau du plateau n°10 par FIC 444. Les vapeurs à -7°C sont dirigées vers le sous refroidisseur de butane X60-C pour être refroidies à -29°C puis vers l'échangeur à plaques X17-C pour être réinjectées dans le gaz naturel afin d'augmenter son pouvoir calorifique. Une autre partie de ce soutirage peut être utilisée comme appoint en cas de besoin dans le MCR. Tout excédent de vapeur est dirigé vers le fuel gaz

II.2.4) Condenseur de tête X51-C

Il s'agit d'un condenseur à plaques à deux étages de réfrigération au propane. Le 1er étage est en mesure de condenser les vapeurs de tête jusqu'à une température de -16°C ; tandis que le second jusqu'à -33°C (c'est la température de sortie minimale). Les vapeurs en tête renferment une proportion non négligeable de C₁.

II.2.5) Ballon de reflux X52-F

Il fonctionne en condensation partielle. Une ligne en tête du ballon permet à l'aide de l'indicateur de pression PIC403 d'évacuer les incondensables vers le collecteur fuel gaz et de

contrôler la pression du dééthaniseur à 31,4bar. Le ballon X52-F dispose d'une capacité utile de liquide d'environ 4 m³ ; ce qui correspond à une autonomie de 2 minutes pour un reflux à pleine charge d'alimentation.

II.2.6) Rebouilleur X52-C

Il s'agit d'un rebouilleur à vapeur (4,5 bars), côté calandre. et hydrocarbures côté tubes.

La circulation du produit de fond se fait du bas vers le haut du rebouilleur, il est alimenté par le fond du X51-E où se trouve la plaque séparatrice. L'action sur la vanne de niveau LV404 sur le condensât permet de jouer sur le débit de vapeur à condenser, donc sur la chaleur échangée et sur la quantité vaporisée, réinjectée au fond de la colonne.

Le tableau (II-3) regroupe les conditions de fonctionnement Design des équipements cités ci-dessus.

Tableau (II-3)- Conditions de fonctionnement Design des équipements

Equipement	Paramètre	Indicateur	Design
Ballon tampon (X51-F)	Pression (bar)	PIC 401	32,7
	Débit vers 51E (m ³ /h)	FIC403	38,6
	Température (°C)	TI-1-401	28,7
Dééthaniseur (X51-E)	Température de tête (°C)	TI-1-405	-6,7
	Température de fond (°C)	TI-1-426	112
Ballon de reflux (X52-F)	Pression (bar)	PIC403	30,3
	Débit de reflux (m ³ /h)	FIC404	35,6
	Température (°C)	TI-1-407	-31

II.3) Suivi du fonctionnement du dééthaniseur

Le suivi du fonctionnement du dééthaniseur à été mis en œuvre par le tracé de quelques Variables opératoires, notamment la température, la pression et le débit, pendant une période allant du 24/02/2019 jusqu'au 05 /05 /2019. Les résultats sont regroupés dans plusieurs graphiques cités ci-dessous [10] :

II.3.1) Variation de la pression dans le ballon tampon :

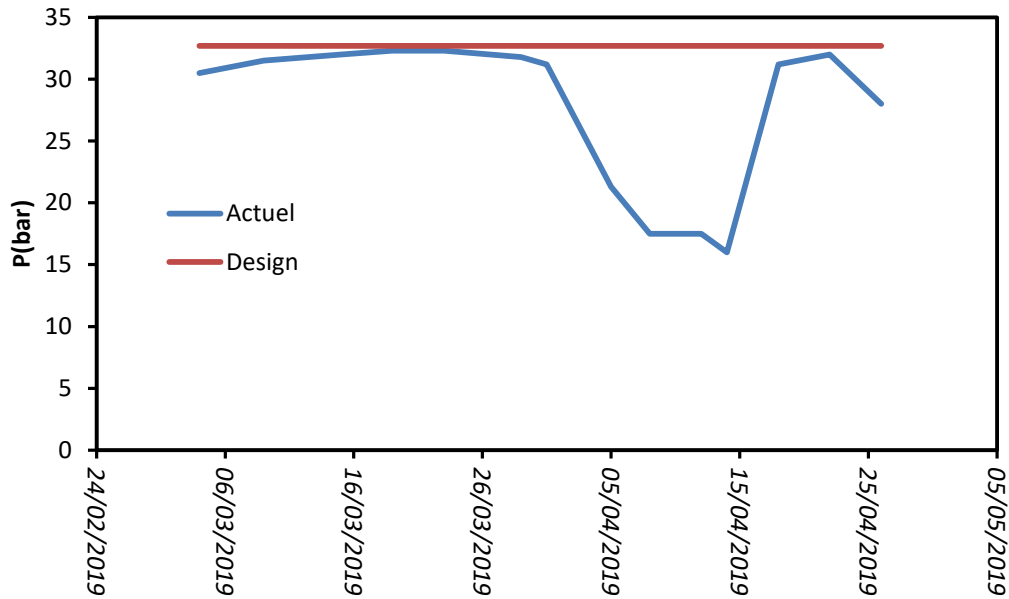


Figure (II.5) - Variation de la pression dans le ballon tampon X51-F

II.3.2) Variation de la température dans le dééthaniseur :

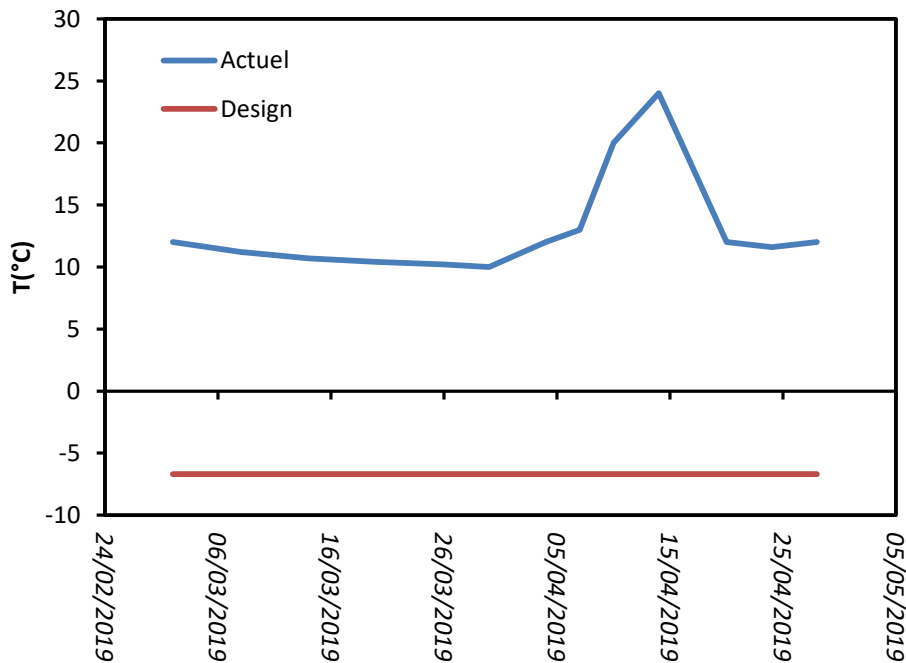


Figure (II.6)-Variation de la température du produit de tête de dééthaniseur X51-E

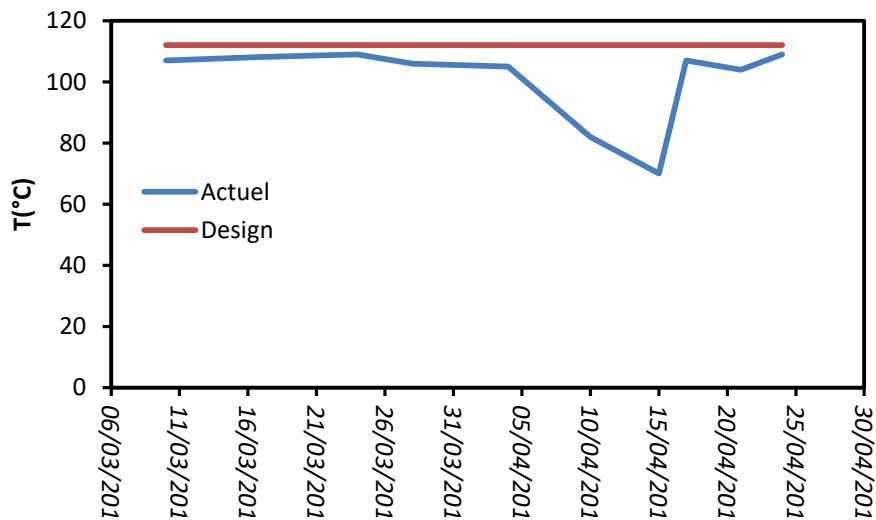


Figure (II.7)-Variation de la température du produit de fond du dééthaneur X51-E

II.3.3) Variation du débit dans le ballon de reflux

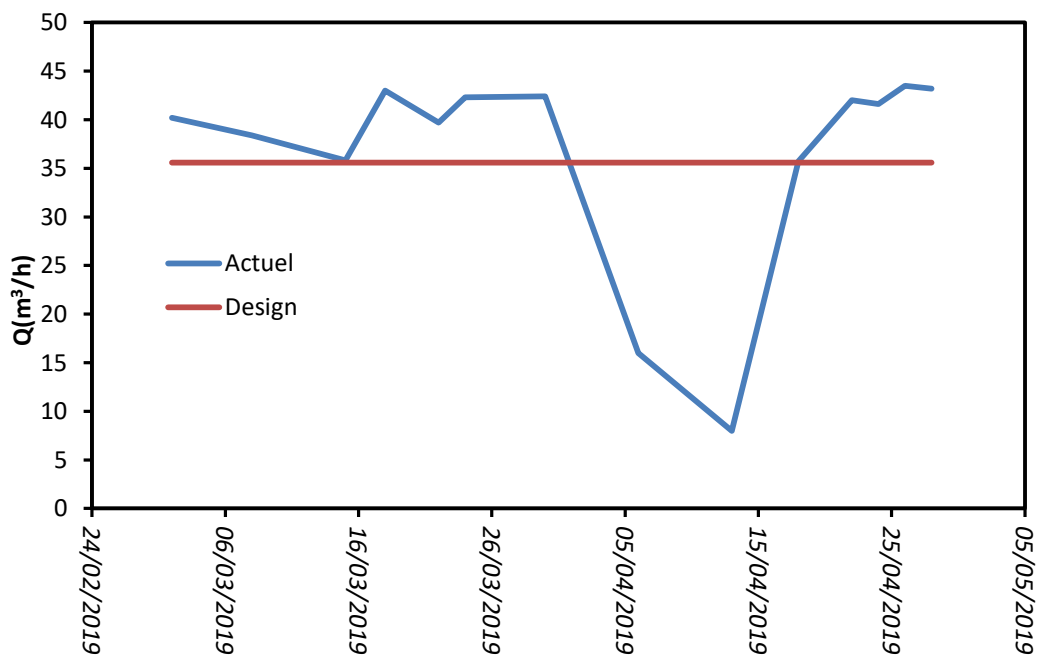


Figure (II.8)-Variation du débit du ballon de reflux X52-F

II.3.4) Interprétation :

D'après les graphes on remarque qu'il y a une perturbation au niveau de la colonne de dééthanisation X51-E (durant la période (24 /02/2019 au 05 /05 /2019)).

La température en tête du dééthaneur est toujours supérieure à celle du design ;on constate une augmentation brusque de la température entre le 24/02/2019 et le 05/05/2019; due à un

faible débit de reflux (voir Figure (II.8)) causé par un dysfonctionnement du condenseur de tête (X51-C). Ce problème est engendré par la contamination de la boucle propane par les produits légers tels que l'éthane ce qui augmente la température au niveau du condenseur et une mauvaise condensation du C₂ et un faible reflux (voir Figure (II.6)).

La température du fond de la colonne de dééthanisation est quasiment stable durant la période du 11-03-2019 jusqu'à 25-04-2019 sauf pour la journée du 15-04-2019 où le MCR renfermait une quantité importante de C₃.

La pression du ballon X51-F est plus au moins conformes à celle du design, les perturbations de la journée du 14-04-2019 sont dues à un déclenchement d'un turbo compresseur suivi d'un arrêt du train 100.

II.4) Impact de la composition du MCR

▪ Un excès d'éthane et de propane dans la composition du multi-réfrigérant MCR est accompagné d'un appauvrissement en constituants légers tels que le méthane et l'azote et par conséquent une diminution du rapport (Pression de sortie/Pression à l'entrée de la vanne Joule-Thomson froide) ce qui provoque une chute de température et un écart entre le réel et le design et de ce fait la température de sortie du GNL n'est pas atteinte. La figure (II.9) illustre ces remarques.

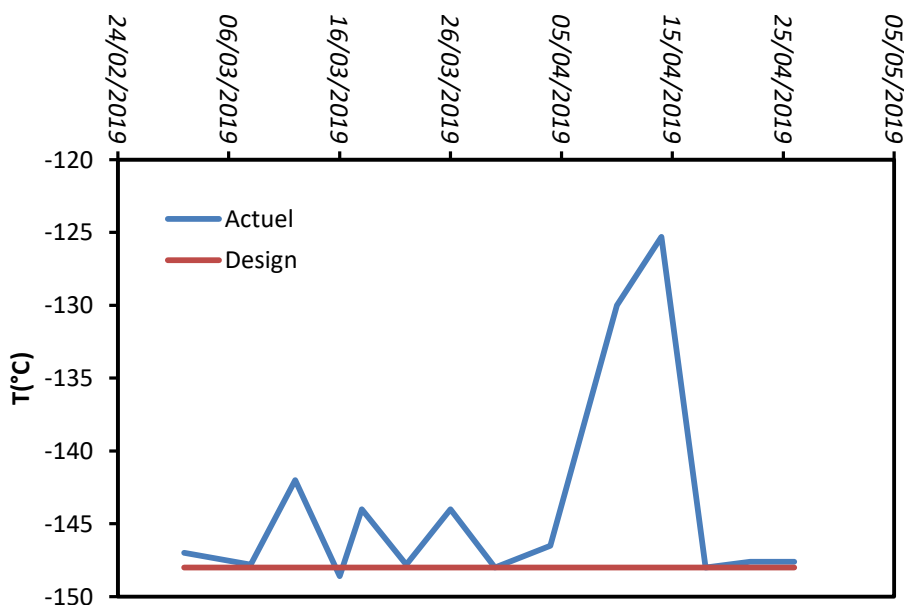


Figure (II.9)-Variation de la température du GNL sorti de l'échangeur principal X16-C

▪ Lorsque le pourcentage des lourds (L'éthane et beaucoup plus le propane) augmente dans la boucle MCR; la température côté calandre de l'échangeur principale X16-C diminue ce qui provoque une chute de la température d'aspiration du compresseur MCR I (X02-J) qui peut atteindre parfois sa température de déclenchement (-60°C) comme le montre le graphe de la figure (II.10)

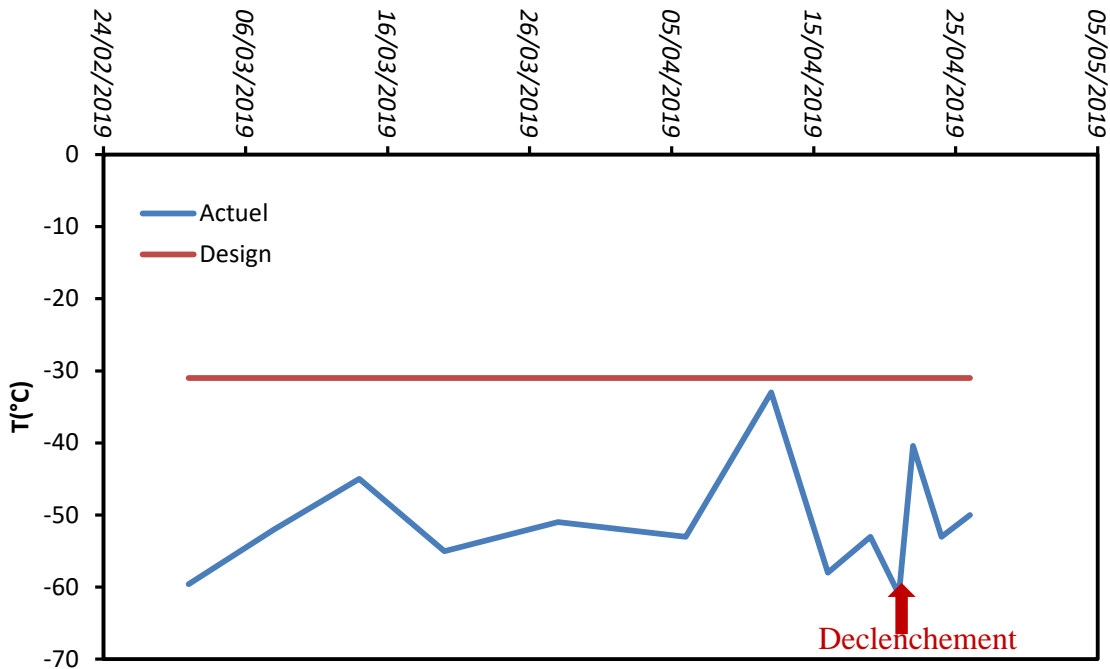
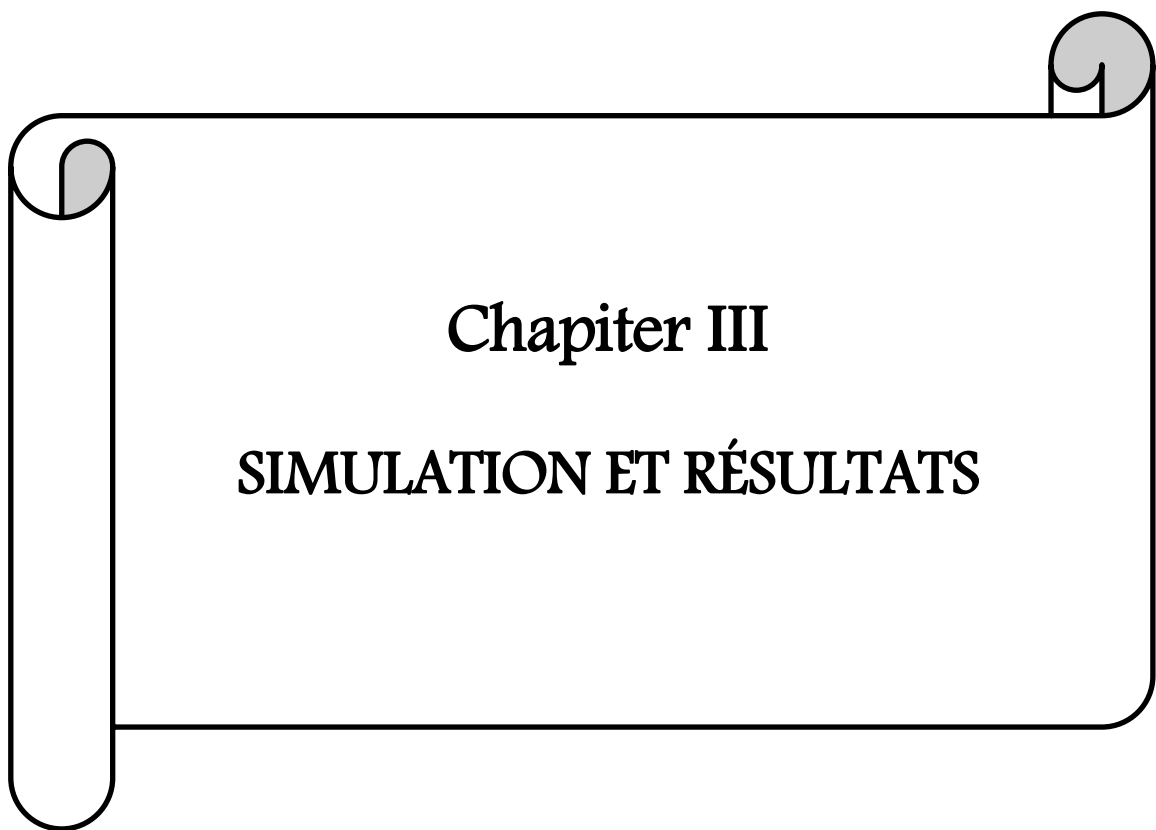


Figure (II.10)-Variation de la température d'aspiration du compresseur MCR I (X02-J)

Conclusion :

Enfinement et après plusieurs expérimentations, nous avons pu constater les causes et les conséquences du dysfonctionnement du circuit frigorifique multiple MCR, notamment l'encrassement du circuit propane et la variation de la composition du MCR. Effets de la variation de la composition du MCR sur le cycle frigorifique et la production de GNL, une simulation du cycle frigorifique par MCR est présentée dans le chapitre suivant.



Chapiter III

SIMULATION ET RÉSULTATS

SIMULATION ET RÉSULTATS

Afin de pouvoir analyser la problématique du dysfonctionnement de la boucle MCR, nous avons simulé le problème à l'aide du logiciel Hysys afin d'étudier l'influence de la perturbation de la boucle MCR sur quelques paramètres du procédé tels que la température de sortie du gaz naturel de l'échangeur principal, les puissances consommées des compresseurs et notamment le coefficient de performance (COP).

III.1) Simulation

III.1.1) Le simulateur HYSYS :

Le développement de l'informatique a connu un très grand essor et progrès important, les différentes disciplines en profitent largement. Son application aux différents domaines scientifiques s'est élargi d'avantage vu l'importance de l'ordinateur dans la résolution des problèmes. Dans le domaine du génie des procédés, la nécessité de l'informatique ne se discute pas et se fait de plus en plus ressentir. En fait pour traiter de la modélisation et de la simulation, la programmation est plus qu'indispensable. En génie des procédés, la conception assistée par ordinateur (CAO) regroupe un bon nombre de simulateurs qui passe de la spécialisation aux simulateurs de procédés robuste et efficace dont on peut citer : Aspen plus, Hysys, Chemcad, Prosim etc... Grace à la CAO des simulations virtuelles peuvent être faites avant de procéder à la réalisation d'un procédé. Cette technique est particulièrement intéressante, compte tenu de l'enjeu économique et financier de certains projets. Les simulateurs précédemment cités permettent non seulement de simuler tout un procédé mais aussi les différents équipements que peut contenir un procédé comme la colonne de distillation, d'extraction, d'absorption, les réacteurs chimiques, les échangeurs de chaleur, etc. Un simulateur peut être utilisé lors de la conception d'un procédé industriel afin de :

- Établir des bilans de matière et d'énergie d'un procédé industriel.
- Dimensionner les équipements de ce procédé.
- Etudier l'influence d'un paramètre donné sur le bon déroulement d'un procédé ou partie du procédé

Le simulateur permet aussi de suivre les procédés déjà installés afin de :

- Réajuster les paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de Compositions de l'alimentation ou des conditions de fonctionnement de certains équipements.

- Déterminer les performances des équipements.
- Adopter un process conforme à de nouvelles lois réglementaires (concernant le produit, l'environnement, etc.)

Le procédé est schématisé par une feuille de courant **PFD**(Process Flow Diagram) ou Flowsheet.

Tableau (III-1) - Les différentes données Design [10]

	Débit total (kg/h)	Débit entrant X17-C (kg/h)	Température D'entrée T (°C)	Pression entrant P(bar)	Composition Design (%)		Pression de GNL à la sortie de X16-C (bar)
					N ₂	C ₁	
MCR	4,263.10 ⁵	9119			N ₂	2.7	
					C ₁	40.7	
					C ₂	54.4	
					C ₃	2.2	
GN	2,22.10 ⁵	33,4	36,5				28

Tableau (III-2)-Composition du gaz naturel traité entrant dans l'échangeur principal

Composant	He	N ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	iC ₆	nC ₆
%(molaire)	0,02	5,92	84,70	7,72	1,52	0,04	0,03	0	0	-	-

Tableau (III-3a)- Paramètres de fonctionnement des équipements

	Aspiration du 1 ^{er} compresseur	Refoulement du 1 ^{er} compresseur	Aspiration du 2 ^{ème} compresseur	Aspiration du 2 ^{ème} compresseur
Température (°C)			32.2	121
Pression(bar)		12.3	11.7	44.7

Tableau (III-3b)- Paramètres de fonctionnement des équipements

Équipement	Te (°C)	Ts (°C)	Pe (bar)	Ps (bar)	ΔP (bar)
X10-C	-	32,2	12,3	-	0,6
X11-C	-	32,2	44,7	-	0,5
Schiller	32,2	-30,5	-	42,8	-
X17-C	-	-149	-	42	-
TV-514	-149	-	42	3,779	-
JT Chaude	-117,2	-125,5	36,4	-	-
JT Froide	-149	-152,3	29,10	-	-

Dans le tableau (III-4), sont calculées les erreurs relatives commises entre les résultats réels (cas simulation) et design et ceux trouvés par simulation, nous constatons que ces erreurs ne dépassent pas les 15%, ce qui confirme la validité de la simulation et nous permet de modifier quelques paramètres dans le procédé et obtenir des résultats fiables pouvant analyser le problème du dysfonctionnement de la boucle MCR

Tableau (III-4) –Erreur relative entre résultats réels et de design

Paramètres	Cas design	Cas simulation	Erreur [(XD - XS)/XD] %
Température du GNL sortie du X16-C (°C)	-148	-149,7	1,1
Puissance du compresseur MCR 1 (kW)	22170	23975,6	8,14
Puissance du compresseur MCR 2 (kW)	24869	21427,7	13,8
Température d'aspiration du compresseur MCR1 (°C)	-35	-35	0

III.2) Simulation du dysfonctionnement de la boucle MCR :

Dans ce qui suit, nous étudions l'effet de la variation de la composition du MCR sur les paramètres suivants :

- La température du GNL à la sortie de l'échangeur principal X16-C.
- La puissance consommée par les compresseurs MCR1 et MCR2.
- La température du MCR à la sortie de la calandre de l'échangeur principal X16-C

(Température d'aspiration du compresseur MCR 1).

- Le coefficient de performance de la boucle MCR(COP).

Les compositions réelles du MCR sont enregistrées pendant 03 jours consécutifs (16-18 et 20 avril 2019)

Tableau (III-5)-Différentes compositions de MCR, réelles et de Design [9]

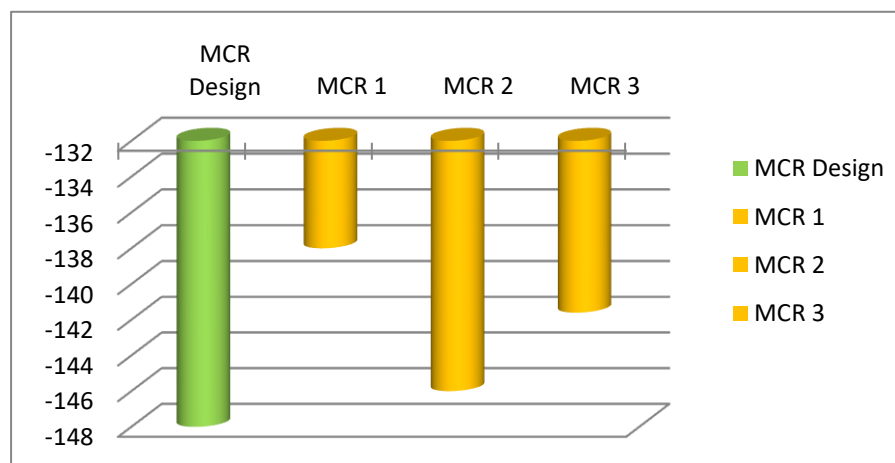
Composant	MCR (design)	MCR 1 (16 /04/2019)	MCR 2 (18 /04/2019)	MCR 3 (20/04/2019)
N ₂	2,7	2,01	2,282	3,2
C ₁	40,7	38,462	36,018	40,2
C ₂	54,4	58,553	58,497	53,4
C ₃	2,2	0,641	3,144	3,2
iC ₄	-	0,022	0,056	-
nC ₄	-	0,028	0,004	-
iC ₅	-	0,002	-	-

III.2.1) Résultats et interprétation

L'impact des différentes compositions du MCR sur plusieurs paramètres est résumé par les différents graphiques des figures (III.1), (III.2), (III.3) et (III.4)

III.2.1.a) Variation de la température du GNL sorti de l'échangeur principal

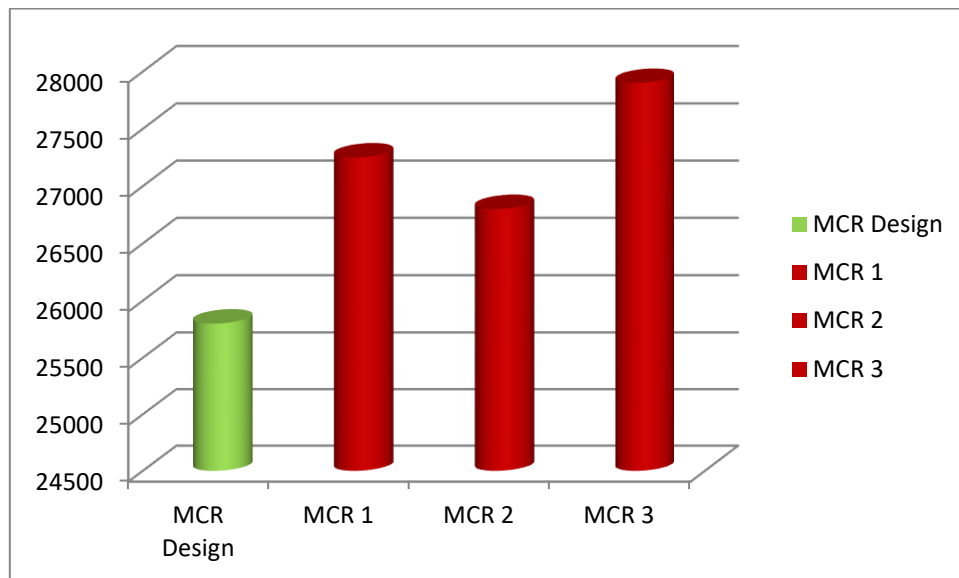
Le graphe de la figure (III.1) montre qu'avec les compositions actuelles du MCR, la température design du GNL à la sortie de l'échangeur principal X16-C n'est pas atteinte et on constate une différence de température atteignant 13°C en d'autres termes le gaz naturel liquéfié n'est pas refroidi jusqu' à la température désirée avec le multi-réfrigérants de température non adéquate



Figure(III.1).Température du GNL sorti de l'échangeur principal X16-C

III.2.1.b) Variation des puissances consommées par les deux compresseurs (MCR 1 et MCR 2)

Les graphes des figures (III.2) et (III.3) présentent la variation de la puissance du compresseur MCR 1 et MCR 2 en fonction de la composition de MCR.



Figure(III.2). Puissance consommée par le compresseur MCR 1

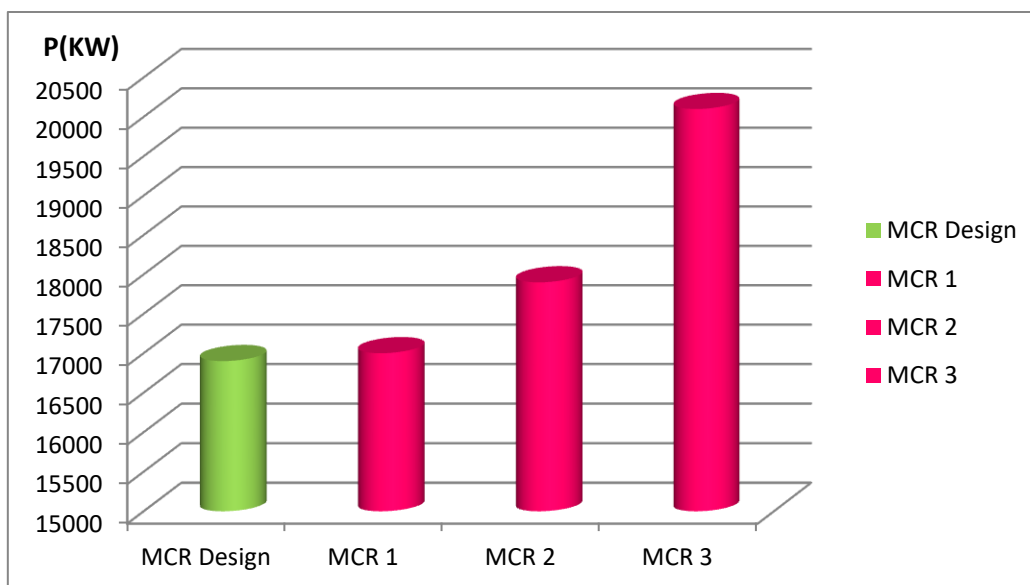
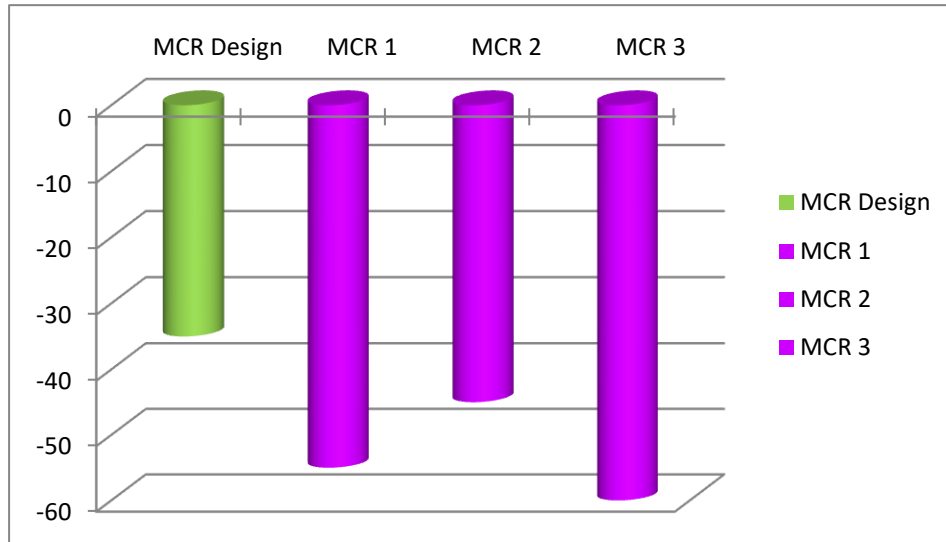


Figure (III.3) . Puissance consommée par le compresseur MCR 2

On remarque que la puissance consommée dans le cas design est inférieure à celle consommée dans les trois autres cas réels ce qui permet de produire un maximum de froid (GNL sort de l'échangeur principal à -148°C), ce qui augmente l'auto-consommation de l'unité de liquéfaction.

III.2.1.c) Variation de la température du MCR sorti de l'échangeur principal (X16-C)

Le graphe de la figure (III-4) illustre la variation de la température du multi-réfrigérant MCR sortant de l'échangeur principal (X16-C) avec sa composition



Figure(III.4) .Température de MCR sorti du X16-C en fonction de sa composition

D'après le graphe nous remarquons que la température de MCR sorti de l'échangeur principal X16-C vers le premier ballon d'aspiration X06-F est plus basse que celle de design (-35°C) ; elle atteint -60°C pour le multi-réfrigérant baptisé MCR 1, ce qui peut provoquer un déclenchement du compresseur MCR 1

III.2.1.d) Variation du coefficient de performance (COP)

Le coefficient de performance est le rapport de la quantité d'énergie reçue par le GNL et le travail fourni aux compresseurs, les différentes valeurs du coefficient sont calculées en fonction de la composition du multi-réfrigérants et illustrées sur le tableau (III-8), le graphe de la figure (III.6) confirme ces valeurs.

$$COP = \frac{Q_{re\acute{c}ue\ par\ GNL}}{W_{fournie}} = \frac{H_E - H_S}{W_{MCR I} + W_{MCR II}}$$

H_E : Enthalpie du gaz à l'entrée de l'échangeur principal(Kj/h).

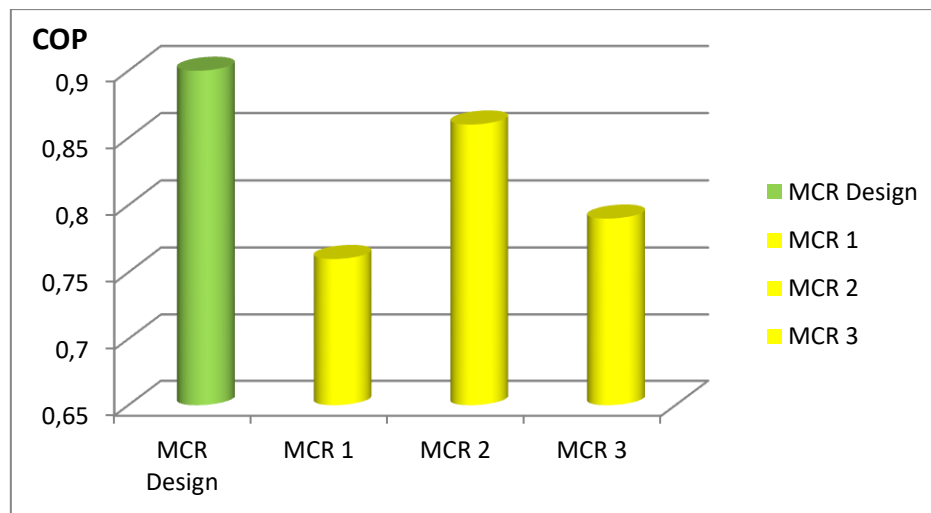
H_S : Enthalpie du gaz sortie de l'échangeur principal(Kj/h).

$W_{MCR I}$: Travail consommé par le compresseur 1er étage(Kw)

$W_{MCR II}$: Travail consommé par le compresseur 2èmeétage(Kw)

Tableau (III-6) - Valeurs du coefficient de performance (COP)

	COP
MCRI	0,59
MCRII	0,565
MCRIII	0,545

**Figure (III.5)**-Variation du COP en fonction de la composition du MCR

Les résultats montrent que la composition du MCR Low in C₃ (MCR 1) donne le coefficient de performance le plus bas, le cas de conception donne le meilleur résultat, ce qui se traduit par une faible consommation et une production élevée de GNL.

III.2.2) Effet des variations de la composition du MCR dans le cycle

Compte tenu des constatations concernant la contamination du MCR, principalement causée par l'augmentation du pourcentage de propane (C₃) et la présence de traces de C₄ et C₅ provenant de la composition dééthaniseur, nous avons alors proposé de faire varier la teneur du fluide frigorigène multi-composants en éthane et propane pour ensuite voir, par simulation, l'impact de ces additifs sur les paramètres précédemment étudiés, notamment la température du GNL en sortie de l'échangeur principal. la composition du MCR par addition de C₂ et C₃ est présentée dans le Tableau (III9), Figures (III.6) à (III.11) sont les résultats de cette simulation.

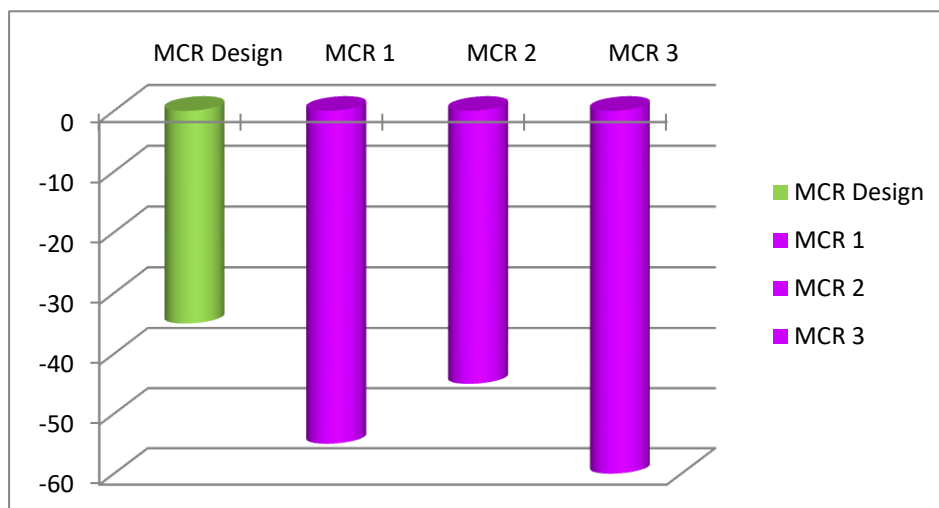


Figure (III.6) - Température de MCR sorti du X16-C en fonction de sa composition

Tableau (III-7)-Appoints de C₂ et C₃ dans MCR

Composition du MCR	Cas 1 (%)	Cas 2 (%)	Cas 3 (%)
N ₂	2,7	2,7	2,7
C ₁	40,7	40,7	40,7
C ₂	54,6	48,6	45,6
C ₃	5	8	11

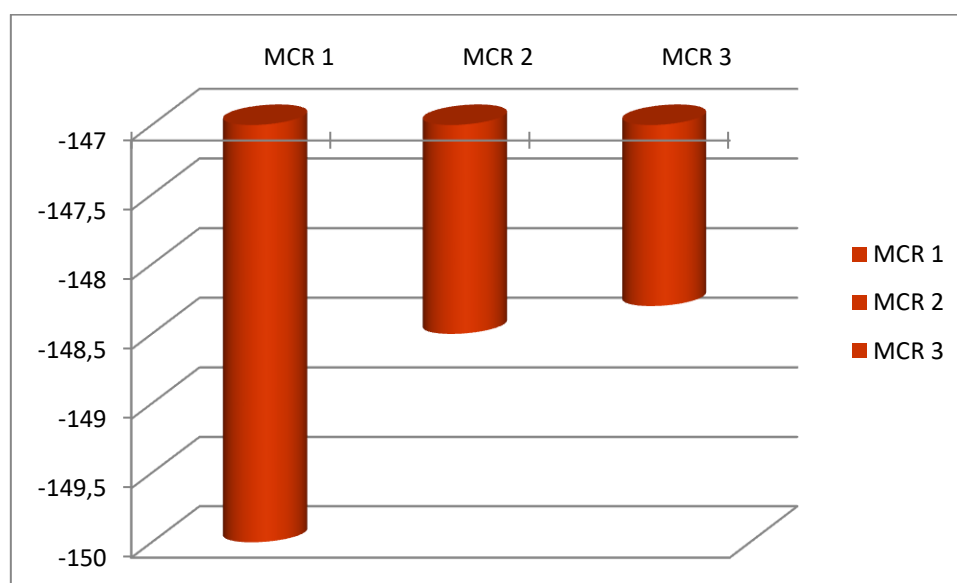
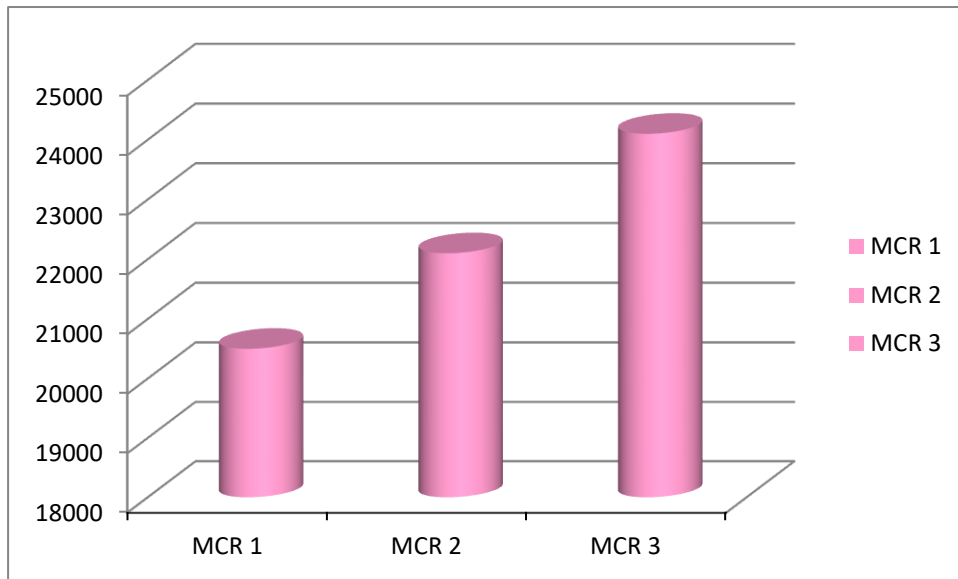
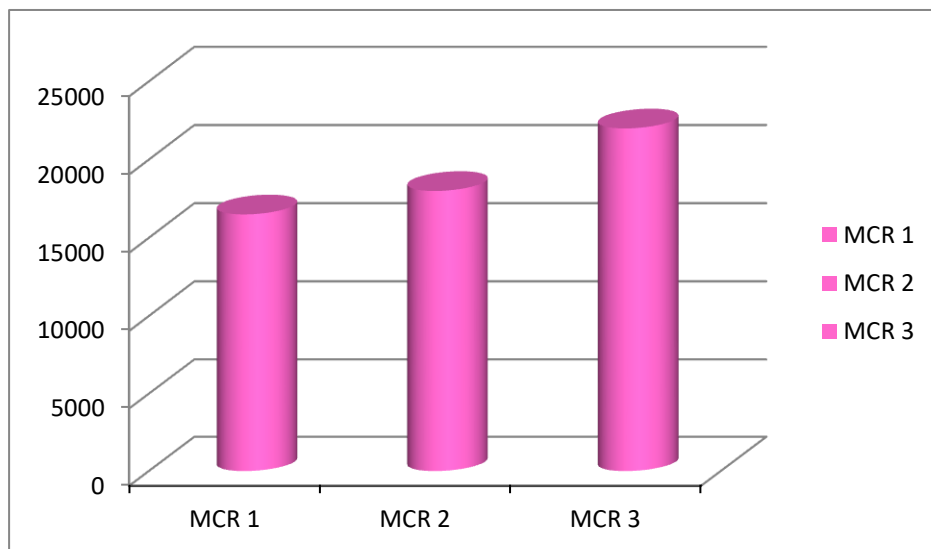


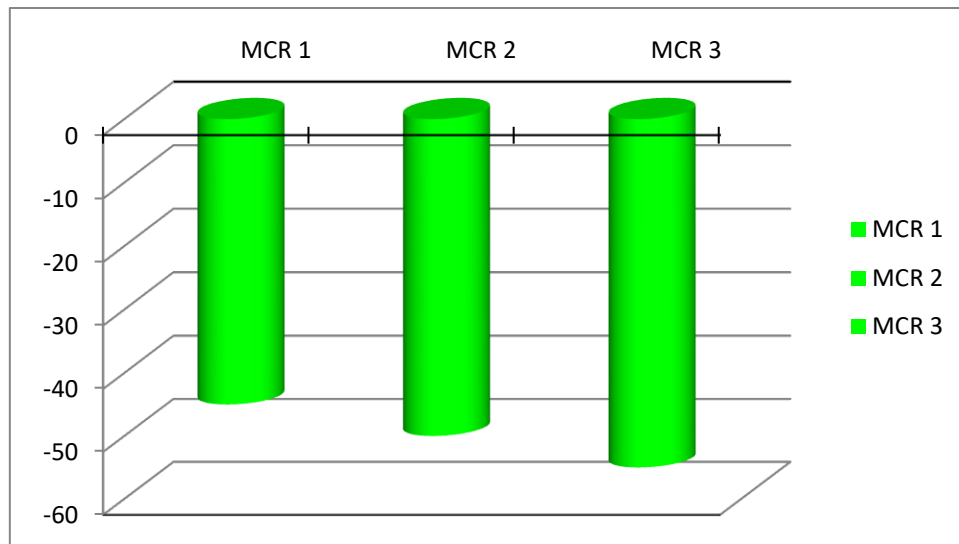
Figure (III.7)-Température de sortie du GNL de l'échangeur principal



Figure(III.8). Puissance du compresseur MCR 1



Figure(III.9). Puissance du compresseur MCR 2



Figure(III.10). Température d'aspiration du compresseur MCR 1

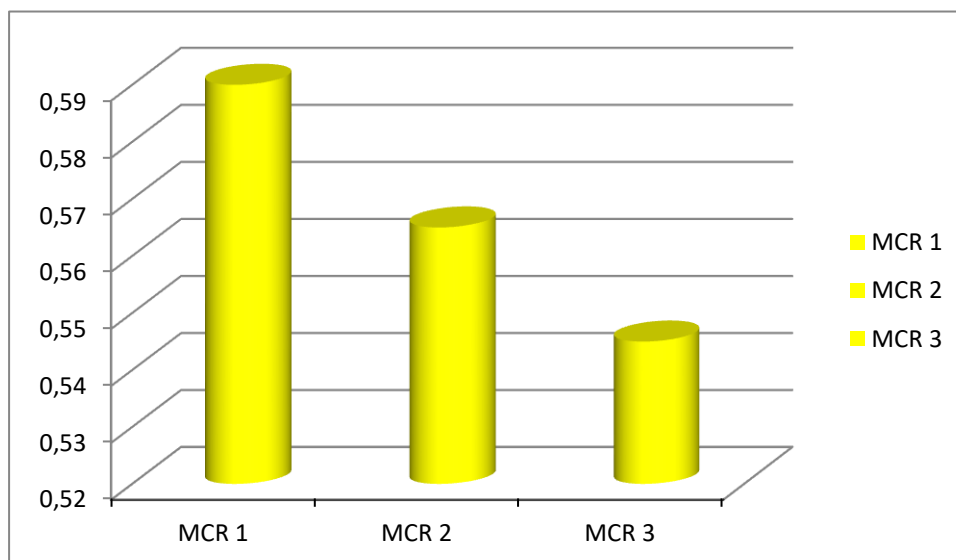


Figure (III.11). Variation du COP en fonction de la composition du MCR

Conclusion

A travers les résultats obtenus, après augmentation de la fraction lourde (C_3) dans la composition du MCR, on constate que la température de sortie du GNL n'a guère changé du fait de ces changements, ce sont principalement les performances des deux compresseurs MCR (un sur consommation) et la température d'aspiration du compresseur MCR 1, qui sont les plus fortes Si ce dernier est moins affecté, le COP diminue également A l'aide de cette simulation, nous montrons que la perturbation de la composition du MCR a un impact négatif sur l'efficacité du cycle et la capacité de refroidissement.

Conclusion générale

Après avoir pris connaissance du processus de liquéfaction et des installations qui réalisent ce processus, nous avons enquêté sur le dysfonctionnement de la ligne de réfrigération dû à des problèmes dans le circuit frigorifique multi-composants MCR et, dans un premier temps, nous avons tenté d'identifier les principales causes de ce dysfonctionnement. , pour cela, plusieurs investigations et une étude approfondie nous ont permis d'identifier les facteurs responsables de ce dysfonctionnement

, ainsi que leur impact sur cette boucle. Dans un second temps et afin de confirmer par des calculs les observations liées au dysfonctionnement, une simulation du procédé utilisé a été développée, préalablement validée avec des données de conception et des résultats à l'aide du logiciel AspenHysysV7.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que la variation de la composition du MCR influe d'une manière significative sur la performance du cycle de réfrigération du procédé de liquéfaction (diminution du coefficient de performance) et le travail fourni par les compresseurs (MCR 1 et MCR 2), ce qui se répercute sur une consommation excessive d'énergie (auto consommation de l'unité) et une diminution en production de GNL.

Pour résumer, l'objectif principal de l'étude est de maintenir la composition du MCR aussi proche que possible de celle du design en appliquant les résultats trouvés par simulation , par la suite, nous recommandons ce qui suit :

- ✓ Réparation de la passe endommagée du condenseur à plaque 151-C.
- ✓ Assurer l'étanchéité des vannes d'appoints.
- ✓ Installation des analyseurs en ligne afin de suivre la composition du MCR.
- ✓ Réparation des échangeurs EDM- (102 CA/CB).
- ✓ Installation des analyseurs en ligne pour un suivi régulier de la boucle propane.
- ✓ Faire des études approfondies sur la boucle propane pour éviter toute contamination par les produits légers.
- ✓ L'ouverture de l'évent ou la purge du ballon X09-F lors de la perturbation de la composition du MCR pour sa stabilisation (faire des appoints pour compenser les fuites).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] [http://www.connaissances-des-energies.org/fiche-pedagogique/chiffres-clesproduction-d-energie\(2015\)](http://www.connaissances-des-energies.org/fiche-pedagogique/chiffres-clesproduction-d-energie(2015))
- [2] [http://www.energy.gov.dz/francais/liquefaction-du-gaz-naturel-gnl-etseparation-des-gpl\(2014\)](http://www.energy.gov.dz/francais/liquefaction-du-gaz-naturel-gnl-etseparation-des-gpl(2014)).
- [3] GNL101 Initiation au Gaz Naturel Liquéfié, SNC. LAVALIN . 2016
- [4] Documentation interne SONATRACH, annuaire statique):
- [5] Jørgen Bauck Jensen. Optimal Operation of Refrigeration Cycles PhD thesis, NTNU
Faculty of Natural Sciences and technology , Department of chemical Engineering.
- [6] Snamprogetti. DOC.NO (00-ZAE-79009); principes fondamentaux du procédé & d'exploitation.
- [7] Manuel de service formation GL2/Z, soft liquéfaction.
- [8] Datasheet of Pullman Kellogg Company;
- [9] Service production complexe GL2/Z.
- [10] Service technique complexe GL2/Z.