

PREPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah – Ouargla

Faculté Des Sciences Appliquées

Département Génie Mécanique



Mémoire De Fin D'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master II

Spécialité : **Génie Mécanique**

Option : **Energétique**

Présenté Par :

ABABSA Mohammed

BELKHAMSA Salah Eddine

Thème

Étude Du Processus De Liquéfaction Du Gaz Naturel

Soutenu devant le jury :

Encadreur: Mr T .GUERMIT

President: Mr B. GHERFI

Examineur: Mr L.ZIANI

Promotion 2019

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos grandes familles pour leurs soutiens et leurs encouragements

Durant toute au long de notre carrière d'étude

A nos enfants ABABSA : Ichrack, Yahia , Ilyas

BELKHAMSA Mayar

Ainsi qu'à tous nos amis a Hauod Elhamra et Groupement Berkine

Et nos collègues 2^{ème} Master mécanique Energétique

à l'université de Kasdi Merbah – Ouargla

Et à Tous qui notre connaissent.

Remerciements

*On premier lieu nous remercions mon DIEU à tout puissant qui nous
donné la force pour L'élaboration de ce travail.*

*On adresse nos remerciements à notre encadreur Mr : GUERMIT Tahar
pour son aide précieuse et ses conseils qui ont été bénéfiques dans la réalisation
de se mémoire*

*A tous les enseignants du département Exploitation et Génie Mécanique &
les travailleurs du complexe GNL1K Skikda.*

*Nos profonds remerciements et notre gratitude vont aussi aux membres du
jury, pour leur accord de juger notre travail.*

*On adresse nos remerciements tout personnels qui nous ont tant aidées par
leurs conseils et encouragements dans l'élaboration de cette présente étude en cas
particulière Mr DOKKAR, Mr DRID, Mr GOURRAH, Mr BENHADDA,
Mr BEN SASSI, Mr NADJAH, Mr BOUMOSBAH, Mr MARRAD et
Mme DAMEN ainsi notre collègues BOUHAFER ALI, BABEKAR, ANIS
,MOURAD,BILEL, MOSBAH, SOUALAH*

Mohammed et Salah Eddine

Condoléances

على إثر هذا الحادث الأليم الذي خلف الكثير من الضحايا من عمال مركب التميع بسكيكدة وهم يؤدون واجبهم المهني تاركين في قلوب أهاليهم و أصدقائهم حزنا فراغا رهيبين. وبعد زيارتنا للمركب ماكان علينا إلا ان نقدم التعازي لعائلات و أصدقاء الضحايا ونتمنى من الله عز وجل ان يسكنهم فسيح جنانه. اللهم أرحمهم و أقبلهم عندك من الشهداء فإنك انت الرحمن الرحيم و على الإجابة قدير. إنا لله و إنا إليه راجعون.



SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I

I.1. introduction.....	03
I.2 Historique du GNL.....	05
I.2.1 Gaz naturel dans le monde et en Algérie.....	07
I.2.2 Utilisation du gaz naturel	12
I.3 Description du nouveau train de liquéfaction de SKIKDA « Méga-Train GL1K ».....	14
I.3.1 Situation géographique	14
I.3.2 Caractéristiques de production.....	14
I.3.3 Composition du gaz naturel d'alimentation (GN)	15
I.3.4 Présentation des différentes unités	16
I.3.4.1 Les utilités	16
I.3.4.2 Unité de comptage	20
I.3.4.3 Unité de compression	20
I.3.4.4 Unités de traitement	20
I.3.4.5 Unité de liquéfaction	20
I.3.4.6 Unité de fractionnement	21
I.3.4.7 Stockage des produits finis	23

Chapitre II

II.2 Objectifs De Liquéfaction	24
II.3 Pré-Refroidissement	26
II.4 Lavage	28

II.5 Description le processus de liquéfaction	29
II.5.1. L'échangeur principal (MCHE)	30
II.5.2. Le Système Du Réfrigérant MR	30
II.5.2.1 Circuit du GNL.....	32
II.5.2.2 Compresseur du réfrigérant MR.....	32
II.5.2.3 Circuit du MR liquide	33
II.5.2.4 Circuit des vapeurs MR	33
II.5.3 L'expander de GNL 15-MJ02	35
II.5.4 Séparation de l'hélium	36
II.5.5 Séparation de l'azote	38
II.5.6 Ligne de coulée du GNL	39
II.5.7 Stockage et expédition du GNL	40

Chapitre III

III.1 Echangeur de chaleur principal cryogénique (MCHE) 15-MC05	42
III. 1.1 Mélange réfrigérant MR	42
III.1.2 Composition du fluide MR (mélange réfrigérant)	42
III.1.3 Echangeurs bobinées	44
III.1.4. Principe de fonctionnement	45
III.1.5 Circulation des fluides	45
III.2 Calcul l'efficacité de l'échangeur de chaleur 15MC-05	46
III.2.1 Définition de l'efficacité :.....	46
III.2.2 Méthodes de calcul de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur	47

III.2.3 Etude de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur par la méthode ΔT_{lm}	48
III.2.3.1 Calcul de l'écart logarithmique moyen de température	49
III.2.3.2 Calcul débit thermique unitaire pour les deux fluides	49
III.2.3.3 Calcul ϕ réel échangé	49
III.2.3.4 Calcul de température différentielle maximale	50
III.2.3.5 Calcul flux de chaleur maximal (ϕ max possible):.....	50
III.2.3.6 Calcul de l'efficacité de l'échangeur de chaleur 15MC-05.....	50
III.3 programme de calcul.....	51
III.3.1 Le programme	51
III.3.2 L'exécution	52
III.4 L'efficacité en fonction de K, S, Φ et NUT	53
III.4.1 L'efficacité en fonction du K	53
III.4.2 L'efficacité en fonction du S	54
III.4.3 L'efficacité en fonction de Φ	55
III.4.4 L'efficacité en fonction de NUT	56
III.5 conclusion	56
Conclusion général	57
Bibliographie	

Nomenclature

T_1 : Température d'entrée du fluide chaud ($^{\circ}\text{C}$).

T_2 : Température sortie du fluide chaud ($^{\circ}\text{C}$).

t_1 : Température d'entrée du fluide froid ($^{\circ}\text{C}$).

t_2 : Température sortie du fluide froid ($^{\circ}\text{C}$).

K : Le coefficient de transfert de chaleur globale en $\text{w}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

S : La surface de transfert de chaleur en m^2 .

Φ : Le flux de chaleur effectivement transféré en (Watt).

Φ_{\max} : Le flux de chaleur maximum en (Watt).

ΔT_{lm} : La différence de la température logarithmique moyenne en $^{\circ}\text{C}$.

M_c, M_f : Débit massique du fluide chaud et fluide froid respectivement en kg/s .

C_{p_c}, C_{p_f} : Capacité calorifique du fluide chaud et fluide froid respectivement en $\text{Kcal}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$.

$\Delta T_c, \Delta T_f$: La différence de la température sortie et entrée fluide chaud et froid respectivement en $^{\circ}\text{C}$.

Q_{tc} : débit thermique unitaire pour le fluide chaud en $\text{kcal}/\text{h}^{\circ}\text{C}$.

q_{tf} : débit thermique unitaire pour le fluide froid en $\text{kcal}/\text{h}^{\circ}\text{C}$.

NUT : Le nombre d'unités de transfert.

R : Rapport de déséquilibre.

Lettres grecques:

ϵ : L'efficacité dans l'échangeur de chaleur.

Abréviation:

APCI: Air Product and Chemicals Incorporation

GN : Gaz Naturel

GNT : Gaz naturel traité

GND : Gaz naturel décarbonaté

GNL : Gaz naturel liquéfié

GPL : Gaz du Pétrole liquéfié

MCHE : Main Cryogenic Heat Exchanger (l'échangeur de chaleur cryogénique principal)

MR : Multi (Mixed) Réfrigérant

C3MR: Propane-Precooled Mixed Refrigerant, MR Cycle and C3 (Propane) cycle.

SMR: Single MR cycle

DMR: Double MR cycle

MDEA: Methyl Diethanol Amine

HP : Haute Pression

MP : Moyen Pression

BP : Basse Pression

Kettle : Type des échangeurs

JT : Vanne Joule Thomson

BOG : Boil-Off Gas

Référence de l'Equipment de GNL1K :

15-MC05 : L'échangeur principal de chaleur cryogénique (MCHE)

15-MC01/2/3 : L'échangeur de propane

15-MD01 : La colonne d'épuration

15-MC15 : Le rebouilleur de la colonne d'épuration

15-MD02 : Le ballon de reflux de la colonne d'épuration

15-MC16 : Le refroidisseur de fond de la colonne d'épuration

15-MJ01/A : Pompes de reflux de la colonne d'épuration

16-MD08 : Séparateur MR HP

16-MJ01/2/3 : le compresseur MR

16-MC04/5/6/7 et 20-MC04/5/6/7 : 08 Refroidisseurs de réfrigérant propane

16-MJ06 : L'expander MR

16-MD01 : Ballon d'aspiration MR BP

15-MJ02 : L'expander de GNL

15-MD03 : Le ballon de flash de gaz riche en hélium

15-MC06 : L'échangeur de chaleur du gaz riche en hélium /LMR

15-MJ05 : Le compresseur du gaz riche en hélium

15-MC13 : Le refroidisseur de refoulement du compresseur de débit riche en hélium

15-ML06 : Le réchauffeur d'hélium gazeux

15-MD04 : Le déazoteur

15-MC12 : Le rebouilleur du déazoteur

15-MJ03/A : Les pompes de produit de GNL

15-MJ04 : Le compresseur de fuel gaz

71-MF01 : Le bac de stockage

71-MJ06/A : Les pompes de retour de GNL

71-MJ01-A/B/C/D : (04) pompes de chargement de GNL

Liste des figures

Chapiter I :

Figure I.1 : Utilisation du gaz naturel.....	13
Figure I.2 : Situation géographique du complexe GL1K dans la zone industrielle de Skikda.....	14
Figure I.3 : Utilités du MEGA-TRAIN.	16
Figure I.4 : Le schéma synoptique du processus du MEGA-TRAIN.....	19
Figure I.5: Schéma simplifie de fractionnement.....	21

Chapiter II :

Figure II.1 : Schéma de principe de liquéfaction du Gaz Naturel	25
Figure II.2 : Schéma de pré-refroidissement du GN.....	26
Figure II.3 : Schéma de les echangeurs type Kettle et la colonne d'épuration.....	27
Figure II.4 : Schéma de processus de liquéfaction du Gaz Nature	29
Figure II.5 : Schéma de Système du refrigerant mixte (MR)	31
Figure II.6 : Schéma de circuit du mélange réfrigérant (MR)	34
Figure II.7 : Schéma de l'expander de GNL.....	35
Figure II.8 : Schéma de separation de l'hélium.....	37
Figure II.9 : schéma de stockage de GNL.	41

Chapiter III :

Figure III.1 : Echangeur de chaleur principal 15-MC05	43
Figure III.2 : Echangeur de chaleur du type bobiné	44
Figure III.3 : Resultats de calcul obtenu par le programme.....	52
Figure III.4 : L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction de K.....	53
Figure III.5 : Influence de La Surface d'échange S sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur	54
Figure III.6 : l'évolution de l'efficacité en fonction du flux de chaleur échang.....	55
Figure III.7 : Diagramme $E = f(Nut)$	56

Liste des tables

Chapiter I :

Tableau I.1: Les principales reserves du gn dans le monde	8
Tableau I.2 : Les principaux pays exportateurs de gaz naturel liquefie (GNL)	9
Tableau I.3 : Pourcentage molaire du GN.	15
Tableau I.4 : Utilisation des produits finis du GN.....	22

Chapiter III :

Tableau III.1 : Composition du fluide MR	42
Tableau III.2 : Donnees reels de l'echangeur de chaleur principale	48

Abstract:

In this humble work, our goal is to identify natural gas and determine its importance in the national economy so that our work addresses:

- ✚ Study of natural gas liquefaction in the new huge Skikda train (GLK1).
- ✚ Study the main heat exchanger 15-MD-05 and determine the very important role of this device in the process of watering.
- ✚ Study and calculate the efficiency of the main exchanger and develop an account program to facilitate its calculation.

ملخص:

في هذا العمل المتواضع ، تمثل هدفنا في تحديد الغاز الطبيعي وتحديد أهميته البالغة في الاقتصاد الوطني بحيث يتطرق عملنا إلى:

- ✚ دراسة عملية تسييل الغاز الطبيعي في قطار سكيكدة الضخم الجديد (GLK1).
- ✚ دراسة المبادل الحراري الرئيسي MD-05-15 وتحديد الدور الهام جدا لهذا الجهاز في عملية التميع.
- ✚ دراسة و حساب كفاءة المبادل الحراري الرئيسي و إنشاء برنامج عبر الماطلاب لتسهيل حسابها.

Introduction Générale

Introduction Générale [1]

Parallèlement au pétrole, l'énergie gazière occupe une place très importante dans le marché mondial grâce à ces réserves importantes. Sa propreté et sa souplesse d'utilisation, dispose d'atouts certains pour devenir une importante source d'énergie, et occuper ainsi une place d'avant garde dans la satisfaction du besoin énergétique mondial.

Le GNL est une technologie éprouvée depuis près de 56 ans, cette technologie a été lancée en 1963 en Algérie et qui est utilisée depuis de nombreuses années par plusieurs pays, notamment la France, la Belgique, l'Espagne, la Corée et les États-Unis. Il en va de même au Japon qui dépend à 100 % du GNL importé pour répondre à ses besoins en gaz naturel. Vu la richesse de l'Algérie en gaz et en pétrole, l'économie nationale se base essentiellement sur l'industrie des hydrocarbures. Cette industrie nécessitait l'implantation de diverses unités de traitement avec l'installation d'équipements coûteux. Dans ces conditions, les progrès techniques permettant de réduire ces coûts devraient jouer dans l'avenir un rôle majeur dans le développement du commerce international des hydrocarbures.

L'Algérie peine toujours à maintenir le niveau des volumes exportés au-dessus de 60 milliards de mètres cubes, L'Algérie est le deuxième plus gros exportateur de gaz naturel liquéfié vers l'Europe, selon les données du rapport 2018 du groupe international des importateurs de GNL (GIIGNL) publié lundi 1 avril 2019. L'Algérie, qui a exporté l'année dernière, 9.29 millions de tonnes vers le marché européen, arrive derrière le Qatar, premier plus gros exportateur, avec 16.42 millions de tonnes.

Le problème qui se pose est comment transporter cette quantité très importante de gaz naturel vers les pays importateurs dans des conditions optimums et on toute sécurité.

Le but du processus de liquéfaction du gaz est de réduire le volume du gaz naturel dans un rapport d'environ 600 à 1 afin de faciliter son transport dans des conditions optimums aussi bien sur le plan économique que sur celui de la sécurité.

Dans ce travail notre objectif consiste à étudier le processus de liquéfaction du GN au niveau du nouveaux méga-train de Skikda et d'estimer l'efficacité de l'échangeur principal cryogénique.

Ce mémoire est composé d'une introduction et trois chapitres:

- Chapitre I : Généralité sur le GNL et description du GL1K

- Chapitre II : Processus de Liquéfaction de GN

- Chapitre III : Etude de l'échangeur de chaleur principal cryogénique 15-MC05.

Et une Conclusion.

CHAPITRE I :

*Généralité sur le GNL et
description du GL1K*

I.1 Introduction:

Aujourd'hui, le gaz naturel liquéfié (GNL) est considéré comme l'un des principaux vecteurs énergétiques. Avec la demande croissante d'énergie, le gaz naturel est resté récemment la ressource énergétique fossile la plus consommée dans le monde. Selon l'organisme International Energy Outlook, U.S Energy Information 2013, il a estimé que la consommation du GN dans le monde augmenterait de 1,7% par an.

Durant les deux dernières décennies, les travaux scientifiques ont couvert plusieurs thèmes de recherche focalisés sur l'amélioration de la production du GNL, la rentabilité des installations industrielles et leurs équipements. Plusieurs chercheurs effectuent des études théoriques et expérimentales et s'intéressent à l'optimisation des processus et cycles de liquéfaction du GN.

Dans un contexte de réduction de la pression environnementale des énergies fossiles, le gaz naturel jouit d'un regain d'intérêt car c'est le combustible fossile le moins polluant. En effet, pour une même quantité d'énergie produite, la combustion du gaz naturel qui est constitué principalement de méthane génère moins de polluants et de gaz à effet de serre comparativement à d'autres combustibles fossiles.

L'acheminement du gaz naturel se fait, sous forme gazeuse par gazoduc ou par méthanier sous forme liquide (gaz naturel liquéfié). Le marché du gaz naturel liquéfié (GNL) est en plein essor et présente l'avantage de diversifier les approvisionnements et de réduire la dépendance énergétique vis-à-vis des pays qui fournissent le gaz naturel par gazoduc. Dans une usine de liquéfaction, une grande quantité d'énergie est consommée pour liquéfier le gaz naturel. Une partie de l'énergie dépensée lors de la liquéfaction est stockée dans le GNL sous forme liquide à une température de -162 °C et à pression atmosphérique. Une fois le GNL acheminé, il est comprimé, vaporisé et chauffé pour être commercialisé à travers un réseau de distribution.

L'objectif visé par cette recherche est le passage en revue des différents cycles cryogéniques destinés à la liquéfaction du gaz naturel. Et ce par l'examen des travaux scientifiques effectués lors des deux dernières décennies relatifs à l'étude des divers paramètres et fonctions thermodynamiques. Ce qui permettra de maîtriser en premier lieu les grandeurs thermiques et mécaniques qui sont à la base du dimensionnement des équipements de ces installations cryogéniques industrielles. Puis, mènera par la suite à la gestion des principaux organes de production notamment : les compresseurs cryogéniques, les échangeurs de chaleur, les refroidisseurs et les turbines à gaz ; et finalement aboutira à l'intervention en temps opportun afin de maintenir la production de GNL désirée. [2]

- Wen-sheng. Cao, Xue-sheng Lu, Wen-sheng Lin, An-zhong Gu (2006) [3]: Ont fait une étude sur la comparaison des paramètres de deux procédés de liquéfaction de GN. Le processus de liquéfaction du cycle de réfrigérant mixte (MRC) a été adopté dans le premier procédé, Évidemment les travaux des chercheurs mentionnés dans cet article ne concernent pas le procédé de liquéfaction à petite échelle du GN dans l'emballage skid-monté. Le calcul de simulation et l'optimisation des Processus ont été effectués en utilisant les équations d'état Peng-Robinson (PR) et Lee-Kesler-Plocker (LKP).
- Shahrooz Abbasi Nezhad, Bezhah Shabani and Majid Soleimani (2012) [4] : Ont effectué une analyse thermodynamique par la méthode exégétique d'un cycle de liquéfaction. Durant la description du procédé APCI (Air Product and Chemicals Incorporation), les deux étapes principales relatives au refroidissement et à la liquéfaction du gaz naturel sont évoquées au cours de ce processus. Le cycle de pré-refroidissement utilise le propane à cinq (05) niveaux de pression et peut refroidir le GN du processus jusqu'à -40 °C, Il se compose principalement d'une partie échangeur de chaleur, quatre (04) compresseurs et d'un condenseur.
- Ali Vatani, Mehdi Mehrpooya, Ali Palizdar (2014) [5]: Ont fait une analyse thermodynamique par la méthode exégétique avancée, effectuée pour cinq (05) des procédés de liquéfaction du GN (L'APCI, le C₃MR, LINDE, DMR (Double Mixed Réfrigérants) et MFC (Mixed Fluide Cascade), Les auteurs ont pu identifier les composants les plus inefficaces dans les processus de liquéfaction.
- Peyman Moein, Mehran Sarmad, Hadi Ebrahimi, Marziyeh Zare, Saeed Pakseresht, Shahrokh Zandieh Vakili (2015) [6]: Ont étudié l'optimisation du processus typique APCI de réfrigérant mixte d'un cycle de liquéfaction du GN. Le but visé est la détermination des conditions optimales de fonctionnement. Les auteurs ont montré qu'il n'y a pas de changement significatif dans les compositions MR dans cette gamme de pression. Qu'il n'y a pas de changement significatif dans les compositions MR dans l'intervalle de pression étudié.
- Tianbiao He, Yonglin Ju (2015) [7]: Ont proposé quatre (04) stratégies de configuration du cycle d'expansion de liquéfaction pour les installations à l'échelle distribuée de GNL, à savoir les expanders étagés, le cycle de pré-refroidissement unique, la régénération et le mélange d'un fluide de travail (l'azote). Les auteurs ont optimisé par algorithme génétique à facteur de mérite (FOM) maximale pour une synthèse optimale. Le cycle de liquéfaction optimisé comporte deux cycles : le cycle de pré refroidissement R410A et le cycle d'expansion de l'azote.

➤ Mohd Shariq Khana, I.A. Karimi, Alireza Bahadori, Moonyong Lee (2015) [8]: Ont fait une étude la méthode de recherche aléatoire de coordonnées séquentielles connue sous l'appellation Séquentiel Coordinat Random Search (SCRS) pour optimiser les usines de traitement du GNL. La recherche de coordonnées est basée sur l'idée de minimiser la fonction multi-variable en considérant une variable à la fois. Les auteurs ont optimisé les deux procédés de liquéfaction de GN établis par SMR et C₃MR.

Divers résultats ont été obtenus par diverses méthodologies utilisées par les chercheurs et conduisent globalement à l'amélioration des performances des unités de production du GNL.

Le processus de liquéfaction de gaz naturel est effectivement un système thermique complexe et dynamique. Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique qui a concerné des études théoriques et expérimentales, elle a mis en évidence l'intérêt accordé à l'optimisation des processus et divers cycles de liquéfaction du GN. Divers résultats ont été obtenus par diverses méthodologies utilisées par les chercheurs et conduisent globalement à l'amélioration des performances des unités de production du GNL. Ce qui constitue les fondements de notre thèse visant l'importance de ces performances énergétiques du GNL.

I.2 Historique du GNL

La première usine de GNL a été construite en Virginie (USA) en 1912. Cette usine était du type peak shaving.

A la différence des usines à flux continu, ce type d'usine liquéfie le gaz naturel pendant les périodes de basse consommation pour le vaporiser et le réinjecter dans le réseau de distribution pendant les périodes de consommation de pointe.

En 1941, à Cleveland (USA) fut mis en service un autre 'peak shaving' qui fut malheureusement le siège d'un accident important qui s'est traduit par la mort de 128 personnes en 1944.

Par la suite, au début des années 50, aux USA, il a été envisagé de transporter du gaz naturel, liquéfié en Louisiane et transporté sur le Mississippi par barges. Ce GNL était destiné à être utilisé comme réfrigérant dans les abattoirs de Chicago.

En 1954, la France et l'Angleterre s'engagèrent dans la recherche de solutions pour permettre de transporter du GNL par voie maritime, dans la perspective d'importer du gaz du moyen orient.

Compte tenu des bases températures, les recherches se sont concentrées sur deux préoccupations:

- Le choix des matériaux constituant les cuves.
- Les isolants (protection de la cuve des navires et limitation des déperditions de chaleur).

En 1959: Conversion du cargo Méthane Pionner pour transporter du GNL dans des cuves en alliage d'aluminium entre les Etats Unis et la Grande Bretagne, ce qui a donné le jour au transport commercial du GNL. Sept (07) traversées ont été réalisées en France, c'est un liberty ship, le Beauvais, qui a été converti pour tester différents types de cuves. (Les liberty ship sont des cargos construits en masse aux USA durant la seconde guerre mondiale pour ravitailler les forces alliées).

En 1962: Premières commandes (Méthane Pionner et Méthane Progress en Grande Bretagne, Jules Verne en France).

En 1964-1965: Démarrage de la première chaîne commerciale de GNL à grande échelle comprenant:

- Le gisement de gaz de Hassi R'Mel dans le Sahara algérien (HR1 découvert en 1956).
- L'usine de liquéfaction de la CAMEL (Arzew Algérie)
- Trois méthaniers (Méthane Princes, Méthane Progress, Jules Verne, rebaptisé CINDERELLA et qui est en service à ce jour).
- Les terminaux de Canvey Island (Grande Bretagne) et Havre (France) pour réceptionner et regazéifier le GNL avant expédition sur le réseau des consommateurs.

En 1969: Démarrage de l'usine de Kenai (Alaska).

A partir du début des années 1970, démarrage d'usines en Afrique (Libye, Algérie) et en Asie du sud Est (Indonésie).

En 1977: Démarrage de la première usine de GNL au Moyen Orient (Das Island à Abu Dhabi).

A partir de la fin des années 1970, augmentation progressive des capacités de production avec le démarrage d'usines:

- En Asie du Sud Est (Indonésie, Malaisie, Brunei).
- En Australie.
- En Afrique (Algérie, Nigeria, Egypte).
- Au Moyen Orient (Abu Dhabi, Qatar, Oman).
- En Amérique du Sud (Trinité et Tobago).

Aujourd'hui, la grande majorité des usines de liquéfaction dans le monde utilisent le procédé **APCI** (Air Product and Chemicals Incorporation).

I.2.1 Le gaz naturel dans le monde et en Algérie:

a) Dans le monde:

Le gaz naturel s'est formé il y a des millions d'années à partir des dépôts organiques au fond des océans ou des lacs.

On le trouve en gisement sec (accompagné parfois de gouttelettes dispersées de pétrole parce que le pétrole a " fui " ailleurs, ou parce qu'il ne s'est pas formé en quantité suffisante).

On le trouve également en gisement humide (associé au pétrole). Le plus souvent, le gaz, moins lourd, occupe la partie supérieure de la cavité appelée " roche magasin ", l'étoile, la partie moyenne, et de l'eau salée, la partie basse.

Il arrive aussi que le gaz naturel soit seul. Il est épuré et traité avant d'être utilisé. Souvent, il faut le séparer des gouttelettes d'hydrocarbure liquide se trouvant en suspension dans le gaz, (dégazolinage et extraction des GPL).

Dans le tableau suivant, voici quelques éléments d'appréciation des principales réserves prouvées de gaz naturel dans le monde (en m3)

Tableau I.1: Les principales réserves du GN dans le monde. [9]

	Pays/Region	Réserves prouvées de gaz naturel (Trillion m ³)
1	Russie	47,805
2	Iran	33,721
3	Qatar	24,072
4	États-Unis	15,484
5	Arabie saoudite	8,619
6	Turkménistan	7,504
7	Émirats arabes unis	6,091
8	Venezuela	5,740
9	Nigeria	5,475
10	Chine	5,440
11	Algerie	4,504
12	Iraq	3,820
13	Indonesie	2,866

Exportateurs de GNL: Le GNL recense dans le monde 20 pays exportateurs (en comptant le Yémen, dont l'unique terminal est à l'arrêt en raison de la guerre civile), avec une capacité totale de 340 millions de tonnes par an. Le tableau suivant donne le détail des exportations (effectives, et non la capacité) par pays en 2016. Ou l'Algérie se trouve à la sixième place parmi les plus grands exportateurs de GNL au monde.

Ce tableau n'inclut pas les petites quantités réexportées par certains pays (notamment la Belgique et la France) lorsque les approvisionnements contractés auprès de leurs fournisseurs dépassent leur besoin.

Tableau I.2: Les principaux pays exportateurs de gaz naturel liquéfié (GNL) [9]

Pays	Volume (Mt/an) 2016	Terminaux	Principaux client
Qatar	79,62	Rasgas, Qatargas	Leader depuis 2006. Asie et Europe
Australie	44,62	Sept sites différents	forte croissance. Asie
Malaisie	25,08	Bintulu, Satu (flottant)	Asie
Indonésie	19,95	Bontang, Tangg	Fut leader du marché jusqu'en 2006. Asie
Nigeria	17,78	Bonny Island	Valorisation de gaz associé
Algérie	11,44	Arzew, Skikda	Europe. Historiquement le premier exportateur
Russie	10,70	Sakhaline	Japon
Trinité-et-Tobago	10,46	Point Fortin	Pays d'Amérique
Oman	8,12	Qalhât	Corée du sud et Japon
Papouasie-Nouvelle-Guinée	7,66	Port Moresby	Japon, Chine
Brunei	6,29	Lumut	Japon
Émirats arabes unis	5,86	Île de Das	Japon
Norvège	4,49	Snohvit	Europe
Pérou	4,01	Pampa Melchorita	Mexique
Guinée équatoriale	3,37	Bioko	Inde
États-Unis	2,64	Sabine Pass, Kenai	Chili, Mexique
Angola	0,76	Soyo	Inde (hors service une partie de l'année)
Yémen	0	Bal'haf	Hors service (guerre civile)

b) En Algérie:

Le secteur des hydrocarbures en Algérie connaît depuis quelques années un développement considérable au regard de l'importance du nombre de projets inscrits dans le cadre d'un partenariat stratégique avec des compagnies pétrolières internationales disposant de moyens financiers et technologiques.

La découverte du gaz naturel pour la première fois en Algérie, remonte à l'année 1956 mois de novembre dans les champs de HASSI R'MEL et AIN AMENAS au sud du pays, ces champs renferment l'une des plus importantes réserves mondiales du gaz naturel, par la suite ils se sont reliés aux usines de production du gaz naturel liquéfié (GNL) aux cotes .Est et Ouest du pays (Skikda et Arzew), par des gazoducs comme moyen d'acheminement. La première compagnie algérienne du gaz nommée (CAMEL) a été installée à Arzew en décembre 1961, par les sociétés françaises (Air liquide et Sn rupal), et la société anglais (Conth international).

L'Algérie est un pays traditionnellement fournisseur de gaz naturel à l'Europe depuis 1964, d'abord en Angleterre, puis en France, à travers les flux de GNL. SONATRACH joue un rôle important dans l'économie algérienne. Il convient de noter que la SONATRACH procure plus de 95% des recettes d'exportation du pays et qu'elle assure plus de 51 % des recettes budgétaires.

SONATRACH est classée comme étant la treizième compagnie pétrolière mondiale, deuxième exportateur en GNL et GPL, troisième en gaz naturel et premier exportateur de condensat. En 1973, presque 85 % de la production était constituée de pétrole brut. La part de pétrole brut représente actuellement à peine 25 % des exportations, le reste étant réalisé par le gaz naturel sous forme GNL, c'est-à-dire liquéfié, ou par gazoduc, le GPL, le condensat et les produits raffinés.

En 2003 l'Algérie a assuré une production brute de gaz naturel de 85 Milliards, y compris la consommation nationale ; en 2010 le volume des exportations sera de 85 Milliards de mètre cube et comme il y a des besoins de gaz en réinjection et en consommation locale, il y aura donc une production de 117 milliards de mètres cubes et en 2020 de 172 milliards de mètres cubes.

L'Algérie a exporté la majorité de son gaz, soit un volume de 53 milliards de mètres cubes vers l'Europe en 2003, essentiellement vers l'Espagne, 26%, l'Italie, 45 %, et la France 17 %, et il y a bien sûr les autres pays tels que la Belgique, le Portugal, la Grèce, sans parler aussi de la Turquie, de la Slovénie, de la Tunisie et des Etats-Unis d'Amérique.

Actuellement l'Algérie exporte 62 milliards de m³/an de gaz naturel dont la moitié environs sous forme de GNL. Au horizon 2010, l'Algérie compte porter ses exportations totales de gaz à 82 milliards de m³, et davantage encore vers 2012 avec l'entrée en service de deux importants projets de production de GNL avec une capacité de 4,5 millions chacun.

Dans la Conférence Internationale sur l'Industrie du Gaz en Algérie tenue, au Centre des Conventions d'Oran (2014) :

L'expérience algérienne dans l'industrie du GNL mise en exergue à Oran : Des communications portant sur l'évolution du processus GNL et sa maîtrise, ainsi que sur la stratégie de SONATRACH sur le marché mondial du GNL, ont été données par plusieurs intervenants.

A été surtout marquée par la célébration du cinquantenaire de la mise en service, en 1964, de la première usine de liquéfaction du gaz naturel au monde, la CAMEL, à Arzew. Cette journée, consacrée au deuxième axe de la conférence internationale, "50 ans dans l'industrie du gaz naturel liquéfié (GNL)" a été mise à profit pour mettre en évidence et valoriser l'expérience de l'Algérie dans l'industrie du gaz naturel liquéfié. Des communications portant sur l'évolution du processus GNL et sa maîtrise, ainsi que sur la stratégie de SONATRACH sur le marché mondial du GNL, ont été données par plusieurs intervenants. L'aventure du GNL a commencé en septembre 1964 avec la livraison par la Compagnie Algérienne de Méthane Liquide (CAMEL), à partir du port d'Arzew, de la première cargaison de 27.000 m³ de méthane algérien à bord du navire "Méthane Princess" à destination du terminal de regazéification de Canvey Island en Grande Bretagne. Celui-ci est arrivé à destination le 12 octobre 1964, après un voyage de 1600 miles (2600 km). L'ère moderne du GNL avait ainsi commencé. C'était également le début du transport de grande distance pour ce type de cargaison. , tout en indiquant que les premières livraisons de GNL ont été faites vers la Grande Bretagne, puis la France.

Ensuite, revenu sur le développement de cette industrie, ses différentes étapes depuis la pose de la première pierre, en 1962, jusqu'à l'arrêt de la production, en 2010, en passant par les différentes réalisations dans le domaine du GNL. "La CAMEL, le doyen des complexes gaziers, est la première réalisation mondiale à l'échelle industrielle, une référence pour les usines de GNL", va-t-il dit. L'usine a constitué un "facteur important" de développement et a donné "le coup d'envoi à la construction de nouveaux [10]

Les complexes : ils ont été un facteur important de l'essor du développement du GNL dans le monde", s'est intéressés au développement des unités de GNL en Algérie. En effet, depuis la CAMEL, l'Algérie n'a pas cessé de développer son industrie de GNL, jusqu'à devenir le 4ème exportateur mondial de ce type de produit. Quatre phases essentielles ont été nécessaires pour arriver à cette performance. La première, appelée "Pionnier", de 1964 à 1971, a permis le démarrage de l'industrie dans notre pays, suivie de la phase dite "Expansion", 1971-1990, qui a donné lieu à la construction de trois autres complexes GNL et à la hausse de la production, passant de 2,7 millions de mètres cube de GNL par an à 51,4 millions de mètres cubes. La troisième étape, 1990-2001, concerne la rénovation des équipements, la mise en place du système d'information et l'amélioration de la performance et est appelée "Maturité et défis". De 2001 à nos jours, phase de "Consolidation de position", concerne, "la veille réglementaire, la veille technologique et la veille de développement et rajeunissement". Actuellement, la production de GNL est passée à 60,70 millions de m³ cubes par an. Cette phase a vu la réalisation de deux nouveaux méga trains de production et à la certification iso 9001 et iso 14001, ainsi que la certification concernant la sécurité des travailleurs OSHAS 18001. "Cinquante ans de performance", a commenté l'orateur.

I.2.2 Utilisation du gaz naturel :

Le gaz naturel joue un rôle majeur dans l'approvisionnement énergétique, rôle qu'il devrait continuer à jouer dans le bouquet énergétique de demain.

✓ Le marché résidentiel :

Il est connu surtout pour son usage domestique, le chauffage et la cuisson, et 30% de la consommation du gaz naturel au niveau mondial est destinée à ce secteur.

✓ Le secteur industriel :

Le gaz naturel est utilisé comme matière première dans l'industrie chimique, notamment pour la pétrochimie et le raffinage. A titre d'exemple, on peut citer la synthèse de l'ammoniac et de l'urée, et la synthèse du méthanol utilisé comme base d'additif des essences. Au niveau mondial, la part du gaz utilisée comme matière première est très faible (4%) par rapport à son utilisation industrielle.

✓ La production d'électricité :

Depuis une dizaine d'année, le secteur électrique est devenu le moteur principal de l'augmentation de l'utilisation du gaz naturel dans le monde, une tendance qui devrait se poursuivre. D'ici 2020, le secteur électrique devrait absorber environ 35% du gaz commercial chaque année contre 30% aujourd'hui avec une demande importante de la part des pays émergents.

✓ Le transport :

Plusieurs millions de véhicules fonctionnant au gaz naturel circulent dans monde, et les moteurs au gaz naturel offrent par ailleurs un bon rendement énergétique combiné à un potentiel important de réduction d'émissions de CO₂.

Les 2/3 des réserves mondiales de gaz naturel sont essentiellement concentrées en Russie et au Moyen-Orient (Iran et Qatar), et les réserves mondiales ont augmentées de 15% depuis 2000.

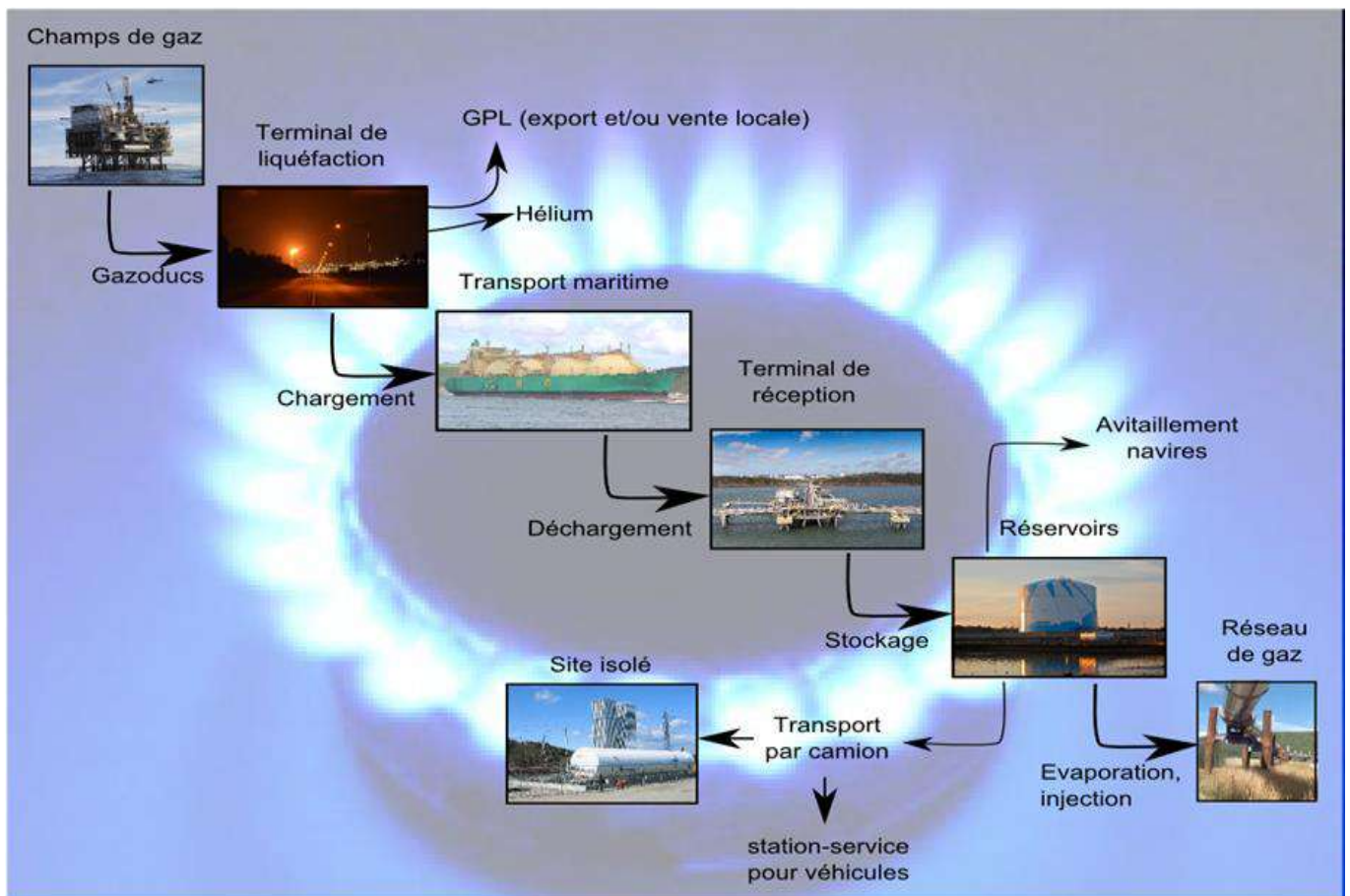


Fig I.1: Utilisation du gaz naturel

I.3 Description du nouveau train de liquéfaction de SKIKDA « Méga-Train GL1K »

I.3.1. Situation géographique :

Le nouveau train de GNL (MEGA-TRAIN) est situé à l'intérieur de l'enceinte du complexe, au nord-ouest du GL1K (train de liquéfaction actuel), le nouveau train vient pour réaliser la production en GNL qui permet de satisfaire toute la demande des clients, qui ne cesse d'augmenter d'une année à une autre, notamment avec l'arrêt des unités U20, U30 et U40 suite à l'incident du 19/01/2004.

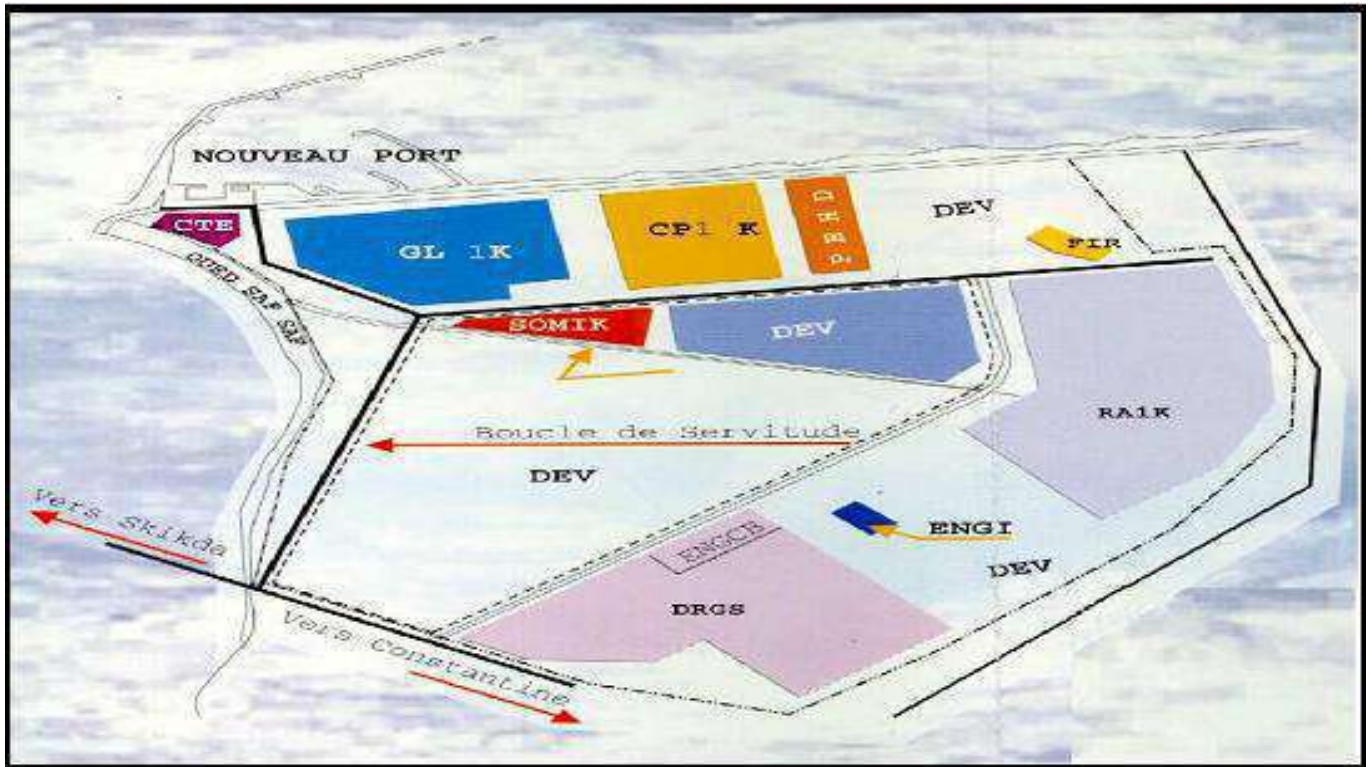


Fig I.2: Situation géographique du complexe GL1K dans la zone industrielle de Skikda

I.3.2. Caractéristiques de production :

Le Nouveau Train de GNL a été conçu pour une capacité de production de **4,5 Millions** de tonnes de GNL par an, et peut fonctionner avec ou sans extraction des sous-produits (Ethane, Propane, Butane, Gazoline). Une charge de gaz enrichi en Hélium est également produite pour alimenter l'usine de production d'Hélium mitoyenne (HELISON). En retour, Helison renvoie de l'azote gazeux et du Fuel Gaz (**48%** azote, **52%** méthane). Etant donné que l'usine Helison est aussi alimentée en gaz enrichi en hélium par les unités existantes de **GNL1K**, l'azote et le Fuel Gaz retournés sont aussi utilisés par ces unités.

I.3.3.Composition du gaz naturel d'alimentation (GN) :

Le GN qui alimente GL1K, sous une pression de 42 bars et une température (25°C) est composé de (voir tableau ci-dessous après les analyse de Labo de GL1K) :

Tableau I.3: Pourcentage molaire du GN, (GL1K analyse de Labo).

Composant	Molaire %
Hélium	0.19
Azote	5.78
Méthane	82.49
Ethane	07.27
Propane	2.35
Isobutane	0.47
Normal-butane	0.68
Iso-pentane	0.15
Normal-pentane	0.19
Hexane	0.23
CO2	0.21
H2O	0.01

I.3.4 Présentation des différentes unités :

I.3.4.1 Les utilités :

Ces installations fournissent les utilités nécessaires au fonctionnement du Nouveau Train de GNL.

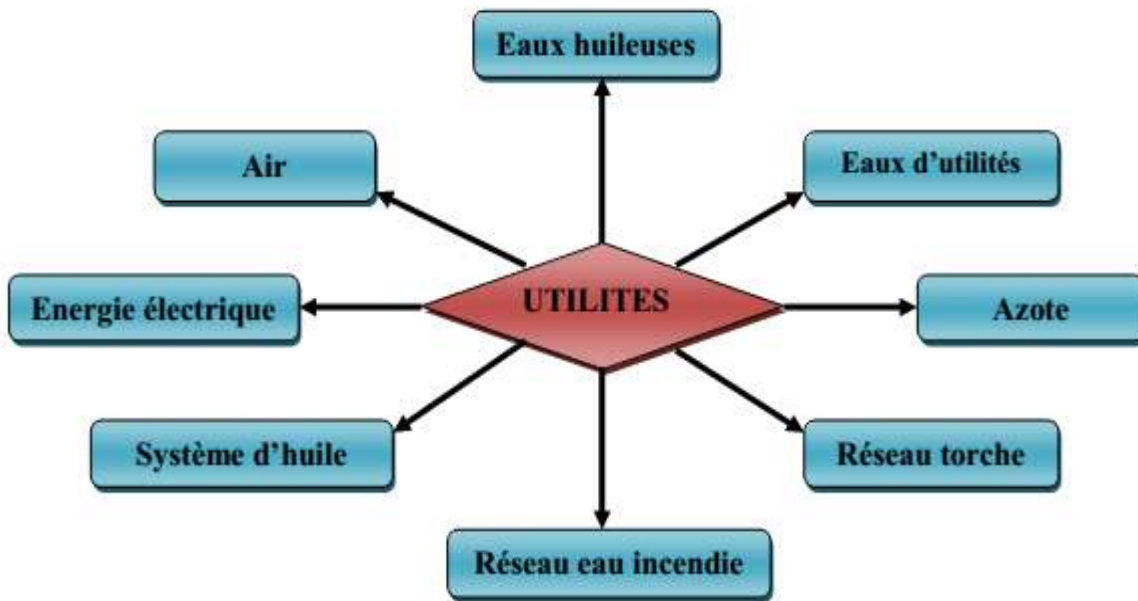


Fig I.3: Utilités du MEGA-TRAIN

a. L'énergie électrique :

- **5 Générateurs diesel** d'une puissance unitaire de **1,8 MW**.

Ces équipements servent à fournir l'énergie électrique nécessaire pour le démarrage et pour l'arrêt sécurisé des installations.

- **5 Turbos générateurs** (turbines à gaz entraînant des alternateurs) d'une puissance unitaire de **25 MW**.

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

- **6 Sous stations** pour la distribution électrique.

b. Production d'air instrument et d'air service :

- **3 Compresseurs** d'une capacité unitaire de **3300 Nm³/heure** (Normo Mètre Cube/heure), munis d'une batterie de sécheurs et de ballons de recette associés.

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

c. Eaux huileuses et pluviales :

Le but de ce système est de récupérer les eaux contaminées ainsi que les eaux de pluie à partir de l'ensemble de l'usine.

Les eaux contaminées sont séparées par différence de densité avant d'être rejetées comme eau propre dans le canal de rejet eau de mer existant.

L'huile récupérée est brûlée à la torche chaude, la collecte d'eau se fait dans 6 bassins implantés dans l'ensemble de l'usine.

d. Eaux d'utilités :

✓ Eau industrielle ou de service :

Cette eau soutirée à partir du réseau du complexe GL1/K, elle est stockée dans un bac. Ce bac a une capacité de 610 m³. Il est équipé de 2 tubulures de sortie placées l'une au-dessus de l'autre. La tubulure de fond alimente une pompe pour maintien le réseau incendie en pression, et la tubulure supérieure alimente le réseau eau de service (nettoyage, échantillonneurs) et le package d'eau potable.

✓ Eau déminéralisée :

Elle est utilisée pour alimenter:

- Les unités de décarbonatation et de stockage MDEA pour appoint et lavage
- Le système de lavage des turbines à gaz.
- Le laboratoire.
- L'unité de refroidissement en appoint.

e. Le réseau d'azote :

Le nouveau train de GNL ne dispose pas d'équipements de production d'azote, à l'exception d'une bouteille de stockage liquide et d'évaporateurs. Il est connecté sur le réseau de GL1/K qui est alimenté en azote gazeux par :

- Complexe COGIZ à partir du complexe d'extraction d'hélium (HELISON) où l'azote est extrait à partir de la charge de gaz riche en hélium envoyée par le nouveau train et le complexe GL1/K.
- Complexe MESSER ALGERIE où l'azote est extrait à partir de l'air.

f. Système torche et brûlot :

- Une torche recevant les effluents gazeux des unités du Nouveau Train de GNL et du complexe existant. La hauteur de cette torche est de 150 m. Elle est montée sur un seul derrick comprenant 3 futs (2 pour le Nouveau Train et 1 pour les unités existantes de GL1K).
- Une torche basse pression (torche confinée) recevant le torchage de boil off du nouveau Train de GNL et du complexe GL1K existant.
- Un brûlot recevant les liquides torchés à partir du Nouveau Train de GNL et du complexe existant.

g. Réseau anti incendie :

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

h. Système d'huile chaude :

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

- Unité 08 stockage d'huile : Stockage de l'huile et compensation des pertes par appoint aux unités.
- Unité 18 Chauffage d'huile pour les échangeurs du traitement du gaz et pour le réchauffeur de Fuel Gaz.
- Unité 58 : Chauffage d'huile pour les échangeurs du fractionnement et pour le réchauffeur de gaz naturel.

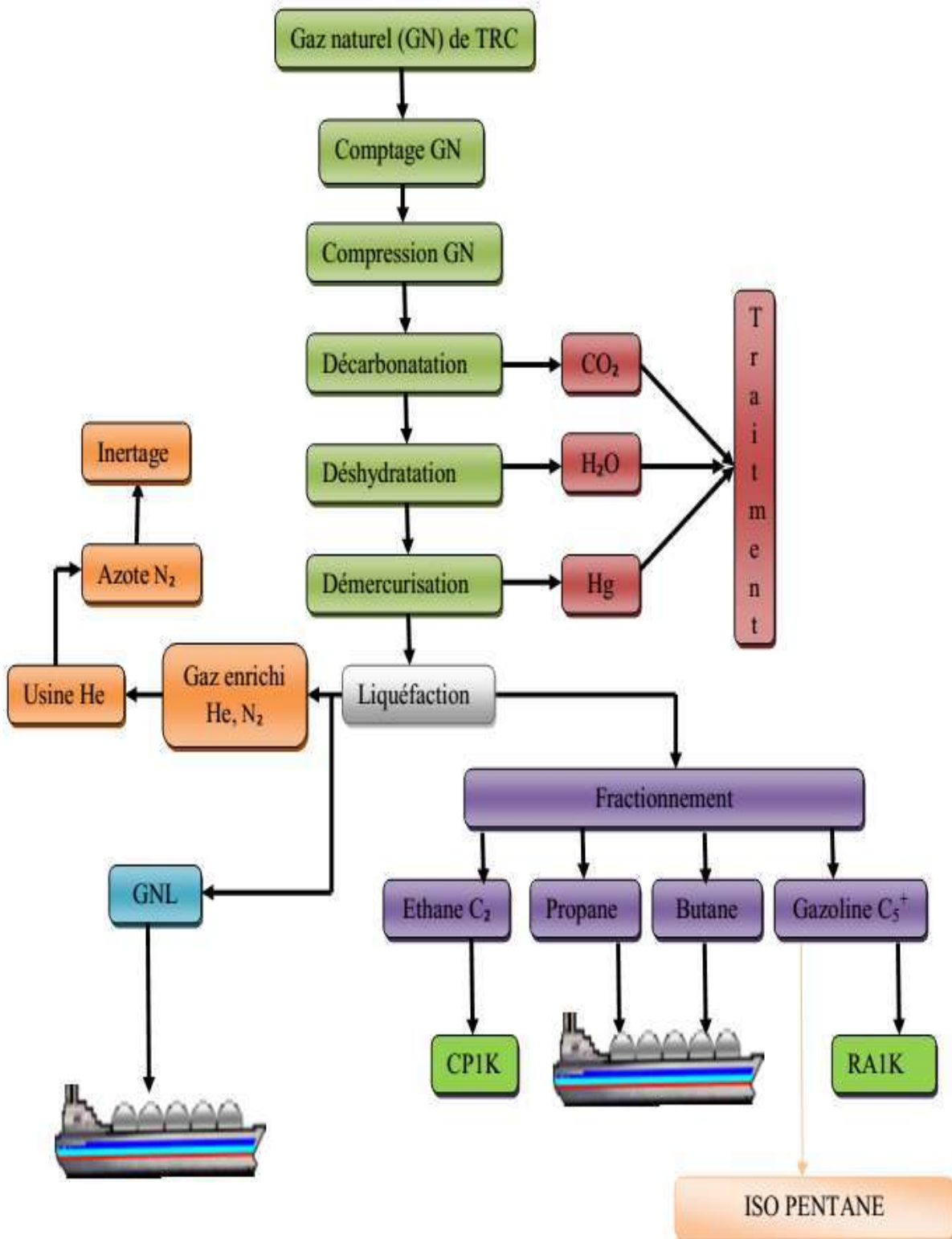


Fig I.4: Le schéma synoptique du processus du MEGA-TRAIN

I.3.4.2 Unité de comptage :

Son rôle est de compter les quantités de GN consommées, le comptage sert à fournir les éléments nécessaires pour le calcul des divers bilans de l'usine ainsi que pour les besoins de facturation avec le fournisseur RTE.

I.3.4.3 Unité de compression :

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

I.3.4.4 Unités de traitement :

- **Unité de décarbonatation :** Durant le processus de liquéfaction, le gaz naturel est refroidi progressivement de +35°C à -162° C. L'élimination du CO₂ contenu dans le gaz naturel est nécessaire, pour éviter la solidification et le bouchage de l'échangeur principal.
- **Unité de déshydratation :** L'eau contenue dans le gaz naturel se solidifie et provoque le bouchage de l'échangeur principal d'où la nécessité de l'extraire.
- **Unité de démercurisation :** Le système de démercurisation est conçu pour éliminer le mercure du gaz d'alimentation et empêcher la corrosion des sections cryogéniques de l'usine.

I.3.4.5 Unité de liquéfaction :

La liquéfaction est la sixième étape dans le processus de production de GNL, c'est la plus importante, elle consiste à combiner entre l'abaissement de la température du gaz et l'augmentation de sa pression, c'est-à-dire en comprimant suffisamment le gaz puis on enlève sa chaleur par le biais d'un fluide réfrigérant (MCR), dans l'échangeur principal, ce fluide à son tour sera auto-refroidi à contre-courant dans le même échangeur cryogénique, ensuite par échange de chaleur dans des condenseurs dont le fluide réfrigérant est le propane, la chaleur du gaz naturel est ainsi enlevée, le GN est liquéfié à une température de -162°C sous la pression atmosphérique est stocké dans un bac de 150 000m³.

I.3.4.6 Unité de fractionnement :

▪ But de l'unité de fractionnement :

Séparer les constituants dits "lourds" du gaz naturel, ceci afin de respecter les spécifications commerciales du GNL. Ces constituants sont:

- L'éthane
- Le propane
- Le butane
- La gazoline (C5+)

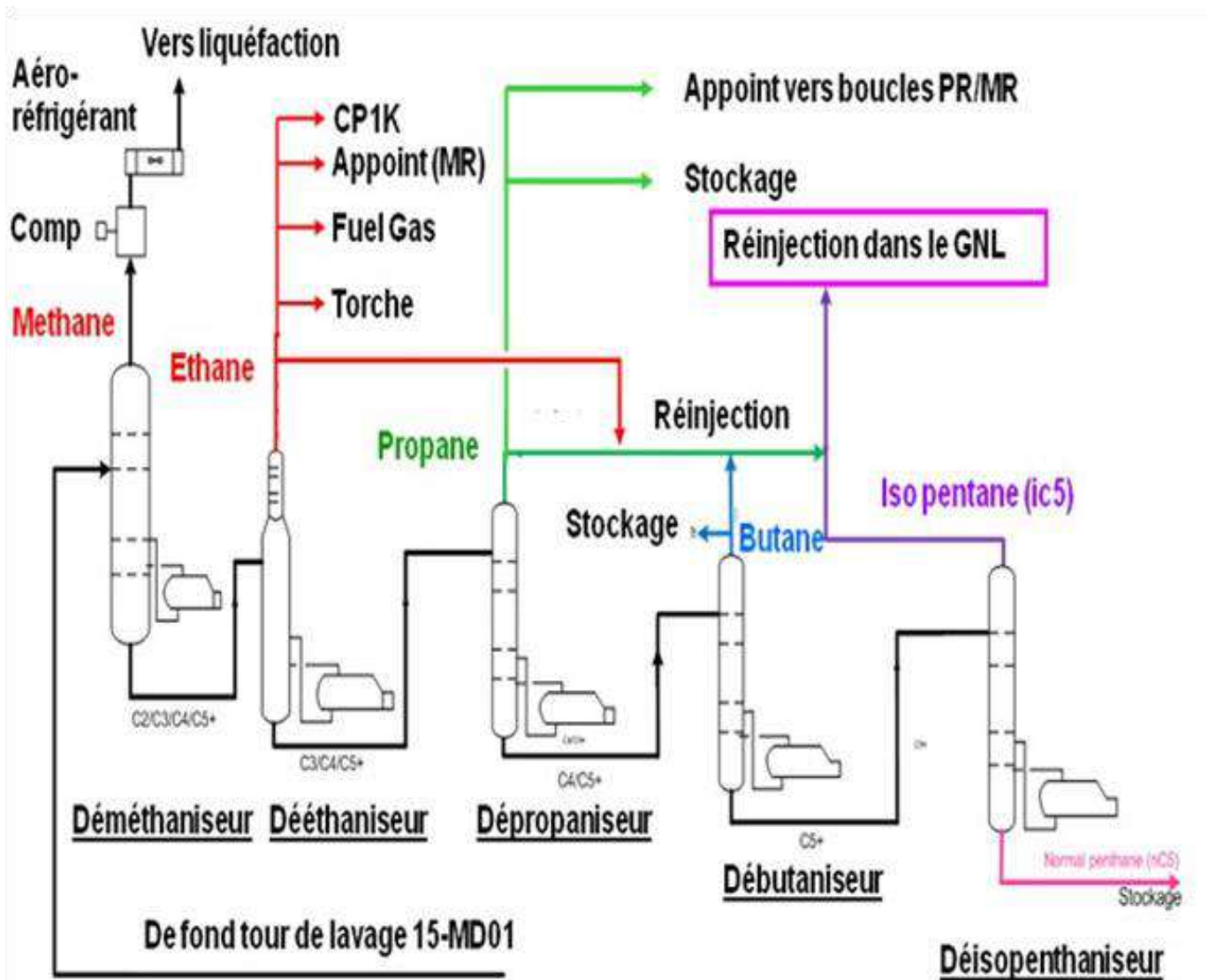


Fig I.5: Schéma simplifié de fractionnement

Remarque: Le nouveau Train de GNL est dimensionné pour pouvoir aussi fonctionner avec réinjection totale de ces produits.

▪ **Utilisation des produits :**

Les différentes utilisations des produits finis (les lourdes du GN) sont montrées dans le tableau suivant:

Tableau I.4: Utilisation des produits finis du GN

Ethane	<ul style="list-style-type: none">- Alimentation CP-1/K- Réinjection dans le GNL- Réinjection dans le Fuel Gas- Appoint dans la boucle MR
Propane	<ul style="list-style-type: none">- Stockage et expédition- Réinjection dans le GNL- Appoint dans la boucle PROPANE
Butane	<ul style="list-style-type: none">- Stockage et expédition- Réinjection dans le GNL
Gazoline (iC5)	<ul style="list-style-type: none">- Réinjection dans le GNL
Gazoline (nC5)	<ul style="list-style-type: none">- Stockage et expédition vers RA-1/K

I.3.4.7 Stockage des produits finis :

❖ Un bac de stockage de GNL de **150000 m3**. Il est du type confinement intégral avec une structure extérieure en béton armé précontraint à toit suspendu et une cuve interne en acier à **9%** de nickel.

Les gaz d'évaporation des bacs « Boil off » et de retour des méthaniers durant le chargement sont repris par des compresseurs et envoyés dans le réseau Fuel Gaz et/ou recyclés à l'entrée de l'unité de liquéfaction du Nouveau Train de GNL.

❖ Un bac de stockage de propane de capacité totale de **66000 m3** (type confinement intégral).

❖ Un bac de stockage de butane de capacité totale de **66000 m3** (type confinement intégral).

❖ Une unité de réfrigération de **GPL** (propane et butane).

Cette unité reçoit :

➤ Les gaz d'évaporation des bacs de propane et de butane du Nouveau Train. Ce « Boil off » est liquéfié puis est renvoyé au stockage au nouveau train.

➤ Le retour gaz des navires GPL durant les chargements. Ce « Boil off » est liquéfié puis est renvoyé au stockage au Nouveau Train.

➤ Le butane et le propane chauds venant de la Raffinerie de Skikda (**RA1K**). Ces produits sont sous-refroidis puis renvoyés au stockage dans les bacs du Nouveau Train de GNL.

❖ Une sphère de stockage de gazoline de capacité totale de **3760 m3**.

CHAPITRE II :

Processus de Liquéfaction de GN



II.1 Liquéfaction de GN :

La distribution de gaz naturel sous sa 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 par un facteur de 600:1 pour être transformé en gaz naturel liquéfié (GNL). Les sociétés qui commercialisent le gaz naturel utilisent généralement des unités de liquéfaction GN pour liquéfier et transporter le gaz naturel.

Le gaz naturel est un carburant brûlant sans résidu, plus efficace que le charbon par exemple. Obtenir du gaz naturel via le GNL pour les pays ne possédant pas leurs propres sources de gaz naturel peut être bénéfique pour la qualité de l'air si le gaz naturel est brûlé comparé à des sources d'énergie moins écologiques.

II.2 Objectifs de liquéfaction :

- Réduire la température du gaz naturel à -162°C
- Pour la même quantité d'énergie, le volume est réduit environ 600 fois comparé au gaz
- Concentrer l'énergie dans un plus petit volume pour le transport

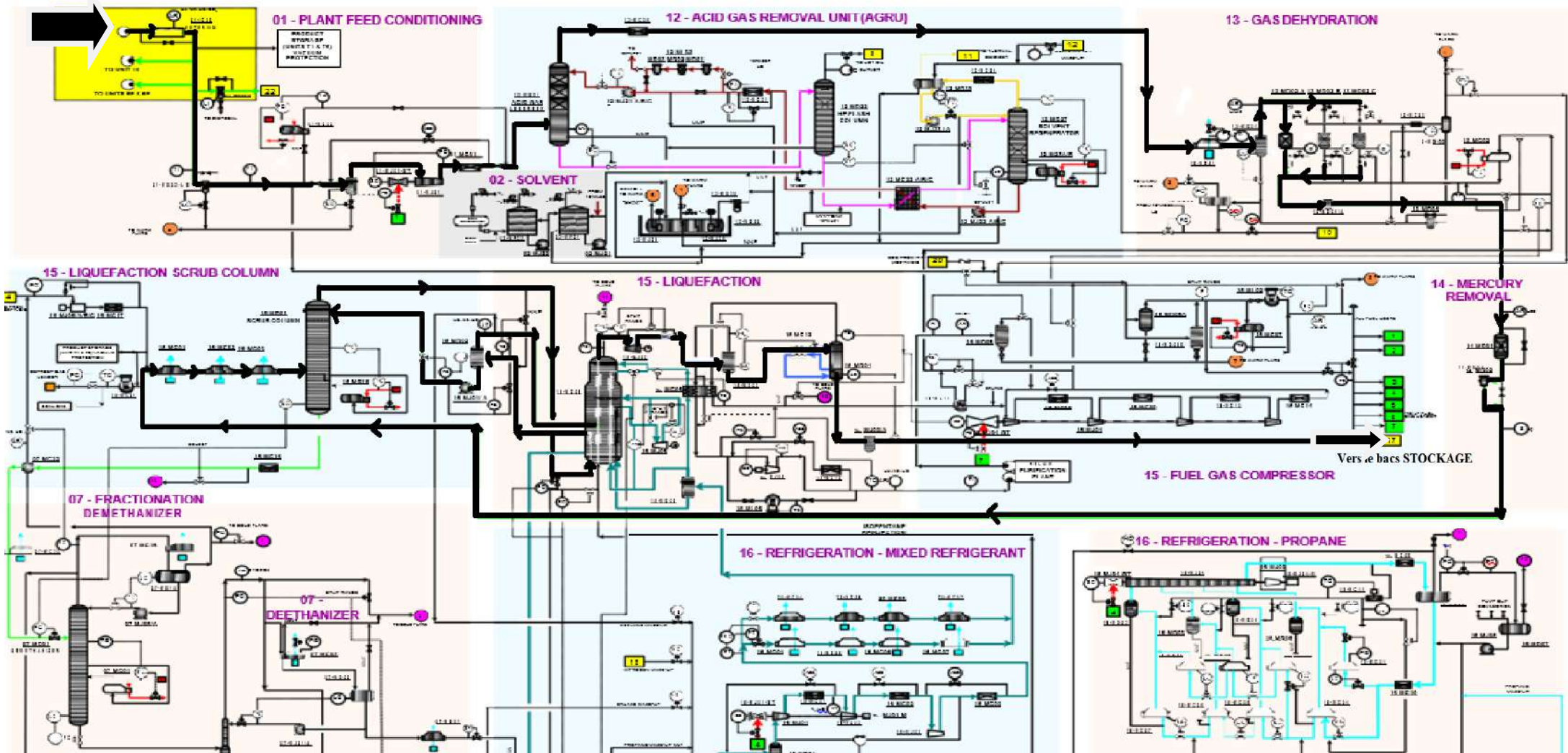


Fig II.1 : Schéma de principe de liquéfaction du Gaz Naturel

II.3 Pré-Refroidissement :

Le gaz d'alimentation venant du système de démercuration à un débit de 813 049 kg/h se mélange avec le gaz de recyclage venant du système compresseur de recyclage du BOG (Boil-Off Gas) dont le débit est de 27 172 kg/h.

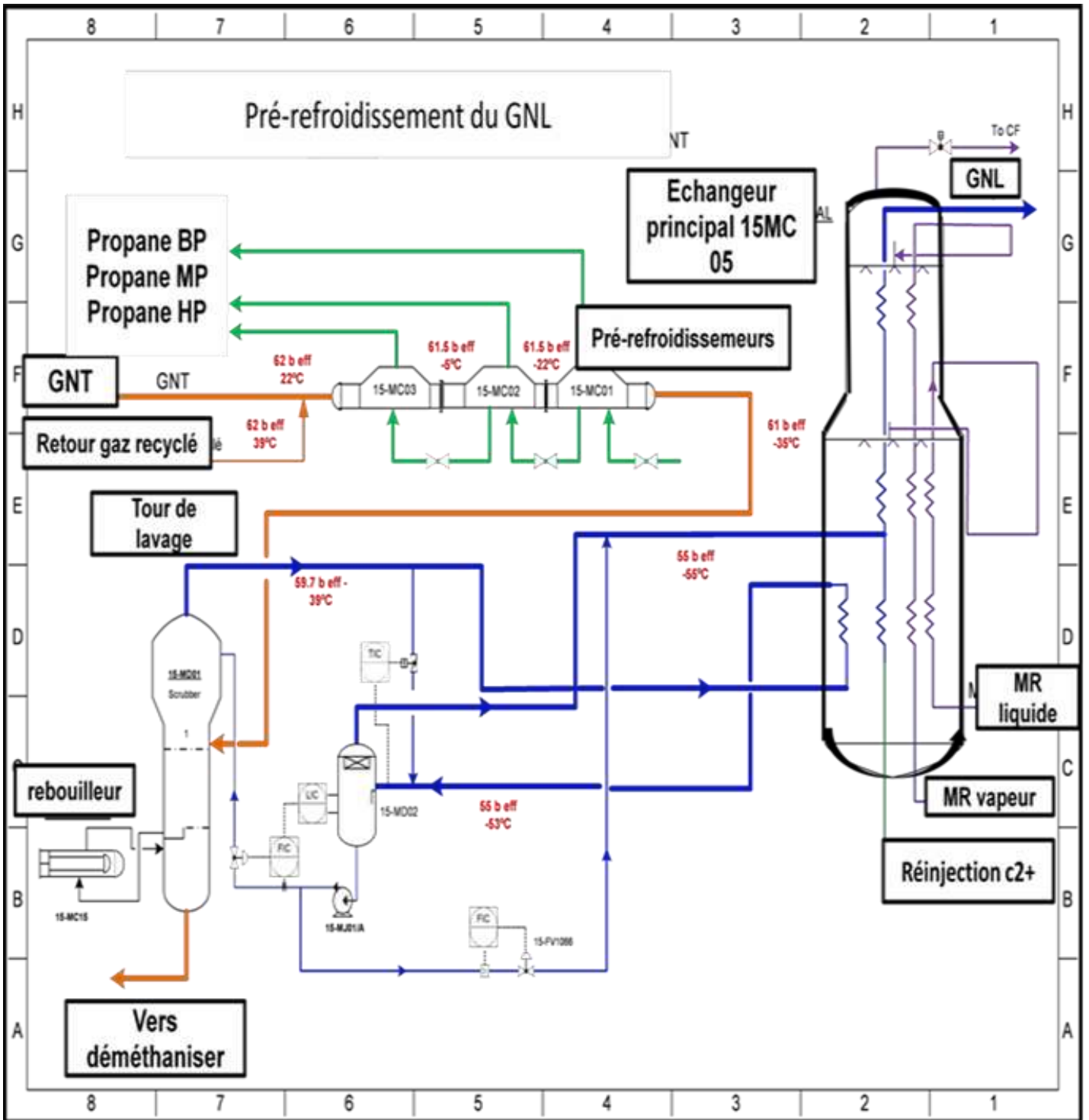


Fig II.2 : Schéma de pré-refroidissement du GNL

Ce mélange de gaz circule à travers les refroidisseurs de gaz d'alimentation propane HP, MP, BP 15-MC01/2/3 à un débit de 840 221 kg/h à 22°C et 62 bars eff. Ceci permet de baisser sa température à -35°C et condenser partiellement le gaz d'alimentation avant d'entrer dans la colonne d'épuration 15-MD01.

Ces refroidisseurs sont des échangeurs de type Kettle à tubes renforcés du fait qu'un débit bi-phasique est généré au moment où il traverse ces tubes.

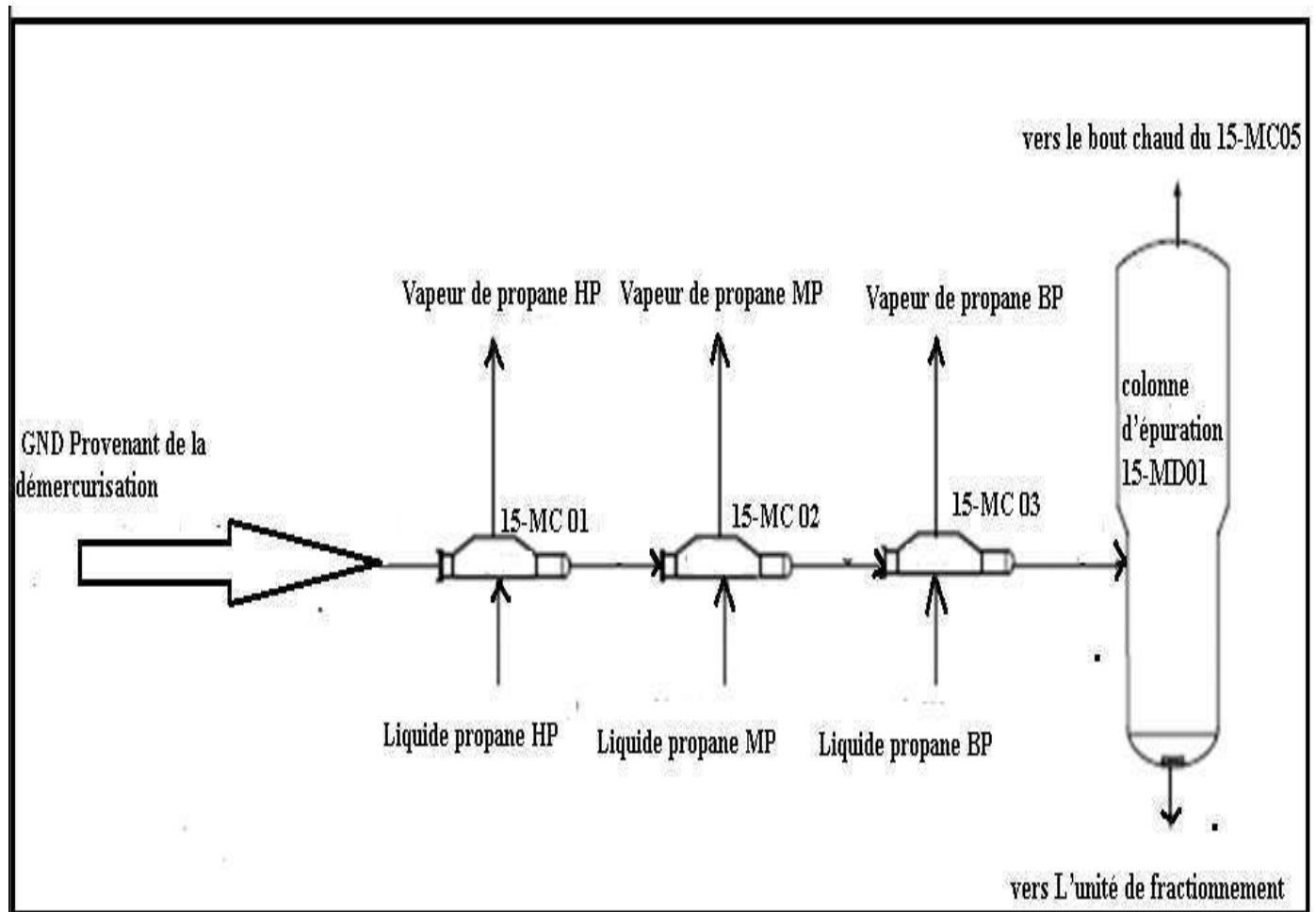


Fig II.3 : Schéma de l'échangeur type Kettle et la colonne d'épuration

II.4 Lavage:

La colonne d'épuration 15-MD01 élimine les hydrocarbures lourds et tous les aromatiques contenues dans le gaz d'alimentation, et ce afin d'éviter le colmatage dans l'échangeur principal 15-MC05.

La colonne d'épuration augmente les taux d'éthane et de propane qui sont utilisés comme réfrigérants pour le procédé de liquéfaction, et aide à produire un GNL selon les spécifications commerciales.

Le GN venant du refroidisseur de (GN/propane) BP 15-MC03 entre dans la colonne d'épuration 15-MD01 à un débit normal de 840 221kg/h à -35°C et à 60,6 bar eff.

Le rebouilleur de la colonne d'épuration 15-MC15 utilise de l'huile chaude pour le réchauffage. La colonne d'épuration est équipée d'un plateau de soutirage pour diriger le liquide vers le rebouilleur de la colonne d'épuration. Un débit d'hydrocarbure mélangé (venant du rebouilleur de la colonne d'épuration) est renvoyé vers la colonne en-dessous du plateau de soutirage à partir duquel il monte à travers les cheminées et les plateaux à clapets.

Il y a deux courants qui quittent la colonne d'épuration; le courant de fond et le courant de tête. Le courant de fond, constitué d'hydrocarbures lourds et d'aromatiques, est refroidi dans le refroidisseur de fond de la colonne d'épuration 15-MC16. Il est ensuite dirigé vers l'unité 07 de fractionnement.

L'unité de fractionnement sépare ce débit de ses composants d'éthane, de propane, de butane, d'isopentane et de condensat (gazoline naturelle). Le courant de tête de la colonne d'épuration est mélangé avec du GPL récupéré du fractionnement.

Le courant mélangé est ensuite envoyé vers le bout chaud du 15-MC05, et en ressort en deux-phases. Enfin, il alimente le ballon de reflux de la colonne d'épuration 15-MD02. Le ballon de reflux sépare la phase liquide et la renvoie vers la colonne d'épuration en reflux grâce aux pompes de reflux de la colonne d'épuration 15-MJ01/A. La phase vapeur venant du 15-MD02 revient au milieu du 15-MC05 à - 55°C en tant que constituant principal de la production de GNL. [11]

II.5 Description du processus de liquéfaction :

Le Nouveau Train de GNL utilise le procédé APCI de propane pré-refroidi comme MR pour la liquéfaction du gaz naturel. Elle utilise des refroidisseurs d'air à tirage induit en association avec un système MR et deux systèmes de réfrigérant propane.

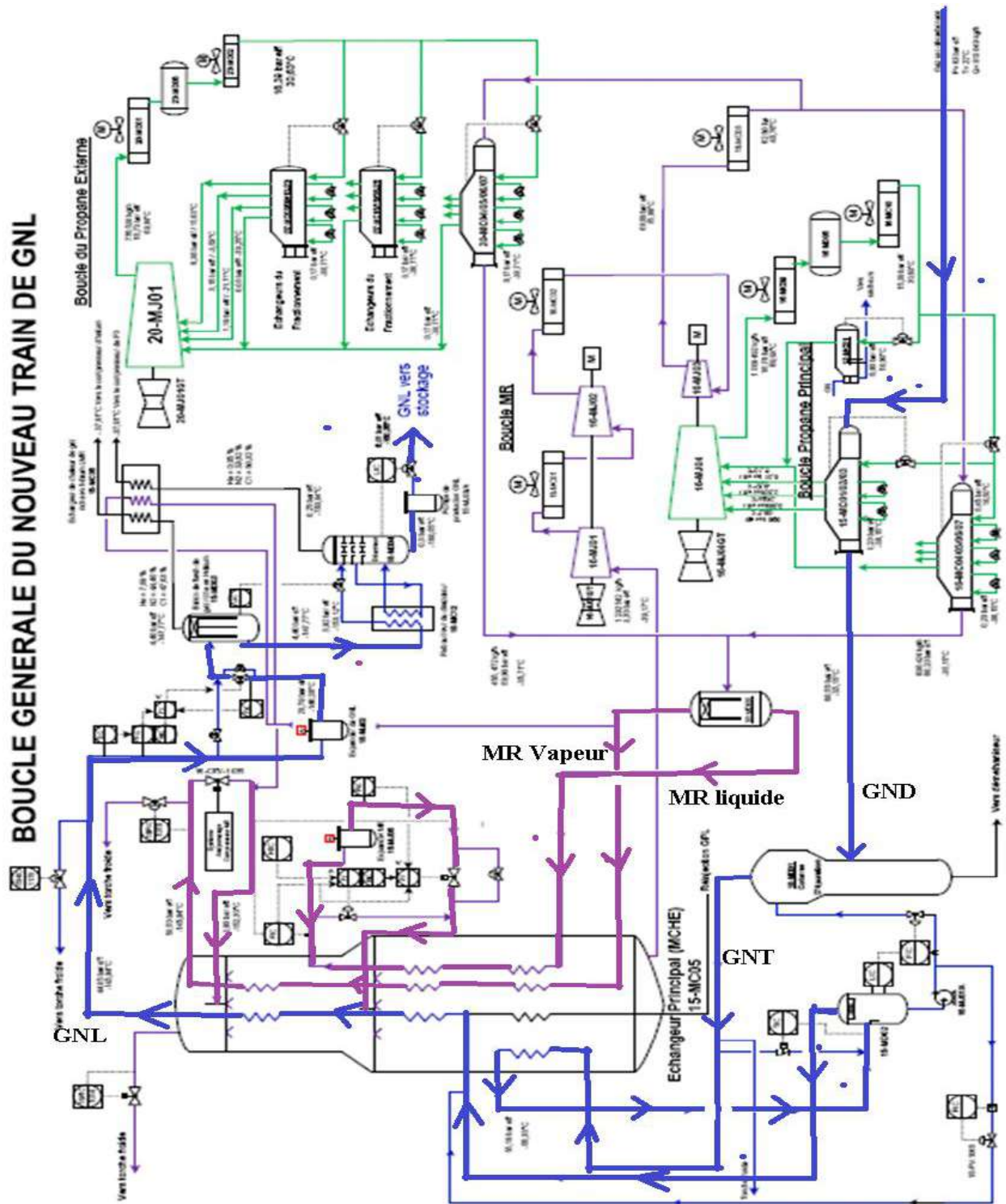


Fig II.4: Schéma de processus de liquéfaction du Gaz Naturel

Avant la liquéfaction, le gaz naturel est traité par les procédés de décarbonatation, déshydratation et démercurisation. Après l'élimination des hydrocarbures lourds contenus dans le gaz d'alimentation grâce à la colonne d'épuration, le débit de GN circule à travers le circuit tubes GNL de l'échangeur principal 15-MC05 afin de produire du GNL. Les produits nécessaires pour le procédé de réfrigération (méthane, éthane, propane) sont obtenus à partir du procédé de fractionnement. L'azote provient du système de distribution d'azote du Nouveau Train.

II.5.1 L'échangeur principal (MCHE) :

L'échangeur principal de chaleur cryogénique (MCHE) 15-MC05 est de refroidir le gaz naturel (GN) venant de la tête de la colonne d'épuration de -39°C à -146°C , ceci par une circulation à contre-courant de fluide réfrigérant (MR). [11]

L'échangeur principal comprend des faisceaux tubulaires hélicoïdaux en bas, au milieu, et en haut. Les trois (03) sections de cet échangeur sont appelées : le bout chaud (en bas), le bout médian (au milieu) et le bout froid (en haut). Le gaz naturel d'alimentation est dirigé vers le fond du bout chaud puis s'élève vers le bout médian, et enfin quitte le bout froid sous forme de GNL liquide.

II.5.2 Le système de réfrigérant MR :

Le réfrigérant MR traverse aussi de bas en haut deux (02) ensembles de faisceaux tubulaires parallèles. Dans l'un des faisceaux circule le liquide MR quittant le bas du séparateur MR HP 16-MD08 ; dans l'autre circulent les vapeurs MR quittant le haut du séparateur MR HP 16-MD08.

Lorsque les débits MR atteignent le sommet de l'échangeur principal, ils sont mélangés puis "pulvérisés" sur l'extérieur des tubes du côté calandre de l'échangeur principal. Au fur et à mesure que le MR atteint le fond, tout le liquide MR est vaporisé. Les vapeurs MR sont réchauffées d'environ -150°C au sommet à environ -40°C au fond, avant de retourner au ballon d'aspiration MR BP 16-MD01.

Le système du réfrigérant mixte (MR) fournit le refroidissement et la réfrigération nécessaires pour refroidir et liquéfier le gaz naturel d'alimentation en traversant l'échangeur principal de chaleur cryogénique 15-MC05. [11]

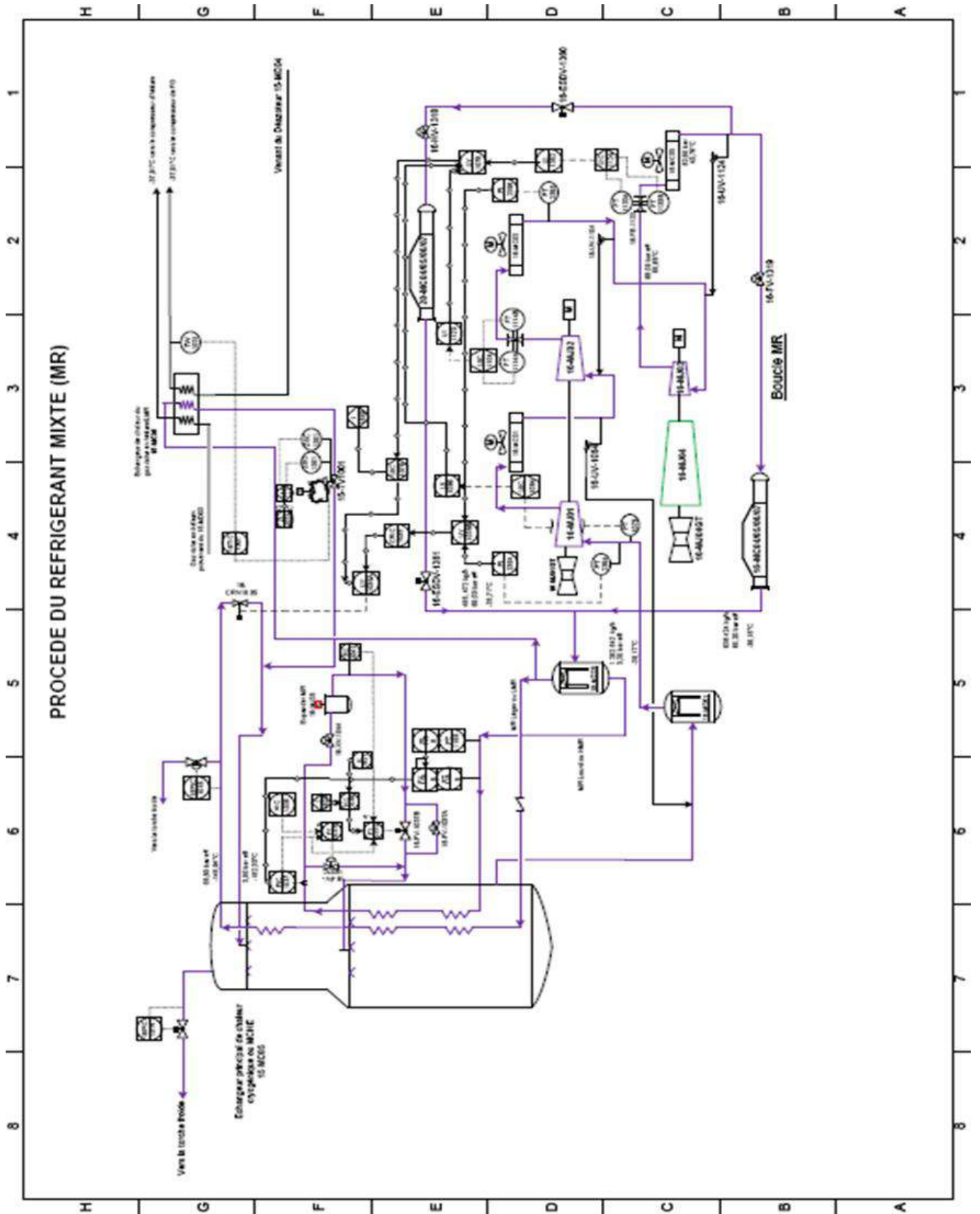


Fig II.5 : Schéma De Système Du Réfrigérant Mixte (MR)

II.5.2.1 Circuit du GNL :

Le GNT provenant de tête de la colonne d'épuration 15-MD01 entre dans le bout chaud (fond) de l'échangeur principal à environ -39°C . Au cours du mode de fonctionnement "no LPG Extraction " (Pas d'extraction de GPL), de petites quantités "haute pureté" d'éthane, de propane, de butane et d'isopentane sont réinjectées dans le débit de GNL comme décrit dans le manuel opératoire de la réinjection GPL.

Le débit de GNT quitte le bout chaud de l'échangeur principal au sommet à -55°C et alimente le ballon de reflux de la colonne d'épuration 15-MD02. Les produits de fond du ballon de reflux sont renvoyés vers la colonne d'épuration à travers la pompe de reflux. Les vapeurs de tête du ballon de reflux entrent dans l'échangeur principal par le bas du bout médian à environ -55°C .

Le GNT se dirige vers le haut de l'échangeur à travers le faisceau médian et le faisceau supérieur. Après que le GNT est totalement condensé, il quitte le haut du bout froid de l'échangeur principal à -146°C .

II.5.2.2 Compresseur du réfrigérant MR :

Le réfrigérant mixte est composé d'azote, de méthane, d'éthane et de propane. Le système MR alimente en liquide et en vapeurs réfrigérants à haute pression le côté tubes du 15-MC05 à -36°C et 59 bar eff. Ensuite, il les récupère sous forme de vapeurs MR basse pression du côté calandre du 15-MC05 à -39°C et 3,4 bar eff.

Les vapeurs MR basse pression sont comprimées de 3,4 bar eff à environ 59 bar eff en trois étapes (basse pression : BP, moyenne pression : MP et haute pression : HP) par le compresseur MR 16-MJ01/2/3. Elles sont refroidies à -36°C à travers les huit (08) refroidisseurs de réfrigérant propane (16-MC04/5/6/7 et 20-MC04/5/6/7) par le système de réfrigération de propane de l'unité 16 et par le système de réfrigération de propane externe de l'unité 20.

Le réfrigérant MR comprimé sort des échangeurs de propane sous forme diphasique à 36°C , et ensuite envoyé vers le séparateur MR HP 16-MD08 pour y être séparé.

Le liquide HP MR à partir du fond du séparateur se dirige vers le haut à travers les bouts chaud et médian du 15-MC04. Une partie des vapeurs de tête circule à travers les bouts chaud, médian et froid.

II.5.2.3 Circuit du MR liquide :

Le réfrigérant MR liquide alimente le bas du bout chaud de l'échangeur principal 15- MC05 à environ -36°C et se dirige vers le haut à travers le circuit des tubes du MR liquide. Le liquide MR quitte ensuite le haut du bout médian à environ -129°C vers l'expander MR 16-MJ06, où il est refroidi à environ -134°C puis "pulvérisé" sur l'extérieur des tubes des bouts médian et chaud.

II.5.2.4 Circuit des vapeurs MR :

Les vapeurs du réfrigérant MR provenant du séparateur HP MR 16-MD08 sont divisées en deux débits. Environ 80% des vapeurs (160 t/h) circule du bas du bout chaud de l'échangeur principal vers le haut à travers les tubes du circuit de vapeurs MR. Les vapeurs MR entrent dans le bas du bout chaud à environ -36°C et circulent à travers les bouts chaud et médian, puis sortent du bout froid à une température de -146°C . Après une détente à travers une vanne J-T, la température descend à environ -152°C .

Les autres 20% des vapeurs (40 t/h) sont acheminées vers l'échangeur de chaleur de gaz riche en hélium/LMR 15-MC06, où elles sont refroidies et condensées à environ -162°C .

Ces deux débits sont mélangés puis "pulvérisés" sur l'extérieur des tubes des bouts froid, médian et chaud de l'échangeur. En contact de la surface extérieure des tubes et au fur et à mesure que ce mélange se dirige vers le bas, le liquide MR se vaporise. Le mélange se réchauffe aux environs de -40°C au bas de l'échangeur principal 15-MC05 avant de retourner au ballon d'aspiration MR BP 16-MD01 pour être aspiré de nouveau par le compresseur MR. [11]

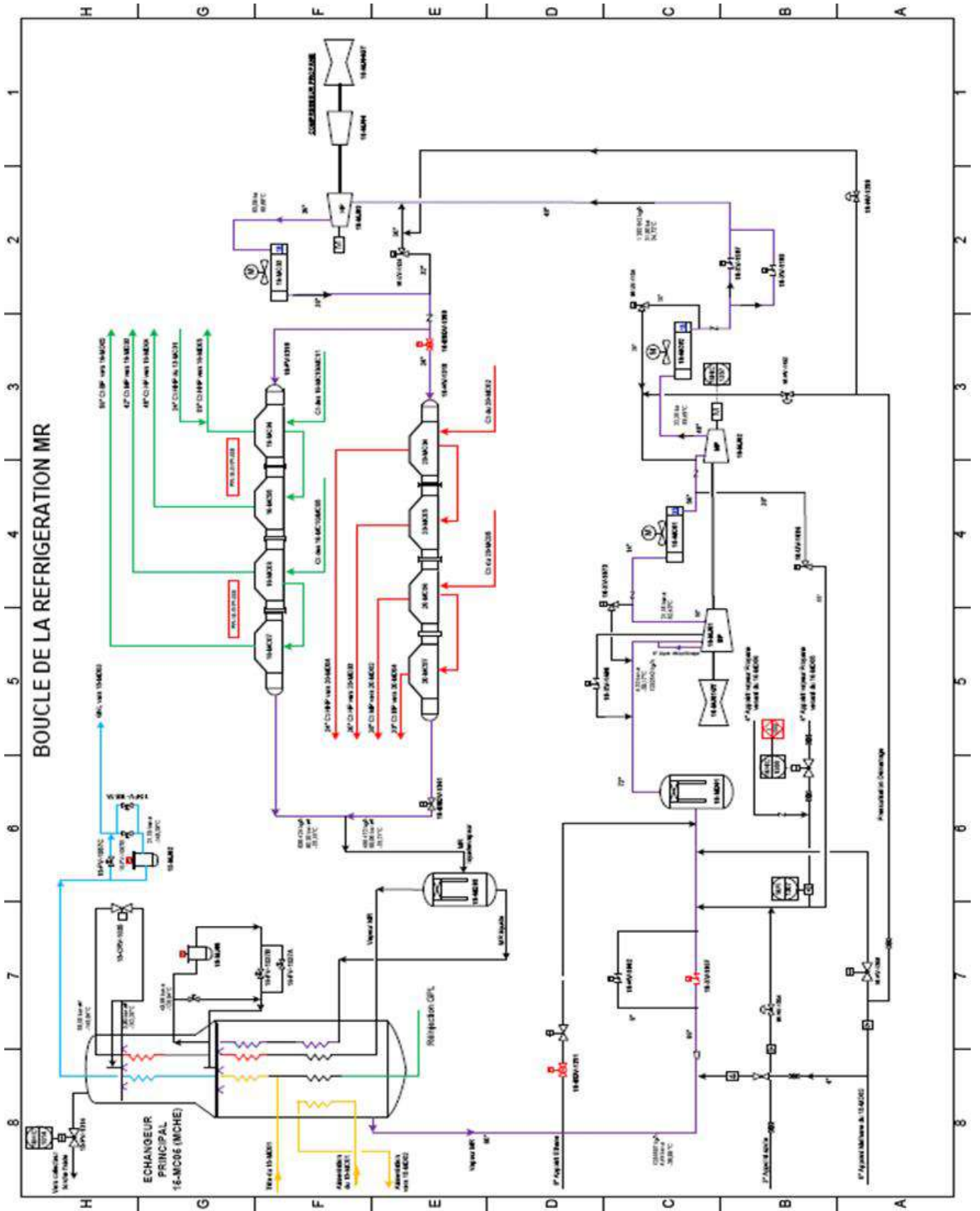


Fig II.6 : Schéma de circuit du mélange réfrigérant (MR)

II.5.3 L'expander de GNL 15-MJ02 :

L'expander de GNL15-MJ02 est un ballon (pot) vertical de type expander avec un générateur intégré sur un arbre commun qui produit une puissance nominale de 1059 KW.

L'expander de GNL reçoit le gaz naturel liquéfié à haute pression (GNL HP) à partir du bout froid de l'échangeur principal de chaleur cryogénique 15-MC05, à une pression de 44,9 bar eff et le détend jusqu'à une pression de 20,8 bar eff avant son admission dans le ballon de flash de gaz riche en hélium 15-MD03.

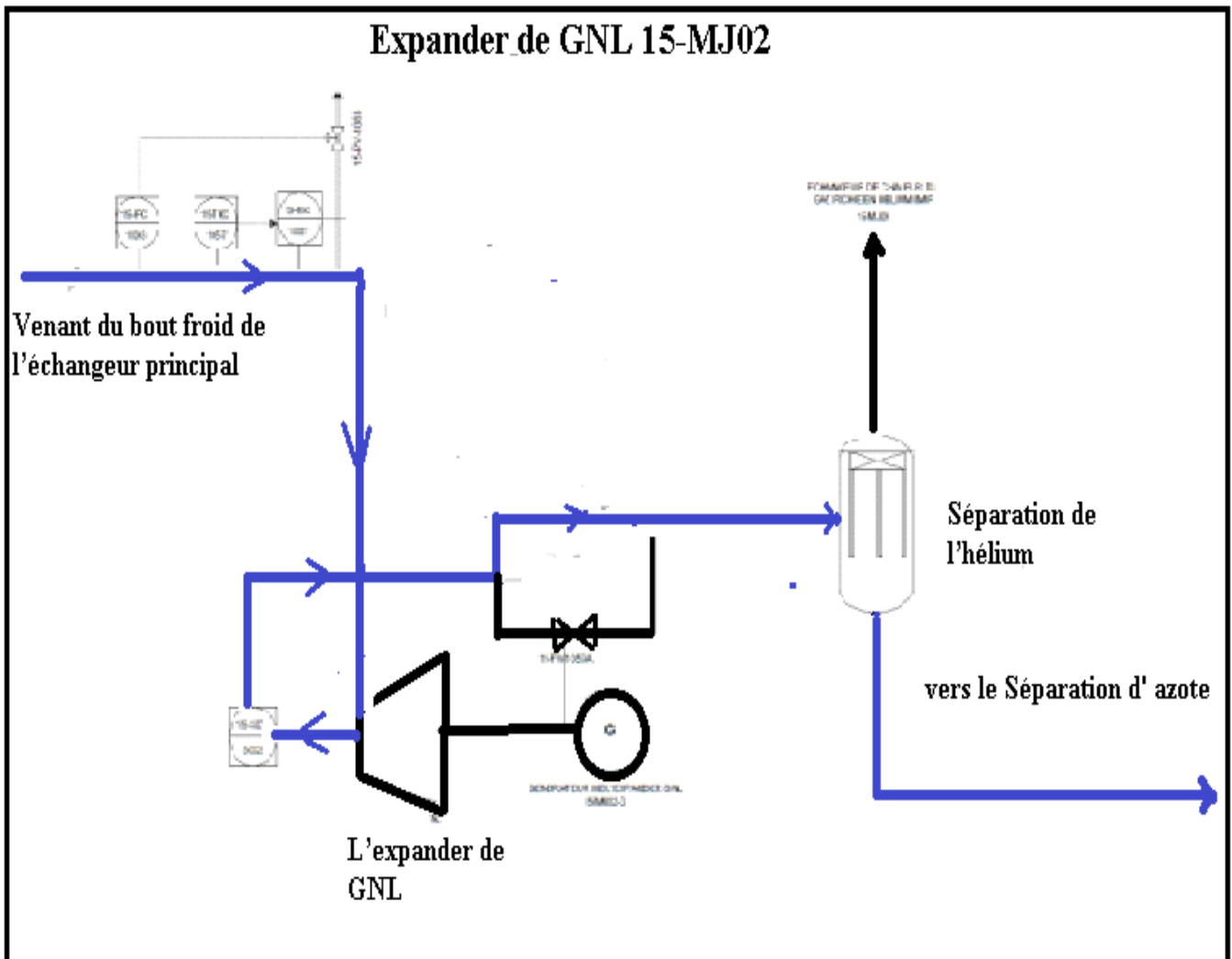


Fig II.7 : Schéma De L'expander de GNL

II.5.4 Séparation de l'hélium :

Le fluide de GNL, provenant de l'expander de GNL 15-MJ02, est détendu dans le ballon de flash du gaz riche en hélium 15-MD03, dans lequel le GNL et les vapeurs riches en hélium sont séparés.

Les vapeurs riches en hélium, avec une concentration minimale d'hélium (7,9 % mole), sont envoyées vers l'échangeur de chaleur du gaz riche en hélium /LMR 15-MC06, dans lequel elles sont réchauffées puis envoyées vers l'aspiration du compresseur du gaz riche en hélium 15-MJ05.

Le liquide provenant du fond du ballon de flash du gaz riche en hélium 15-MD03 alimente le déazoteur 15-MD04.

Le gaz riche en hélium provenant de la tête du ballon de flash du gaz riche en hélium 15-MD03 est aspiré par le compresseur du gaz riche en hélium 15-MJ05 à travers l'échangeur de chaleur du gaz riche en hélium 15-MC06 où il est comprimé puis refoulé vers l'unité de purification d'hélium pour traitement.

Le refroidisseur de refoulement du compresseur de débit riche en hélium 15-MC13 est destiné à refroidir le débit qui est recyclé du refoulement du compresseur du gaz riche en hélium 15-MJ05 vers la ligne d'aspiration et qui est utilisé pour la protection anti-pompage. Le réchauffeur d'hélium gazeux 15-ML06 permet de stabiliser l'envoi du gaz riche en hélium vers l'unité de purification d'hélium.

Le débit recyclé qui est utilisé pour la protection anti-pompage du compresseur du gaz riche en hélium 15-MJ05 est refroidi par le refroidisseur de refoulement du compresseur de débit riche en hélium 15-MC13.

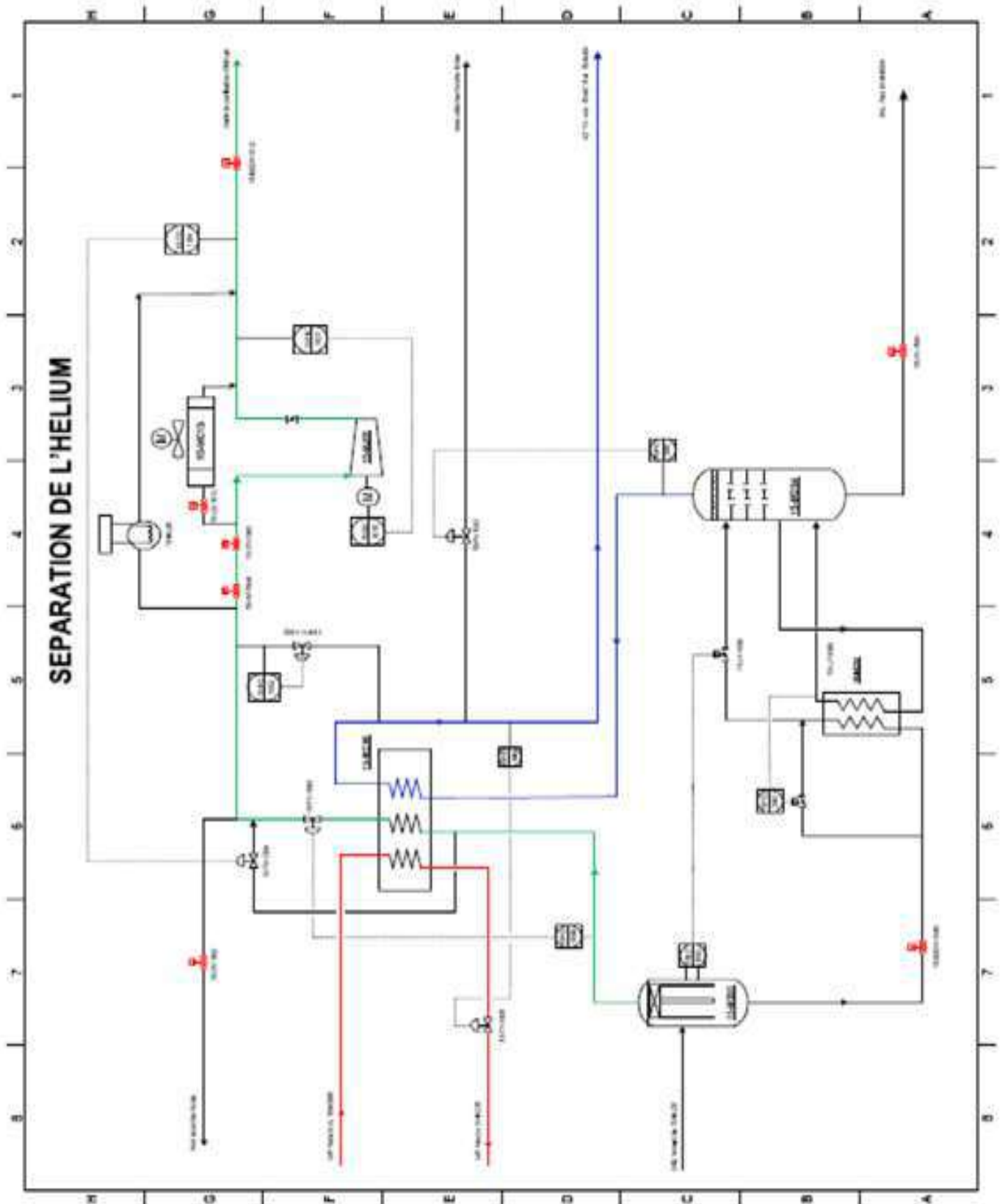


Fig II.8 : Schéma De Séparation De L'hélium

II.5.5 Séparation de l'azote:

Le courant de GNL, provenant du ballon de flash du gaz riche en hélium 15-MD03, alimente le déazoteur 15-MD04 à travers le rebouilleur du déazoteur 15-MC12.

Du fond du déazoteur, il est repris par les pompes 15-MJ03/A et envoyé vers le bac de stockage de GNL 71-MF01.

Les vapeurs riches en azote en tête du déazoteur alimentent le compresseur de fuel gaz 15-MJ04, à travers l'échangeur de chaleur du gaz riche en hélium/LMR 15-MC06.

Un courant liquide provenant des niveaux les plus bas du déazoteur circule à travers le rebouilleur du déazoteur 15-MC12 pour refroidir encore plus le GNL qui alimente le déazoteur.

Le produit de GNL à partir du ballon de flash du gaz riche en hélium 15-MD03 contient 5,6 % mole d'azote. Il traverse le rebouilleur du déazoteur 15-MC12 en contre-courant avec le produit froid obtenu à partir de la ligne de recirculation des liquides de fond du déazoteur 15-MD04. Le produit de GNL se refroidit de -148°C à -153°C avant d'alimenter le déazoteur 15-MD04.

Le produit de GNL est détendu de 3,9 bar eff à 0,3 bar eff avant d'alimenter le déazoteur ce qui va aider à l'élimination d'une quantité considérable d'azote par flash et refroidir encore plus le produit de GNL.

Cette détente à 0,3 bar eff dans le déazoteur permet d'extraire environ 81 % mole d'azote de l'alimentation et d'abaisser la température du produit de GNL à -161°C , avant de l'envoyer vers les bacs de stockage grâce aux pompes 15-MJ03/A. Le taux d'azote contenu dans le GNL au fond du déazoteur est seulement de 1,2 % mole.

II.5.6 Ligne de coulée du GNL :

Le système de la ligne de coulée du GNL se compose des pompes de produit de GNL 15-MJ03/A en aval du déazoteur 15-MD04, des lignes de coulées venant des pompes de production, des lignes de coulées venant des unités existantes de GNL vers le bac de stockage de GNL 71-MF01 et ainsi que des lignes de circulation du GNL entre le bac de stockage et les bras de chargement.

Le système de la ligne d'expédition du GNL fait circuler une petite quantité de GNL entre les bras de chargement et le bac de stockage. Le système maintient le débit dans ces lignes en phase liquide et à une température de -160°C pendant le mode "holding" (attente) du train de GNL.

Les pompes de produit de GNL 15-MJ03/A sont de type pompe centrifuge à moteur submergé et monté sur un pot vertical et qui reçoivent le produit de GNL à partir du fond du déazoteur 15-MD04 à 0,35 bar eff et l'envoient au bac de stockage de GNL 71-MF01 à -160°C et 6 bar eff.

Pendant le mode "chargement" de l'usine de GNL, le produit de GNL venant des pompes de production va directement vers le bac de stockage de GNL. Cependant, quand l'usine est en mode "attente", un faible pourcentage de produit de GNL est dévié vers le collecteur de la ligne de coulée afin de maintenir les lignes d'expédition de GNL à -160°C et 6 bar eff (lignes entre le bac de stockage et l'appontement).

II.5.7 Stockage et expédition du GNL :

L'unité 71 de stockage et d'expédition de GNL est d'assurer le stockage de GNL produit par le nouveau train de GNL ainsi que pour le GNL produit par les unités existantes.

Le bac de stockage de GNL reçoit la production du nouveau train par les pompes 15-MJ03-A, le recyclage venant des pompes de retour de GNL 71-MJ06/A Et le recyclage venant des pompes de chargement.

Dans le bac 71-MF01. Quatre (04) pompes de chargement de GNL 71-MJ01-A/B/C/D sont utilisées pour expédier le GNL à partir du bac vers les méthaniers.

Des installations pour le traitement et récupération de « Boil off » sont aussi disponibles pour le bac de stockage de GNL 71-MF01 et pour les bacs de GNL existants.

Le nouveau bac de stockage 71-MF01 a une capacité de 150 000 m³. Le GNL est stocké à -162 °C et à environ 50 mbar eff.

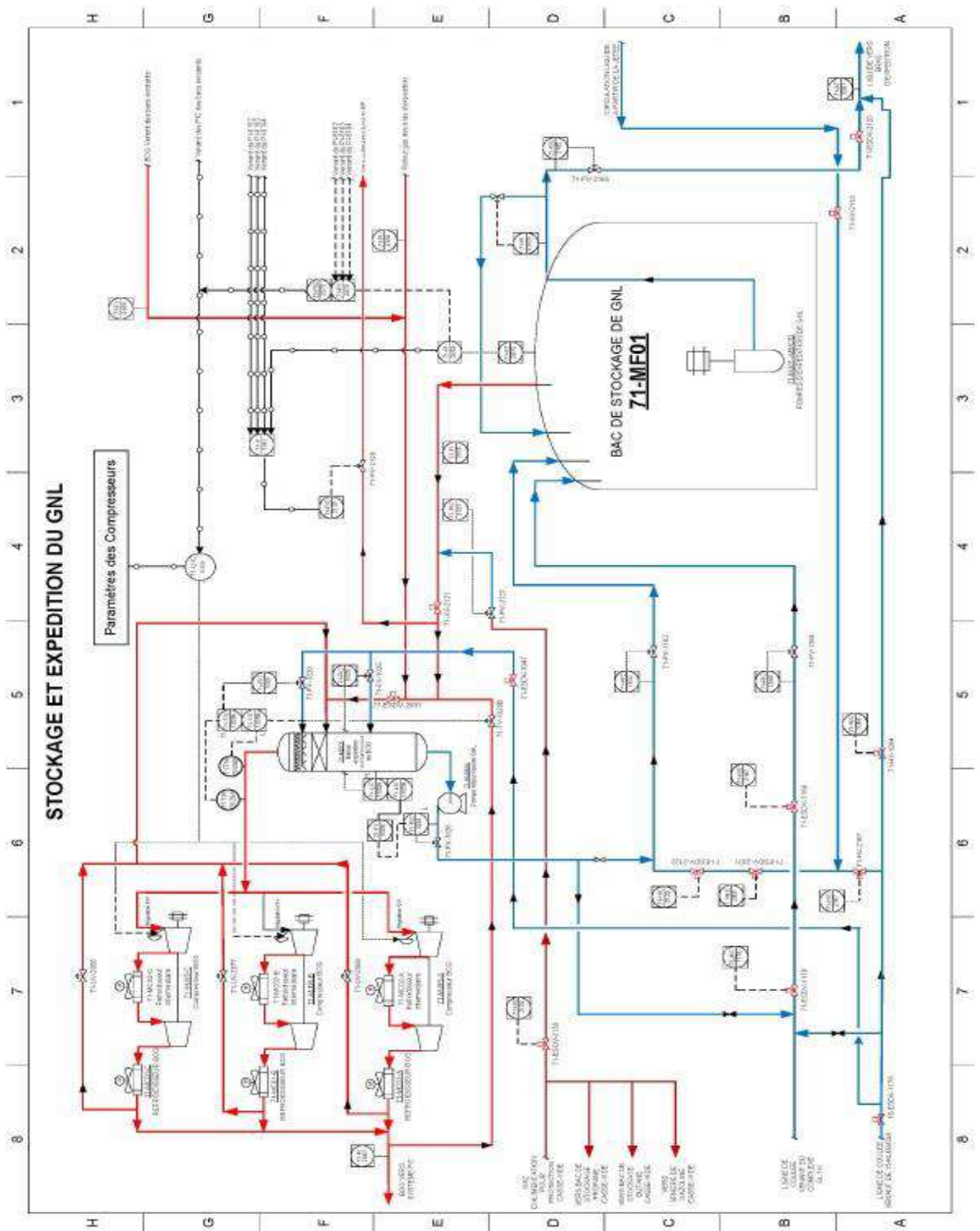


Fig II.9 : schéma de stockage de GNL

CHAPITRE III

Etude de L'échangeur de chaleur principal cryogénique 15-MC05



III.1 Echangeur de chaleur principal cryogénique (MCHE) 15-MC05 :

Cet échangeur est du type bobiné, à faisceau et calandre en aluminium. Il comporte 03 faisceaux.

- ✓ Le faisceau gaz naturel / GNL.
- ✓ Le faisceau MR vapeur.
- ✓ Le faisceau MR liquide.

Sur le plan de process , il est divisé en 3 parties :

- ✓ Le bout chaud ou partie inférieure, là où commence le refroidissement du gaz naturel dans

L'échangeur.

- ✓ Le bout médian, là où commence le refroidissement du GNT revenant de la tête du ballon 15-MD02 (ballon de reflux de la tour de lavage) et où se fait la détente du MR liquide venant de L'expander 16-MJ06.
- ✓ Le bout froid ou partie supérieure, là où se termine la liquéfaction du gaz naturel,
- ✓ A travers la vanne JT, la détente du MR, auparavant liquéfié et sous refroidit.

III. 1.1 Mélange réfrigérant MR:

C'est un fluide frigorigène utilisé dans les systèmes de production de froid qui permet à la mise en œuvre d'un cycle frigorigène.

Le MR c'est un mélange de fluides purs en phases liquide et gazeuse à la fois, il compose par 04 produits nécessaires pour le procédé de réfrigération (méthane, éthane, propane et azote)

III.1.2 Composition du fluide MR (mélange réfrigérant) :

La composition du MR de fonctionnement doit être comme suit:

Tableau III.1 : Composition du fluide MR

Composant	Pourcentage
Méthane	48,9 % mole
Ethane	37,2 % mole
Propane	8.7 % mole
Azote	5.2 % mole

Les produits nécessaires pour le procédé de réfrigération (méthane, éthane, propane) sont obtenus à partir du procédé de fractionnement. L'azote provient du système de distribution d'azote du nouveau Train.

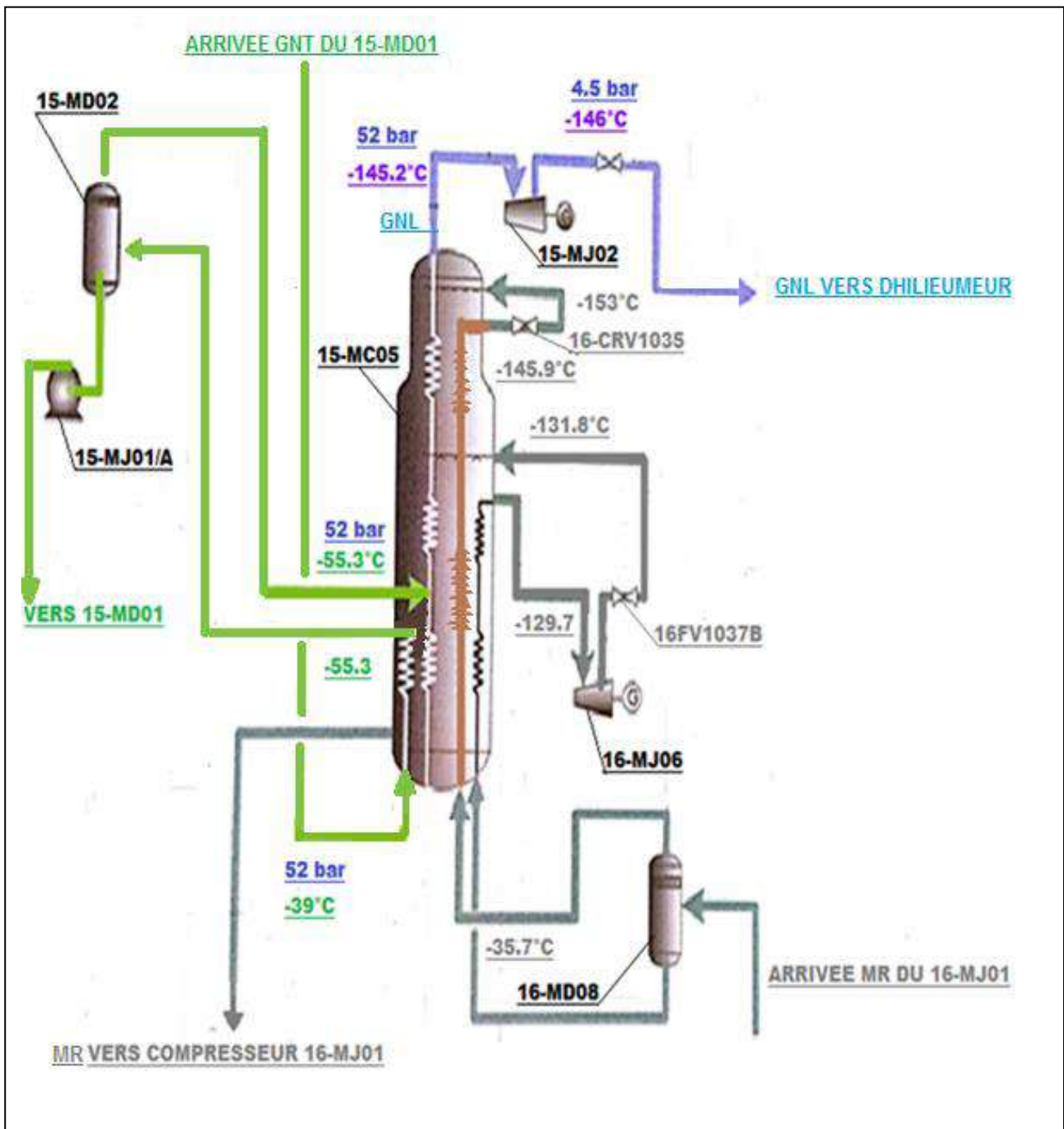


Fig III.1: Echangeur de chaleur principal 15-MC05

III.1.3 Echangeurs bobinés :

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

Principe de construction: Le faisceau tubulaire est constitué de tubes enroulés par couches en hélice autour d'un cylindre central appelé noyau central ou mandrin.

Avantages : On peut réaliser avec un seul appareil des échanges thermiques différents. une grande efficacité thermique en raison de la circulation à contre-courant. des puissances thermiques requises très importantes (de l'ordre 100MW) associé à des débits de fluides très élevés (centaines de t/h). très grande surface d'échange (de l'ordre 20000 m²).

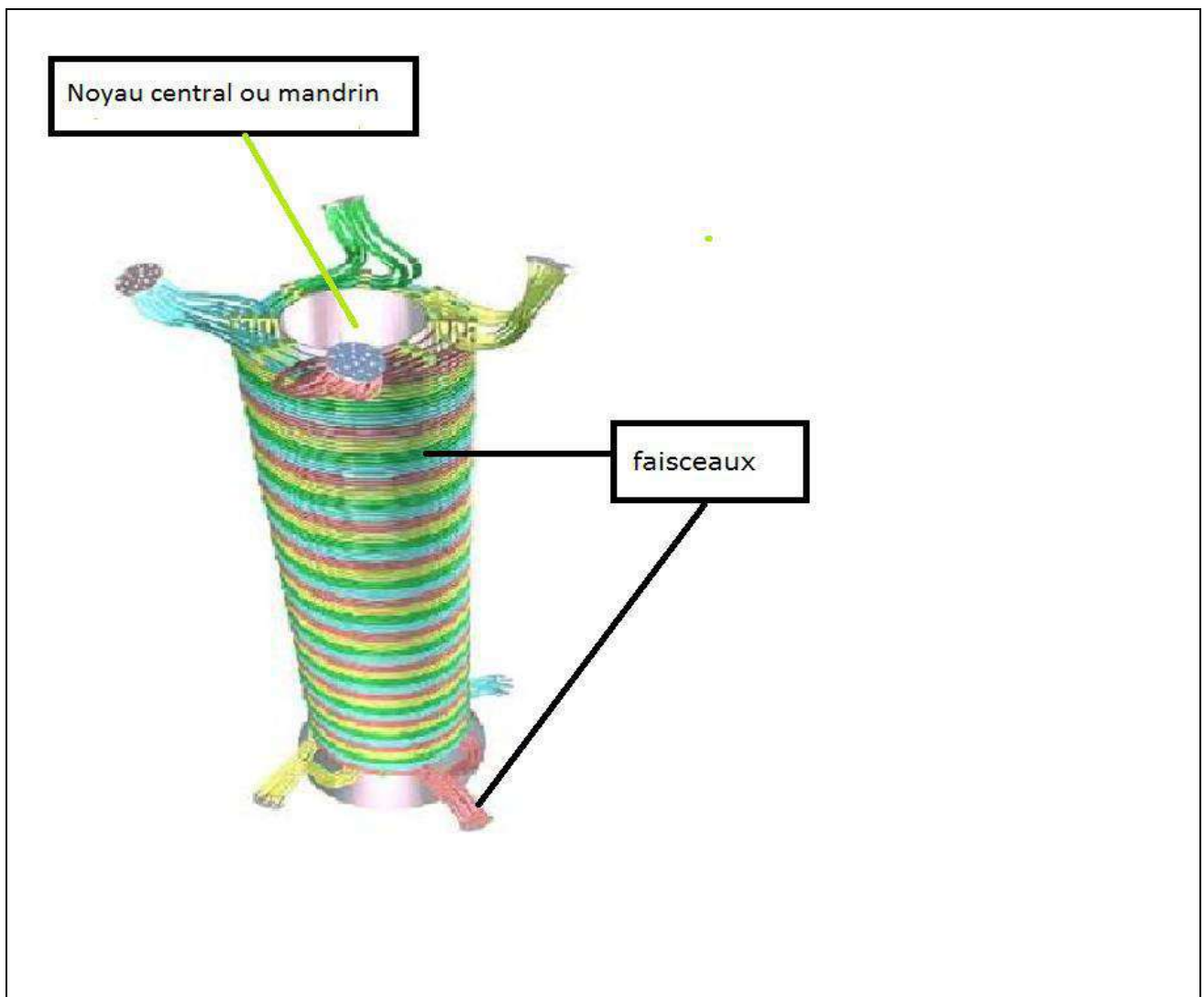


Fig III.2: Echangeur de chaleur du type bobiné

III.1.4. Principe de fonctionnement :

Le rôle principal de l'échangeur de chaleur cryogénique (MCHE) 15-MC05 est de refroidir le gaz naturel (GN) venant de la tête de la colonne d'épuration de -39°C à -146°C , ceci par une circulation à contre-courant de fluide réfrigérant (MR).

Le débit de GN circule à travers le circuit tubes GNL de l'échangeur principal 15-MC05 afin de produire du GNL.

III.1.5 Circulation des fluides :

➤ Gaz naturel :

Le gaz naturel sortant en tête de la tour de lavage à une température de -39°C entre par le bas au bout Chaud de l'échangeur principal 15-MC05.

Il circule de bas en haut de l'échangeur puis est progressivement refroidit puis condensé jusqu'à -55.3°C par le MR liquide venant de l'expander 16-MJ06, détendu coté calandre et circulant à contre-courant de haut en bas.

Le MR liquide / vapeur détendu dans la vanne 16-CRV1035 coté calandre et circulant à contre-courant de haut en bas à une température égale à -153°C .

➤ MR liquide :

Le MR liquide venant du fond du ballon séparateur 16-MD08 à -35.7°C entre par le bas de l'échangeur et circule cote tubes vers le haut. Le MR liquide ressort de l'échangeur à -129.7°C , est détendu dans l'expander 16-MJ06 puis dans la vanne 16-FV1037B, vers la calandre de l'échangeur à -131.8°C et circule de haut en bas pour refroidir le gaz naturel et s'auto-refroidir.

Il est aussi refroidi par le MR qui circule coté calandre depuis la tête de l'échangeur vers le bas.

➤ MR vapeur :

Le MR vapeur venant de la tête du ballon séparateur 16-MD08 entre par le bas de l'échangeur à -35.7°C et circule cote tubes vers la tête de l'échangeur.

Le MR ressort liquide a -145.9°C de l'échangeur, est détendu jusqu'à -153°C dans la vanne JT puis passé vers la calandre de l'échangeur et circule de haut en bas pour refroidir le gaz naturel, Le MR liquide et s'auto-refroidir.

Nb : Tout le MR détendu coté calandre retourne a l'état vapeur par le bas de l'échangeur principal, vers L'aspiration du compresseur MR, 16-MJ01.

III.2 Calcul l'efficacité de l'échangeur de chaleur 15MC-05 :

III.2.1 Définition de l'efficacité :

L'efficacité dans l'échangeur de chaleur est le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur cryogénie (Φ réel échangé) aux flux de chaleur maximal (Φ max possible) qui serait transférer dans les mêmes conditions de température d'entrée de deux fluides.

$$\mathcal{E} = \Phi \text{ réel échangé} / \Phi \text{ max possible}$$

L'efficacité dans l'échangeur de chaleur peut être calculée par l'utilisation des équations suivantes :

1- A partir de K et S	$\mathcal{E} = \frac{K \cdot S \cdot \Delta T_{lm}}{\Phi \text{ max possible}}$
2- A partir M_c et CP_c	$\mathcal{E} = \frac{M_c \cdot CP_c \cdot \Delta T_c}{\Phi \text{ max possible}}$
3- A partir m_f et cp_f	$\mathcal{E} = \frac{m_f \cdot cp_f \cdot \Delta T_f}{\Phi \text{ max possible}}$

Avec:

\mathcal{E} : L'efficacité dans l'échangeur de chaleur

K: le coefficient de transfert de chaleur globale en $w/m^2 \text{ } ^\circ C$.

S: la surface de transfert de chaleur en m^2 .

ΔT_{lm} : la différence de la température logarithmique moyenne en $^\circ C$.

M_c , m_f : débit massique du fluide chaud et fluide froid respectivement en kg/s .

CP_c , cp_f : capacité calorifique du fluide chaud et fluide froid respectivement en $kcal/kg^\circ C$.

ΔT_c , ΔT_f : la différence de la température sortie et entré fluide chaud et froid respectivement en $^\circ C$.

III.2.2 Méthodes de calcul de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur :

- ✓ La méthode de NUT
- ✓ La méthode de ΔT_{lm} .

Méthode de NUT :

La méthode que nous venons de voir n'est valable que pour les échangeurs coaxiaux. Pour les autres types d'échangeurs, une méthode plus générale existe que nous allons décrire succinctement ci- dessous :

La méthode fait référence à une situation idéale à savoir le cas de l'échangeur à contre-courant de longueur infinie.

Définitions:

a) **Flux maximum** : C'est le flux maximum échangé dans un échangeur à contre-courant de longueur infinie soit :

$$\Phi_{\max} = (q_t)_{\min} \Delta T_{\max} \dots\dots\dots (1)$$

b) **Efficacité de l'échangeur** : C'est le rapport du flux de chaleur effectivement transféré dans l'échangeur au flux de chaleur maximal qui serait transféré dans les mêmes conditions de températures d'entrée des deux fluides :

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} \dots\dots\dots (2)$$

c) **Rapport de déséquilibre** : C'est le rapport des débits thermiques soit :

$$R = \frac{(q_{tc})_{\min}}{(q_{tc})_{\max}} \dots\dots\dots (3)$$

d) **Nombre d'unités de transfert** : On appelle nombre d'unités de transfert, le nombre sans dimension

$$NUT = \frac{KS}{q_t} \dots\dots\dots (4)$$

On distingue le nombre d'unités de transfert du coté chaud et du coté froid:

$$NUT_c = \frac{KS}{q_{tc}} \qquad NUT_f = \frac{KS}{q_{tf}}$$

Dans la pratique, seul le NUT correspondant au débit thermique minimum est utile. On le notera NUT sans préciser d'indice :

$$NUT = \frac{KS}{(q_t)_{\min}}$$

L'idée de la méthode du NUT consiste à exprimer l'efficacité ϵ de l'échangeur en fonction des deux paramètres R et NUT pour chaque configuration d'échangeur. On dispose alors d'une fonction générale indépendante des conditions particulières de température ou de débit qui permet de calculer rapidement les flux mis en jeu sans connaître les températures de sortie. Remarquons que les trois grandeurs utilisées ici ϵ , R et NUT sont sans dimension ce qui fait toute l'efficacité de la méthode.[12]

Rapport de déséquilibre : C'est le rapport des débits thermiques soit :

$$R = \frac{(qtc)_{\min}}{(qtc)_{\max}} \dots\dots\dots (5)$$

Nombre d'unités de transfert :

On appelle nombre d'unités de transfert, le nombre sans dimension :

$$NUT = \frac{KS}{qt_{\min}} \dots\dots\dots (4)$$

Le cas de l'échangeur à contre-courant, l'expression de l'efficacité est donnée par :

$$\epsilon = \frac{1 - \exp(-NUT(1-R))}{1 - R \exp(-NUT(1-R))} \rightarrow NUT = \frac{1}{R-1} \ln \frac{1-E}{1-RE} \dots\dots\dots (6)$$

III.2.3 Etude de l'efficacité dans l'échangeur de chaleur par la méthode ΔT_{lm} :

Tableau III.2 : Données réels de l'échangeur de chaleur principale

Propriétés	Unité	Coté tube	Coté calandre
Fluide circulant		Gaz naturel	MR (Mélange réfrigérant)
Température d'entrée	C°	$T_1 = -55.3$	$t_1 = -153$
Température de sortie	C°	$T_2 = -145.2$	$t_2 = -69.9$
Débit	Kg/h	$MC = 737481 \text{ kg/h}$	$mf = 1092289 \text{ kg/h}$
Chaleur spécifique	$Kcal/Kg^{\circ}C$	$C_p = 0.984$	$c_p = 0.71$

III.2.3.1 Calcul de l'écart logarithmique moyen de température :

L'étude de l'écart logarithmique moyen de température dans un appareil s'effectue en supposant que le coefficient global et les chaleurs spécifiques sont constants en tout point, et qu'il n'y a pas une perte thermique. L'écart de température ΔT_{lm} est déterminé par utilisation de l'équation suivant :

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{CHAUD} - \Delta T_{FROID}}{\ln \frac{\Delta T_{CHAUD}}{\Delta T_{FROID}}} \dots\dots\dots(7)$$

Avec :

$$\Delta T_{CHAUD} = T_1 - t_2 = (-55.3 + 69.9) = 14.6$$

$$\Delta T_{FROID} = T_2 - t_1 = (-145.2 + 153) = 7.8$$

$$\Delta T_{lm} = 10.84^\circ C$$

III.2.3.2 Calcul débit thermique unitaire pour les deux fluides :

Q_{tc} : débit thermique unitaire pour le fluide chaud (le gaz naturel)

$$Q_{tc} = MC * C_p = 737481 * 0.984 = 725681.304 \text{ k cal/h } ^\circ c \dots\dots\dots(8)$$

$$Q_{tc} = 725681.304 \text{ k cal/h } ^\circ c$$

q_{tf} : débit thermique unitaire pour le fluide froid. (Mélange réfrigérant)

$$q_{tf} = mf * c_p = 1092289 * 0.71 = 775525.19 \text{ k cal/h } ^\circ c \dots\dots\dots(9)$$

$$q_{tf} = 775525.19 \text{ k cal/h } ^\circ c$$

III.2.3.3 Calcule ϕ réel échangé:

On établit un bilan thermique global de l'échangeur, en supposant que les pertes thermiques sont négligeables, donc la quantité de chaleur ϕ perdue par le fluide chaud est égale à celle reçue par le fluide froid :

La quantité de chaleur ϕ est calculée par utilisation de l'équation suivante :

$$\phi \text{ réel échangé} = Q_{tc} * (T_2 - T_1) = q_{tf} * (t_2 - t_1) \dots\dots\dots(10)$$

Donc:

$$\begin{aligned} \phi \text{ réel échangé} &= 737481 * 0.984 * (-145.2 + 55.3) \\ &= 725681.304 * 89.9 \end{aligned}$$

$$\phi \text{ réel échangé} = 65238749.22 \text{ W}$$

III.2.3.4 Calcul de température différentielle maximale:

$$\Delta T_{max} = T_1 - t_1 = -55.3 - (-153) \dots\dots\dots(11)$$

$$\Delta T_{max} = 97.7 \text{ } ^\circ\text{c}$$

III.2.3.5 Calcul flux de chaleur maximal (ϕ max possible):

$$\phi \text{ max possible} = (\text{la valeur minimum entre } Q_{tc} \text{ et } q_{tf}) * \Delta T_{max}$$

On a:

$$Q_{tf} > Q_{tc} \text{ donc:}$$

$$\begin{aligned} \phi \text{ max possible} &= Q_{tc} * \Delta T_{max} \dots\dots\dots(12) \\ &= 725681.304 * 97.7 \end{aligned}$$

$$\phi \text{ max possible} = 7089906.34 \text{ k cal/h } ^\circ\text{c}$$

III.2.3.6 Calcul de l'efficacité de l'échangeur de chaleur 15MC-05 :

$$\epsilon = \frac{\phi \text{ réel échangé}}{\phi \text{ max possible}} = \frac{65238749.22}{7089906.34} \dots\dots\dots(2)$$

L'efficacité de l'échangeur de chaleur 15MC-05 :

$$\epsilon = 0.92$$

III.3 Programme de calcul :

Le calcul de l'efficacité des échangeurs de chaleur est une opération complexe qui nécessite la connaissance de nombreux paramètres, nombreuses lois d'échange et de frottement, et évidemment des différentes méthodes de calcul.

Nous avons établi un programme de MATLAB permet de faciliter le calcul de l'efficacité de notre échangeur de chaleur principal 15MC-05 en utilisant des données réels .

III.3.1 Le programme:

```
% données réels de l'échangeur de chaleur principale
T1=-55.3;
t1=-153;
T2=-145.2;
t2=-69.9;
MC=737481;
mf=1092289;
Cp=0.984;
cp=0.71;

% calcul de l'écart logarithmique moyen de température
Delta_T_chaud=T1-t2;
Delta_T_froid=T2-t1;
Delta_TLm=(Delta_T_chaud-Delta_T_froid)/log(Delta_T_chaud/Delta_T_froid);
fprintf('l écart logarithmique moyen de température Delta_TLm=%d\n',Delta_TLm);

% Calcul débit thermique unitaire pour les deux fluides
Qtc=MC*Cp;
qtf=mf*cp;
fprintf('débit thermique Qtc=%d\n',Qtc);
fprintf('débit thermique qtf=%d\n',qtf);

%Calcule réel échangé
Phi_reel_echange= Qtc*abs(T2-T1);
fprintf('Phi_reel_echange=%d\n',Phi_reel_echange);

%Calcule de température différentielle maximale:
Delta_Tmax=T1-t1;
fprintf('temperature differentielle maximale Delta_Tmax=%d\n',Delta_Tmax);

%Calcul flux de chaleur maximal ( max possible ):
Phi_max_possible=Qtc*Delta_Tmax;
fprintf('flux de chaleur maximal Phi_max_possible=%d\n',Phi_max_possible);

%Calcul de l'efficacité de l'changeur de chaleur 15MC-05
e=Phi_reel_echange/Phi_max_possible;
fprintf('l efficacite de l changeur de chaleur 15MC-05 e=%d\n',e);
```

III.3.2 L'exécution:

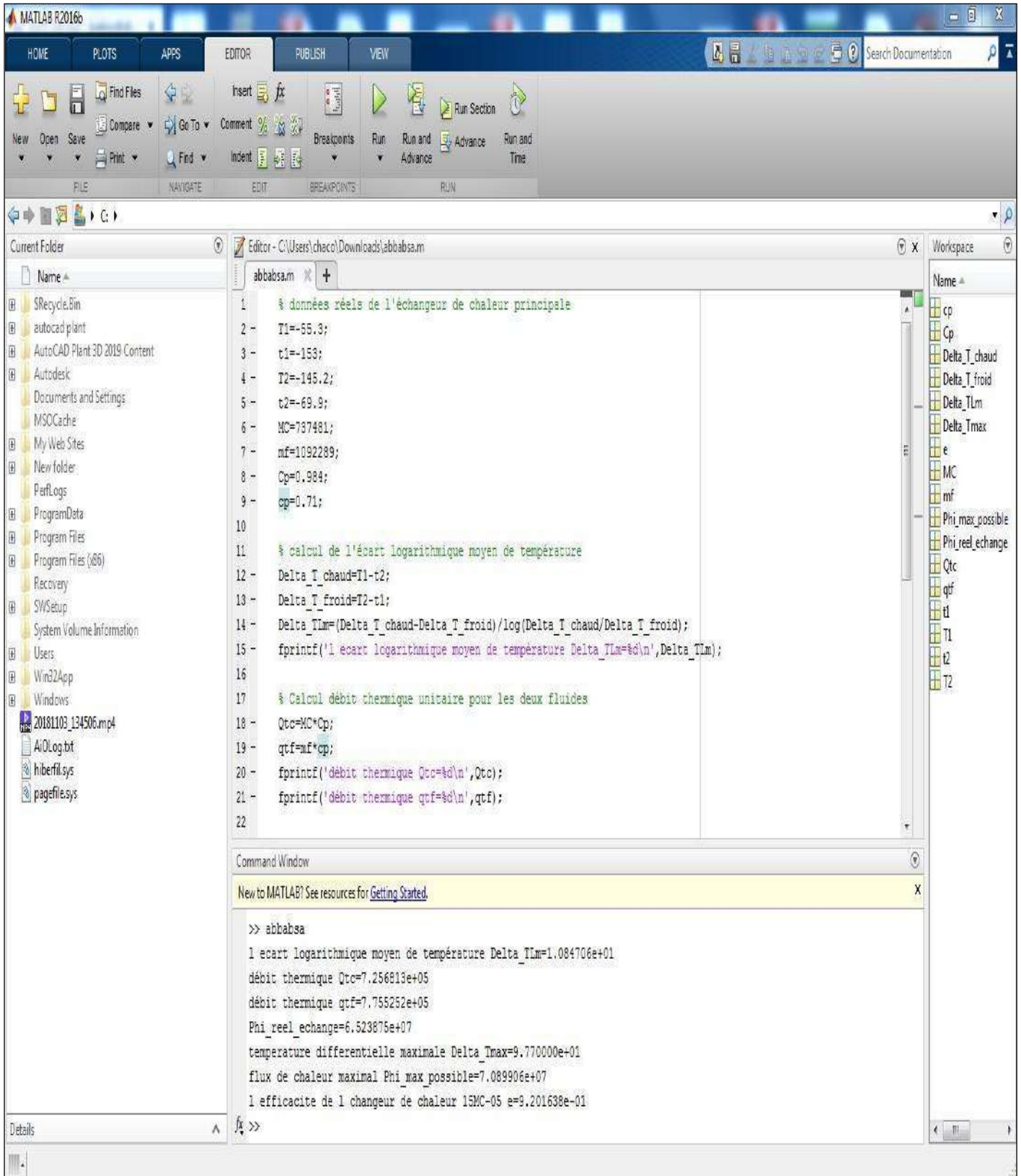


Fig III.3 Résultats de calcul obtenu par le programme

III.4 L'efficacité en fonction de K, S, Φ et NUT :

On générale le flux de chaleur maximal (ϕ max possible) dans un échangeur de chaleur reste toujours constant. Le changement de l'efficacité (ϵ) est relatif avec les facteurs suivants:

III.4.1 L'efficacité en fonction du K :

K (w/m ² °C)	10000	20000	30000	40000	50000	60000
Efficacité ϵ	0.1525	0.3051	0.4577	0.6103	0.7629	0.9154

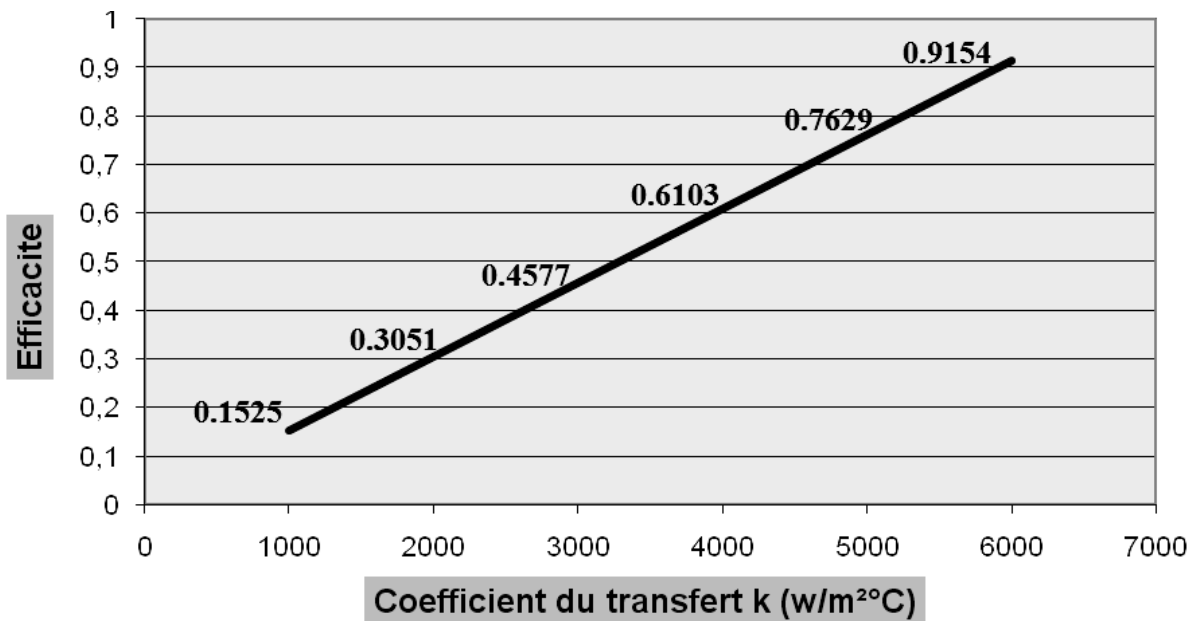


Fig III.4: L'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction de K

Interprétations :

La figure III.4 : représente la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ϵ en fonction du coefficient d'échange global K.

On sait que le coefficient d'échange de chaleur est en fonction en général des caractéristiques physiques des fluides utilisés à des températures de fonctionnement de l'échangeur de chaleur ainsi que des matériaux des tubes et de calendres et leur épaisseur.

On remarque que cette variation c'est une fonction linéaire croissante positif, L'efficacité de l'échangeur de chaleur croit linéairement avec le coefficient de transfert de chaleur global, plus le coefficient augmente plus l'efficacité est importante.

III.4.2 L'efficacité en fonction du S:

S (m ²)	50	100	150	200	250	300
Efficacité ϵ	0.1525	0.3051	0.4577	0.6103	0.7629	0.9154

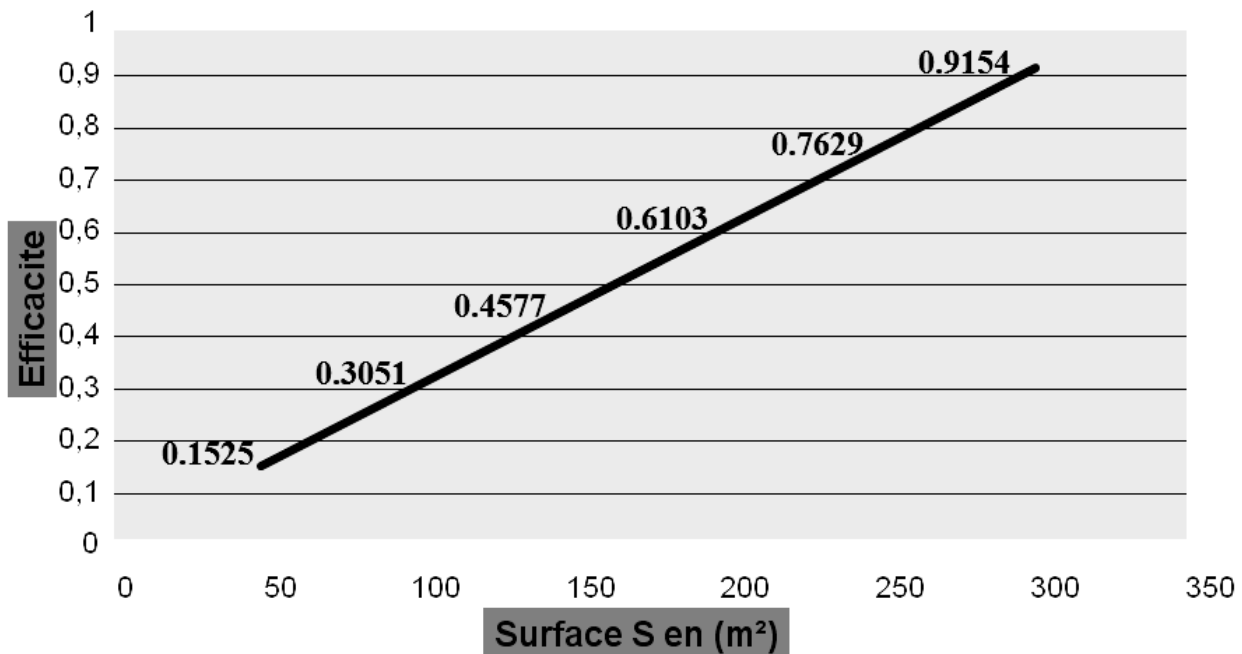


Fig III.5: Influence de la surface d'échange S sur L'efficacité de L'échangeur de chaleur

Interprétations :

La Figure III.5 : représente l'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ϵ en fonction de la surface d'échange globale S.

On remarque que cette variation c'est une fonction linéaire croissante positif, L'efficacité de l'échangeur de chaleur croit linéairement avec la surface d'échange globale S. plus le coefficient augmente plus l'efficacité est importante.

III.4.3 L'efficacité en fonction de Φ :

Φ (MW)	10	20	30	40	50	60
Efficacité ϵ	0.1407	0.2815	0.4222	0.5630	0.7037	0.8445

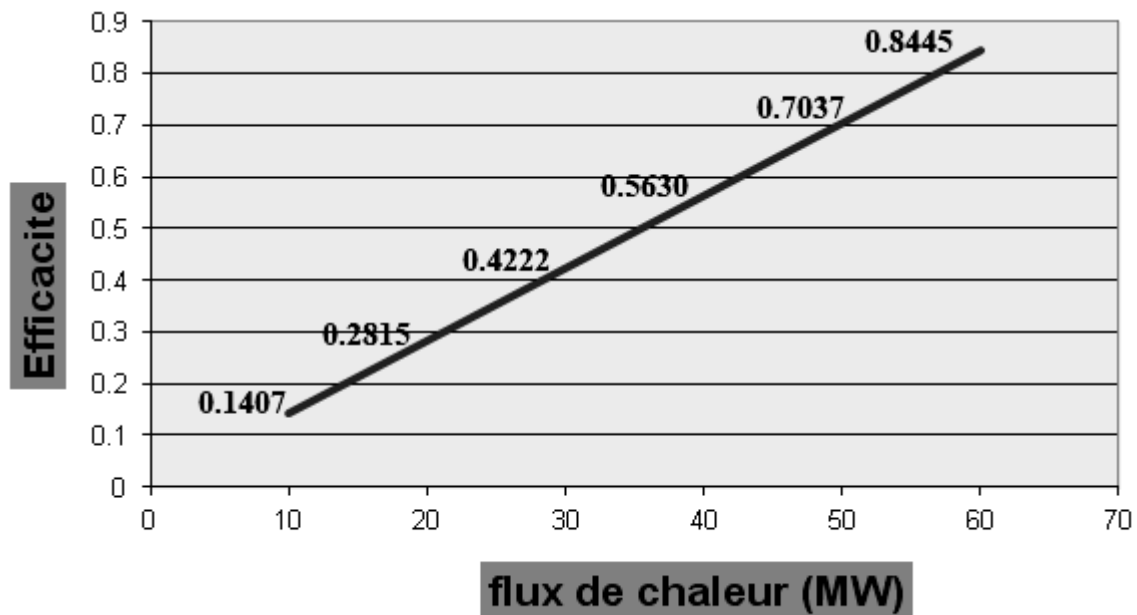


Fig III.6: l'évolution de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction du flux de chaleur échangé

Interprétation :

La Figure III.6 : représente la variation de l'efficacité ϵ de l'échangeur de chaleur en fonction de flux de chaleur Φ , On remarque que cette variation c'est une fonction linéaire croissante positif, l'efficacité de l'échangeur de chaleur croit linéairement avec la valeur du flux de chaleur échangée entre les deux fluides, plus le flux augmente plus l'efficacité est importante

III.4.4 L'efficacité en fonction de NUT:

$$\text{On a } \varepsilon = \frac{1 - \exp(-NUT(1-R))}{1 - R \exp(-NUT(1-R))}$$

NUT	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Efficacité ε	0	0.383	0.675	0.753	0.841	0.897	0.933	0.956	0.972

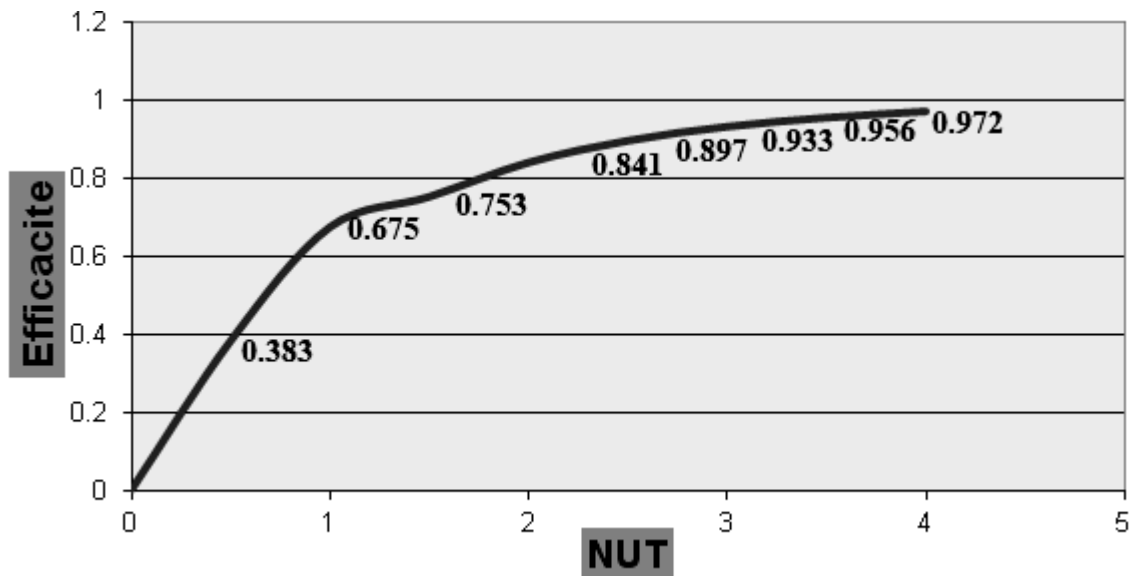


Fig III.7 : Diagramme $\varepsilon = f(NUT)$

Interprétation :

La figure III.7 : représente la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ε en fonction de nombre d'unités de transfert (NUT), Cette variation c'est une fonction exponentielle positive. A partir cette courbe on peut dire qu'il y a une relation d'équivalence entre ε et NUT, lorsque NUT augmente, l'efficacité de l'échangeur augmente aussi, jusqu'à une valeur voisine a $\varepsilon = 1$.

III.5 Conclusion :

D'après les résultats obtenus dans cette partie qui représenter par des puissances thermiques requises importante associé à des débits de fluides très élevés et une très grande efficacité thermique en raison de la circulation à contre-courant; nous concluons que l'échangeur de chaleur cryogénie 15MC-05 il est très efficace et cet organe fais un rôle très important dans le circuit de liquéfaction.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ces dernières années, l'amélioration des techniques de liquéfaction et l'innovation dans le domaine de la construction navale ont favorisé l'essor du gaz naturel liquéfié. Le transport du gaz sur de longues distances est désormais possible et économiquement viable. L'AIE prévu une augmentation de la part du GNL dans les échanges de gaz naturel dans le monde: cette part pourrait atteindre plus de 40% en 2035 selon ses projections (contre près de 30,5% en 2010).

L'importance de GNL en Algérie, et son impact sur l'économie des pays exportateurs, l'Algérie est un pionnier dans ce domaine à travers les complexes d'Arzew et Skikda.

Le complexe GL1K de Skikda avec sa grande superficie, et ses grandes installations présente un pôle stratégique et économique important qui sert à évoluer le domaine industriel en l'Algérie et cela permet de renforcer ses relations économiques avec d'autres pays du monde.

Dans tout calcul d'échangeur de chaleur, le but d'une façon général est d'obtenir la récupération d'une certaine quantité de chaleur dans des conditions économiques optimales qui sont un compromis entre les frais d'investissement, et les frais de maintenance

Nous avons fait une description du complexe GL1K de Skikda et essayer d'expliqué le processus de liquéfaction de gaz naturel, et aussi l'étude l'efficacité de l'échangeur principal cryogénique du complexe méga train de GNL, en proposant un programme qui facilite le calcul de l'efficacité de l'échangeur.

On sait que le coefficient d'échange de chaleur est en fonction en général des caractéristiques physique des fluides utilisés à des températures de fonctionnement de l'échangeur de chaleur ainsi que des matériaux des tubes et de calendres et leur épaisseur, d'après nos résultats l'efficacité de l'échangeur de chaleur croit linéairement avec le coefficient de transfert de chaleur global, plus le coefficient augmente plus l'efficacité de l'échangeur est importante, On remarque aussi que la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction de la surface d'échange globale est une fonction linéaire croissante positif, L'efficacité de l'échangeur de chaleur croit linéairement avec la surface d'échange globale.

L'économie de notre pays se base essentiellement sur l'industrie des hydrocarbures. Cette industrie Nécessite l'implantation de diverses unités de traitement. Dans ces conditions, les progrès techniques permettant de réduire ces coûts devraient jouer dans l'avenir un rôle majeur dans le développement du commerce international des hydrocarbures.



Bibliographie

[1]: Mlle. Tabet Roumaïssa : Etude de la section de réfrigération au propane pour une meilleure exploitation durant les périodes chaudes (T d'air ambiant $> 42^{\circ}\text{C}$). / Thèse fin d'étude, université Badji Mokhtar - Annaba, juin 2017

[2]: <https://www.scribd.com/document/135385216/Introduction-generale>

[3] : Wen-sheng Cao, Xue-sheng Lu, Wen-sheng Lin, An-zhong Gu, "Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction processes in skid-mounted packages".

Applied Thermal Engineering 26 (2006) 898-904.

[4]: Shahrooz Abbasi Nezhad, Bezhan Shabani and Majid Soleimani" Thermodynamic Analysis of Liquefied Natural Gas (LNG) Production Cycle in APCI Process" Journal of Thermal Science Vol.21, No.6 (2012) 564–571.

[5]: Ali Vatani, Mehdi Mehrpooya, Ali Palizdar, "Advanced exergetic analysis of five natural gas Liquefaction processes". Energy Conversion and Management 78 (2014) 720-737.

[6]: Peyman Moein, Mehran Sarmad, Hadi Ebrahimi, Marziyeh Zare, Saeed Pakseresht, Shahrokh Zandieh Vakili " APCI- LNG single mixed refrigerant process for natural gas liquefaction cycle: Analysis and optimization" Journal of Natural Gas Science and Engineering 26 (2015) 470-479.

[7]: Tianbiao He, Yonglin Ju" Optimal synthesis of expansion liquefaction cycle for distributed-scale LNG (liquefied natural gas) plant" Energy 88 (2015) 268-280.

- [8]: Mohd Shariq Khana, I.A. Karimi, Alireza Bahadori, Moonyong Lee, “Sequential coordinate random search for optimal operation of LNG (liquefied natural gas) plant”. Energy 89 (2015) 757-767.
- [9] :<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- [10]: Baosem N°1112 : La Conférence Internationale sur l'Industrie du Gaz en Algérie / Article, 21/10/2014.
- [11]: Manuel opératoire (KBR) : Projet du nouveau train de GNL Skikda, Algerie, 2014.
- [12]: Yves Jannot : Transferts Thermiques (cours et 55 exercices corrigés) / livre, 2012.
- [13]: P&ID : (Process and instrumentation diagram) / Schéma : des unités de liquéfaction.
- [14]: P&FD : (Process flow diagram) / Schéma : des unités de liquéfaction
- [15]: BABOURI Nejoua : Etude de L'opportunité de Remplacement d'un Echangeur à Plaques par un Echangeur à Tubes et Calandre / thèse fin d'étude, IAP Boumerdés, Avril 2017
- [16]: KEDISSA. N et KISMOUNE Bilel : Simulation de la colonne de déisopentaneur pour une TVR optimal dans le cas où l'isopentane ne sera pas injecté dans l'échangeur principal / thèse fin d'étude, IAP Boumerdés, 2010.
-

