

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara-Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie mécanique-Mécanique des unités pétrochimiques

Présenté par : MADENE Rabah

THEME

**Calcul analytique d'un compresseur centrifuge 2109J et
vérification par HYSYS**

Soutenu publiquement le 23 / 06 / 2024

Devant le jury :

| | Nom et Prénom | Grade | Université/Affiliation |
|-------------------|---------------------------|-------|------------------------|
| Président de jury | MEFTAH LAOUAR Sihem | Pr | UMBB |
| Examinateur | FERROUDJI Hichem | MCB | UMBB |
| Examinateur | HARKAT Yamina | MAA | UMBB |
| Encadreur | KHELIFI TOUHAMI Med Salah | MCA | UMBB |

Remerciement

Quel que soit le progrès, les différentes portes qui ont été ouvertes vers la gloire, le succès et la réussite dans la réalisation de mes rêves, je dois très respectueusement me souvenir de la raison de mon accomplissement, de ceux qui m'ont aidé et tenu la main pour continuer dans le chemin de la prospérité.

**Tous d'abord je tiens à remercier mon promoteur Mr. KHELIFI
TOUHAMI, et**

Un grand merci pour Mr. BELHAJI Aek et pour leur aide et leur soutien au sein du SONATRACH.

Mon remerciement s'adresse aussi aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté pour mon travail

Je tiens également à mentionner et à témoigner mes reconnaissances à l'ensemble du personnel de la faculté des hydrocarbures et de la chimie en particulier ceux de département de transport et équipements des hydrocarbures.



Dédicaces

Je dédié ce travail :

A toi maman ma raison de vivre, autant de phrase aussi expressive soient elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi.

A mon père, frère Rayane, mes chères sœurs et ma nièce INES vous avez tous joué un rôle essentiel dans mon parcours, et c'est avec gratitude que je vous offre ce travail, en espérant qu'il soit le reflet de l'amour et de l'appréciation que je vous porte.

A mes chères amies.

Table des matières

| | |
|--|----------|
| Introduction générale..... | 1 |
| CHAPITRE I Généralité sur GNL et Description du complexe | 2 |
| 1. Introduction..... | 3 |
| 2. Généralité sur le gaz naturel : | 3 |
| 3. Propriétés physiques et chimiques : | 3 |
| 3.1 Propriétés physiques..... | 4 |
| 3.2 Propriétés chimiques : | 4 |
| 4. Composition du gaz naturel : | 4 |
| 5. Chaîne GNL : | 5 |
| 6. Fonctionnement technique : | 6 |
| 7. Production du gaz naturel : | 7 |
| 8. Le transport du gaz naturel : | 7 |
| 8.1 Le transport par gazoduc | 7 |
| 8.2 Le transport par méthaniers..... | 8 |
| 9. Utilisation du gaz naturel : | 8 |
| 9.1 Avantages du gaz naturel : | 9 |
| 9.2 Inconvénients du gaz naturel : | 9 |
| 10 Le GNL en Algérie : | 10 |
| 11. Présentation du complexe GL2/Z : | 10 |
| 11.1 Historique du complexe : | 11 |
| 11.2 Carte technique du complexe : | 11 |
| 11.3 Organigramme générale du complexe : | 13 |
| 11.4 Fonction de l'usine : | 13 |
| 11.5 Constitution du complexe : | 13 |
| 11.5.1 Première Zone : Utilités..... | 14 |
| 11.5.2 Deuxième Zone : Process | 14 |
| 11.5.3 Troisième Zone : Terminal | 15 |
| 12. Torches et brûlots : | 16 |
| 13. Principe du procédé : | 16 |
| 13.1 Section traitement de gaz : | 17 |
| 13.1.1 Démercurisation : | 18 |
| 13.1.2 Décarbonatation : | 18 |
| 13.1.3 La déshydratation : | 19 |
| 13.2 La séparation et la liquéfaction | 20 |
| 13.2.1 La Séparation..... | 20 |
| 13.2.2 La liquéfaction | 20 |
| 14. Le fractionnement | 22 |
| 14.1 Séparation de l'Ethane | 22 |
| 14.2 Séparation du propane..... | 22 |
| 14.3 Séparation du butane et gazoline | 22 |
| 15. Conclusion : | 23 |
| CHAPITRE II Description de la zone terminale | 24 |
| 1. Introduction : | 26 |
| 2. Description de la zone terminale..... | 26 |
| 2.1 Emplacement | 26 |
| 2.2 Procède de la zone..... | 26 |
| 2.3 Les équipements de la zone terminale : | 28 |
| 2.4 Zone d'expédition | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.5 Zone de chargement..... | 28 |
| 2.6 Circuit de stockage..... | 28 |
| 3. Réservoir de stockage de GNL : | 29 |
| 3.1 Conception des réservoirs de stockage GNL : | 29 |
| 3.2 Les composants et le dimensionnement du bac de stockage GNL : | 29 |
| 3.3 Isolation du bac de stockage GNL : | 30 |
| 3.4 Le rôle de l'isolation..... | 30 |
| 4.Cryogénie | 31 |
| 4.1 Matériaux cryogéniques | 31 |
| 4.2 Propriétés physiques..... | 31 |
| 5. Système de circulation de la vapeur de GNL | 32 |
| 6. Le compresseur 2109 J..... | 32 |
| 6.1 Description : | 32 |
| 6.2 Principe de fonctionnement..... | 32 |
| 6.3 Fiche technique de compresseur..... | 33 |
| 6.4 Les équipements de compresseur | 33 |
| 7. Réchauffeur de gaz d'évaporation 2109-C..... | 34 |
| 8. Le ballon du désurchauffeur de vapeurs de stockage (2108-F) | 35 |
| 9. Conclusion : | 36 |
| CHAPITRE III Calcul analytique et simulation par HYSYS | 37 |
| 1. Introduction..... | 38 |
| 2. Rappels thermodynamiques..... | 38 |
| 2.1 Définitions..... | 38 |
| 2.2 Equation d'état | 38 |
| 2.2.1 Premier principe de la thermodynamique | 38 |
| 2.2.2 Deuxième principe de la thermodynamique | 39 |
| 3. Propriétés d'un mélange des gaz | 39 |
| 3.1 La chaleur spécifique | 39 |
| 3.2 La masse moléculaire..... | 39 |
| 3.3 L'exposant isentropique..... | 39 |
| 3.4 La constante spécifique du gaz..... | 40 |
| 3.5 Le facteur de compressibilité..... | 40 |
| 4. Thermodynamique de la compression..... | 41 |
| 4.1 Compressions de référence | 41 |
| 4.2 Les rendements de la compression : | 42 |
| 5. Calcul des caractéristiques du gaz | 43 |
| 6. Calcul des performances du compresseur : | 46 |
| 7. Calcul des pressions intermédiaires : | 48 |
| 8. Calcul des températures intermédiaires : | 49 |
| 9. Calcul des travaux | 49 |
| 10. Calcul des rendements : | 50 |
| 11. Partie simulation du compresseur : | 51 |
| 11.1 Présentation du simulateur HYSYS..... | 52 |
| 11.2 Les étapes principales d'utilisation du logiciel HYSYS..... | 52 |
| 11.3 Choix de composés : | 53 |
| 11.4 Sélection d'un model thermodynamique : | 53 |
| 12. Les resultats de la simulation : | 58 |
| 13. Interprétation des résultats : | 59 |
| CHAPITRE IV Modification du procès de récupération BOG | 60 |
| 1. Modélisation de problème..... | 61 |
| 2. La modification proposée : | 62 |
| 2.1 Les équipements utilisés : | 62 |
| 2.2 Analyse des résultats : | 67 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 3. Discussion :..... | 67 |
| Conclusion générale : | 69 |
| BIBLIOGRAPHIE | 70 |
| ANNEXES..... | 71 |

Liste des figures

Chapitre 1

- Figure I. 1 : Dessin De La Chaîne Gnl
- Figure I. 2 : Transport Du Gaz Naturel Par Gazoduc
- Figure I. 3 : Le Transport Du Gaz Naturel Par Methaniers
- Figure I. 4 : Vu Par Satellite Du Complexe
- Figure I. 5 : L'organigramme Generale Du Complexe
- Figure I. 6 : Repartition Des Gaz Produits, Du Fuel Gaz Et Des Gaz Torches
- Figure I. 7 : Schema Synoptique D'un Train De Procédé.
- Figure I. 8 : Schema Decarbonatation
- Figure I. 9 : Schema Deshydratation
- Figure I. 10 : Separation Et Liquefaction
- Figure I. 11 : Schema Fractionnement

Chapitre 2

- Figure Ii. 1 : Schema De Stockage Gnl A G12z
- Figure Ii. 2 : Dessin De Conception D'un Bac De Stockage Gnl
- Figure Ii. 3 : Schema D'installation Du Compresseur 2109 J
- Figure Ii. 4 : Schema De Rechauffeur De Vapeur 2109 C
- Figure Ii. 5 : Schema De Ballon De Desurchauffeur

Chapitre 3

- Figure Iii. 1 : Interface De Logiciel
- Figure Iii. 2 : List Des Composants
- Figure Iii. 3 : Choix Du Model Thermodynamique
- Figure Iii. 4 : La Palette Des Modeles Pour Le Choix D'equipements
- Figure Iii. 5 : Composition Du Gaz
- Figure Iii. 6 : Designe De Compresseur
- Figure Iii. 7 : Conditions De Flux D'entre De Compresseur
- Figure Iii. 8 : Conditions De Flux De Sortie De Compresseur
- Figure Iii. 9 : Modelisation De Compresseur
- Figure Iii. 10 : Propriete De Compresseur
- Figure Iii. 11 : Performance De Compresseur

Chapitre 4

- Figure Iv. 1 : Proces De La Zone Terminal
- Figure Iv. 2 : Condition De Gnl Recupere
- Figure Iv. 3 : Composition De Gnl Recupere

Figure Iv. 4 : Proces Modifie

Figure Iv. 5 : Composition Gnl

Figure Iv. 6 : Condition D'entre De Gnl

Figure Iv. 7 : Condition De Fuel Gaz

Figure Iv. 8 : Condition De Vapeur Vers Compresseur

Figure Iv. 9 : Condition De Gnl Vers Methanier

Figure Iv. 10 : Composition De Gnl Vers Methanier

Figure Iv. 11 : Composition De Gnl Recupere

Figure Iv. 12 : Conditions De Gnl Recupere

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau I. 1 : Proprietes Physiques Du Gaz Naturel [2]

Tableau I. 2 : Composition Du GN Destine L' unite Gl2z D' arzew (Algerie) [4]

Tableau I. 3 : Description Generale Du Complexe

Tableau I. 4 : Les Specification Des Produits De Gnl

Tableau I. 5 : Composition Mcr

Chapitre 3

Tableau Iii. 1 : Composition Et Conditions Critiques

Tableau Iii. 2 : Calcul Des Pressions.

Tableau Iii. 3 : Calcul Des Temperatures.

Tableau Iii. 4 : Tableau Recapitulatif

Chapitre 4

Tableau Iv. 1 : Comparaison Des Conditions

Tableau Iv. 2 : Comparaison Des Compostions

Nomenclature

GN : Gaz naturel.

GNL : Gaz naturel liquéfié.

GNT : gaz naturel traité.

GL2/Z : Complexe de liquéfaction de gaz naturel d'Arzew.

APCI : Cycle à réfrigérant mixte à cascade propane incorporée.

MEA : Mono Ethanol Amine.

MCR : multi component réfrigérant.

C₁ : Méthane

C₂ : Ethane

C₃ : Propane

C₄ : Butane

C₅₊ : Gazoline

F : Ballon

D : Démercuriseur

C : Echangeur

E : Colonne

UA/B/C/D : Chaudières

FA/B/C/D : Ballons de purge

JA/B/C/D : Pompes

JAT/BT/CT : Turbos pompes

J : Compresseurs

JT : turbo compresseur

U : Dégazeur

C : Rebouilleur

Introduction Générale

Introduction générale

Le gaz naturel est une ressource énergétique cruciale, Son commerce international est en plein croissance, avec l'Algérie comme acteur majeur grâce à ses exportations. Le GNL, obtenu par liquéfaction du gaz naturel à des températures extrêmement basses, permet un transport plus efficace. Principalement composé de méthane, le GNL est stocké en toute sécurité dans d'énormes réservoirs cryogéniques avant d'être expédié.

Lors du stockage du GNL, un phénomène d'évaporation est imposé par divers facteurs comme la température et la pression. Plutôt que de perdre cette vapeur vers l'atmosphère, ou brûler à travers la torche, elle peut être récupérée, ce qui maximise l'utilisation de l'énergie. Un système de récupération de vapeur mise en place pour diriger cette vapeur vers des utilisations utiles, comme le chauffage des chaudières.

Dans ce mémoire nous allons viser à étudier la performance thermodynamique d'un compresseur centrifuge, utilisé dans le procédé de récupération Boil Off Gas dans le complexe de GL2Z d'Arzew, par une analyse comparative entre la méthode analytique et la méthode numérique fournit par des logiciels de simulations connues par leurs efficacités dans ce domaine. Après l'introduction, ce travail se compose de quatre chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre présente une généralité sur le GNL et description de complexe GL2Z d'Arzew lieu de déroulement de notre stage pratique.

Dans le deuxième chapitre, on donne des informations sur la zone de terminal et la section BOG, et description d'un équipement essentiel dans le procédé de récupération d'énergie c'est le compresseur centrifuge 2109J.

Dans le troisième chapitre, on entame la partie de vérification thermodynamique en rappelant quelques notions fondamentales, et en donnant les différentes formules utilisées pour le calcul analytique, ensuite on fait l'application numérique. Après ce travail, on compare les résultats trouves avec les résultats obtenus par le logiciel HYSYS.

Le quatrième chapitre, concerne une proposition de modifier le circuit d'injection des vapeurs provenant des méthaniers.

CHAPITRE I

Généralité sur le GNL et Description du complexe

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

1. Introduction :

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est une forme de gaz naturel refroidie à une température d'environ -162°C , ce qui le transforme en un liquide incolore et inodore. Ce processus de liquéfaction permet de réduire le volume du gaz naturel d'environ 600 fois, facilitant ainsi son transport et son stockage. Le GNL est devenu une source d'énergie de plus en plus importante dans le monde entier, en raison de sa disponibilité, de sa fiabilité et de son faible impact environnemental.

Les complexes de liquéfaction de GNL sont des installations complexes et sophistiquées qui nécessitent une technologie de pointe et une expertise technique approfondie. Ils jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en énergie à l'échelle mondiale, en permettant le transport du gaz naturel sur de longues distances et en offrant une source d'énergie propre et fiable à des pays qui n'ont pas accès à des ressources gazières naturelles.

Le GNL est une ressource énergétique stratégique de plus en plus importante dans le monde d'aujourd'hui. Les complexes de liquéfaction de GNL jouent un rôle essentiel dans la production, le transport et la distribution de cette source d'énergie propre et fiable.

2. Généralité sur le gaz naturel :

Le gaz naturel est un combustible fossile formé sur des millions d'années par la décomposition de matière végétale et animale enfouie dans des roches sédimentaires. Sous l'effet de la chaleur et de la pression, cette matière se transforme en hydrocarbures solides, liquides ou gazeux.

Ce mélange d'hydrocarbures est constitué en grande partie de méthane, mais il peut contenir aussi, en quantités variables, des hydrocarbures plus lourds qui se liquéfient à la pression atmosphérique, et de la vapeur d'eau. Il peut aussi comporter des composés soufrés, comme l'hydrogène sulfuré et d'autres gaz non hydrocarbonés, tels que le gaz carbonique, l'azote ou l'hélium.

Après avoir été extrait par forage, le gaz peut être acheminé par voie terrestre et sous-marine par une conduite appelée, dans ce cas, un gazoduc. Des stations de compression sont alors réparties le long du tube afin de maintenir une pression suffisante, ce qui augmente l'emprise au sol de telles constructions.

Mais le gaz peut aussi être mis en phase liquide par l'abaissement de sa température à -163°C , ce qui permet de réduire 600 fois son volume et facilite donc son transport sur de grandes distances. Des usines de liquéfaction produisent ce gaz naturel liquéfié (GNL ou *LNG* en anglais). Il peut alors être stocké ou transporté par des camions-citernes ou des navires dédiés, les méthaniers.[1]

3. Propriétés physiques et chimiques :

Le gaz naturel est un mélange gazeux d'hydrocarbures saturés, il a les propriétés physiques d'un gaz.

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

3.1 Propriétés physiques

Les différentes propriétés physiques du gaz naturel sont présentées dans le tableau I.1 suivant :

Tableau I. 1 : propriétés physiques du gaz naturel [2]

| Propriété | Indication |
|---|--|
| Odeur et apparence | Gaz incolore et inodore mais contenant un produit odorant (Mercaptan pour la détection des fuites) |
| Masse molaire | 16.7g/mole |
| Densité de vapeur à 15°C | 0.58 (plus léger que l'air =1) |
| Masse volumique | 0.72 g/cm ³ |
| Point de liquéfaction | -163°C |
| Point de solidification | -184°C |
| Solubilité dans l'eau | 0.00023 g/mole |
| Pourcentage de substances volatiles (%) | 100% |

3.2 Propriétés chimiques :

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 [2].

4. Composition du 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 [2].

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 (NO_x) sont plus faibles que celles du pétrole ou du charbon et celles de gaz carbonique (CO₂) inférieures à celles des autres combustibles fossiles (selon Eurogas de 40 à 50% de moins que le charbon et de 25 à 30% de moins que le pétrole) [3]. Le tableau I.2. Présente les différents composants du gaz naturel destiné à être liquéfié au niveau de l'unité GL2Z d'Arzew (Algérie).

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

Tableau I. 2 : composition du gaz naturel destiné à la liquéfaction au niveau de l'unité GL2Z d'Arzew (Algérie)

| Compositions | % molaire |
|---------------------------|--------------|
| Méthane | 83,12 |
| Ethane | 7,70 |
| Propane | 2,08 |
| n-butane | 0,49 |
| Isobutane | 0,31 |
| n-pentane | 0,12 |
| Isopentane | 0,11 |
| Hexanes + | 0,07 |
| Azote | 5,60 |
| Eau | 0,00 |
| Hélium | 0,19 |
| Dioxyde de Carbone | 0,21 |

5. Chaîne GNL :

Dans le cas général, une chaîne de transport de gaz naturel liquéfié comprend principalement :

- Le champ de production de gaz naturel.
- L'usine de traitement du gaz de transport).
- Le gazoduc de transport jusqu'à l'usine de liquéfaction.
- Le traitement du gaz à liquéfier.
- Les unités de liquéfaction.
- Les réservoirs de stockage cryogéniques.
- Le terminal d'expédition.
- Le transport par méthaniers.
- Le terminal de réception et de stockage.
- Le terminal de regazéification.

D'après les chiffres les plus souvent cités pour les anciens marchés, le coût du GNL mis à disposition du consommateur, sans compter ni le coût de distribution ni la marge bénéficiaire, varie actuellement entre 2,9 et 4,2 USD/MBTU. Il se subdivise en coûts de : [3]

- Production 0,8-1,0

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

- Pipelining 0,2-0,5
- Liquéfaction 1,2-1,2
- Shipping 0,4-1,0
- Storage/Ragas 0,3-0,5
- A titre de comparaison, ces données du projet Nigérian :
- Field développement : 0,80
- Liquéfaction : 1,22
- Regazéification : 0,39
- Tankers : 0,98

Total : 3,39 USD/MBTU

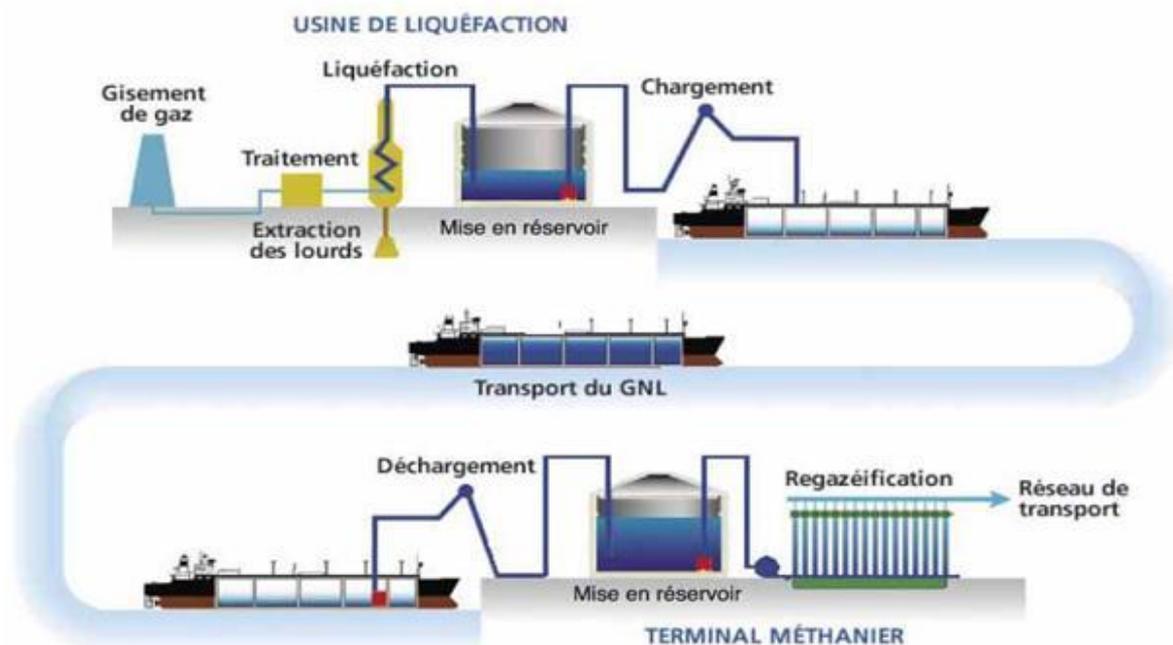


Figure I. 1 : dessin de la chaîne GNL

6. Fonctionnement technique :

Une « chaîne GNL » est créée lorsque la construction d'un gazoduc n'est pas possible, le plus souvent en raison de coûts de construction trop élevés, de la distance de transport, d'une étape maritime imposée ou de contraintes géopolitiques. Elle comprend plusieurs grandes étapes, de la liquéfaction du gaz naturel jusqu'à la regazéification vers le consommateur final.

7. Production du gaz naturel :

Le gaz naturel et le pétrole brut sont souvent associés et extraits simultanément des mêmes gisements, ou encore des mêmes zones de production. Les hydrocarbures liquides proviennent du pétrole brut pour une proportion moyenne de l'ordre de 80 % ; les 20 % restants, parmi les fractions les plus légères, le propane et le butane sont presque toujours liquéfiés pour en faciliter le transport. L'exploration (recherche de gisements) et l'extraction du gaz naturel utilisent des techniques à peu près identiques à celles de l'industrie du pétrole. Une grande partie des gisements de gaz connus à travers le monde a d'ailleurs été trouvée au cours de campagnes d'exploration dont l'objectif était de trouver du pétrole [4].

Lors de l'extraction d'un gaz sous pression, son refroidissement et sa détente à la tête du puits provoque la condensation des hydrocarbures (C_5 à C_8 qu'il peut contenir) et d'eau. Les hydrocarbures liquides légers récupérés, appelés « condensats de gaz naturel » ou « liquide de puits de gaz naturel » correspondent à un pétrole extrêmement léger, de très haute valeur (donnant de l'essence et du naphtha). Tout le reste (hydrocarbures C_1 à C_4 , dioxyde de carbone, sulfure d'hydrogène et hélium) est gazeux à température ambiante et acheminé par gazoduc vers une usine de traitement de gaz. Il faut donc deux réseaux de collecte, un pour le gaz et un pour les condensats [4].

8. Le transport du gaz naturel :

8.1 Le transport par gazoduc

C'est l'option la plus répandue, elle est quatre ou cinq fois plus coûteuse que le transport du pétrole par pipe-line.

Un gazoduc est constitué de tubes en acier épais soudés entre eux (Fig. I.2). Les épaisseurs varient de quelques millimètres à plus d'un centimètre, et le diamètre de 20 cm à 1 m ou plus (le plus grand gazoduc actuel a un diamètre de 1,40 m).

Ces tubes sont souvent recouverts d'une couche protectrice avant d'être soudés entre eux. Avant de déposer le tronçon dans la tranchée, les soudures sont contrôlées très rigoureusement et recouvertes d'un revêtement de protection supplémentaire [5].

Le gaz dans la tuyauterie doit rester à une pression d'environ 70 bars pour garantir une vitesse de transport élevée. Ceci est assuré à l'aide de puissantes stations de compression situées le long du réseau (environ tous les 80 km) [5].



Figure I. 2 : Transport du gaz naturel par gazoduc

8.2 Le transport par méthaniers

Pour être transporté par voie maritime, à bord de méthaniers, le gaz naturel doit être liquéfié (Fig. I.3). Le commerce du Gaz Naturel Liquéfié (GNL) grandit dans les échanges internationaux. Le mode de transport par voie terrestre, moins flexible, repose sur de vastes réseaux de gazoducs [6].



Figure I. 3 : Le transport du gaz naturel par méthaniers

9. Utilisation du gaz naturel :

Nombreuses applications dans divers secteurs. Voici quelques-unes des principales utilisations du gaz naturel :

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

- **Production d'électricité** : Le gaz naturel est l'une des principales sources d'énergie pour la production d'électricité. Il est brûlé dans des turbines à gaz pour générer de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour produire de la vapeur d'eau, qui à son tour entraîne des turbines à vapeur pour produire de l'électricité.
- **Chauffage** : Le gaz naturel est largement utilisé pour le chauffage des bâtiments résidentiels et commerciaux. Il est brûlé dans des chaudières pour produire de la chaleur qui est ensuite distribuée via des systèmes de chauffage à air ou à eau.
- **Eau chaude sanitaire** : Le gaz naturel peut également être utilisé pour chauffer l'eau sanitaire dans les maisons et les bâtiments. Il est brûlé dans des chauffe-eau à gaz pour chauffer l'eau stockée dans des réservoirs, qui est ensuite distribuée aux robinets et aux douches.
- **Industrie** : Le gaz naturel est une source d'énergie importante pour de nombreux processus industriels, tels que la production de verre, de ciment, d'acier et de produits chimiques. Il est utilisé pour alimenter les fours, les chaudières et les sécheurs industriels.
- **Transport** : Le gaz naturel est de plus en plus utilisé comme carburant pour les véhicules, en particulier les camions et les autobus. Il est également utilisé comme carburant pour les navires et les trains dans certains pays.
- **Production d'hydrogène** : Le gaz naturel peut être transformé en hydrogène, qui est une source d'énergie propre et polyvalente pouvant être utilisée dans diverses applications, telles que les piles à combustible et les véhicules à hydrogène.

9.1 Avantages du gaz naturel :

Le gaz naturel présente plusieurs avantages par rapport à d'autres sources d'énergie :

- **Abondant** : Le gaz naturel est une ressource énergétique abondante disponible dans de nombreuses régions du monde.
- **Propre** : Le gaz naturel brûle plus proprement que le charbon et le pétrole, produisant moins d'émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques.
- **Efficace** : Le gaz naturel est une source d'énergie efficace qui peut être convertie en électricité et en chaleur avec un rendement élevé.
- **Polyvalent** : Le gaz naturel peut être utilisé pour une large gamme d'applications, y compris la production d'électricité, le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'industrie et le transport.

9.2 Inconvénients du gaz naturel :

Le gaz naturel présente également quelques inconvénients :

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

- **Combustible fossile :** Le gaz naturel est une ressource fossile non renouvelable dont l'extraction et l'utilisation peuvent avoir des impacts environnementaux négatifs.
- **Fuites de méthane :** Les fuites de méthane, un puissant gaz à effet de serre, peuvent se produire lors de l'extraction, du transport et du stockage du gaz naturel.
- **Risques d'explosion :** Le gaz naturel est une substance inflammable qui peut présenter des risques d'explosion en cas de fuite ou de mauvaise manipulation.

10 Le GNL en Algérie :

Le GNL est un élément clé de l'économie algérienne et joue un rôle important dans son développement et sa diversification. Le pays possède des réserves importantes de gaz naturel et une infrastructure de liquéfaction en croissance. L'Algérie est classée en troisième position après Qatar, en termes de capacité de production de GNL. Elle est en outre troisième exportateur mondial de GNL, L'Algérie est un carrefour privilégié pour le développement de l'industrie du GNL, et grâce au récent accord de partenariat avec British Pétroleum (Isle of Graine) elle va pouvoir retourner sur le marché britannique et renforcer sa position sur le bassin atlantique. Ainsi l'Algérie, est en pleine phase d'intégration énergétique régionale, grâce aux nouvelles routes gazières comme Medgaz (l'Algérie Espagne) et Galsi (Algérie Sardaigne-Italie), mais aussi grâce à la convergence gaz électricité en Europe, qui lui offre de nouvelles possibilités de renforcement sur le bassin euro-méditerranéen.

L'Algérie a été en 2023 le premier exportateur de gaz naturel liquéfié (GNL) en Afrique, devançant le Nigeria, longtemps restée leader.

Ainsi, l'Algérie a exporté 12,9 millions de tonnes de GNL en 2023, un volume en hausse de 26,1% en comparaison avec 2022 (10,2 millions de tonnes).

Une performance d'autant plus remarquable puisque le Nigeria a occupé la première place du classement durant plus de 10 ans. En comparaison, le Nigeria a exporté 12,8 millions de tonnes de GNL en 2023, un volume en baisse de 9,9% comparativement à 2022. Du côté des pays clients de l'Algérie, la Turquie est le premier importateur du GNL algérien. Elle vient devant la France, l'Italie, l'Espagne et la Chine.[7].

11. Présentation du complexe GL2/Z :

Le complexe de liquéfaction du Gaz Naturel (GL2/Z) de la Sonatrach est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, à 450Km de l'ouest d'Alger. Il s'étend sur une superficie de soixante-douze (72) hectares au bord de la mer d'où la facilité du transport par méthaniers. La construction de l'usine a débuté en 1977 et sa mise en production remonte à 1981. Le Gaz est acheminé vers l'usine par gazoduc en provenance de l'usine de traitement de Hassi R'Mel pour le rendre transportable. Il sera conditionné de nouveau au complexe avant d'être liquéfié,

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

stocké, puis chargé à bord des navires méthaniers spécialement conçus pour le transport cryogénique. Le GNL produit est destiné dans sa totalité vers les marchés internationaux [8].

11.1 Historique du complexe :

Le complexe GL2/Z est la dernière usine de liquéfaction où l'engineering a été assuré par la société américaine d'engineering « PULLMAN KELLOGG » qui a été chargée des études de la construction et du démarrage des différentes installations.

L'historique de sa réalisation et de son entrée en production présente comme suit :

Signature du contrat09 février 1976
Ouverture du chantier15 mars 1977
Pose de la première pierre21 février 1978
Première production du GNL20 janvier 1981
Première expédition du GNL29 janvier 1981
Rénovation du complexe1992 à 1996
Certification du complexe iso 9001-2000 : 05 Novembre 2002.

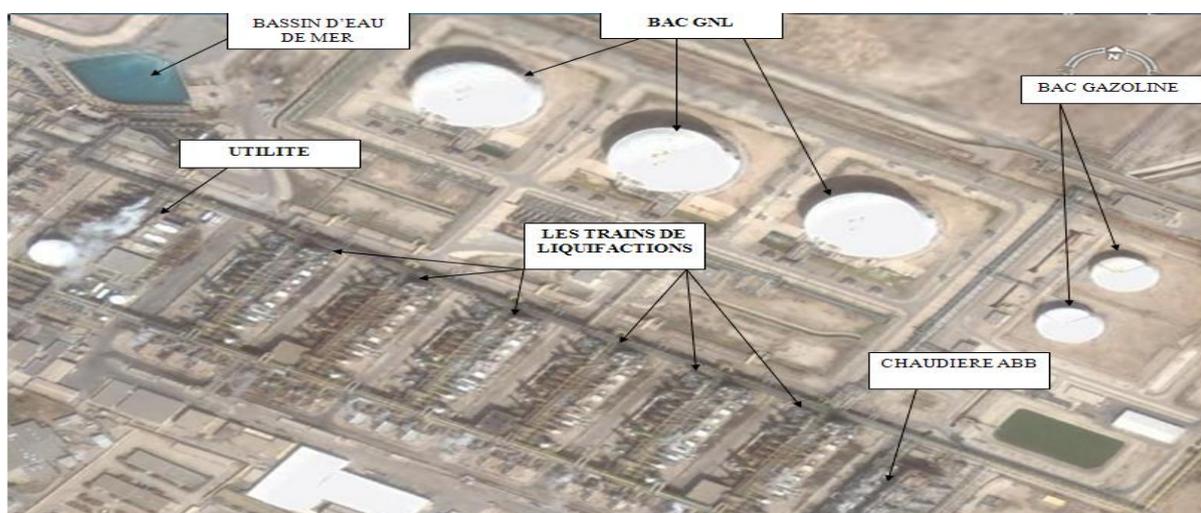


Figure I. 4 : vu par satellite du complexe

11.2 Carte technique du complexe :

Le complexe GL2/Z fait partie des six complexes de liquéfaction qui appartient à l'activité (EN AVAL) de l'entreprise SONATRACH national et a pour mission de traiter le gaz naturel transporté par gazoduc en provenance de Hassi R'mel en gaz naturel liquéfié GNL avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gazoline, ce gaz est ensuite transporté dans les méthaniers (bateau transportant du méthane) à destination de l'étranger.

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

A la sortie des puits, le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures légers dont la teneur en méthane prépondérante ($\geq 80\%$). Il contient également en proportion décroissante des traces d'hydrocarbures lourds, en plus d'éléments non combustibles tels que le CO₂ (gaz carbonique) et le He (hélium).

Le complexe GL2/Z se compose de 6 trains de liquéfaction identique chacun à une capacité de production de 9000 m³ de GNL par jour.

Le tableau suivant donne une description du complexe :

Tableau I. 3 : Description générale du complexe

| | |
|--------------------------------|---|
| Situation Géographiques | Situé sur la côte, à 40 km de la ville d'Oran, dans la daïra de Béthioua. |
| Surface | S'étend sur une superficie de 72 hectares, dont que 56 hectares occupé par les installations. |
| Constructeur | Inc Pull Man Kellogg (USA) dans le cadre d'un contrat clé dans la main. |
| Objectif | Traitement du GN qui signifie la séparation et la transformation dans GNL. |
| Source De provision | Les champs de gaz de Hassi R'mel. |
| Produit | Le gaz naturel Liquéfié. Gazoline. |
| Capacité de production | 17.5 millions m³ / année de GNL & 123.000 tonnes / année de Gazoline. |
| Capacité de stockage | 3 réservoirs de 100.000 m³ & deux (02) ferrys de gazoline de 45.000 m³ chacun. |

11.3 Organigramme générale du complexe :

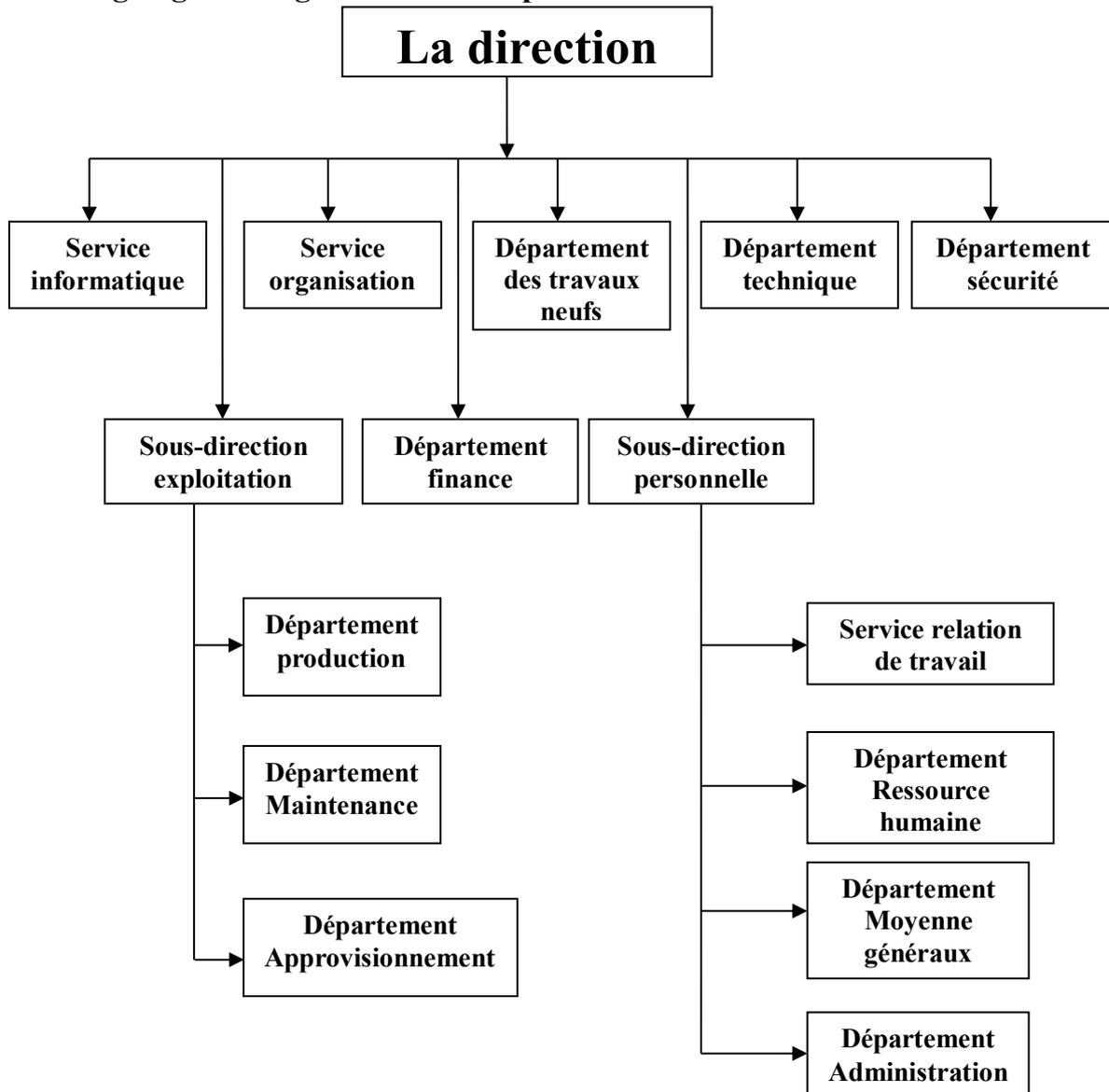


Figure I. 5 : l'organigramme générale du complexe

11.4 Fonction de l'usine :

L'usine a été conçue pour permettre d'assurer le transport sous forme liquide du gaz naturel provenant de HASSI R'MEL ce gaz est acheminé par pipeline vers le complexe ; il traite, liquéfié stocké, le gaz naturel liquéfié (GNL) est ensuite chargé à bord de navires méthaniers de haut mer spécialement prévus pour le transport cryogénique et il est livré à l'étranger.

11.5 Constitution du complexe :

Le complexe GL2/Z est constitué trois (03) zones essentielles :

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

11.5.1 Première Zone : Utilités

Cette zone est essentiellement autonome, elle assure la fourniture de toutes les utilités pendant le démarrage et la mise en marche des six trains de liquéfactions ainsi que toutes les installations de production (électricité, air instrument, eau dessalée) [9].

- Le débit d'eau de mer entre dans l'usine qui est de 173.400m³ /h captée par l'intermédiaire d'une station de pompage raccordée au bassin de distribution d'eau de mer. Le réseau d'eau de mer est utilisé comme : agent de refroidissement dans les unités de liquéfaction, pour la lutte anti-incendie, et pour l'obtention de l'eau dessalée.
- Unité de dessalement : Il y a cinq unités de dessalement identiques ayant chacune un débit nominal de 45 m³ /h d'eau distillée.
- Réseau d'air : Quatre moto-compresseurs centrifuges à trois étages permettent la production et l'alimentation des différentes sections de l'usine en air comprimé pour l'instrumentation pneumatique.
- Circuit d'eau potable : L'eau potable est fournie par la SONADE. Elle se dirige dans le réservoir de stockage d'eau potable, d'où elle est transférée par pompage dans le collecteur de distribution pour l'utilisation de l'usine.
- L'eau de refroidissement (FCW) : Le réseau d'eau de refroidissement est destiné aux équipements pour lesquels l'utilisation de l'eau de mer peut être nuisible (refroidissement des compresseurs d'air...).
- Production d'énergie électrique : La production d'électricité est assurée par trois turbogénérateurs et une source de SONELGAZ. Les générateurs électriques sont entraînés par des turbines à vapeur 62 bars. Ces générateurs peuvent fournir chacun une puissance de 20 MW.
- Réseau de gaz combustible : Le réseau de gaz combustible assure l'alimentation de toutes les chaudières de l'usine ainsi que les veilleuses des torches.[9]

11.5.2 Deuxième Zone : Process

Cette zone est composée de six trains de liquéfaction indépendants, fonctionnant en parallèles avec vingt-deux chaudières dont quatre nouvelles dites chaudière ABB.

- Le gaz naturel venant de HASSI R'MEL est distribué à chacun des trains par un réseau de canalisation permettant d'assurer un débit de 270.000 m³/h pour chaque train.
- Dans chaque train, le gaz naturel est d'abord traité pour éliminer le gaz carbonique, la vapeur d'eau, et le mercure.
- Après ce traitement, le gaz naturel subit en premier un refroidissement dans les échangeurs de propane qui abaisse sa température à -30°c pour condenser les hydrocarbures lourds.

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

- Le gaz passant à travers le faisceau bobiné est refroidi, puis liquéfié à contre-courant par un fluide frigorigène appelé MCR (réfrigérant à composant multiple) à la sortie de l'échangeur, sa température est de -148°C , et sa pression de 24 bars effectifs.
- Le GNL obtenu est alors détendu et débarrassé de son azote dans un ballon déazoteur pour acquies les spécifications définitives pour être acheminé vers le stockage à l'aide de pompes.
- La section de fractionnement qui reçoit les hydrocarbures lourds, extrait l'éthane, le propane, le butane et la gazoline.
- L'éthane est envoyé en appoint dans la boucle de refroidissement MCR et en réinjection dans le GNL pour augmenter son pouvoir calorifique supérieur.
- Le propane est envoyé en appoint dans les boucles de MCR et propane (GL1/Z, GL2/Z) mais la majeure partie est envoyée au complexe GP1/Z qui le commercialise.
- Le butane est envoyé principalement au GP1/Z pour sa commercialisation.
- La gazoline est acheminée vers les bacs de stockage avant d'être vendue sur le marché libre international.[9]

11.5.3 Troisième Zone : Terminal

C'est la zone de stockage et de chargement.

- **Stockage :**

Le GNL produit par les trains de liquéfaction est dirigé vers les trois bacs de stockage par les pompes de chaque train. À la pression atmosphérique de 1.103 bars et une température de -162°C . Le remplissage des bacs de stockage peut s'effectuer soit par le haut ou par le bas.

Les vapeurs produits par le GNL sont récupérés dans le collecteur commun aux trois réservoirs dont la pression est réglée à 1.05 bars absolus, ce collecteur les envoie dans le ballon qui reçoit aussi les vapeurs provenant des méthaniers, dont la température est maintenue inférieure à -96°C par désurchauffe. Les compresseurs renvoient les vapeurs vers le système du gaz combustible.

Le GNL peut être transféré d'un réservoir à un autre lorsqu'on ne charge pas, en utilisant la pompe de transfert. Il est également possible de transférer la production de GNL de GNL1 vers les bacs de stockage de GNL2, en utilisant également la pompe de transfert de GNL2 à GNL1, le débit maximum est de l'ordre de $12000\text{m}^3/\text{h}$.

- Bacs de GNL : Nombre 03.
- Capacité unitaire de 100.000 m^3 .
- Bacs de gazoline : Nombre 02.
- Capacité unitaire de 14.500 m^3 .

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

- **Chargement :**

Les installations de chargement permettent le transfert du GNL contenu dans les bacs vers les cuves des méthaniers. Les cinq pompes de chargement effectuent le pompage du GNL qui est refoulé à travers un collecteur commun jusqu'aux quais 02, chacun de ces derniers est composé de quatre bras de chargement, ils sont articulés pour permettre le raccordement aux brides du navire avec une certaine liberté de mouvement de ce dernier, un cinquième bras est destiné à la collecte des vapeurs de méthanier lors de la mise en froide et du chargement.

Ces vapeurs sont envoyés soit à un ballon puis à la torche du méthanier, soit à un autre ballon pour retourner au système de gaz combustible par l'intermédiaire des compresseurs.

12. Torches et brûlots :

Le complexe est doté d'un système de sécurité permettant d'évacuer le trop plein de gaz et de liquides pouvant causer une élévation de la pression dans les différents équipements. Il est constitué d'un ensemble de purges, d'évents, de torches et de brûlots qui fonctionnent pendant le démarrage et l'arrêt (normal ou d'urgence) des trains, et lors de la marche normale ou perturbée de toute l'usine. Le système comporte un brûlot et quatre torches : Torche chaude, torche froide, torche basse pression de GNL et torche de mise à froid des méthaniers.

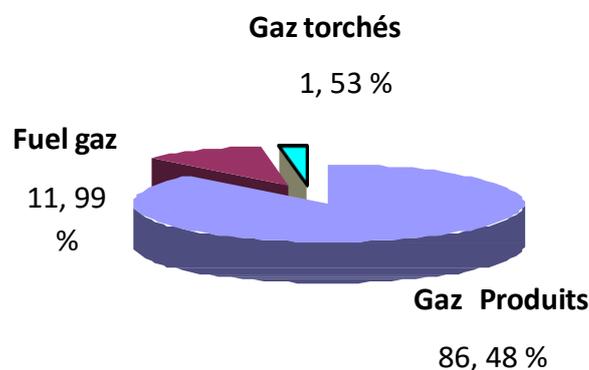


Figure I. 6 : Répartition des gaz produits, du fuel gaz et des gaz torchés

13. Principe du procédé :

La production de GNL dans le complexe GL2/Z est assurée par six trains fonctionnant en indépendance où chacun comprend un nombre d'équipements montés principalement en série, assurant ainsi la transformation du GN de l'état gazeux à l'état liquide, chaque train est divisé en Cinq sections :

- ✓ Section traitement de gaz
- ✓ Section séparation

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

- ✓ Section liquéfaction
- ✓ Section compression
- ✓ Section fractionnement

Le procédé A.P.C.I (Air Product and Chemicals - Incorporation) utilisé dans le complexe GL2/Z fonctionne avec deux fluides frigorigènes, le Propane et le MCR (multi component réfrigérant).

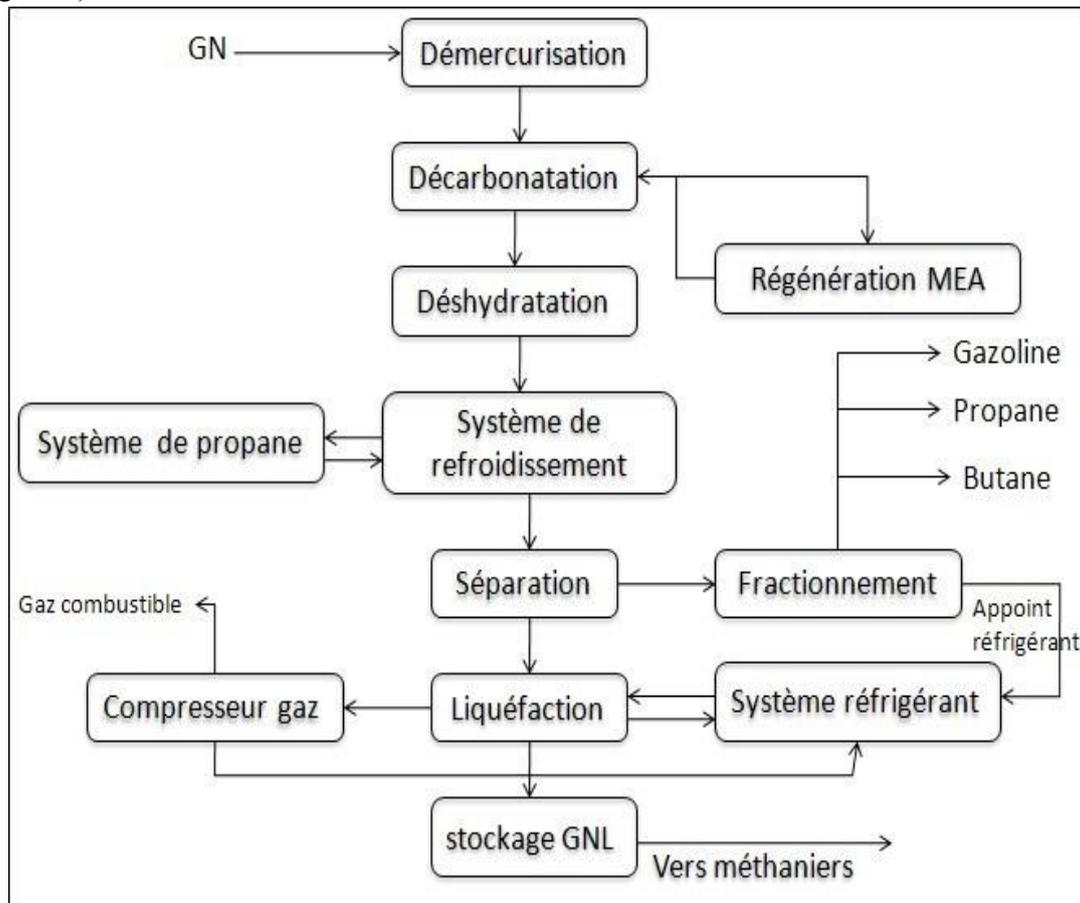


Figure I. 7 : Schéma synoptique d'un train de procédé.

13.1 Section traitement de gaz :

Le GN, à sa sortie du gisement de HASSI RMEL, est un mélange d'hydrocarbure dont la teneur en méthane est supérieure à 80% ; mais contient également de l'éthane du propane, du butane, du pentane et quelque trace d'hydrocarbures lourds. L'alimentation en GN se fait à 42 bars et à la température ambiante.

Il doit être conditionné avant son liquéfaction aux températures cryogéniques. Ce conditionnement comprend l'élimination des contaminants tels que le mercure, le gaz carbonique et la vapeur d'eau. Leurs présences dans le gaz, causeront des problèmes d'exploitation aux températures cryogéniques, créant ainsi des bouchages au niveau des vannes et des échangeurs, de la corrosion par le mercure des boites froides en aluminium.

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

Ce conditionnement est assuré par le démercuriseur, la section décarbonatation et la déshydratation.

Tableau I. 4 : Les spécification des produits de GNL

| PRODUIT | PROPORTION MOYENNE | TEMPERATURE EBULLITION | OBSERVATIONS |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|--|
| C ₁ H ₄ | 83 % | -160°C | Teneur spécifier, à contrôler |
| C ₂ H ₆ | 7 % | -90°C | |
| C ₃ H ₈ | 2 % | -45°C | Commercialisés à part |
| C ₄ H ₁₀ | 1.5 % | -12°C | |
| C ₅ + | 0.5 % | - | |
| CO ₂ | 0.24 % | -80°C | Bouchage à basse température, à éliminer |
| N ₂ | 5.5 % | -196°C | Commercialisé à part |
| He | 0.17 % | -270°C | |
| H ₂ O | 50 ppm | +100°C | Risque de bouchage, à éliminer |
| Mercure (Hg) | < 1 µg/Nm ³ | - | Corrosif pour le matériel, à contrôler |

13.1.1 Démercurisation :

Le GN, à son entrée dans le train, passe à travers une vanne, pour réguler sa pression à 42 bars puis dans un ballon séparateur X31F où tous les hydrocarbures liquides en suspension sont séparés et éliminés pour ne pas encrasser le circuit. Il est ensuite chauffé à 38°C dans le pré chauffeur X31C, utilisant de la vapeur à 4,5 bars, avant d'entrée dans le Démercuriseur X42D à billes d'alumines pour retenir le mercure.[8]

13.1.2 Décarbonatation :

Le GN entre à la base de la colonne d'absorption X31E. Le CO₂ est extrait par absorption au contact d'une solution de MEA circulant à contre-courant. La teneur en CO₂ doit être inférieure à 70 ppm à la sortie de l'Absorbeur.

En tête de colonne, le GN est lavé par une eau déminéralisée qui est injectée au moyen des pompes X36J/JA. [8]

Régénération de la MEA :

En sortie de l'Absorbeur, la solution MEA est chargée en CO₂. Elle doit donc être régénérée pour être utilisée de nouveau. Cette opération s'effectue dans ce qu'on appelle la boucle de régénération de la MEA.

Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

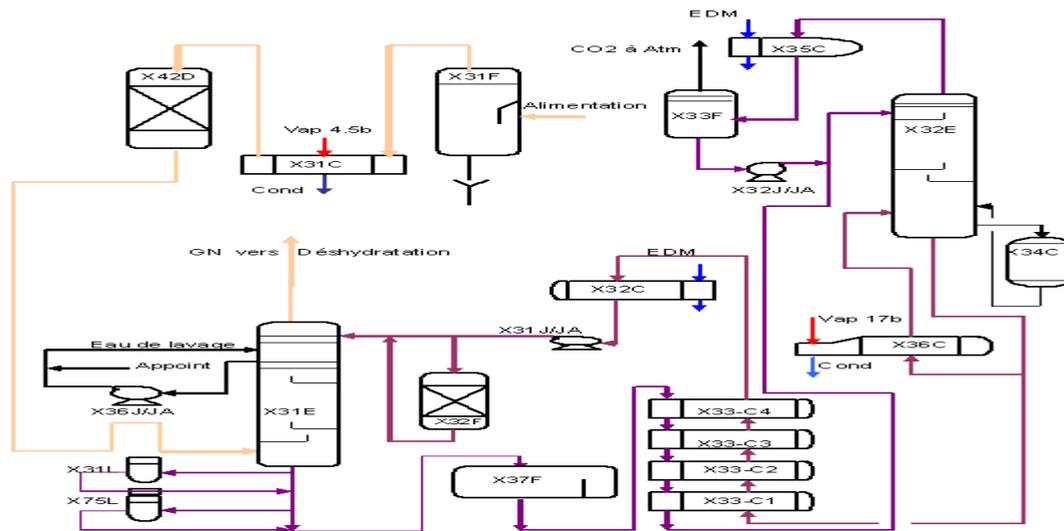
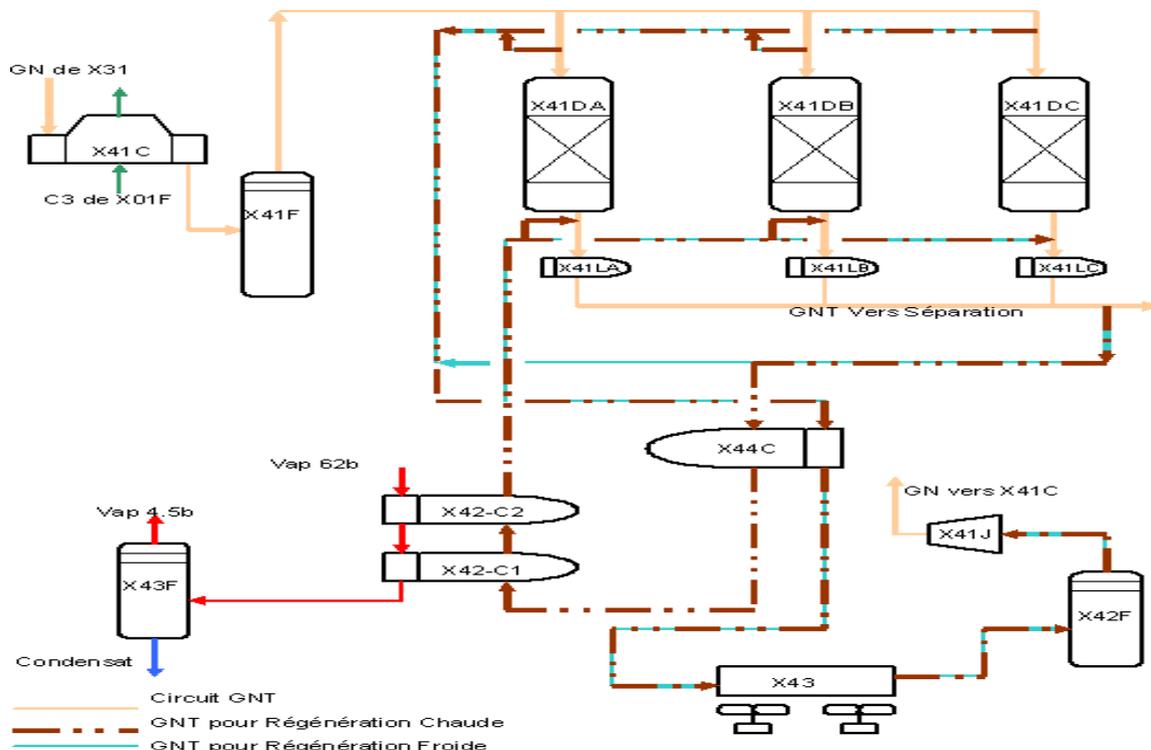


Figure I. 8 : Schéma décarbonatation

13.1.3 La déshydratation :

En sortant de l’Absorbeur, le GN se trouve très hydraté et doit subir une déshydratation pour obtenir une teneur en eau inférieure à 0,5 ppm. Pour ce faire, il entre dans un échangeur à propane X41C et en sort à une température d’environ 21 °C pour condenser le maximum d’humidité et éviter la formation d’hydrates dont la présence perturberait les sections suivantes dans le procédé. Il entre ensuite dans un ballon séparateur X41F où l’eau partiellement condensée est séparée puis évacuée par le fond du ballon.



Chapitre I : Généralité sur le GNL et Description du complexe

13.2 La séparation et la liquéfaction

La liquéfaction d'un gaz n'est possible que si le gaz naturel traité riche en constituants légers est refroidi à une température inférieure à son point de rosée qui est fonction de sa pression. En général pour liquéfier ce gaz, il faudrait le pré-refroidir, le refroidir et le condenser en utilisant des réfrigérants vaporisables afin d'éliminer toute la chaleur.

Pour réaliser la liquéfaction du gaz naturel au GL/2Z, deux (02) boucles sont utilisées : propane et MCR basées sur le cycle frigorifique « Rankine ». Le propane pré-refroidit le GN, le MCR (composant mixte) permet de refroidir et de liquéfier le GN dans l'échangeur principal X16C.

A cette étape du processus, les composés lourds du GNT seront séparés pour être traités en parallèle de la liquéfaction dans la section de fractionnement. Les composés légers vont continuer dans le processus de liquéfaction [8].

13.2.1 La Séparation

C'est à cette phase du processus que va s'effectuer la séparation des composés lourds. Le GNT en sortant des échangeurs à propane passe dans un échangeur X07C où il sera encore refroidi à -47°C par les vapeurs de tête de la tour de lavage. Il entre dans la tour de lavage X01E qui est une colonne de distillation avec un rebouilleur de fond X08C, utilisant de la vapeur 4.5 bars, un condenseur de tête qui est le X07C, un ballon de reflux X08F et des pompes de reflux X06J/JA.

Les produits de fond, les composés lourds, vont vers un ballon de détente à 34 bars et continueront leur chemin vers le fractionnement.

Les vapeurs de tête, composées légers sortant à -57°C , passeront dans le X07C, pour refroidir le GNT issu des échangeurs à propane, puis dans le faisceau chaud de l'échangeur principal X16C et sortiront à -116°C pour aller, ensuite, dans le ballon de reflux X08F. A ce niveau, le fond servira de reflux pour la tour de lavage au moyen des pompes X06J/JA et les vapeurs de tête vont dans le faisceau froid de l'échangeur principal X16C [8].

13.2.2 La liquéfaction

Les vapeurs de tête du ballon de reflux X08F se dirigent vers le faisceau central du X16C où elles seront refroidies par le MCR. Ce courant monte dans le X16C en traversant le faisceau froid où il sera condensé par le MCR liquide issu de la détente à travers la JT froide.

Le GNL liquéfié sort en tête du X16C à -148°C et se dirige vers l'échangeur X17C, où il sera refroidi à -149°C contre les gaz de queue (Azote et Méthane) issus du séparateur X02E.

Dans cet échangeur à plaques, le GNL sera refroidi contre les vapeurs de tête du déazoteur X02-E et du ballon flash X10-F. A sa sortie, il se mélangera avec le courant de réinjection de C_2 et C_3 . Ces deux courants (C_2 et C_3) sont également sous refroidis dans le X17C par les vapeurs de tête du X10F et X02-E et leur débit est régulé par les PV 503 et la FV 512. Ce mélange pénètre dans le X10F où suite à un flash les vapeurs seront séparées du liquide. Les vapeurs du

14. Le fractionnement

Au niveau de cette section, la charge lourde issue de la tour de lavage sera traitée dans trois colonnes de distillation pour en extraire successivement la gazoline, les butanes, le propane et éventuellement l'éthane ; on décrira ces processus ci-dessous [8].

14.1 Séparation de l'Éthane

Cette séparation s'effectue dans une colonne de distillation X51E (déethaniseur) fonctionnant à 29,9 bars et une température de 105 °C en fond de colonne. Cette colonne possède les équipements propres à une colonne de distillation Il permet d'extraire l'éthane en haut de la colonne pour être réinjecter dans le GNL, l'excès est utilisé comme combustible dans le système fuel gaz. Les produits de fond du Déethaniseur sont acheminés vers la colonne de dépropanisations.

14.2 Séparation du propane

Cette séparation s'effectue dans une colonne de distillation X52E (dépropaniseur) fonctionnant à 18 bars et une température de 122 °C en fond de colonne. Cette colonne possède aussi les Équipements propres à une colonne de distillation Il constitue la 2^{ème} tour de fractionnement. Son rôle est de produire le propane en tête de colonne et de l'acheminer en grande partie vers GP1/Z pour y être commercialisé ou réinjecté dans le GNL, l'autre partie est sert comme appoint dans la boucle MCR et propane réfrigérant. Les produits de fond sont acheminés vers la colonne de débutanisation.

14.3 Séparation du butane et gazoline

Cette séparation s'effectue, aussi, dans une colonne de distillation (débutaniseur) fonctionnant à 4.9 bars et une température de 114 °C en fond de colonne. Cette colonne possède aussi les équipements propres à une colonne de distillation Il constitue la 3^{ème} tour de fractionnement, Le produit de tête de colonne est du butane à (98.8 %) est envoyé vers GP/Z pour être commercialisé ou réinjecté. Dans le GNL. Le produit de fond de la tour constitue la gazoline qui est envoyé vers stockage pour y être commercialisé. [8]

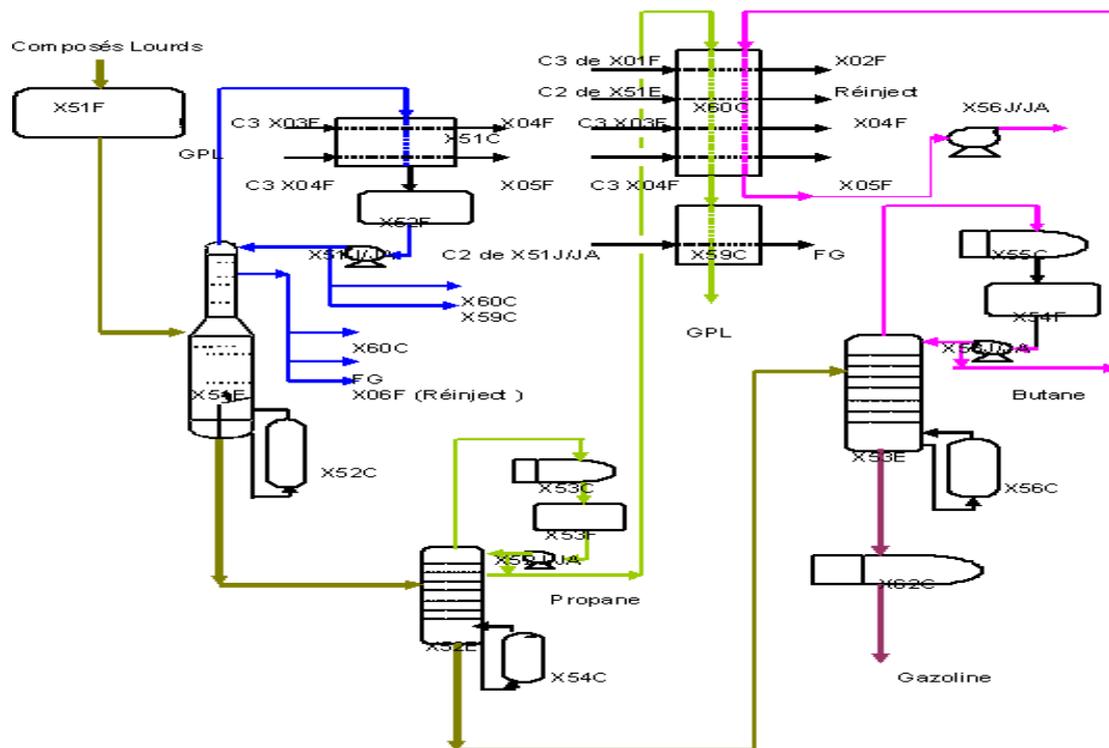


Figure I. 11 : Schéma fractionnement

15. Conclusion :

L'industrie gazière se développe principalement grâce à l'abondance relative des réserves de gaz à travers le monde et à l'augmentation préférentielle de la demande. Les coûts d'investissement et les frais d'exploitation sont très élevés pour une chaîne GNL, qui comprend plusieurs sous-systèmes de nature physique et technologique différente : le stockage dans les réservoirs cryogéniques, le terminal d'expédition, le transport par méthaniers, la réception de stockage et enfin la regazéification.

Le fonctionnement du complexe GL2Z a été exposé dans ce chapitre, qui comprend trois zones distinctes : la zone des utilités, la zone des procédés et la zone de stockage et de chargement.

La zone de procédé est constituée de deux boucles ; la boucle de réfrigération au propane. La boucle de réfrigération de MCR, dans ce procédé de liquéfaction avec pré-refroidissement au propane, le MCR assure la liquéfaction finale du GN. L'azote est le composant le plus léger qui permet d'obtenir une différence de température suffisante.

Après avoir basé sur le fonctionnement du complexe, nous allons entamer le prochain chapitre qui va traiter la zone de terminale de complexe, pour le but d'étudier le circuit de vapeur dans la zone et le fonctionnement de compresseur BOG.

CHAPITRE II

Description de la zone terminale

Chapitre II : Description de la zone terminale

1. Introduction :

La zone terminale de stockage de GNL est la dernière étape du processus de liquéfaction du gaz naturel liquéfié (GNL). Elle joue un rôle crucial en permettant le stockage et le chargement au méthanier. Les zones terminales de stockage de GNL sont des installations complexes qui intègrent une variété d'équipements spécialisés pour assurer le stockage, le transfert du GNL en toute sécurité et efficacité.

2. Description de la zone terminale

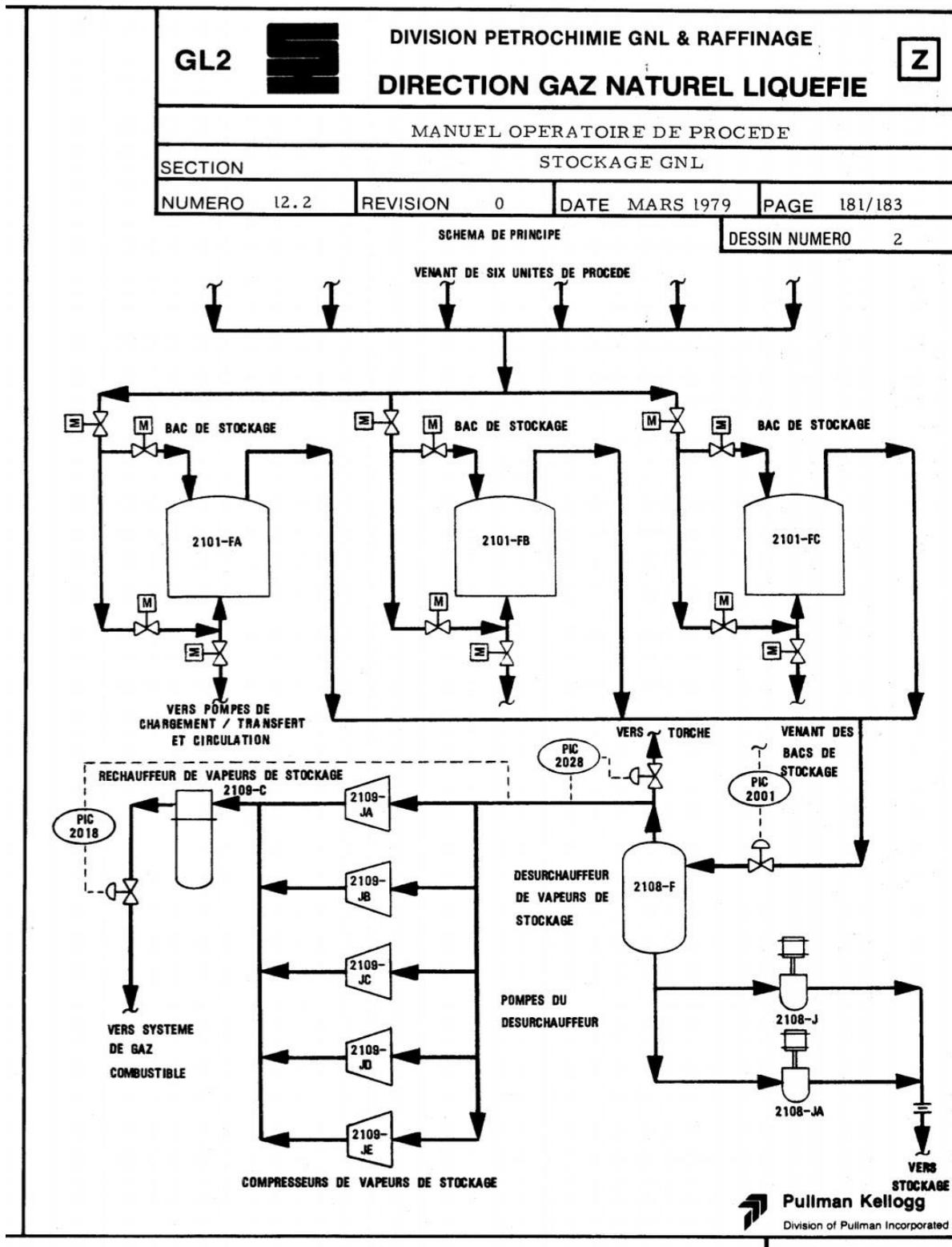
2.1 Emplacement

La zone de terminale du GL2Z est située au nord de l'usine. Elle est encadrée au sud, par le canal de rejet d'eau de mer, à l'ouest, par la station de pompage d'eau de mer, à l'est, par la zone de stockage de gazoline et au nord, par la Mer Méditerranée.

2.2 Procède de la zone

Le gaz naturel liquéfié est livré à la zone de stockage par la zone de procédé à raison d'un débit de 398 m³/h par train de procédé, le débit total étant fonction du nombre de trains de procédé en marche sur les six (6) existants. Chaque train de procédé envoie son GNL, par une ligne de 10", dans un collecteur d'admission commun. Le GNL quitte le collecteur d'admission par une ligne de distribution de 20" et se dirige vers la zone de stockage où on peut l'acheminer vers l'un ou l'autre des trois (3) bacs de stockage de GNL (2101-FA/FB/FC). Le volume de liquide admissible dans chacun des bacs est réglé par la vanne motorisée (MOV) propre à chaque bac. Chaque bac possède trois vannes motorisées qui permettent de régler le débit à l'arrivée ou à la sortie du bac. Le rapport de la densité et de la température du GNL en provenance de la zone de procédé et de la densité et de la température du GNL contenu dans les bacs de stockage détermine laquelle des deux lignes de remplissage sera celle utilisée par le haut ou celle par le bas. Un système commun d'écoulement de vapeurs règle la pression à l'intérieur des trois bacs de stockage. En marche normale, un régulateur de pression maintient la pression dans les bacs de stockage à 1,05 bar abs. En envoyant les vapeurs de stockage vers les compresseurs réservés à cet usage (2109-JA/JB/ JC/JD/JE). Le ballon du désurchauffeur de vapeurs de stockage (2108-F) sert de ballon d'aspiration aux compresseurs de vapeurs de stockage. L'excès de vapeurs serait évacué vers la torche de GNL basse pression sous contrôle d'un régulateur de pression. Les vapeurs sont comprimées sous une pression minimale de 3,6 bars abs. Et envoyées vers le réchauffeur de vapeurs de GNL (2109-C). Les vapeurs sont réchauffées à 16 degrés C et envoyées vers le système de gaz combustible où elles sont utilisées par les installations de production de vapeur. [12]

Chapitre II : Description de la zone terminale



Chapitre II : Description de la zone terminale

2.3 Les équipements de la zone terminale :

- 3 bacs de stockage GNL : 2101 FA, FB, FC.
- 5 pompes de chargement : 2101 JA, B, C, D, E
- Une pompe de transfert :2102J.
- 2 pompes de circulation :2103 J, JA.
- 2 pompes de reprise GNL : 2108 J, JA.
- 5 compresseurs BOG :2109 JA, B, C, D, E.
- Un ballon d'aspiration des compresseur(désurchauffeur) 2108F.
- Un réchauffeur de vapeur 2109 C.

2.4 Zone d'expédition

Stockage de GNL produit par les 6 trains de liquéfaction et le chargement permettant l'enlèvement de GNL produit en expédition pour commercialisation.

La relation entre le planning de production et le service commercial de SONATRACH assure une production optimale et souple en tenant compte des aléas météorologiques (point consigne), pannes, les arrêts techniques pouvant survenir sur les installations de la production ou terminal.

Pour cela une programmation rigoureuse des mouvements des navires et définie mensuellement, ce programme n'est pas figé et reste susceptible du chargement hebdomadaire ou journalier suivant les circonstances rencontrées (météo, pannes).

Cette souplesse dans la gestion est possible grâce aux installations adéquates de la zone d'expédition :

- Les 3 Bacs assurent le stockage de production de 6 trains en 5 jours.
- Les 5 pompes assurent le chargement 2 navires en 48h.

2.5 Zone de chargement

- 2 appontements (quais) "M4 et M5".
- 8 bras de chargement liquide.
- 2 bras retour vapeur.
- 3 compresseurs retour vapeur.

2.6 Circuit de stockage

- Circuit de GNL venant de train permet de remplir les bacs par le haut ou par le bas.
- Circuit de chargement permet d'amener le GNL jusqu'aux appontements.
- Circuit de transfert permet de transférer le GNL.
- Circuit de transfert permet de transférer le GNL d'un bac vers un autre.
- Circuit de circulation permet de maintenir en froid les lignes GNL.
- Circuit de reprise de vapeur permet de reprendre les vapeurs générées dans les bacs de stockage et les cuves de méthaniers pour les envoyer vers le collecteur gaz combustible (FG).

Chapitre II : Description de la zone terminale

3. Réservoir de stockage de GNL :

Les six trains de liquéfaction stockent le GNL produit dans les trois bacs de stockage aériens portant le TAG : 2101-FA/FB/FC, chacun d'entre eux ayant une capacité de 100000. Le GNL produit est conservé dans des conditions propices à son maintien dans son état physique initial, à savoir une température de stockage de -162 C° et une pression de stockage effective de 1.03 bar. Les trois réservoirs de stockage GNL présentent une conception, une instrumentation et un fonctionnement identiques. [12]

3.1 Conception des réservoirs de stockage GNL :

Les réservoirs de stockage appelé bac de stockage sont à double paroi il contient un bac intérieur et bac extérieur. Le bac de stockage intérieur est fabriqué en acier à 9% de Nickel d'une forme cylindrique d'un diamètre de 65.8 m et une hauteur de paroi de 32.1 m, la hauteur maximale de remplissage est de 29.52 mètres. Enveloppe ou bac extérieur est fabriqué en acier en carbone d'un diamètre de 67.64 m est une hauteur de parois de 33.807 m Le dôme du bac couvre l'ensemble du réservoir ce qui permet de compléter la hauteur totale du bac à 40.805 m, se dôme est construit en acier en carbone il est protégé du contacte directe du gaz froid par une plateforme (toit intérieur) en aluminium qui est pondue au- dessous du toit extérieur, ce toit est couvert par des sacs de perlite et la laine de verre. [13]

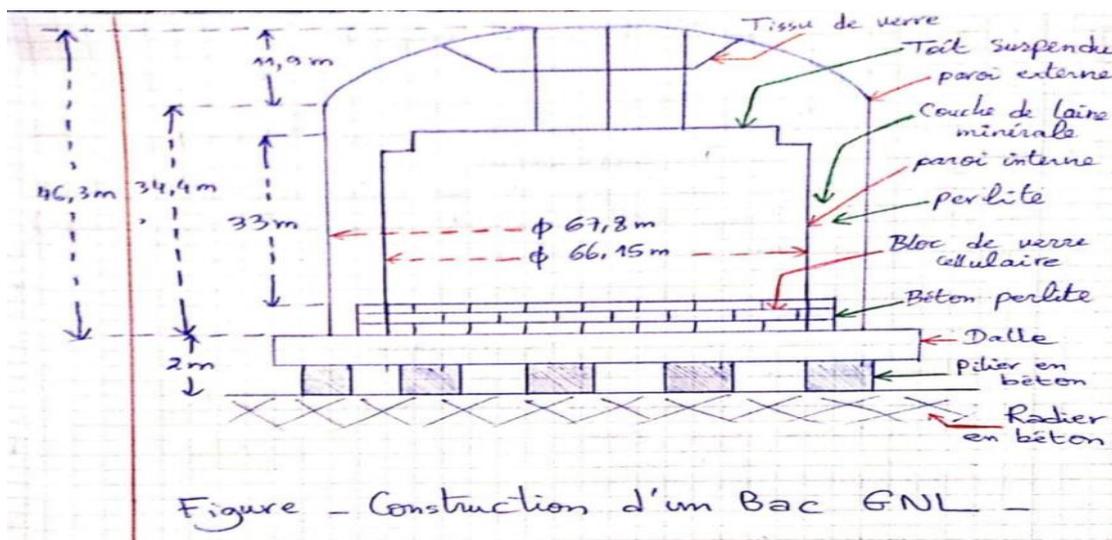


Figure II. 2 : dessin de conception d'un bac de stockage GNL

3.2 Les composants et le dimensionnement du bac de stockage GNL :

- Une fondation dite béton de propreté de 2.5 m de hauteur côté sud et 3.75 m côté mer.
- Radier ou dalle inférieure épaisseur de 0.76m et de 70m de diamètre.
- Les piliers nombres 816 hauteur de 1.24m de hauteur.
- . Radier supérieure épaisseur :0.76 et de 70m Ø.
- Cuve externe : $h = 33.8\text{m}$, $\text{Ø} = 67.64\text{m}$.

Chapitre II : Description de la zone terminale

- Cuve interne : $h = 32.1\text{m}$, $\varnothing = 65.8\text{m}$ capacité de 100000 fabriqué en acier a 9% de Nickel (Ni).
- Toit suspendu fabrique en acier a 9% de Ni.
- Dôme extérieur fabrique en acier na carbone $\varnothing=67.64\text{m}$ et $h=11\text{m}$.
- 04 piquage $\varnothing=3''$ de l'intérieur du bac vers l'extérieur muni Chaque une d'une vanne a l'extérieure du réservoir.
- Les trous d'homme dans la robe, toit intérieur et extérieur.
- Event de sécurité de 20''de diamètre.
- Rompe d'escalier mentent du bac vers le haut du toit supérieur.

3.3 Isolation du bac de stockage GNL :

Afin de permettre la conservation de l'état physique de GNL et de minimisé le phénomène de l'évaporation, le bac de stockage GNL et composé de matériaux d'isolation spécifique bien arrangé pour garantir des meilleures conditions de stockage. L'espace annulaire entre les deux parois est remplie des matériaux d'isolation thermique pour minimiser au maximum le transfert de chaleur ; au contact directe avec les deux parois nous rencontrons la laine de verre, entre eux nous rencontrons la perlite en vrac, cette disposition permet la dilatation et contraction du métal, ce qui conserve les fuites des frigories. Le bac contient un toit suspendue situé au-dessus du bac intérieur et maintenue par des tiges avec le dôme, qui a pour rôle de complété l'isolation thermique et d'empêcher le contacte des vapeurs GNL froide avec la paroi du dôme du bac extérieur. Des sacs en perlite sont posé au-dessus du toit ce qui donne une meilleure isolation. Le réservoir intérieur repose sur plusieurs couches d'isolation, la plate-forme du fond du bac est posée sur un contreplaqué qui est elle-même posé sur différent isolant à savoir: bloc de fibre au niveau de l'extrémité de bac, entre eux de sable traité au-dessous nous avons cinq couches de Foam glass et à la partie inferieur de l'isolation nous rencontrons encore le sable traité, tout l'ensemble de matériaux d'isolation repose sur une dalle en béton appelle dalle supérieur maintenue avec environs 816 pilier en béton armé le tout est posé sur une autre dalle en béton appelé dalle inferieur qui est elle-même fondé sur une superficie de 70 mètres de béton de propreté.

3.4 Le rôle de l'isolation

L'isolation thermique joue un rôle crucial dans la section BOG d'un terminal GNL pour minimiser les pertes de chaleur et optimiser le processus de récupération du gaz évaporé.

- **Réduction des pertes par évaporation :** Le gaz naturel liquéfié (GNL) stocké à des températures extrêmement basses (-162°C) a tendance à s'évaporer légèrement au contact de l'air ambiant. Une isolation efficace empêche la chaleur ambiante de pénétrer dans les équipements de la section BOG, réduisant ainsi l'évaporation du GNL précieux et minimisant les pertes économiques.

Chapitre II : Description de la zone terminale

- **Efficacité du processus de récupération** : Le processus de récupération du BOG vise à capturer les vapeurs de GNL évaporées et à les recondenser pour les réinjecter dans le réservoir de stockage ou les utiliser comme combustible. Une bonne isolation maintient la température des vapeurs de GNL dans la section BOG, ce qui facilite leur compression et leur re-condensation, améliorant ainsi l'efficacité du processus de récupération.
- **Sécurité et protection de l'environnement** : Les vapeurs de GNL sont inflammables et leur rejet dans l'atmosphère peut poser des risques environnementaux. Une isolation adéquate empêche les fuites de vapeurs et minimise le risque d'incendie ou d'explosion, contribuant à la sécurité des opérations et à la protection de l'environnement.

4. Cryogénie

Ce sont toutes les techniques qui concernent le froid dans l'industrie. La liquéfaction d'un gaz naturel est effectuée en le refroidissant jusqu'à une température de -162°C . Cette température permet d'obtenir du GNL à une pression d'équilibre très basse (légèrement au-dessus de la pression atmosphérique) de 1045-1065 mbar absolue. On aurait pu obtenir du GNL à une température plus élevée mais à une pression d'équilibre beaucoup plus élevée (-80°C , 4,8 bars), cela nécessitant des bacs de stockage beaucoup plus résistants.

4.1 Matériaux cryogéniques

- **Alliages** : Les métaux purs fer, cuivre et nickel ont des propriétés physiques bien déterminées (résistance, dureté, souplesse...). On peut améliorer certaines propriétés en mélangeant plusieurs de ces métaux, ce sont les alliages. Exemples :
 - Acier (fer-carbone) : améliore la résistance.
 - Acier trempé : améliore la dureté.
 - Acier et nickel : améliore la résistance.

4.2 Propriétés physiques

Lorsque l'on veut casser un morceau de métal, on observe deux sortes de déformation :

- Le métal se déforme fortement avant de casser et la cassure n'est pas franche (exemple : une barre de cuivre - rupture ductile).
- Le métal se déforme peu et casse brusquement et la cassure est nette (exemple : une barre en acier - rupture fragile).

Tous les métaux peuvent être ductiles et fragiles selon la température à laquelle on les porte. Plus on les refroidit, plus ils deviennent fragiles. Dans l'industrie, il faudra donc déterminer tous les métaux utilisés en section terminale. L'acier courant est l'inox qui résiste aux basses températures (inox = acier + nickel). L'acier au carbone est beaucoup utilisé et également à de bonnes qualités mécaniques, mais il devient fragile dans les températures au-dessous de 0°C .

Chapitre II : Description de la zone terminale

On ne peut donc pas l'utiliser dans les installations cryogéniques. Donc, selon les besoins, on choisit un alliage plus ou moins coûteux.

Exemples :

- Acier 9% nickel pour les bacs de stockage.
- Acier 18% nickel pour les pompes GNL.
- Acier 36% nickel pour prise d'impulsion, régulation.

On peut employer d'autres métaux ayant de bonnes qualités cryogéniques :

- Aluminium (impulseur pompe GNL).
- Bronze (palier des pompes GNL).

5. Système de circulation de la vapeur de GNL

L'ensemble des vapeurs du bac de stockage et les vapeurs de retour de la cuve de méthanier sont acheminés vers le ballon désurchauffeur 2108F servant de ballon d'aspiration aux compresseurs 2109J. L'excédent de vapeur est envoyé (évacué) vers la torche BP 2450FB. Ainsi, les vapeurs de GNL récupérées dans le ballon 2108F sont comprimées par les compresseurs et finalement envoyées vers le collecteur de gaz combustible (FG) après avoir été réchauffées à travers le réchauffeur 2109C.

6. Le compresseur 2109 J

6.1 Description :

Compresseur centrifuge cryogénique qui est entraîné par un moteur électrique a induction celui-ci tourne 1500 rpm et la vitesse du compresseur est augmenté par un multiplicateur a 10500 rpm. Le compresseur consiste un arbre sur lequel est monte 5 impulseurs (étages) l'arbre est soutenue cote aspiration et refoulement par 2 paliers lisse qui empêche les mouvements radiaux de l'arbre, Un disque solidaire avec l'arbre qui tourne entre 2 jeux de palier et protège le compresseur contre les mouvements axiale (palier de butée)

6.2 Principe de fonctionnement

Les vaporisations des bacs sont ramenées à l'aspiration des compresseurs aux paramètres de marche de pression 1040-1065 mbar absolue et de température entre -159c°et -125°c

La compression de vapeur s'effectue en 2 temps :

- Mise en vitesse par la force centrifuge donnée par le mouvement de rotation du compresseur (impulser)
- Mise en pression par diminution du volume à la sortie de l'impulseur

La compression des vapeurs augmente la température (-80°c, - 20°c) les vapeurs sont encore réchauffés par un réchauffeur 2109C a +25°c avant d'être achemine vers collecteur F /G

Chapitre II : Description de la zone terminale

6.3 Fiche technique de compresseur

- Fabricant : ELLIOTE EBARA (JAPON)
- Entraînement : moteur a induction 1775 chevaux a 1500 rpm
- Agent : gaz naturel
- T° admission : [-159°C ; -125°C]
- T° refoulement : [-80°C ; -20°C]
- P admission : [1027 ; 1041 mbar]
- P refoulement : [3.6 ; 5.7bar]
- Vitesse de compresseur avec multiplicateur : 10566 rpm
- Débit normal : [7600 ; 11400]

6.4 Les équipements de compresseur

- Caisse à huile : capacité 3000 litres et se compose de 2 parties :
 - Caisse principale où se fait l'aspiration et que récite le retour de lubrification, et l'huile propre d'étanchéité elle est maintenue à 50°C par un réchauffeur électrique
 - Tambour de dégazage reçoit le retour d'huile d'étanchéité polluée et permet une séparation supplémentaire huile-gaz il est réchauffé à 90°C par un réchauffeur électrique
- Dégazeur (aspiration-refoulement) : récite l'huile d'étanchéité polluée et font une 1ère séparation gaz-huile le gaz et envoie par un évent à l'air libre et l'huile partiellement dépolluée passe dans le tambour de dégazage par une séparation supplémentaire réchauffement le niveau dans le dégazeur est maintenue à 50% par un clapet commande par un flotteur
- Régulateur de température : l'ensemble de circuit d'huile est maintenu à 49°C par un régulateur local agissant sur une vanne à 2 voies qui permet de by-passer les Aero
- Les filtres : un ensemble de 2 filtres cartouche à papier monté dans des peaux métallique qui assurent la propreté d'huile, un filtre en service et l'autre en attente, l'état des filtres est indiqué par contrôle de ΔP entre l'entre et la sortie
- Circuit d'huile : après les filtres le circuit d'huile est divisé en deux, une partie vers l'étanchéité a un débit de 40L /min et d'une pression de 2.4bar et l'autre partie vers lubrification a un débit de 210L /min a une pression 1.24bar
- Pompe attelée : entraînée par l'arbre elle assure le débit d'huile a la pression et volume pendant la marche normale du compresseur
- Pompe auxiliaire : entraînée par un moteur à induction électrique, elle assure le débit d'huile en cas de défaillance de la pompe attelée et lors du démarrage automatique par basse pression d'huile d'étanchéité et de lubrification et la circulation d'huile pendant l'arrêt du compresseur

Chapitre II : Description de la zone terminale

- Etanchéité mécanique du compresseur : elle a pour rôle d'éviter l'entrée d'huile dans le compresseur et la sortie gaz à l'extérieur il y a 2 étanchéités une à l'aspiration et l'autre au cote refoulement, elle se compare d'un encadrement en inox qui contient une bague en iso-Carbon, dans laquelle tourne l'arbre et qui assure son étanchéité pendant la marche de compresseur
- Gaz barrage : est injecte entre les labyrinthes et l'aspiration du compresseur afin d'assurer qu'il n'y a pas de passage d'huile vers le corps du compresseur, ceci est nécessaire à cause de la faible pression à cet endroit, une ligne est ramenée du refoulement passe en cote de faisceau du réchauffeur de gaz
- Barrage qui a ce cote calendrier d'huile chaude venant des pompes, le gaz froid est donc réchauffé avant l'injection.

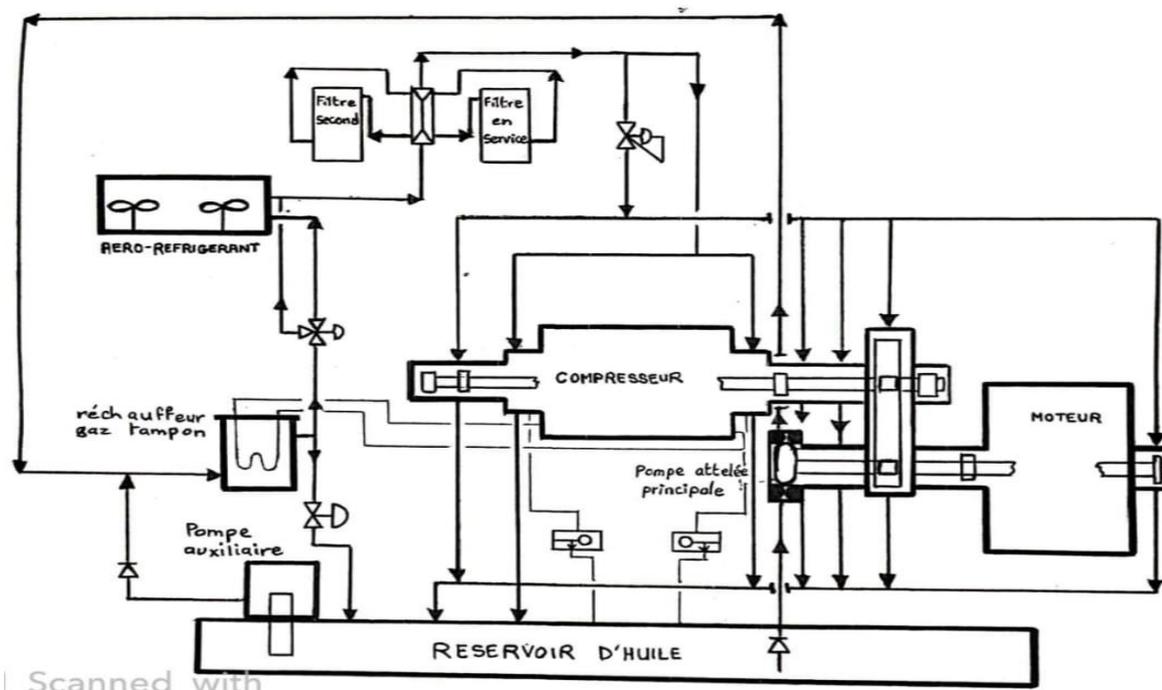


Figure II. 3 : Schéma d'installation du compresseur 2109 J

7. Réchauffeur de gaz d'évaporation 2109-C

Les réchauffeurs de gaz d'évaporation utilisent la vapeur d'eau comme source de chaleur. La pression nominale est 4,83 bars eff. La température d'admission et température de service est de -74°C et la température de sortie est de 20°C .

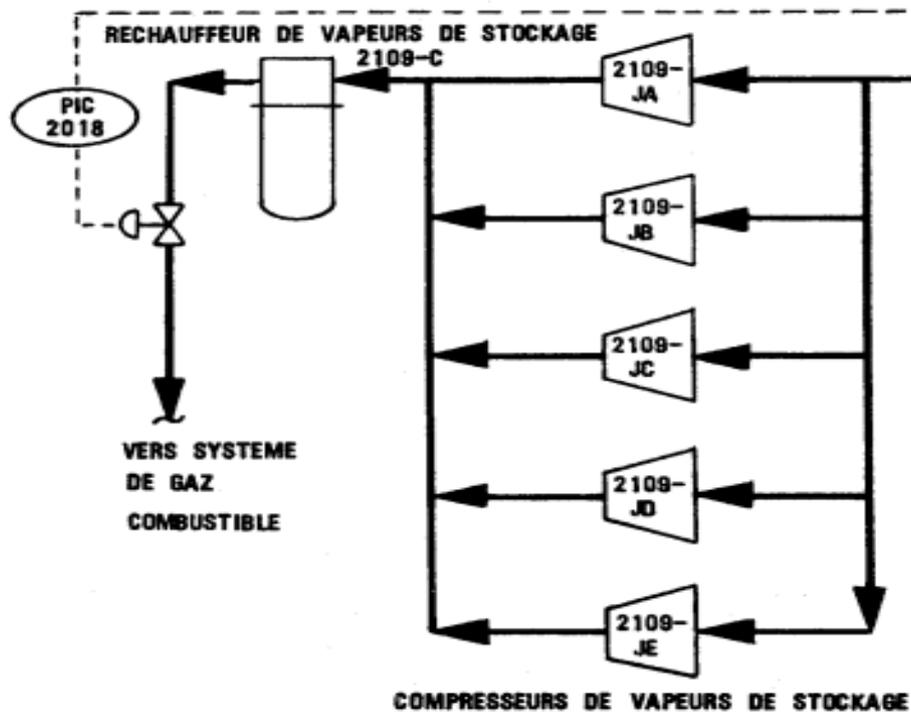


Figure II. 4 : schéma de réchauffeur de vapeur 2109 C

8. Le ballon du désurchauffeur de vapeurs de stockage (2108-F)

Sert de ballon d'aspiration aux compresseurs de vapeurs de stockage. Le ballon du désurchauffeur maintient la température d'admission vers les Compresseur au-dessous de -125°C . S'il arrivait que la pression dans le ballon du désurchauffeur augmente au-delà de 1,06 bars abs. L'excès de vapeurs serait évacué vers la torche de GNL basse de pression.

- Pression de service 0,034 bars
- Température de service -162°C
- 5870 mm Diamètre 3355 mm Hauteur

Chapitre II : Description de la zone terminale

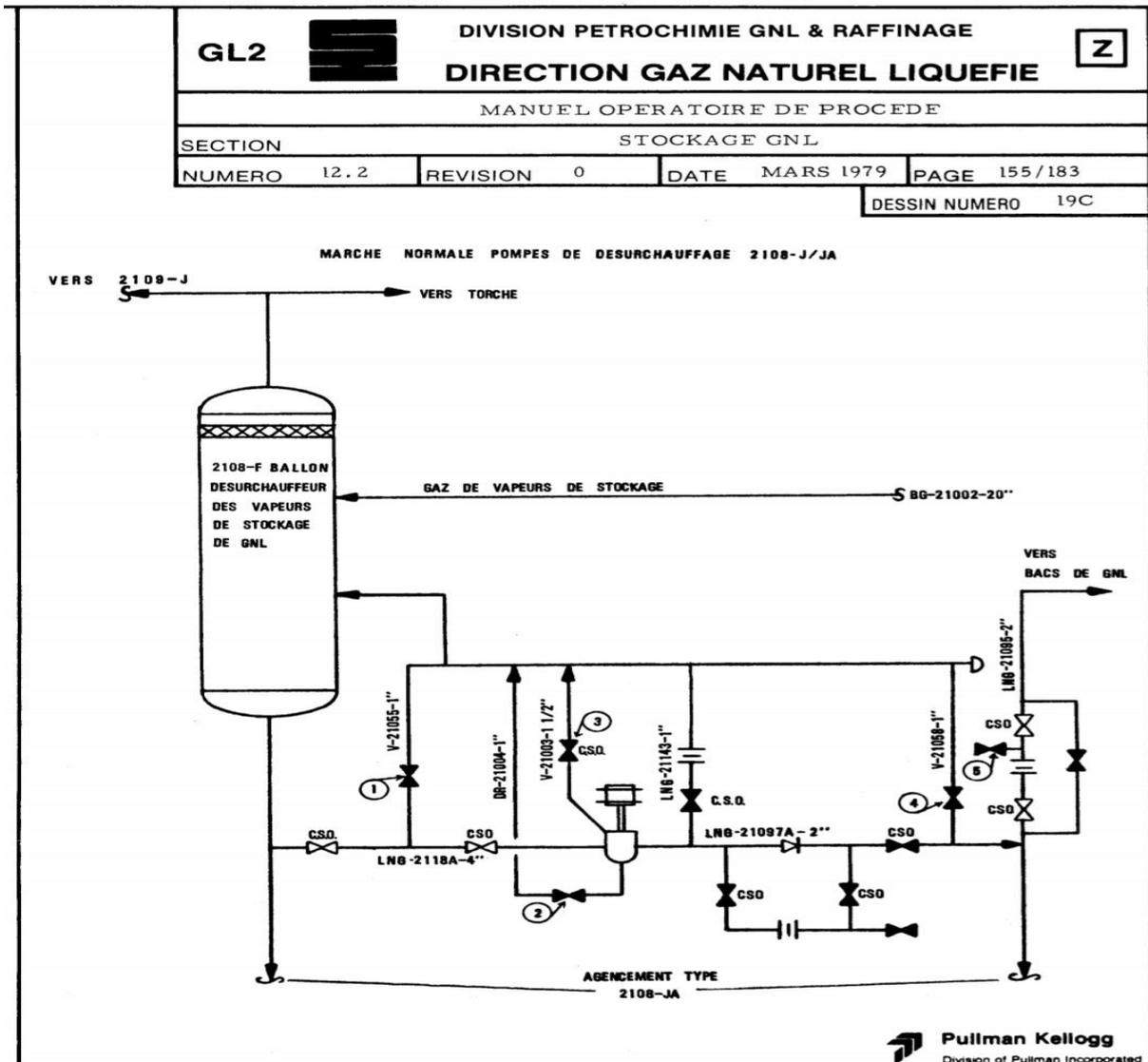


Figure II. 5 : Schéma de ballon de désurchauffeur

9. Conclusion :

La zone terminale de stockage de GNL se positionne comme un maillon essentiel de la chaîne énergétique, reliant les producteurs de gaz naturel liquéfié (GNL) aux consommateurs finaux. Après avoir fait la description de cette zone et les équipements utilisés, on passe à l'étude thermodynamique d'un équipement très important dans la zone c'est le compresseur 2109J.

CHAPITRE III

Calcul analytique et simulation par HYSYS

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

1. Introduction

Le calcul thermodynamique du compresseur centrifuge peut être effectué pour les compresseurs en projet ainsi que pour ceux qui sont en service. Le fait que le compresseur soit en marche, le calcul de vérification a pour but de déterminer les performances du compresseur.

2. Rappels thermodynamiques

2.1 Définitions

- **Le travail**, noté **W**, est l'énergie associée à la valeur ou au changement de la dynamique d'un système par l'agissement de forces mécaniques diverses
- **La chaleur**, notée **Q**, qui est un transfert représentant la transmission d'énergie cinétique de manière chaotique d'un corps vers un autre.
- **L'énergie interne (U)** : qui représente l'ensemble des énergies microscopiques d'un système et se mesure en J/kg. L'énergie interne correspond à la somme des énergies dues à l'agitation thermique des particules et aux liaisons entre les nucléons, les atomes et les molécules [15].
- **L'enthalpie (H)** : qui est une fonction pratique en génie thermique car lorsqu'une transformation a lieu à pression constante, la variation de l'enthalpie exprime la quantité de chaleur échangée. L'enthalpie se mesure en J/kg et est définie par :

$$H = U + P \times V \quad [15].$$

- **L'entropie (S)** : qui représente en quelque sorte le « désordre microscopique » d'un système et se mesure en J/K.kg [15].
- **Système ouvert** : tout échange possible (matière, énergie). Exemple : océan
- **Système fermé** : tout échange possible, sauf de matière. Exemple : frigo cadenassé
- **Système isolé** : aucun échange possible. Exemple : thermos

2.2 Equation d'état

Dans toute la suite de cette section, quel que soit le fluide considéré, un gaz ou une vapeur, l'hypothèse des gaz parfaits permet d'utiliser une équation d'état du fluide particulièrement simple, qui peut prendre la forme suivante :

$$P \times V = n \times R \times T \quad \text{(III.1)}$$

2.2.1 Premier principe de la thermodynamique

$$W + Q = \Delta U \quad \text{(III.2)}$$

- **Premier principe pour un système ouvert**

La loi générale de l'écoulement permanent d'un fluide compressible appliquée entre les points d'entrée et de sortie du gaz 1 et 2 :

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

$$(W + Q)_{12} = (H_2 - H_1) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) + g(Z_2 - Z_1) \quad (\text{III.3})$$

C1 et **C2** : vitesses du gaz à l'entrée et à la sortie respectivement.

Z1 et **Z2** : hauteurs géométriques de l'entrée et de la sortie du compresseur.

H1 et **H2** : enthalpie à l'entrée et la sortie du compresseur.

2.2.2 Deuxième principe de la thermodynamique

Généralement, la variation d'entropie dS du fluide est liée à l'échange thermique δq qu'il a avec son milieu extérieur par la relation [16] :

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + dS'_{ext} + dS'_{int} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

T : la température de la source avec laquelle ont lieu les échanges thermiques.

dS'_{int} : Création interne de l'entropie.

dS'_{ext} : La création externe de l'entropie.

3. Propriétés d'un mélange des gaz

3.1 La chaleur spécifique

$$C_{P_{mél}} = \sum_{i=1}^n C_{P_i} g_i \quad (\text{III.5})$$

Avec g_i : est la concentration de chaque composant.

3.2 La masse moléculaire

$$M = \sum_{i=1}^n M_i Y_i \quad (\text{III.6})$$

Avec M_i : est la masse moléculaire de chaque composant.

Y_i : Fraction molaire de chaque composant.

3.3 L'exposant isentropique

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - r} \quad (\text{III.7})$$

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

3.4 La constante spécifique du gaz

$$r = \frac{R}{M} \quad (\text{III.8})$$

Avec **R** : Constante universelle des gaz parfaits **R = 8,314**[KJ/ (mol. K)]

3.5 Le facteur de compressibilité

Le calcul de facteur de compressibilité *Z* s'effectue en fonction des paramètres suivants :

Y_i, **T_{ci}**, **T_{pci}**, **P_{ci}** et **P_{pci}** tel que :

Y_i : La fraction molaire de chaque composant du mélange.

T_{ci} : La température critique de chaque composant du mélange.

T_{pci} : La température pseudo-critique de chaque composant du mélange.

P_{ci} : La pression critique de chaque composant du mélange.

P_{pci} : La pression pseudo-critique de chaque composant du mélange.

- La température pseudo-critique est donnée par la relation suivante :

$$T_{pc} = \sum Y_i \cdot T_{ci} = \sum T_{pci} \quad (\text{III.9})$$

- La pression pseudo-critique est donnée par la relation suivante :

$$P_{pc} = \sum Y_i \cdot P_{ci} = \sum P_{pci} \quad (\text{III.10})$$

- La température pseudo réduite est :

$$T_r = \frac{T}{T_{pc}} \quad (\text{III.11})$$

- La pression pseudo réduite est :

$$P_r = \frac{P}{P_{pc}} \quad (\text{III.12})$$

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

- La Corrélation de S. Robertson donne :

$$Z = 1 + a(x - b) \times [1 - e^{-c}]$$

$$x = \frac{P_{pr}}{T_{pr}^2}$$

$$a = 0.1219.T_{pr}^{0.638}$$

$$b = T_{pr} - 7.76 + \frac{14.75}{T_{pr}}$$

$$c = 0.3.x + 0.441.x^2$$

4. Thermodynamique de la compression

Comprimer un fluide, c'est le porter d'une pression Pa dite pression d'aspiration, à une pression Pr (supérieur à Pa) dite pression de refoulement. La transformation met en jeu un certain travail, dit de « compression ».

La loi thermodynamique des gaz parfait nous donne la relation suivante :

$$PV^K = Cte \quad (\text{III.13})$$

Ou K : indice de compression

4.1 Compressions de référence

- **La compression isotherme**

Connaissant l'équation d'état, il est facile de calculer le travail en intégrant $dW = v dP$

$$W = rT_1 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{III.14})$$

- **Compression adiabatique :**

Pour une transformation adiabatique on a :

$$PV^\gamma = cte \quad (\text{III.15})$$

$$W_{adiabatique} = \frac{\gamma}{\gamma-1} ZrT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (\text{III.16})$$

- **Compression polytropique**

$$\text{Où : } PV^n = cte \quad (\text{III.17})$$

Le travail polytropique s'exprime par :

$$W_{polytropique} = \frac{n}{n-1} ZrT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (\text{III.18})$$

4.2 Les rendements de la compression :

Les rendements de compression se définissent en comparant les évolutions théoriques aux évolutions réelles. On a donc par définition :

- Rendement isotherme :

$$\eta_{isotherme} = \frac{W_{iso}}{W_{eff}} \quad (\text{III.19})$$

- Rendement isentropique :

$$\eta_{isentropique} = \frac{W_{isen}}{W_{eff}} \quad (\text{III.20})$$

- Rendement polytropique :

$$\eta_{polytropique} = \frac{W_{polytropique}}{W_{eff}} \quad (\text{III.21})$$

5. Calcul des caractéristiques du gaz

Tableau III. 1 : Composition et conditions critiques

| Désignation des composants | Concentration moléculaire X% | Masse molaire (kg /kmol) | Température critique (k) | Pression critique(bar) |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| CH4 | 92.6 | 16.04 | 191.2 | 46.41 |
| N2 | 7.2 | 28.01 | 126.2 | 33.92 |
| C2H6 | 0.2 | 30.07 | 305.7 | 48.91 |

❖ Chaleur spécifique CP :

D'après le site indique sur la référence [14] :

Aspiration : à -138°C :

$$Cp_{C1} = 2.136 \text{Kj} / \text{Kg.k}$$

$$Cp_{C2} = 2.301 \text{Kj} / \text{Kg.k}$$

$$Cp_{N2} = 1.052 \text{Kj} / \text{Kg.k}$$

Refoulement : à -55°C :

$$Cp_{c1} = 2.175 \text{Kj} / \text{Kg.K}$$

$$Cp_{c2} = 2.630 \text{Kj} / \text{Kg.K}$$

$$Cp_{N2} = 1.058 \text{Kj} / \text{Kg.K}$$

❖ Masse molaire du mélange gazeux :

$$M_{mél} = \sum Mi.Xi$$

$$M_{mél} = [(92.6 \times 16.04) + (7.2 \times 28.01) + (0.2 \times 30.07)] \div 100$$

$$M_{mél} = 16.92 (\text{Kg} / \text{Kmol})$$

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

❖ Détermination de la constante spécifique du gaz

$$r = R / M_{mél}$$

$$r = 8.314 / 16.92$$

$$r = 0.491 (Kj / KgK)$$

D'où : R : constante universelle des gaz parfaits,

❖ La masse volumique du mélange

$$\rho = \frac{P.M}{R.T} = \frac{100000 \times 0.01692}{8.314 \times 135} = 1.506 Kg / m^3$$

❖ Détermination de la chaleur spécifique du mélange (cp) :

$$\text{On a : } C_{P_{mél}} = \sum C_{P_i} \cdot g_i$$

$$\text{Comme : } g_i = m_i / M_{mél}$$

• En détermine la masse de chaque composant

La masse de chaque constituant

$$m_i = X_i \cdot M_i$$

$$m_{CH_4} = (92.6 \times 16.04) / 100 = 14.85$$

$$m_{CH_2} = (0.2 \times 30.07) / 100 = 0.06$$

$$m_{N_2} = (7.2 \times 28.01) / 100 = 2.01$$

• Détermination de la concentration des composants

$$g_i = m_i / M_{mél}$$

$$g_{C1} = (14.85 / 16.92) = 0.877$$

$$g_{C2} = (0.06 / 16.92) = 0.003$$

$$g_{N_2} = (2.01 / 16.92) = 0.118$$

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

- **La chaleur spécifique de mélange a l'aspiration :**

$$Cp_{asp} = \sum Cp_i \cdot g_i$$

$$Cp_{asp} = [(2.136 \times 0.877) + (2.301 \times 0.003) + (1.052 \times 0.118)]$$

$$Cp_{asp} = 2.004 \text{Kj} / \text{Kg.K}$$

- **La chaleur spécifique du mélange a refoulement :**

$$Cp_{ref} = \sum Cp_i \cdot g_i$$

$$Cp_{ref} = [(2.175 \times 0.877) + (1.630 \times 0.003) + (1.058 \times 0.118)]$$

$$Cp_{ref} = 2.037 \text{Kj} / \text{Kg.K}$$

- **La chaleur spécifique :**

$$Cp_{moy} = \frac{Cp_{ref} + Cp_{asp}}{2}$$

$$Cp_{moy} = \frac{2.037 + 2.004}{2}$$

$$Cp_{moy} = 2.020 \text{Kj} / \text{Kg.K}$$

❖ Calcul de la température et de la pression critique du mélange :

- Température pseudo critique du mélange :

$$T_{cr} = \sum X_i \cdot T_{cri}$$

$$T_{cr} = [(92.6 \times 191.2) + (7.2 \times 126.2) + (0.2 \times 305.7)] / 100$$

$$T_{cr} = 186.74 \text{K}$$

- Pression pseudo critique du mélange :

$$P_{cr} = \sum X_i \cdot P_{cri}$$

$$P_{cr} = [(92.6 \times 46.41) + (7.2 \times 33.92) + (0.2 \times 48.91)] / 100$$

$$P_{cr} = 45.51 \text{bar}$$

6. Calcul des performances du compresseur :

- Coefficient de compressibilité Z :

$$Z = 1 + a \cdot (x - b) \cdot [1 - \exp(-c)]$$

Telle que :

$$x = \frac{P_{pr}}{T_{pr}^2}$$

$$a = 0.1219 \cdot T_{pr}^{0.638}$$

$$b = T_{pr} - 7.76 + \frac{14.75}{T_{pr}}$$

$$c = 0.3 \times x + 0.441 \times x^2$$

$$Z = 1 - 0.4273 \frac{P_{cr}}{(3.66)^{T_{cr}}}$$

P_{pr} : la pression pseudo réduite

T_{pr} : la température pseudo réduite

Donc : on va calculer P_{pr} et T_{pr} :

- **A l'aspiration :**

Température réduite :

$$T_{pra} = \frac{T_a}{T_{cr}} = \frac{135}{186.74} = 0.722$$

Pression réduite :

$$P_{pra} = \frac{P_a}{P_{cr}} = \frac{1.030}{45.51} = 0.022$$

$$Z_a = 1 - 0.4273 \frac{0.022}{(3.66)^{0.722}} = 0.9953$$

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

- Au refoulement :

Température réduite :

$$T_{pr} = \frac{T_r}{T_{cr}} = \frac{218}{186.74} = 1.167$$

Pression réduite :

$$P_{pr} = \frac{P_r}{P_{cr}} = \frac{5.3}{45.51} = 0.116$$

$$Z_r = 1 - 0.4273 \frac{0.116}{(3.66)^{1.167}} = 0.9849$$

$$Z_{moy} = \frac{Z_a + Z_r}{2} = \frac{0.9953 + 0.9849}{2} = 0.9901$$

- Calcul de coefficient adiabatique :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \text{ Et } C_p - C_v = r$$

Donc :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_p - r} = \frac{2.020}{2.020 - 0.491} = 1.321$$

- Taux de compression :

$$\varepsilon = \frac{P_r}{P_a} = \frac{5.3}{1.030} = 5.145$$

- Coefficient polytropique :

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

$$n = \frac{\log(\varepsilon)}{\log(\varepsilon) - \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{\log(5.145)}{\log(5.145) - \log\left(\frac{218}{135}\right)}$$
$$n = 1.413$$

7. Calcul des pressions intermédiaires :

Connaissant le taux de compression total, on pourra calculer facilement les pressions intermédiaires par la formule suivante :

$$P_{i+1} = \delta P_i$$

$$\delta = (\varepsilon_{tot})^{\frac{1}{n}}$$

$$\delta = (5.145)^{\frac{1}{5}}$$

$$\delta = 1.39$$

i : numéro de l'étage.

Pi : pression de l'étage.

Pi+1 : pression dans l'étage i+1.

Les résultats de calcul sont portés sur le tableau ci-dessous :

Tableau III. 2 : Calcul des pressions.

Pression en bar

| Pasp | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | Pref |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.030 | 1.431 | 1.990 | 2.766 | 3.845 | 5.144 | 5.362 |

8. Calcul des températures intermédiaires :

$$\frac{T_{i+1}}{T_i} = \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

T_{i+1} : température dans l'étage i+1.

T_i : température de l'étage i.

Les résultats de calcul sont portés sur le tableau ci-dessous :

Tableau III. 3 : Calcul des températures.

| Températures en c | | | | | | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| <i>Tasp</i> | <i>T1</i> | <i>T2</i> | <i>T3</i> | <i>T4</i> | <i>T5</i> | <i>Tref</i> |
| -138 | -124.4 | -109.4 | -92.9 | -74.7 | -57.7 | -54.5 |

9. Calcul des travaux

- Calcul travail adiabatique

$$W_{ad} = \frac{\gamma}{\gamma-1} Z.r.T_1 \left[\varepsilon^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$W_{ad} = \frac{1.321}{1.321-1} \times 0.9901 \times 0.491 \times 135 \left[5.145^{\frac{1.321-1}{1.321}} - 1 \right]$$

$$W_{ad} = 132.04 \text{ Kj / Kg}$$

- Calcul du travail polytropique :

$$W_p = \frac{n}{n-1} Z.r.T_1 \left[\varepsilon^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} - 1 \right]$$

$$W_p = \frac{1.413}{1.413-1} \times 0.9895 \times 0.491 \times 135 \left[5.145^{\frac{1.413-1}{1.413}} - 1 \right]$$

$$W_p = 137.80 \text{ Kj / Kg}$$

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

- Calcul du travail réel :

$$W_r = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot Z \cdot r \cdot T_1 \left[\varepsilon^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$W_r = \frac{1.321}{1.321-1} \times 0.9901 \times 0.491 \times 135 \left[5.145^{\frac{1.413-1}{1.413}} - 1 \right]$$

$$W_r = 169.85 \text{ Kj / Kg}$$

10. Calcul des rendements :

- Calcul du rendement adiabatique :

$$\eta_{ad} = \frac{W_{ad}}{W_r} = \frac{132.04}{169.85} = 0.7773$$

$$\eta_{ad} = 77.73\%$$

- Calcul du rendement polytropique :

$$\eta_p = \frac{W_p}{W_r} = \frac{137.80}{169.85} = 0.8113$$

$$\eta_p = 81.13\%$$

- ❖ Rendement global :

$$\eta_g = \eta_{ad} \times \eta_{méc} \times \eta_{vol}$$

$$\eta_g = 0.77 \times 0.97 \times 0.96$$

$$\eta_g = 0.7170$$

$$\eta_g = 71.70\%$$

$\eta_{méc}$: rendement mécanique.

η_{vol} : rendement volumétrique.

- Calcul de la puissance réelle (utile) du compresseur :

$$P_u = M \times W_r$$

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

P_u : puissance réelle(utile)

M_1 : débit massique

$$M = \rho \times \phi_v$$

ϕ_v : débit volumique

$$M = \rho \times \phi_v = 1.506 \times (11400 \div 3600) = 4.769 \text{ Kg / s}$$

$$P_u = M \times W_r = 4.769 \times 169.85 = 810.01 \text{ KW}$$

- **Calcul de la puissance absorbée par le compresseur :**

$$P_a = P_u \div \eta_{méc} = 810.01 \div 0.97 = 785.70 \text{ KW}$$

- **Puissance à l'accouplement :**

On tient compte des pertes mécanique de transmission qui sont comprises entre 2% et 4%, on admettra ici 3%

$$P_{ap} = P_a \times 1.03 = 785.70 \times 1.03 = 809.28 \text{ KW}$$

11. Partie simulation du compresseur :

Après la détermination des différentes caractéristiques du compresseur on doit vérifier la précision de ses résultats en les comparants par une analyse numérique.

L'analyse numérique ou la simulation est un outil utilisé dans différents domaines de l'ingénierie et de la recherche en général, permettant d'analyser le comportement d'un système avant de l'installer et d'optimiser son fonctionnement en testant des différentes solutions et différentes conditions opératoires. Elle s'appuie sur l'élaboration d'un modèle du système, et permet d'en déduire les comportements.

Les simulateurs industriels utilisés dans le domaine de l'énergétique et de procédés chimiques les plus connus mondialement sont[17] :

- ASPEN PLUS (Aspen Technologies) ;
- Design II ;

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

- WinSim ;
- PRO/II (Simulation Sciences) ;
- PROSIM ;
- HYSYS (Hyprotech).

Parmi les logiciels les plus performants et les plus utilisés dans l'industrie pétrolière, on trouve Le simulateur HYSYS.

11.1 Présentation du simulateur HYSYS

Le logiciel de simulation HYSYS, développé par la société canadienne HYPROTECH, est spécifique pour les procédés de génie chimique, séparation bi-phasiques et tri-phasiques, la distillation et la transformation chimique [18].

Les différentes tâches que le simulateur HYSYS peut effectuer sont :

- Dans la conception (engineering) :
 - La résolution des bilans de matières et d'énergie ;
 - Le dimensionnement des équipements ;
 - L'évaluation économique du procédé ;
 - L'optimisation du procédé.
- Dans le suivi des procédés :
 - Réajustement des paramètres de fonctionnement dans le cas des changements de composition de l'alimentation ;
 - Détermination de la performance des équipements.

Cette dernière est le sujet de notre étude : il s'agit d'une analyse de performance d'un compresseur, qui est un équipement stratégique dans l'unité de liquéfaction (zone de stockage) GL2Z Arzew.

11.2 Les étapes principales d'utilisation du logiciel HYSYS

En premier lieu on fait la mise en démarrage de HYSYS, sur la barre d'outils sous l'onglet New.

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

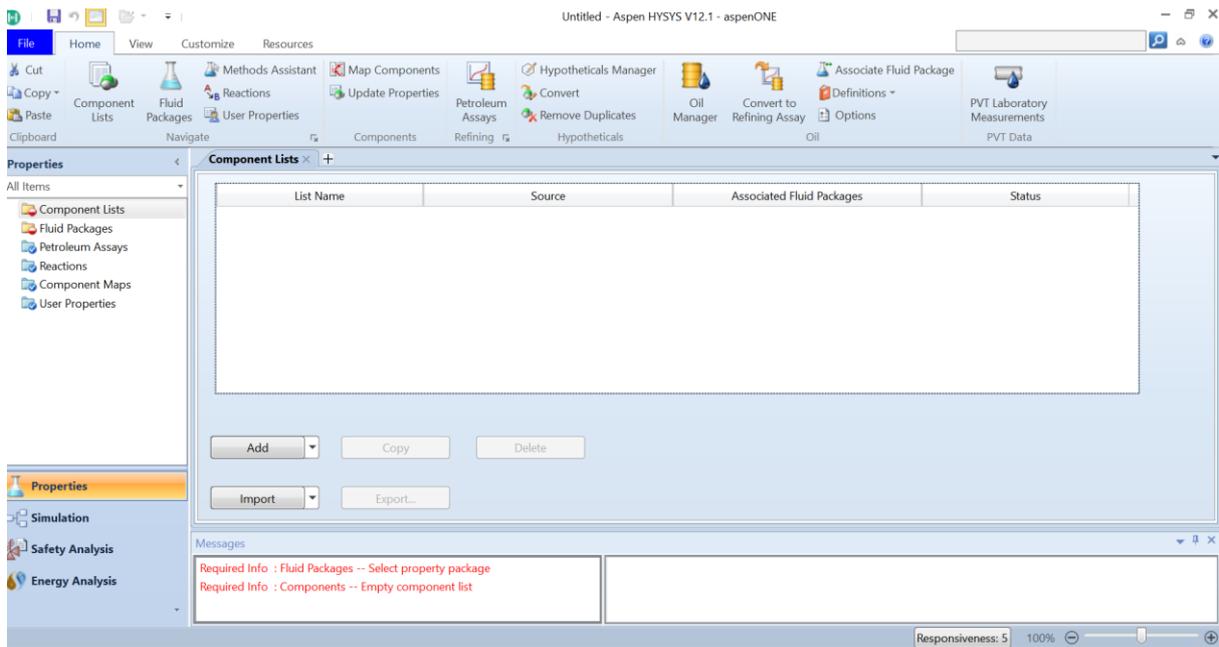


Figure III. 1 : Interface de logiciel

11.3 Choix de composés :

Sur l'accueil de logiciel on fait le choix des composants du mélange gazeux du cas réel (component liste).

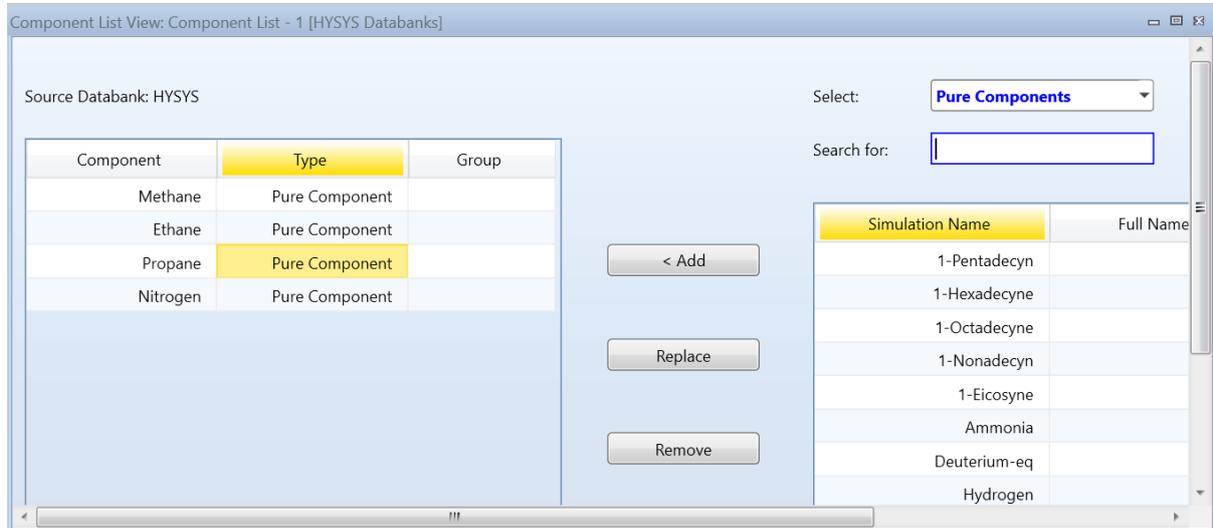


Figure III. 2 : List des composants

11.4 Sélection d'un model thermodynamique :

On a travaillé avec l'équation d'état Peng-robinson, toujours sur la fenêtre principale, on clique sur la commande « fluide package », « add » on cherche en cliquant sur le bouton équation d'état « Peng-robinson ».

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

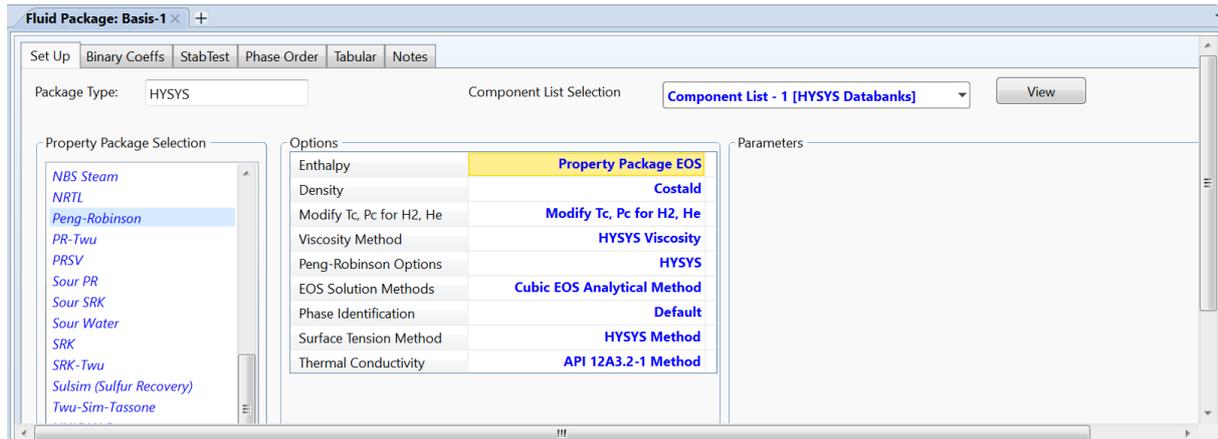


Figure III. 3 : choix du model thermodynamique

Après sélection de model thermodynamique on passe à la simulation, on commence par sélectionner les équipements à simuler.

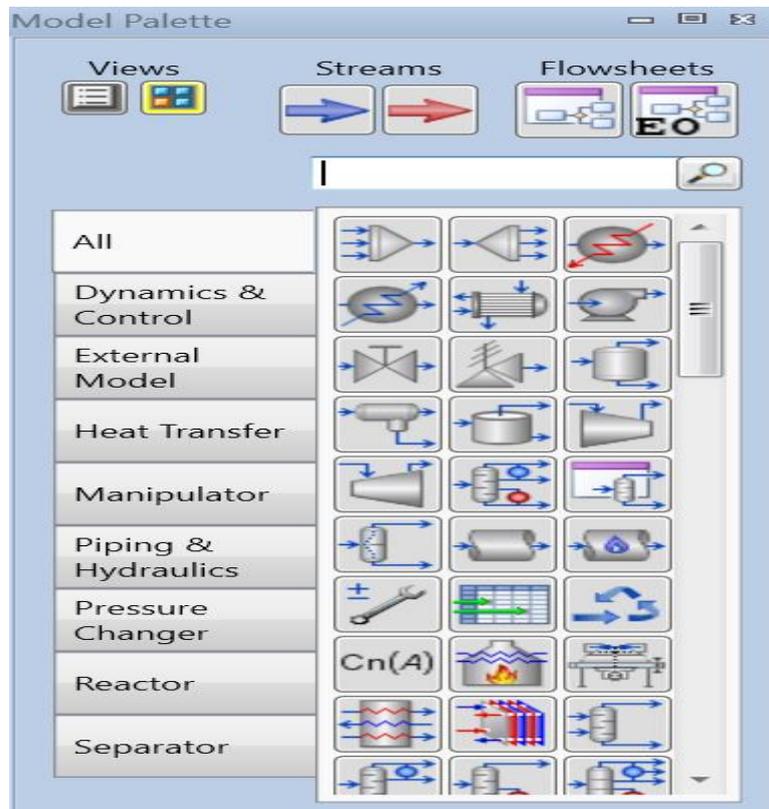
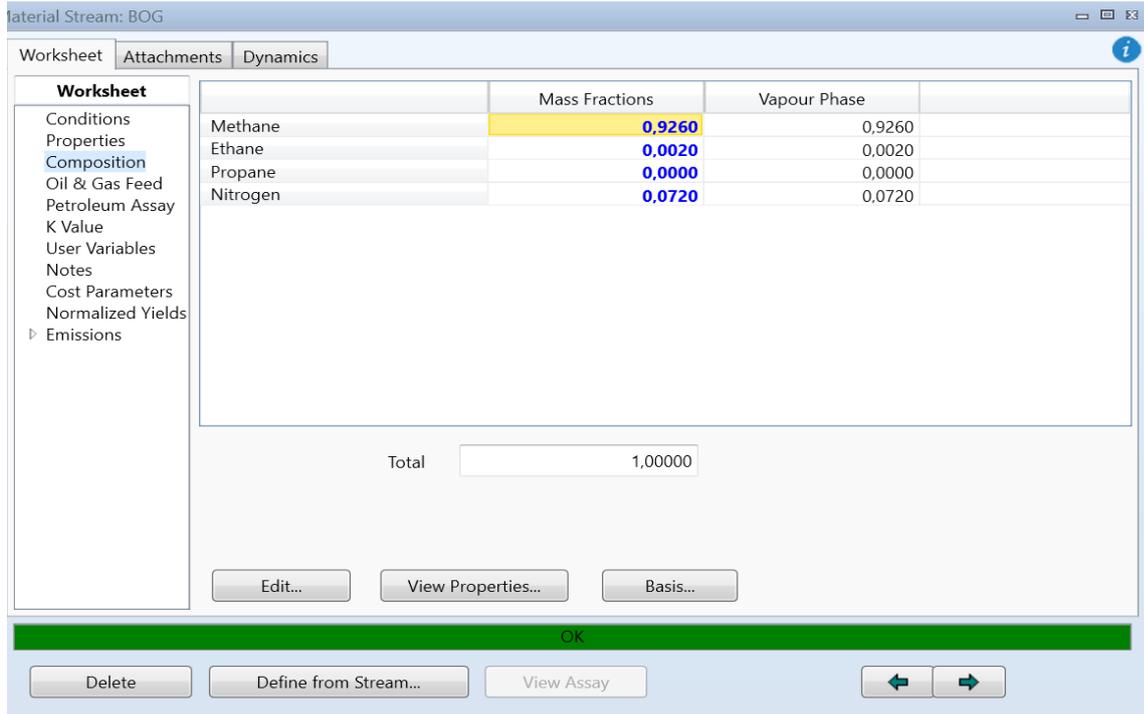


Figure III. 4 : la palette des modèles pour le choix d'équipements

On prend un compresseur et on nomme « 2109J », le flux d'entrée c'est 'BOG' et de la sortie c'est FG. On met la composition de gaz d'entré :

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS



| | Mass Fractions | Vapour Phase |
|----------|----------------|--------------|
| Methane | 0,9260 | 0,9260 |
| Ethane | 0,0020 | 0,0020 |
| Propane | 0,0000 | 0,0000 |
| Nitrogen | 0,0720 | 0,0720 |

Total: 1,00000

Figure III. 5 : Composition du gaz

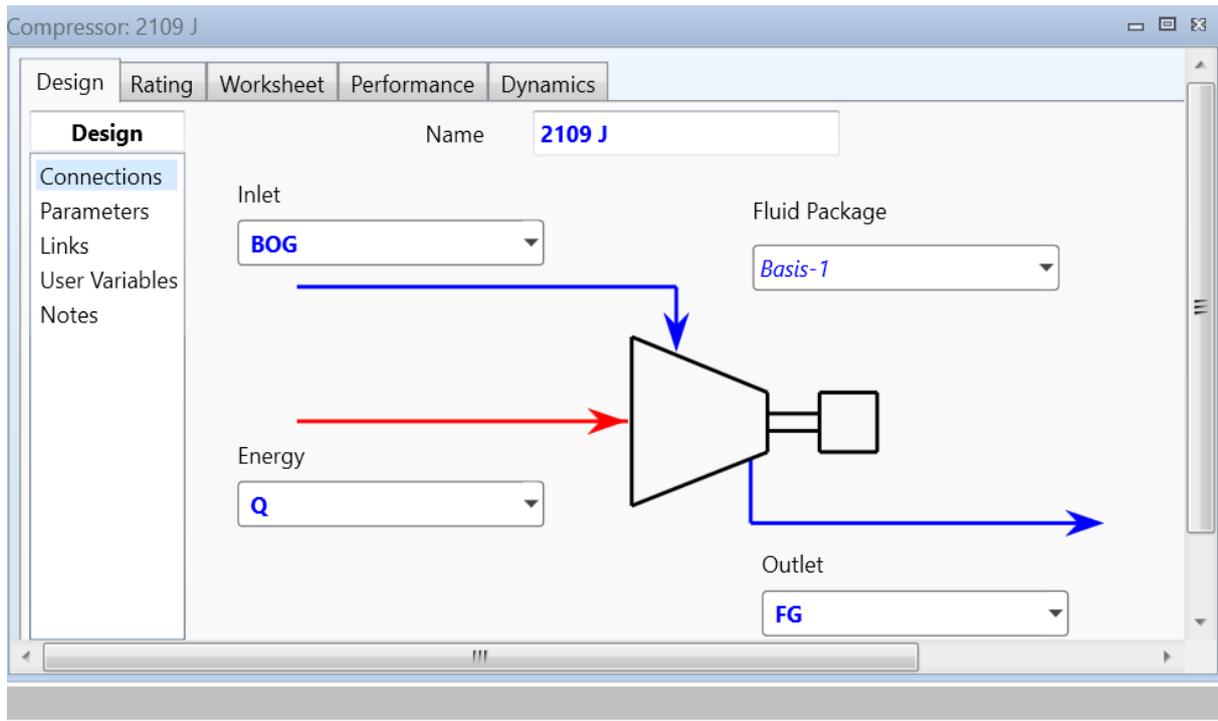
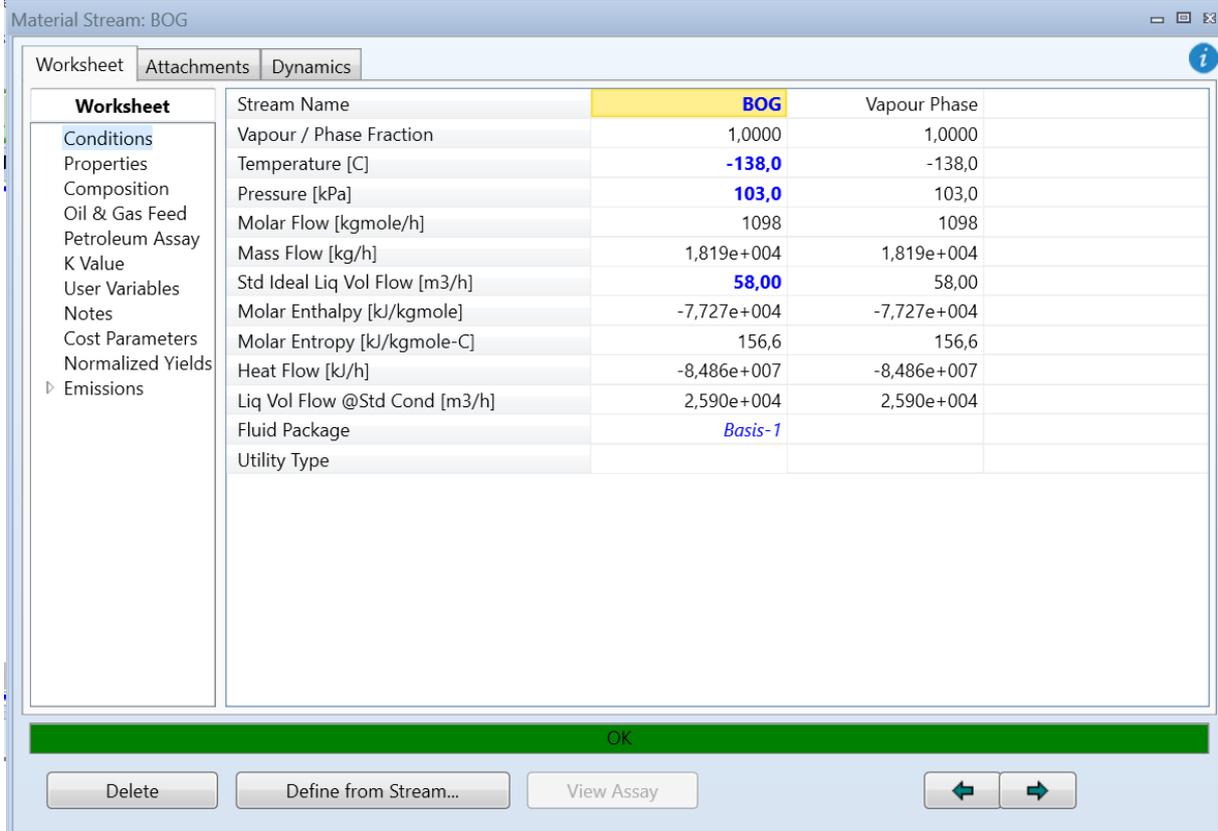


Figure III. 6 : Désigne de compresseur

Le compresseur absorbe l'air à basse pression à (-138 C°, 1,030bar) et le refoule à (-55C°, et 5.15bar) vers le réchauffeur.

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

Les paramètres d'entrée et de sortie de ce compresseur sont donnés en figure ci-dessous :



Material Stream: BOG

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | Stream Name | BOG | Vapour Phase |
|-------------------|-------------------------------|-------------|--------------|
| Conditions | Vapour / Phase Fraction | 1,0000 | 1,0000 |
| Properties | Temperature [C] | -138,0 | -138,0 |
| Composition | Pressure [kPa] | 103,0 | 103,0 |
| Oil & Gas Feed | Molar Flow [kgmole/h] | 1098 | 1098 |
| Petroleum Assay | Mass Flow [kg/h] | 1,819e+004 | 1,819e+004 |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 58,00 | 58,00 |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -7,727e+004 | -7,727e+004 |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 156,6 | 156,6 |
| Cost Parameters | Heat Flow [kJ/h] | -8,486e+007 | -8,486e+007 |
| Normalized Yields | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 2,590e+004 | 2,590e+004 |
| Emissions | Fluid Package | Basis-1 | |
| | Utility Type | | |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure III. 7 : conditions de flux d'entrée de compresseur

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

Material Stream: FG

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | Stream Name | FG | Vapour Phase |
|-------------------|-------------------------------|-------------|--------------|
| Conditions | Vapour / Phase Fraction | 1,0000 | 1,0000 |
| Properties | Temperature [C] | -55,00 | -55,00 |
| Composition | Pressure [kPa] | 515,1 | 515,1 |
| Oil & Gas Feed | Molar Flow [kgmole/h] | 1098 | 1098 |
| Petroleum Assay | Mass Flow [kg/h] | 1,819e+004 | 1,819e+004 |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 58,00 | 58,00 |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -7,463e+004 | -7,463e+004 |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 158,9 | 158,9 |
| Cost Parameters | Heat Flow [kJ/h] | -8,195e+007 | -8,195e+007 |
| Normalized Yields | Heat Flow [kJ/h] | -8,195e+007 | -8,195e+007 |
| ▾ Emissions | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 2,590e+004 | 2,590e+004 |
| | Fluid Package | Basis-1 | |
| | Utility Type | | |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure III. 8 : conditions de flux de sortie de compresseur

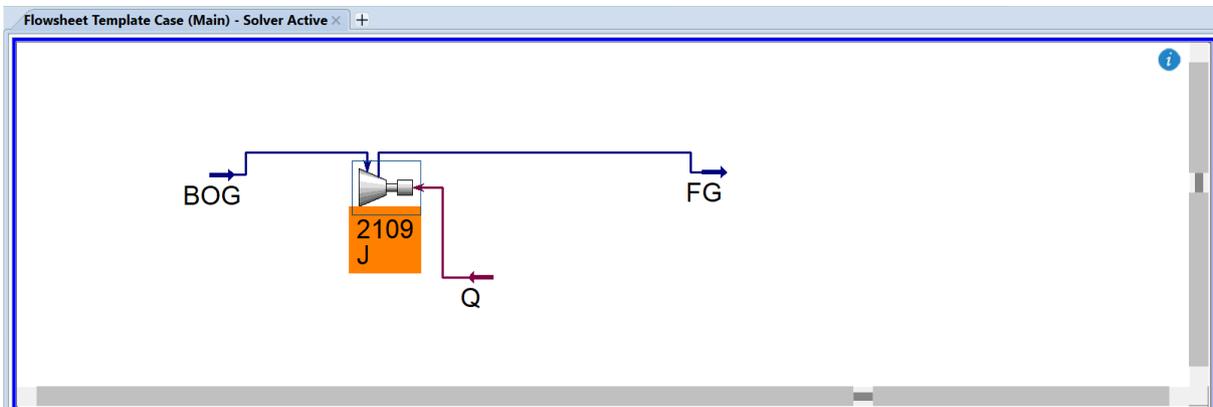
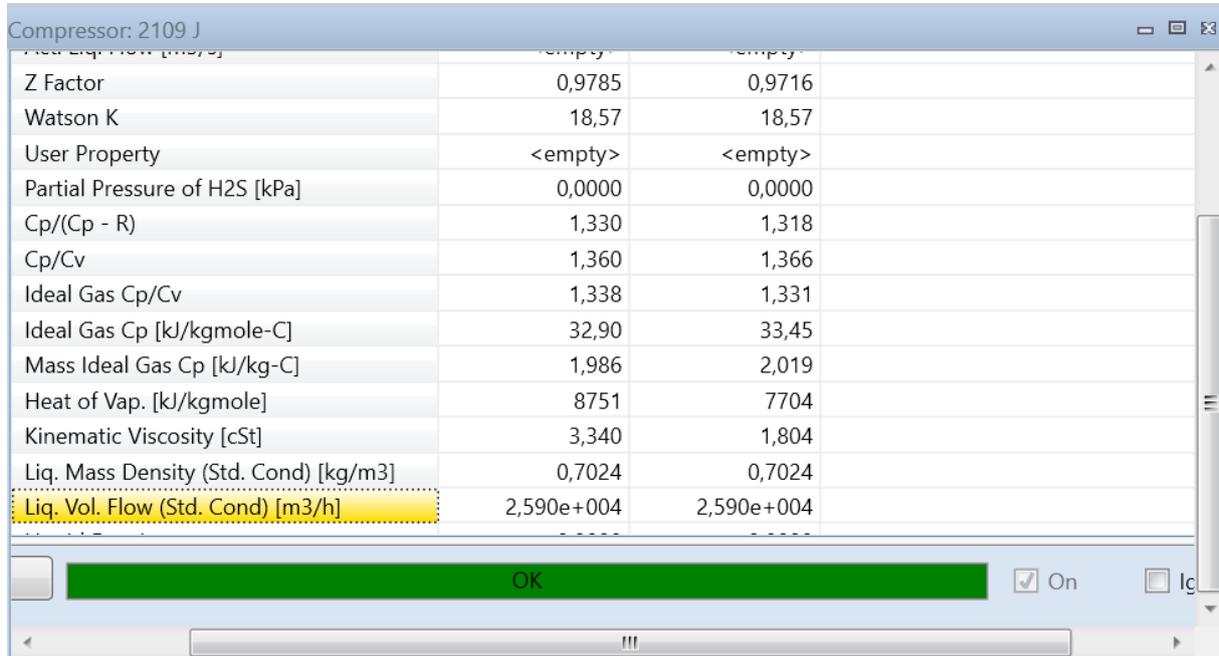


Figure III. 9 : Modélisation de compresseur

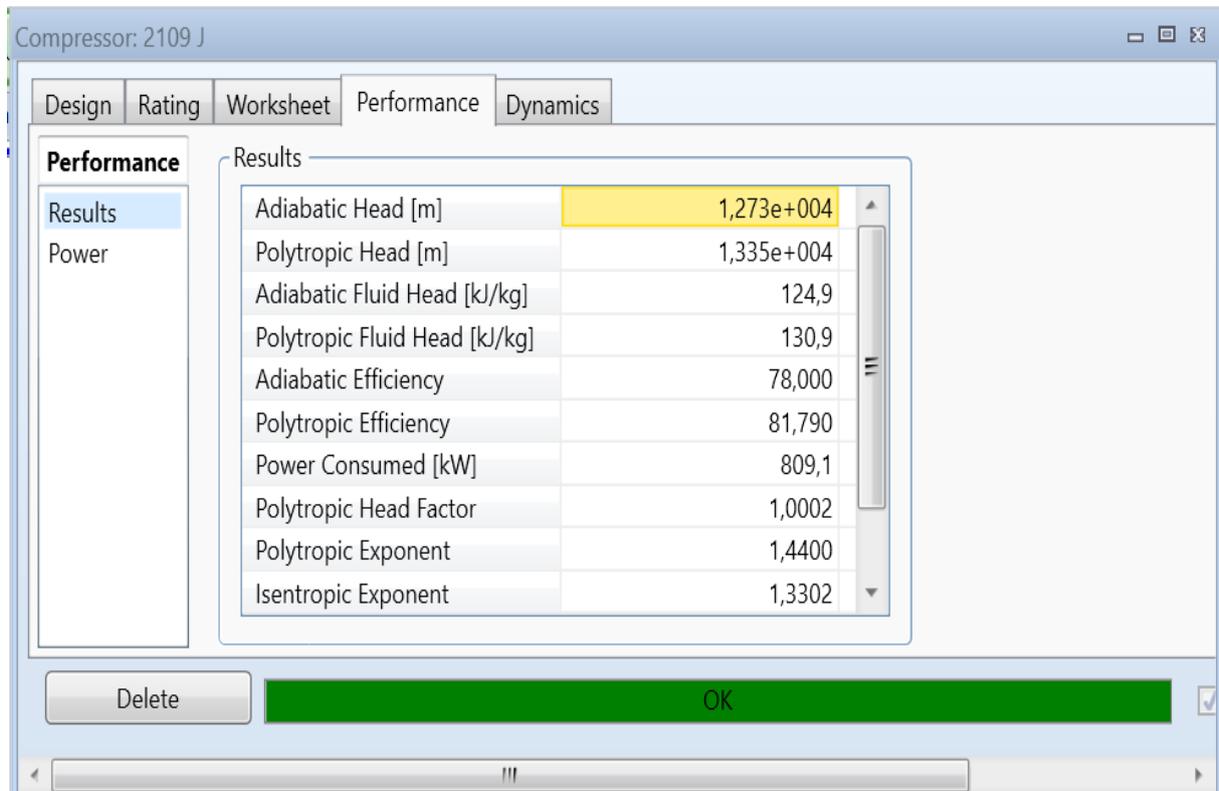
Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

12. Les resultats de la simulation :



| Property | Value 1 | Value 2 |
|---------------------------------------|------------|------------|
| Z Factor | 0,9785 | 0,9716 |
| Watson K | 18,57 | 18,57 |
| User Property | <empty> | <empty> |
| Partial Pressure of H2S [kPa] | 0,0000 | 0,0000 |
| Cp/(Cp - R) | 1,330 | 1,318 |
| Cp/Cv | 1,360 | 1,366 |
| Ideal Gas Cp/Cv | 1,338 | 1,331 |
| Ideal Gas Cp [kJ/kgmole-C] | 32,90 | 33,45 |
| Mass Ideal Gas Cp [kJ/kg-C] | 1,986 | 2,019 |
| Heat of Vap. [kJ/kgmole] | 8751 | 7704 |
| Kinematic Viscosity [cSt] | 3,340 | 1,804 |
| Liq. Mass Density (Std. Cond) [kg/m3] | 0,7024 | 0,7024 |
| Liq. Vol. Flow (Std. Cond) [m3/h] | 2,590e+004 | 2,590e+004 |

Figure III. 10 : Propriété de compresseur



| Property | Value |
|-------------------------------|------------|
| Adiabatic Head [m] | 1,273e+004 |
| Polytropic Head [m] | 1,335e+004 |
| Adiabatic Fluid Head [kJ/kg] | 124,9 |
| Polytropic Fluid Head [kJ/kg] | 130,9 |
| Adiabatic Efficiency | 78,000 |
| Polytropic Efficiency | 81,790 |
| Power Consumed [kW] | 809,1 |
| Polytropic Head Factor | 1,0002 |
| Polytropic Exponent | 1,4400 |
| Isentropic Exponent | 1,3302 |

Figure III. 11 : performance de compresseur

Chapitre III : Calcul analytique et simulation par HYSYS

Tableau III. 4 : Tableau récapitulatif

| Paramètre | | Calcul analytique | Calcul numérique HYSYS | Données du Constructeur |
|--------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|
| Propriétés du gaz | C_p (kJ/kg.k) | 2.020 | 1.986 | / |
| | γ | 1,321 | 1,330 | 1,343 |
| | n | 1,413 | 1,440 | / |
| | z | 0.9901 | 0.9785 | 0.9884 |
| Travaux (kJ/kg) | W_{ad} | 132.04 | 124.9 | / |
| | W_{pol} | 137.80 | 130.9 | / |
| Rendement | n_{ad} | 0,77 | 0,78 | / |
| | n_{pol} | 0,81 | 0,81 | / |
| Puissance (kW) | | 810.01 | 809.10 | [810/1140] |

13. Interprétation des résultats :

D'après l'étude comparative des résultats analytiques, numériques et ceux fournis par le constructeur on peut constater que :

- La cohérence entre les résultats du calcul analytique et ceux de la simulation HYSYS démontre que l'utilisation des équations analytiques est fiable pour l'analyse thermodynamique de compresseurs.
- La correspondance entre le travail et la puissance du compresseur calculés analytiquement et simulés dans HYSYS suggère que les simplifications faites dans les deux méthodes sont appropriées et qu'elles convergent vers des résultats similaires pour le système étudié.
- Dans un contexte industriel, l'utilisation de simulations comme HYSYS est souvent préférée en raison de sa capacité à modéliser des systèmes complexes avec une grande précision.

CHAPITRE IV

Modification du procédé de récupération BOG

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

1. Modélisation de problème

En premier on va montrer dans cette figure le procès de la zone terminal et les conditions et la composition de GNL récupéré

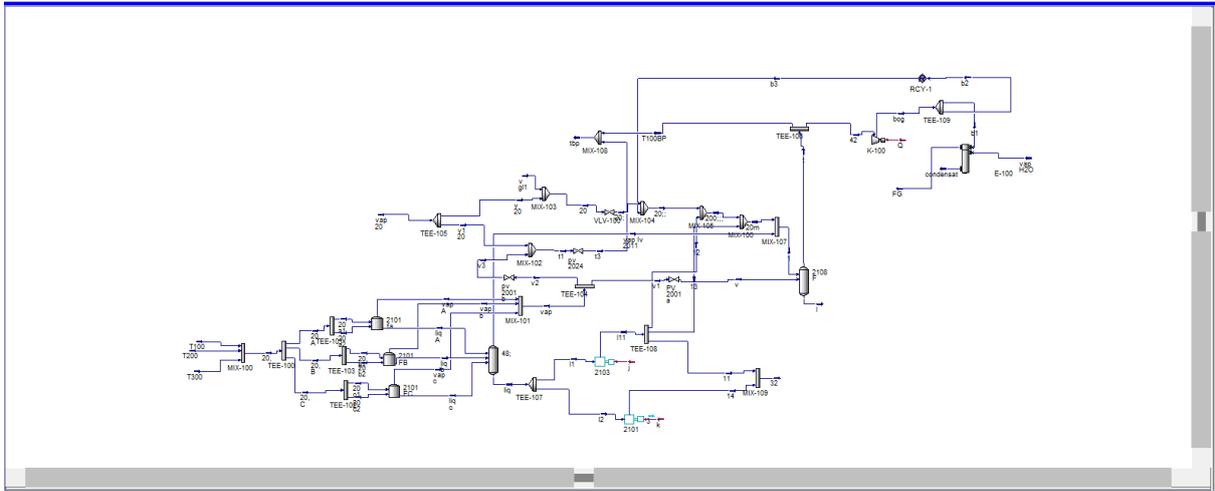


Figure IV. 1 : procès de la zone terminal

Material Stream: I

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | Stream Name | | Vapour Phase | Liquid Phase |
|-------------------|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Conditions | Vapour / Phase Fraction | 0,0000 | 0,0000 | 1,0000 |
| Properties | Temperature [C] | -155,9 | -155,9 | -155,9 |
| Composition | Pressure [kPa] | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| Oil & Gas Feed | Molar Flow [kgmole/h] | 1014 | 0,0000 | 1014 |
| Petroleum Assay | Mass Flow [kg/h] | 2,517e+004 | 0,0000 | 2,517e+004 |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 69,39 | 0,0000 | 69,39 |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -1,028e+005 | -7,694e+004 | -1,028e+005 |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 70,51 | 152,0 | 70,51 |
| Cost Parameters | Heat Flow [kJ/h] | -1,042e+008 | 0,0000 | -1,042e+008 |
| Normalized Yields | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 2,382e+004 | 0,0000 | 2,382e+004 |
| Emissions | Fluid Package | Basis-1 | | |
| | Utility Type | | | |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure IV. 2 : Condition de GNL récupéré

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

| | Mole Fractions | Vapour Phase | Liquid Phase |
|----------|----------------|--------------|--------------|
| Methane | 0,5305 | 0,9442 | 0,5305 |
| Ethane | 0,3114 | 0,0009 | 0,3114 |
| Propane | 0,1572 | 0,0000 | 0,1572 |
| Nitrogen | 0,0009 | 0,0549 | 0,0009 |
| H2O | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Total: 1,00000

Figure IV. 3 : Composition de GNL récupéré

2. La modification proposée :

On prend le modèle thermodynamique de « Peng-Robinson », et on met la composition et les conditions d'entrée.

2.1 Les équipements utilisés :

Pour la réalisation d'une simulation d'une zone terminale on a besoin de quelques équipements qui vont composer notre section :

- Bac de stockage.
- Ballon séparateur.
- Compresseur.
- Réchauffeur.

Les équipements vont être sélectionnés de la palette des modèles (model palette).

On va simule le circuit de vapeur dans la zone de stockage

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

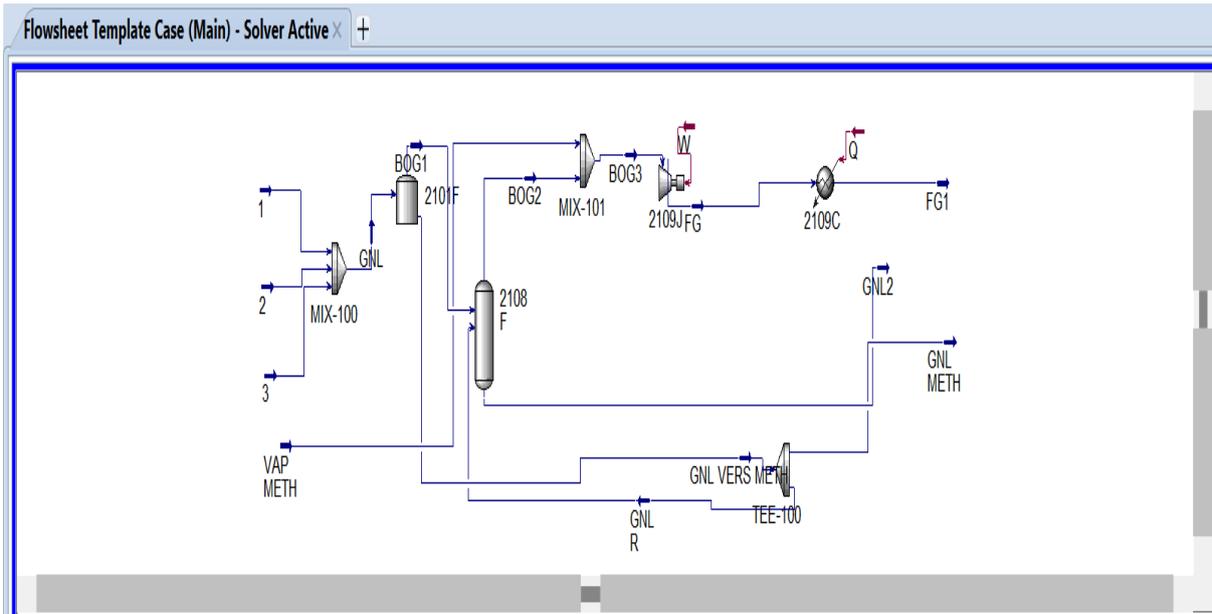


Figure IV. 4 : processus modifié

La composition du gaz :

Material Stream: GNL

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | | Mole Fractions | Vapour Phase | Liquid Phase |
|-------------------|----------|----------------|--------------|--------------|
| Conditions | Methane | 0,9053 | 0,9257 | 0,9042 |
| Properties | Ethane | 0,0549 | 0,0001 | 0,0578 |
| Composition | Propane | 0,0336 | 0,0000 | 0,0354 |
| Oil & Gas Feed | Nitrogen | 0,0062 | 0,0742 | 0,0026 |
| Petroleum Assay | H2O | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| K Value | | | | |
| User Variables | | | | |
| Notes | | | | |
| Cost Parameters | | | | |
| Normalized Yields | | | | |
| Emissions | | | | |

Total 1,00000

Edit... View Properties... Basis...

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure IV. 5 : Composition GNL

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

Les conditions d'entrée et sortie

Material Stream: GNL

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | Stream Name | GNL | Vapour Phase | Liquid Phase |
|-------------------|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Conditions | Vapour / Phase Fraction | 0,0501 | 0,0501 | 0,9499 |
| Properties | Temperature [C] | -161,0 | -161,0 | -161,0 |
| Composition | Pressure [kPa] | 105,0 | 105,0 | 105,0 |
| Oil & Gas Feed | Molar Flow [kgmole/h] | 2,132e+004 | 1067 | 2,025e+004 |
| Petroleum Assay | Mass Flow [kg/h] | 3,801e+005 | 1,807e+004 | 3,620e+005 |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 1200 | 55,70 | 1144 |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -9,128e+004 | -7,564e+004 | -9,211e+004 |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 79,71 | 149,9 | 76,01 |
| Cost Parameters | Heat Flow [kJ/h] | -1,946e+009 | -8,073e+007 | -1,865e+009 |
| Normalized Yields | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 5,025e+005 | 2,518e+004 | 4,773e+005 |
| ▶ Emissions | Fluid Package | Basis-1 | | |
| | Utility Type | | | |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure IV. 6 : Condition d'entre de GNL

Material Stream: FG1

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | Stream Name | FG1 | Vapour Phase | |
|-------------------|-------------------------------|-------------|--------------|--|
| Conditions | Vapour / Phase Fraction | 1,0000 | 1,0000 | |
| Properties | Temperature [C] | 40,00 | 40,00 | |
| Composition | Pressure [kPa] | 550,0 | 550,0 | |
| Oil & Gas Feed | Molar Flow [kgmole/h] | 2977 | 2977 | |
| Petroleum Assay | Mass Flow [kg/h] | 5,062e+004 | 5,062e+004 | |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 155,7 | 155,7 | |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -6,885e+004 | -6,885e+004 | |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 170,8 | 170,8 | |
| Cost Parameters | Heat Flow [kJ/h] | -2,050e+008 | -2,050e+008 | |
| Normalized Yields | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 7,024e+004 | 7,024e+004 | |
| ▶ Emissions | Fluid Package | Basis-1 | | |
| | Utility Type | | | |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure IV. 7 : Condition de fuel gaz

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

Material Stream: BOG3

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | Stream Name | BOG3 | Vapour Phase |
|-------------------|--------------------------------|-------------|--------------|
| Conditions | Vapour / All Stream Properties | 1,0000 | 1,0000 |
| Properties | Temperature [C] | -141,2 | -141,2 |
| Composition | Pressure [kPa] | 103,0 | 103,0 |
| Oil & Gas Feed | Molar Flow [kgmole/h] | 2977 | 2977 |
| Petroleum Assay | Mass Flow [kg/h] | 5,062e+004 | 5,062e+004 |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 155,7 | 155,7 |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -7,493e+004 | -7,493e+004 |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 155,7 | 155,7 |
| Cost Parameters | Heat Flow [kJ/h] | -2,231e+008 | -2,231e+008 |
| Normalized Yields | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 7,024e+004 | 7,024e+004 |
| Emissions | Fluid Package | Basis-1 | |
| | Utility Type | | |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure IV. 8 : Condition de vapeur vers compresseur

Material Stream: GNL METH

Worksheet Attachments Dynamics

| Worksheet | Stream Name | GNL METH | Vapour Phase | Liquid Phase |
|-------------------|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Conditions | Vapour / Phase Fraction | 0,0000 | 0,0000 | 1,0000 |
| Properties | Temperature [C] | -161,0 | -161,0 | -161,0 |
| Composition | Pressure [kPa] | 105,0 | 105,0 | 105,0 |
| Oil & Gas Feed | Molar Flow [kgmole/h] | 1,770e+004 | 0,0000 | 1,770e+004 |
| Petroleum Assay | Mass Flow [kg/h] | 3,164e+005 | 0,0000 | 3,164e+005 |
| K Value | Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 1000 | 0,0000 | 1000, |
| User Variables | Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -9,211e+004 | -7,564e+004 | -9,211e+004 |
| Notes | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 76,01 | 149,9 | 76,01 |
| Cost Parameters | Heat Flow [kJ/h] | -1,630e+009 | 0,0000 | -1,630e+009 |
| Normalized Yields | Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 4,171e+005 | 0,0000 | 4,171e+005 |
| Emissions | Fluid Package | Basis-1 | | |
| | Utility Type | | | |

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Figure IV. 9 : condition de GNL vers méthanier

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

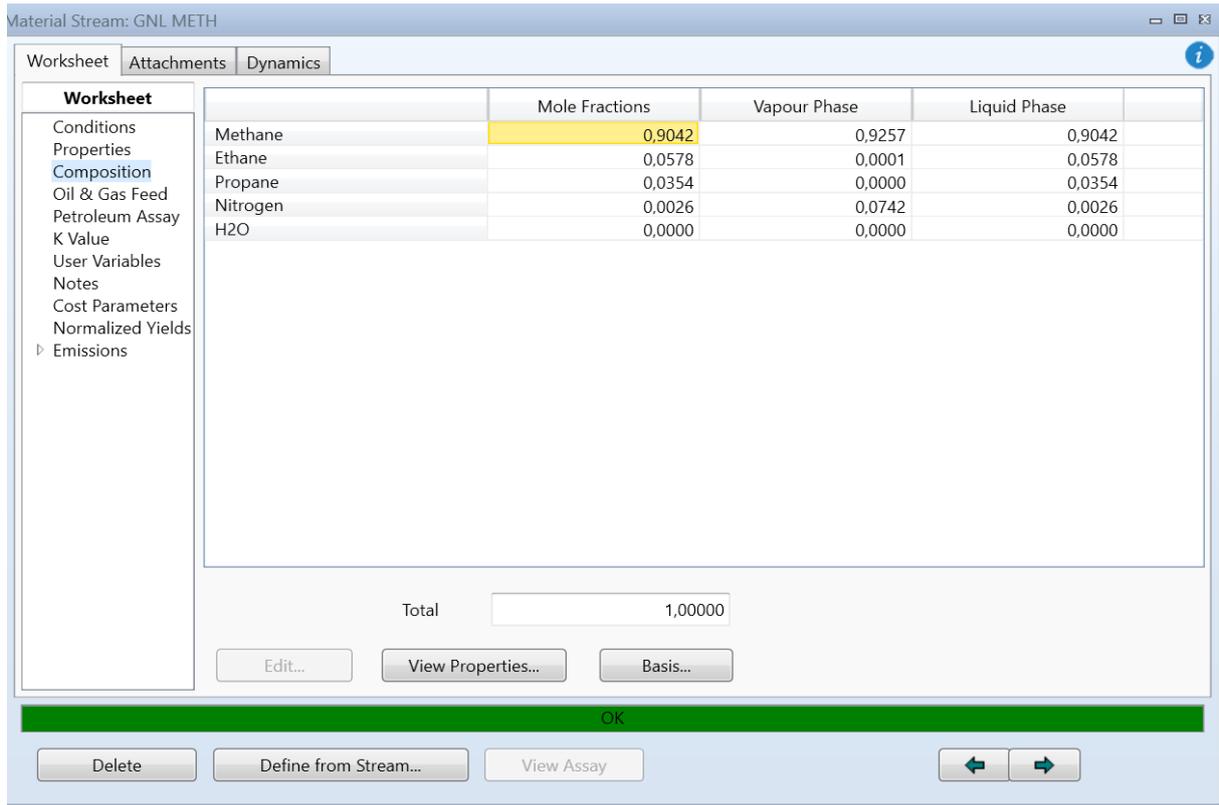


Figure IV. 10 : Composition de GNL vers méthanier

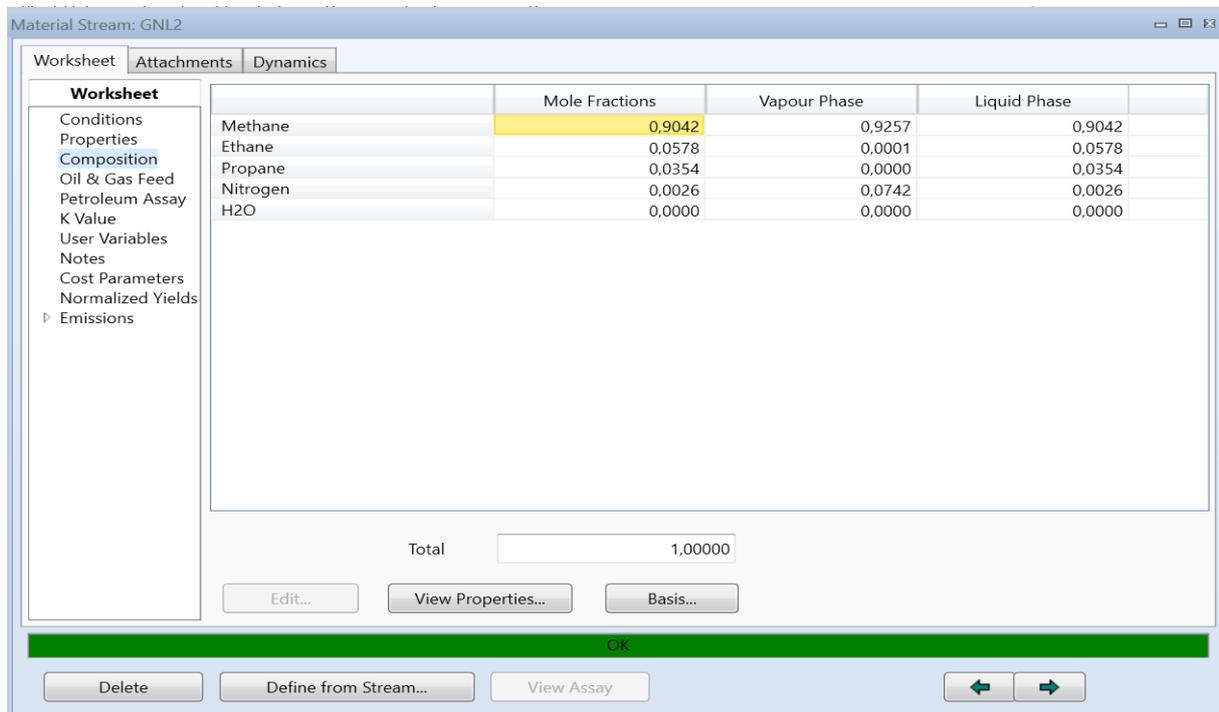


Figure IV. 11 : Composition de GNL récupéré

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

| Property | Vapour Phase | Liquid Phase |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| Stream Name | GNL2 | |
| Vapour / Phase Fraction | 0,0000 | 1,0000 |
| Temperature [C] | -161,0 | -161,0 |
| Pressure [kPa] | 105,0 | 105,0 |
| Molar Flow [kgmole/h] | 996,2 | 996,2 |
| Mass Flow [kg/h] | 1,781e+004 | 1,781e+004 |
| Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] | 56,30 | 56,30 |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole-C] | -9,211e+004 | -9,211e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 76,01 | 76,01 |
| Heat Flow [kJ/h] | -9,176e+007 | -9,176e+007 |
| Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] | 2,348e+004 | 2,348e+004 |
| Fluid Package | Basis-1 | |
| Utility Type | | |

Figure IV. 12 : conditions de GNL récupéré

2.2 Analyse des résultats :

Dans ces deux tableaux on va comparer les conditions et composition de GNL récupéré d'après le procès du site et procès que on a proposé : (dans le cas il y a un chargement de méthanier)

Tableau IV. 1 : comparaison des conditions

| Conditions | Process GL2Z | Process modifiée |
|------------------|--------------|------------------|
| Température (c°) | -156 | -161 |
| Pression (bar) | 1.000 | 1.050 |

Tableau IV. 2 : comparaison des compositions

| Compositions | Process GL2Z | Process modifiée |
|--------------|--------------|------------------|
| Méthane | 53.05% | 90.42% |
| Éthane | 31.14% | 5.78% |
| Propane | 15.72% | 3.54% |
| Azote | 0.09% | 0.26% |

3. Discussion :

Les résultats obtenus par simulation Hysys pour le procédé de récupération des vapeurs de GNL modifié donne une correction adéquate pour une composition de 90% de méthane et la température du GNL renvoyé vers stockage à -161°C. Alors que le GNL renvoyé actuellement dans le complexe GL2Z renvoi un liquide de composition différente qui est de 50% de méthane avec une température plus élevée à celle du stockage ce qui cause énormément de problème par la suite, plusieurs problèmes techniques et de sécurité peuvent survenir comme :

Chapitre IV : Modification du procédé de récupération BOG

Différences dans les Propriétés Physiques et Chimiques :

L'ajout d'un GNL avec une teneur en méthane plus faible augmente la proportion d'hydrocarbures plus lourds (comme l'éthane, le propane, etc.). Cela modifie la densité globale du GNL dans le réservoir, et encore variation de point d'ébullition. Cela peut affecter le comportement d'évaporation et de stockage.

Séparation en Couches : L'ajout de GNL plus dense et plus riche en hydrocarbures lourds peut se déposer en couches distinctes dans le réservoir. Le méthane plus léger a tendance à rester en haut, tandis que les composants plus lourds s'installent en bas. Cette stratification peut compliquer le prélèvement uniforme du GNL.

Effets sur l'Évaporation et la Sécurité (phénomène boil off) : Les composants plus volatils (comme le méthane) s'évaporent plus rapidement, augmentant la proportion de composants plus lourds (comme l'éthane ou le propane) dans le liquide restant. Cela modifie la composition du gaz vapeur et peut entraîner des changements imprévus dans la pression du réservoir.

Impact sur la Qualité et la Commercialisation : La différence de composition modifie la valeur calorifique du GNL, impactant son efficacité énergétique et sa conformité aux normes contractuelles.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

A travers ce mémoire de fin d'études, une étude thermodynamique du compresseur centrifuge 2109J de la zone terminale GL2Z d'Arzew a été réalisée. Cet équipement permet d'augmenter la pression et la température, après cela le gaz comprimé passe par le réchauffeur est envoyé vers chaudière de la zone d'utilité pour la production d'énergie. Ce qui est confirmé par la simulation Hysys.

L'étude thermodynamique basée sur des données réelles a été faite par une étude analytique du compresseur à 5 étages. Les résultats obtenus après cette étude visent à comparer les paramètres les plus importants comme les pressions et les températures et s'assurer que la sortie est toujours monophasique. Après ces mêmes données ont été utilisées par Hysys ce qui a donné des paramètres très satisfaisants et proches de nos calculs.

Dans le but d'une bonne analyse du problème actuel, nous avons vu que l'étude du processus de récupération du GNL s'avère très important. L'étude analytique est très complexe pour tous les appareils. Alors la solution adéquate est d'utiliser le logiciel Hysys pour le processus existant. Une comparaison a été faite en fin du chapitre 4 et a montré l'exactitude des paramètres du processus avec les données réelles sur site en cas de chargement.

La recommandation étudiée dans ce mémoire est de corriger la composition chimique obtenue par le GNL récupéré par Hysys et sa température qui ne se confond pas avec la température de stockage.

Enfin ce travail a été très bénéfique pour moi, il a été d'une grande utilité scientifique surtout qu'il m'a permis d'approfondir mes différentes connaissances théoriques et pratiques sur la chaîne de GNL en particulier sa liquéfaction et son stockage, et aussi sur les compresseurs centrifuges et la manipulation sur le logiciel Hysys.

Bibliographie

- [1] : (Laurent Carroué, « La révolution du gaz et du pétrole de schiste aux États-Unis : enjeux technologiques, territoriaux et géostratégiques », *Géococonfluences*, juin 2022.
- [2] : GNL101 Initiation au Gaz Naturel Liquéfié, SNC. LAVALIN. 2016.
- [3] : Jonathan Stern, “the new security environment for European gas : worsening geopolitics and increasing global competition for LNG ”, Oxford Institute for Energy Studies, NG 15, October 2006.
- [4] : <https://www.connaissancedesenergies.org> ,15/03/2019
- [5] : <https://www.gaznaturel.be>, 02/04/2019
- [6] : <https://total.direct-energie.com>, 13/02/2019
- [7] : (OPAEP) paru le 28 janvier, qui indique ce bond impressionnant du pays.
- [8] : Manuel interne d’organisation Sonatrach, “Description du procédé de fabrication de GL2Z”, page 1-17, Août 2006
- [9] : Kolli Khaled, “Fuites de gaz au niveau de l’échangeur de régénération X44C du complexe GL2Z ”, mémoire pour l’obtention du grade d’ingénieur spécialisé en mécanique, IAP, Boumerdes, Octobre 2008.
- [10] Thermodynamique. Récupéré sur la science pour tous : [Http://lasciencepourtous.cafe-sciences.org](http://lasciencepourtous.cafe-sciences.org), 2012, Novembre 24.
- [11] S. BESSAM, Etude des propriétés thermodynamique, structurales et de transport du méthane liquide et des mélanges d’hydrocarbures par dynamique moléculaire de corps flexible, Mémoire de magister université d’Oran département de chimie, 2008, page 25-27-28
- [12] Manuelle opératoires de procédé « mars 1979 »
- [13] TOYO KANETSU K.K : Note de calculs pour réservoirs de stockage de 100000de GNL
- [14] peacesoftware.de/einigewerte/stickstoff_e.html
- [15] thermodynamique. Récupère sur la science pour tous.
- [16] LALLEMAND, A. Compression et détente des gaz. Technique de l’ingénieur 2008.
- [17] DJEBBARI Abdelbasset, simulation d’une unité de production du méthanol a laide de l’Aspen plus Hysys.Memoire de master, Université khider Biskra,2014
- [18]Laidi Abderrouaf,description technologique et étude thermodynamique du system TurboExpander.Memoir de master, Université Mhamed BOUGARA Boumerdes 2015

ANNEXES

Les Annexes

ENG EQUIP 699-1 (1-76)



Pullman Kellogg
Division of Pullman Incorporated

SPECIAL-PURPOSE GEAR DATA SHEET

JOB NO. 5300-50 ITEM NO. 2109-TA/B/C/D/E
PURCHASE ORDER NO. _____
REQUISITION NO. 5300-50-721-103
INQUIRY NO. _____
PAGE NO. 14 OF 15 BY R KLUTZKE
DATE 10-12-77 REV 12-15-77
9-5-78 RSM
11-7-78 KMM

FOR SONATRACH LNG-2 UNIT _____
SITE ARZEW, ALGERIA SERIAL NO. _____ GEAR RATED HP 1770
SERVICE LNG BOIL-OFF GAS COMPRESSOR NO. REQ'D. 5
MANUFACTURER EBARA CORP. OUTLINE DWG. SB-7709990 SECTIONAL DWG. SB-7802903
GEAR TYPE GBH43 DRIVER TYPE ELECTRIC MOTOR DRIVEN EQUIPMENT BQG COMPRESSOR

NOTE: INDICATES INFORMATION TO BE COMPLETED BY PURCHASER; BY MANUFACTURER
PARAGRAPH NUMBERS WITHIN () REFER TO APPLICABLE PARTS OF API STANDARD 613

OPERATING CONDITIONS

DRIVEN EQUIPMENT BHP: REQ'D 1140 KW (1066 MAX. 1529 BHP)
DRIVER BHP: RATED 1320 KW MAX. 1770 HP
GEAR RATED HP (7a) 1770 HP 1320 KW
TORQUE @ MAX. CONTINUOUS SPEED 8485 N-m (6262 FT-LB)
MAX. TORQUE (7a) 10742 LB-FT @ 1485 RPM (L.S.)
RPM INPUT (4d) 1485 (S) (N)
RPM OUTPUT (4e) 10566 (S) (N)
MAX. CONTINUOUS SPEED (4f) 10566 RPM
DUTY: CONT. INTERMIT. STANDBY _____ HRS/YR
MIN. AGMA SERVICE FACTOR (7b) 1.5 REVERSING _____
CHARACTER OF LOAD: SMOOTH MODERATE SHOCK HEAVY
SHAFT ASSEMBLY DESIGNATION (8c) R-L
ROTATION OF H.S. SHAFT FACING GEAR CPL'G (8b3): CW CCW
ROTATION OF L.S. SHAFT FACING GEAR CPL'G (8b3): CW CCW
SHAFT ENDS (11c) CYLINDRICAL TAPERED KEYED
LOCATION (20a): INDOOR OUTDOOR ROOF: YES NO
SITE TEMP. (20c) (FIG. 4a) SUMMER 107 WINTER (MIN.) 32
 WINTERIZATION REQ'D. (20g, 20c)
COOLING WATER SUPPLY: _____ PSIG _____ °F; MAX. ΔP _____
UNUSUAL CONDITIONS: DUST FUMES OTHER SAND
THRUST LOAD (10b): API _____ LB TOTAL _____ OTHER (FIG. A-1) _____
REQ'D SOUND PRESS. LEVEL (16b) TRAIN 98 DECIBELS

ADDITIONAL REQUIREMENTS

FURNISH NON-SPARK COUPLING GUARD:
 H.S. STD. CODE _____
 L.S. STD. CODE _____
 SOLEPLATES (19a) BY _____
 BASEPLATE (19a) BY COMP APPLICABLE API STD. _____
EQUIP. ON BASEPLATE (19a): DRIVER GEAR DRIVEN EQ.
 HEATING ELEMENT (20c) STEAM @ _____ PSIG ELECTRIC
 SPACE FOR VIBRATION PROBE (14c): NO. 2 MFR. BENTLY
 SPARE GEAR SET REQUIRED
 SPARE PARTS LIST REQUIRED (28c)
SHIPMENT (25c): DOMESTIC EXPORT
OUTDOOR STORAGE OVER 3 MONTHS (25d) YES NO

APPLICABLE SPECIFICATIONS

API GEAR STD. 613 AGMA GEAR SOUND SPEC. 295
 API TURBINE STD. 615 _____
 AGMA 421-06 KELLOGG 5300-10-7991

TORSIONAL & LATERAL CRITICAL SPEED ANALYSIS (15b)
BY BY ELLIOTT

LUBRICANT CHARACTERISTICS (15b, 20b)

OIL VISCOSITY: 150 SUS @ 100° F. 42 SUS @ 210° F
 MAXIMUM PERMISSIBLE OIL VISCOSITY @ STARTUP 650 SUS
SEE SPEC J21-2-5300-8-1
INSPECTIONS & TESTS (22a, 23b)

COUPLINGS (17)

SUPPLIER: H.S. PURCHASER GEAR MFR. OTHER _____
L.S. PURCHASER GEAR MFR. OTHER _____
MFR: H.S. N.S. DIBENDIX L.S. N.S. DIBENDIX
TYPE: H.S. DIAPHRAGM L.S. DIAPHRAGM
SPACER: H.S. L.S.
LUBRICATION: H.S. GREASE CONTIN. OIL
L.S. GREASE CONTIN. OIL
MOUNT GEAR HALF BY GEAR MFR.: H.S. L.S.
MOUNT DRIVER HALF BY DRIVER MFR.: H.S. L.S.
MOUNT DRIVEN HALF BY DRIVEN EQ. MFR.: H.S. L.S.

| SHOP INSPECTION BY PURCHASER DURING FABRICATION | WITNESS TEST LOG | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> MFR. STD. SHOP TESTS WITH DRIVEN EQUIP. | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> LUBE CONSOLE SHOP TEST | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> FULL LOAD RUN <input type="checkbox"/> PART LOAD RUN | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> FULL SPEED-LOAD TORQUE BAR | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> DISMANTLE-REASSEMBLY INSPECTION | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> SHOP SOUND LEVEL TEST | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> SPARE GEAR SET SHOP TEST | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

REMARKS: _____

Les Annexes

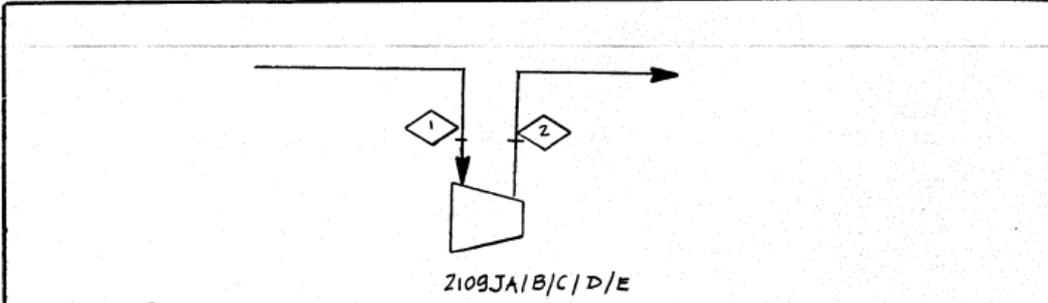
KG-0908 (3-81)



JOB NO.: 666203 C662-50
 PAGE NO.: 1
 ITEM NO.: 2109JA/B/C/D/E

CLIENT: SONATRACH
 LOCATION: BETHIOJA, ALGERIA
 UNIT: OFFSITE

COMPRESSOR LOAD SHEET



| OPERATING CONDITIONS (each) | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------|-------|------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|
| SUCTION | | | NO LOADOUT | | LOADOUT | | LOADOUT | | LOADOUT | |
| | | | A | | B | | C | D | E | F |
| Temperature | C | F | -159.37 | -254.9 | -146.71 | -232.1 | -146.61 | -231.9 | -140 | -220 |
| Pressure | Bar Abs. | psia | 1.027 | 14.9 | 1.027 | 14.9 | 1.027 | 14.9 | 1.027 | 14.9 |
| cp/cv(K avg) | - | - | NOTE 6 | | | | | | | |
| Z | - | - | NOTE 6 | | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | lb/h | 22863 | 50405 | 17544 | 38678 | 17387 | 38331 | 19449 | 42878 |
| Vol. Flow | m3/h | ft3/h | | | | | | | | |
| DISCHARGE | | | (NOTE-8) | | | | | | | |
| Temperature | C | F | -96 | -140.8 | -75 | -99.4 | -73 | -99.4 | -57 | -70.6 |
| Pressure | Bar Abs. | psia | 4.254 | 61.7 | 4.254 | 61.7 | 4.254 | 61.7 | 4.254 | 61.7 |
| cp/cv(K avg) | - | - | NOTE 6 | | | | | | | |
| Z | - | - | NOTE 6 | | | | | | | |

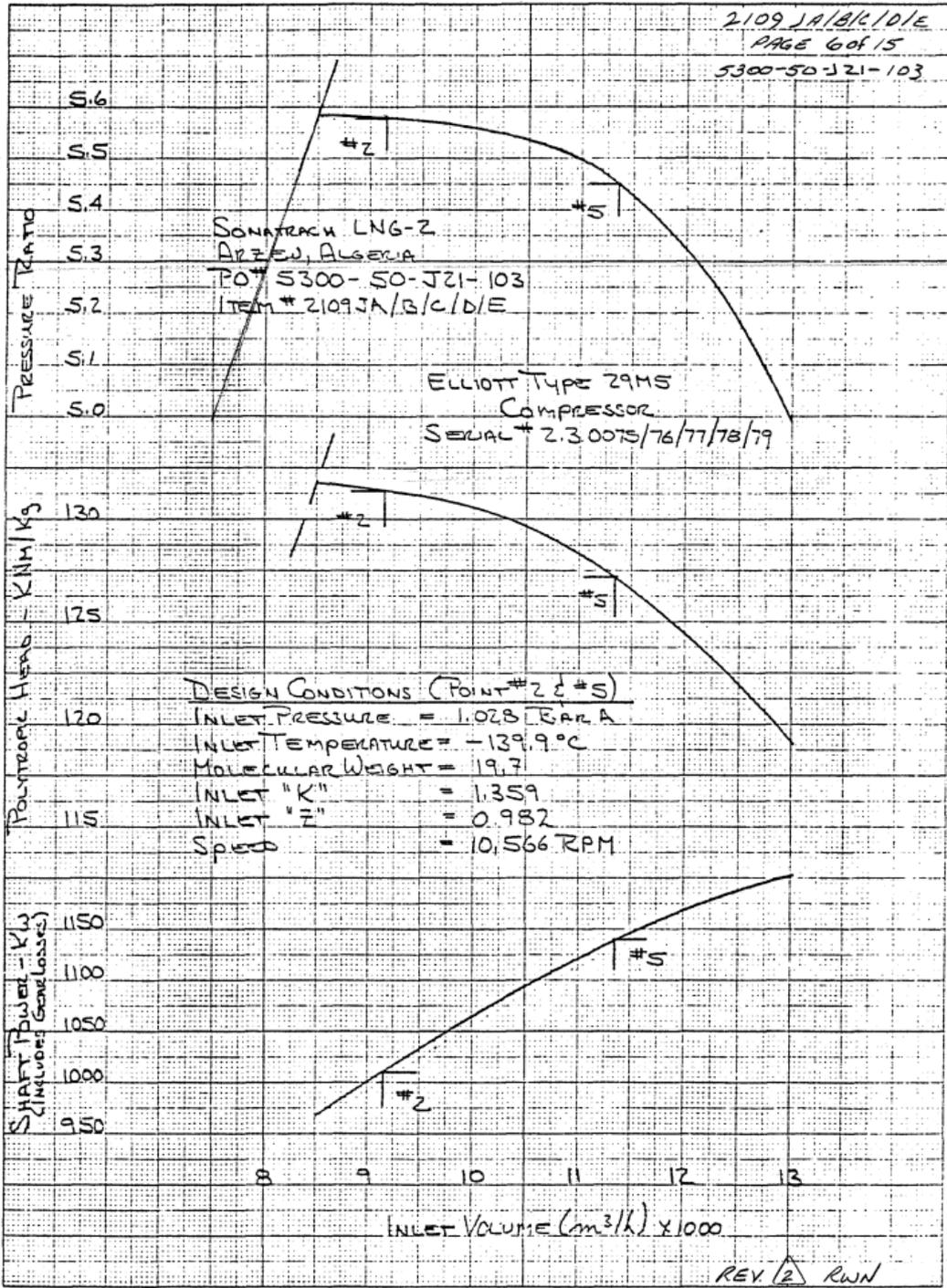
8. DISCHARGE PRESSURE INDICATED ARE MINIMUM REQUIRED. VENDOR TO PROVIDE ACTUAL DISCHARGE PRESSURES FOR EACH CASE.

GAS COMPOSITION (NOTE-6)

Les Annexes

FORM 1107-319-A REF. NO. R718415 TITLE ESTIMATED PERFORMANCE CURVE NO. JF-1626

2109 JA/B/C/D/E
PAGE 6 of 15
5300-50-J21-103



DIETZEN CORPORATION
MADE IN U.S.A.

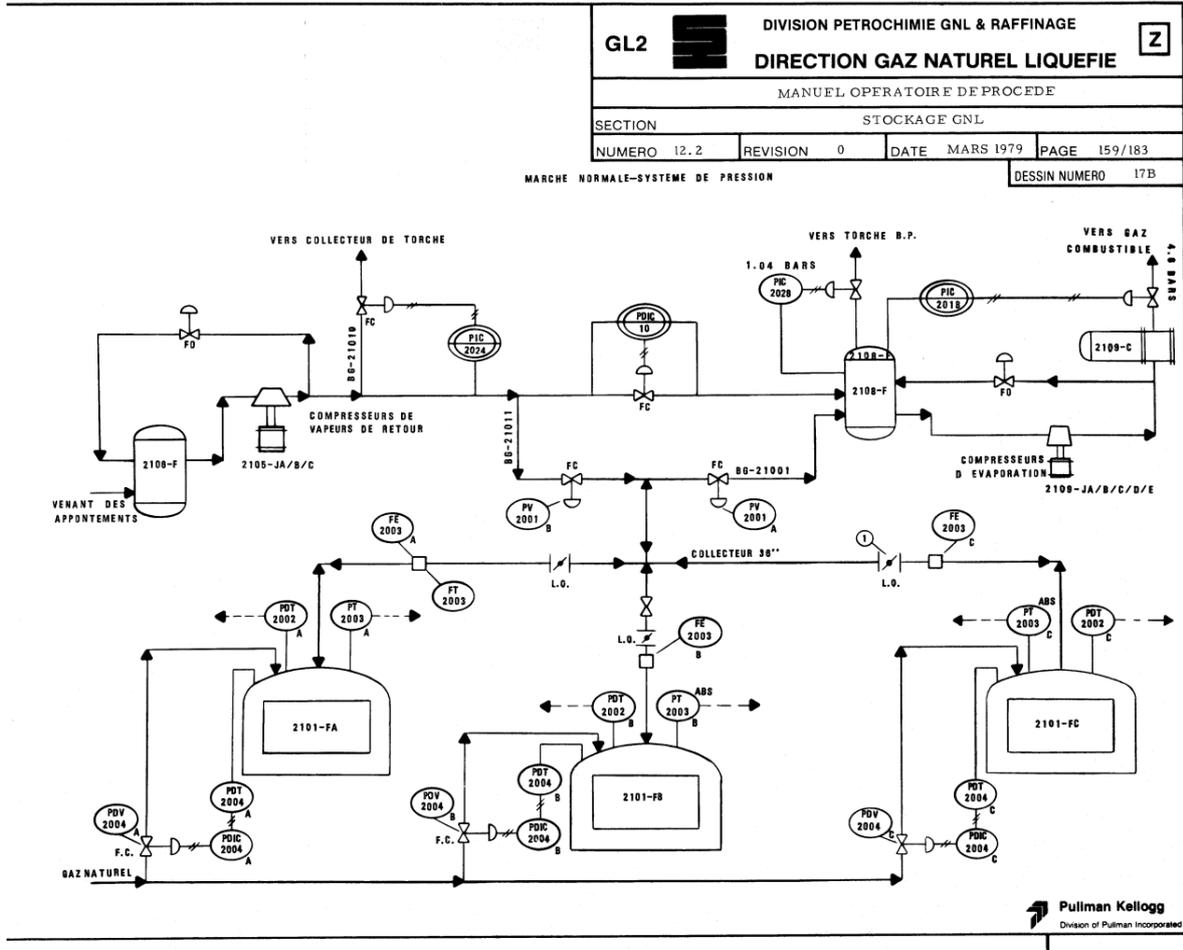
NO. 340-M DIETZEN GRAPH PAPER
MILLIMETER

77 CURVE NO. JF-1626



REV. 2 RWN
REV. 3 9-5-74
REV. 4 11-7-78 BY RLS DATE 23 Nov 77

Les Annexes



Les Annexes

2101FA, FB, FC

REQ.NO.: 5300-50-F21-101
 PAGE : 1 of 3
 BY : S.G.
 CHECK : S.A.A.
 APPVD. : W.H.P.
 DATE : 4-14-76

CLIENT : SONATRACH LNG-2
 LOCATION: ARZEW, ALGERIA



STORAGE TANK DESIGN DATA SHEET

SERVICE LNG STORAGE TANK
 ITEM NO. 2101-FA, FB & FC

ENG GEN FAC 20-1 (4-76)

- 1.0 PURCHASER DATA**
- 1.1 CAPACITY OF EACH STORAGE CONTAINER
100,000 m³
- 1.2 SIZE (Vendor to provide most economical tank size.) (Purchaser to state limiting dimensions, as required.)
- 1.2.1 Mean Diameter Purchaser by Fabricator
- 1.2.2 Straight Height Fabricator by fabricator
- 2.1.3 TYPE OF STORAGE CONTAINER
 (Shop, Field or Partial Shop Fab.) *check box*
- 1.3.1 Cone Roof.
- 1.3.2 Floating Roof.
- 1.3.3 Dome Roof. (C)
- 1.3.4 Sphere
- 1.3.5 Bullet
- 1.3.6 Bin
- 1.3.7 Other, specify
- 1.4 NUMBER OF WALLS
- 1.4.1 Single
- 1.4.2 Double
- 1.5 TYPE OF CONTAINER BOTTOM
- 1.5.1 Cone up.
- 1.5.2 Cone down.
- 1.5.3 Flat
- 1.5.4 Conical w/ ° included angle.
- 1.5.5 Other, specify
- 2.0 SPECIFICATIONS**
- 2.1 Purchasing Specification F40-8F70
- 2.2 INDUSTRY CODE
- 2.2.1 API - 620. .fifth edition, 1973.
- 2.2.2 API - 650.
- 2.2.3 API - 2501
- 2.2.4 ASME - Section I
- 2.2.5 ASME - Section VIII
- 2.2.6 Others Algerian Regulations & NFPA-59A - 1975
- 2.3 KELLOGG STANDARDS
- 2.3.1 Ladder & Stairway Clips
- 2.3.2 Others

- 3.0 FLUID DATA**
- 3.1 FLUID STORED Liquified Natural Gas
- 3.2 PROPERTIES OF FLUID STORED
- 3.2.1 Storage temp., °F Operating -257-264 Design -264
- 3.2.2 Storage press., psig 0.6 1.5
- 3.2.3 Specific gravity @ -260°F 0.45-0.48
- 3.2.4 Expansion factor @ storage temperature
- 3.2.5 Vapor press. @ storage temperature, psia
- 3.2.6 Viscosity @ storage temperature /centipoise 0.17
- 3.2.7 Pour Point, °F
- 3.2.8 Closed cup flash point, below 100°F
- 3.2.9 Closed cup flash point, above 100°F
- 3.2.10 Bulk Density, lbs/cu.ft.
- 3.2.11 Angle of repose, degrees
- 3.3 FLOW RATES
- 3.3.1 Inage rate, U.S. gals/min. 10,700-13,000
- 3.3.2 Outage rate, U.S. gals/min. 44,000-53,000 ✓
- 3.4 INERT GAS BLANKET
- 3.4.1 Required, Yes No
- 3.5 Design Requirements
- 3.5.1 Design Structurally For Fluid at -264°F
- 3.5.2. Design Thermally For Fluid at -260°F
- 4.0 SITE DATA**
- 4.1 Wind Load, lbs. per sq. ft. *
- 4.2 Snow Load, lbs. per sq. ft. *
- 4.3 Earthquake zone *
- 4.4 Allowable foundation press. *
- 4.5 Minimum valley angle required, deg.
- 4.6 Design winter temperature, °C 10
- 4.7 Design summer temperature, °C 38
- 4.8 Barometric pressure, mm - Hg 758
- 4.9 Maintained foundation temp, °F

(C) Dome roof with suspended deck.
 ** Base design on heaviest fluid.

* See the Purchasing Specification Summary Sheet, Class F(LNG), paragraph 3.0.

| REVISIONS | NO. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----------|-----|---------|----------|---------|---------|---|---|---|---|---|----|----|
| DATE | | 5-20-76 | 12-13-76 | 3-22-77 | 7-25-78 | | | | | | | |
| BY | | S.G. | D.A.T. | D.A.T. | dar | | | | | | | |
| CHECK | | S.A.A. | S.A.A. | S.G. | S.A.A. | | | | | | | |

GL2



DIVISION PETROCHIMIE GNL & RAFFINAGE
DIRECTION GAZ NATUREL LIQUEFIE

Z

MANUEL OPERATOIRE DE PROCEDURE

SECTION

STOCKAGE GNL

NUMERO

12.2

REVISION

0

DATE MARS 1979

PAGE

4/183

1. PLACE DANS LE PROCEDURE

Ouvrir les dessins N° 1 et 1A

La zone de stockage de GNL est située au nord de l'usine. Elle est encadrée au sud, par le canal de rejet d'eau de mer, à l'ouest, par la station de pompage d'eau de mer, à l'est, par la zone de stockage de gazoline et au nord, par la Mer Méditerranée. La zone de stockage comprend cinq (5) compresseurs, trois (3) bacs de stockage, dix (10) pompes, un (1) ballon du désurchauffeur, un (1) échangeur de chaleur et la tuyauterie connexe. Le système est conçu pour stocker le GNL produit par les six (6) trains de procédé.

Le GNL est produit par six trains de procédé et envoyé après pompage vers les trois bacs de stockage de GNL. Chaque bac a une capacité de 100.000 m³.

Les trois bacs de stockage de GNL sont reliés à un système commun d'écoulement de vapeurs. Ce système reçoit les vapeurs des bacs de stockage et les vapeurs produites pendant les opérations de chargement des méthaniers. Après compression, les vapeurs de stockage (ou vaporisats) sont envoyées vers le système de gaz combustible.

Le bâtiment de la douane sert de centre de contrôle principal à partir duquel est assurée la supervision d'ensemble des installations de stockage.

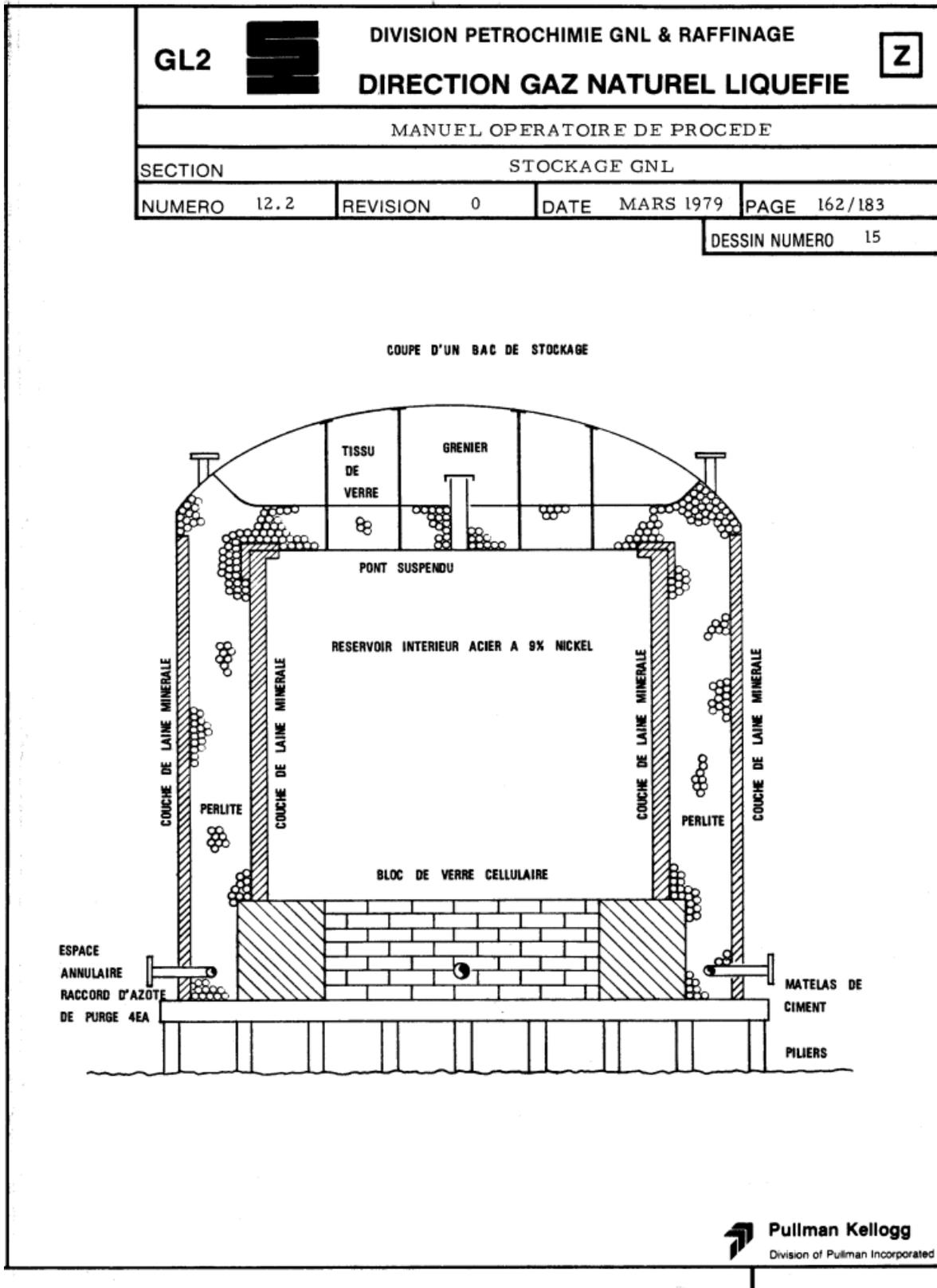
Une ligne d'interconnexion reliant GNL-I à GNL-II assure le transfert de GNL entre ces deux usines.

Utilités de base

Les utilités de base suivantes doivent être disponibles pour assurer le fonctionnement des installations de stockage :

Énergie électrique
Air-instrument
Azote
Vapeur d'eau

Les Annexes



Les Annexes

