

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Chimie.

Filière : Chimie appliquée.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Chimie.

Option : **Chimie appliquée.**

Présenté par :

-Chaib draa Nesrine

-Atsaoui Samia

THEME:

**Etude Sur la Surconsommation
De Propane dans la
Boucle de Réfrigération au train 300**

Soutenu le : 03/07/2022

Devant le jury composé de :

Président : M.C.HARRATS	Pr.	U. Mostaganem
Examineur : Mme.N.DRICI	M.C.A	U. Mostaganem
Encadreur : M.A.BELHAKEM	Pr.	U. Mostaganem
CO.ENCADREUR :Mme.N.BENAICHA	Ing.	GL2/Z

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ملخص:

لقد قمنا في هذا البحث المتواضع بدراسة حالة في مركب تمبيع الغاز الطبيعي رقم 02 بأرزيو والمتمثلة في الاستهلاك المفرط لغاز البروبان في حلقة التبريد للغاز الطبيعي والغاز المبرد المتنوع التركيب في وحدة الإنتاج رقم 300 والتي لها آثار سلبية على ثمن وتكلفة إنتاج الغاز الطبيعي المميع. في خلال دراساتنا قمنا بالبحث عن الاسباب المؤدية لهذا الإفراط في الاستهلاك والذي تجاوز الحد المسموح بنسبة 361% مما أثر سلبا على مردود الوحدة ذاتها, ومما لفت انتباهنا لأول وهلة هو إرتفاع الضغط في جهازي التكتيف 302س-أ و 302س-ب والذي هو نتاج بحد من السبام التالي -خلل في التبريد في الجهازين سالفين الذكر.

-خلل في نوعية غاز البروبان.

بعد بحث حديث وجدنا أن السبب الرئيسي لهذا المشكل هو عدم تكتيف غاز البروبان في الجهازين السالفين الذكر مما إضطرنا إلى إرسال إلي وحدة أخرى وإستهلاك غاز البروبان الموجه للبيع بإفراط وهو موضوع هذا البحث.

الكلمات المفتاحية: البروبان, الاستهلاك المفرط, وحدة التبريد بالروبان.

Résumé :

Nous avons fait une étude de cas dans le complexe GL2Z dont l'intitulé est la surconsommation du propane dans la boucle de réfrigération au propane du train 300 qu'il a des conséquences néfastes sur le prix de revient du GNL.

Durant notre étude nous avons cherché les causes susceptibles d'avoir un impact sur le dépassement de consommation du propane réfrigérant qui a excédé 361% ce qui influe sur la rentabilité du train en question, à signaler que nous avons été alerté par l'augmentation excessive de la pression au refoulement du compresseur et dans les deux condenseurs 302CA/CB CE qui est causé éventuellement par :

- Mauvaise condensation du propane réfrigérant dans les deux Condenseurs suscités.
- Contamination du propane réfrigérant par les légers.

Après avoir une investigation poussée nous avons déduit que la principale cause de ce problème réside dans la mauvaise condensation dans les deux condenseurs suscités ce qui nous a conduit à envoyer le propane non condensé vers autre unité et de consommer le propane commerciale d'où le sujet de notre étude

Mots clés: propane, surconsommation, boucle de réfrigération au propane.

Summary :

We have done a case study in the GL2Z complex whose title is the overconsumption of propane in the propane refrigeration loop of train 300 that it has harmful consequences on the cost price of LNG.

During our study we looked for the causes likely to have an impact on the excess consumption of refrigerant propane which exceeded 361% which influences on the profitability of the train in question, to point out that we were alerted by excessive pressure increase at the compressor discharge and in both 302CA/CB CE condensers which is possibly caused by:

- Bad condensation of the refrigerant propane in the two Condensers aroused.
- Contamination of refrigerant propane by light gases.

After extensive investigation we have deduced that the main cause of this problem lies in the bad condensation in the two condensers aroused this which led us to send the non-condensed propane to another unit and to consume commercial propane, hence the subject of our study.

Keywords: propane, overconsumption, propane refrigeration loop.

REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pas abouti sans la bénédiction du Bon Dieu, Qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail et Qui a entendu nos prières.

Nous, CHAIB DRAA NESRINE et ATSAOUI SAMIA , nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de manière directe ou indirecte à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions également et profondément notre encadreur Mr. BELHAKEM AHMED qui n'a jamais cessé de nous conseiller, orienter et nous encourager. Merci pour sa disponibilité et sa coopération remarquable.

Nous tenons à remercier le personnel du complexe G12Z particulièrement Mr BOUTEFAHA MOHAMED, Mr LAIDAT ABDELMADJID, Melle BENAICHA NADJET , tant pour leurs encouragements que pour l'aide qu'ils nous ont apporté de leurs critiques et de leurs suggestions à propos de notre travail.

Nous adressons nos remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Nos vifs remerciements au membre de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A celle qui a le paradis sous ses pieds mère

A très cher père

A Mes sœurs et mes frères

*A tout Mes familles : **chaib draa** et **atsaoui***

*Aux meilleurs personne de **GL2/Z***

A tous ceux qui me sont très chers et qui m'ont apporté une aide précieuse que je ne saurais jamais oublier.

Sommaire

Introduction générale	01
CHAPITRE I : Technologie de liquéfaction de GN.....	04
Introduction.....	04
I.1.Mission de l’usine.....	04
I.2.Description générale du complexe.....	04
Capacité Contractuelle Installée de production.....	05
I.3.Présentation technique du complexe.....	05
I.3.1.a- Zone Utilités.....	05
I.3.2-Energie électrique.....	05
I.3.3-Vapeur.....	05
I.3.4. Eau dessalée.....	05
I.3.5.Air.....	06
I.3.6.Eau de refroidissement.....	06
I.3.2.b. Zone de process.....	06
I.3.2.1.Section traitement.....	06
Démercurisation	06
Décarbonatation	07
Déshydratation	07
Adsorption de l’eau	08
Régénération des sécheurs	08
séparation	09
Liquéfaction	09
Le système de propane réfrigérant	09
.Pourquoi liquéfier le gaz naturel ?.....	10
Le système de réfrigérant mixte (MCR)	11
Fractionnement	12
Séparation de l’Ethane	12
Séparation du propane	12
Séparation du butane et gazoline	12
I.3.3. Zone terminal	12
1-Stockage et chargement du GNL/gazoline	12
2-Installations d’expédition et de chargement	12
CHAPITRE II :La boucle propane.....	15
II.1.Introduction	15

.Propriete chimique et physique du propane	15
II.2.Rôle de la boucle	15
II.3.Description	15
II.3.1 Réfrigération propane 1er niveau	
II.3.2Réfrigération propane 2ème niveau	16
II.3.3Réfrigération propane 3ème_niveau.....	16
II.3.4Réfrigération propane 4ème niveau	16
II.4Rôle des équipements.....	17
II.5Rôle des principales lignes	20
Les lignes de drainage.....	21
Les lignes d'équilibrage.....	21
Ligne de Pr dégivrage.....	21
Ligne de trempe.....	21
Ligne des incondensables.....	21
Piège de fond du X01F.....	21
II.6 Paramètres de fonctionnement.....	22
II.6.1Pression	22
II.6.2 niveau	23
II.6.3Débit	23
II.6.4Température	23
II.8 Chargement de la boucle de réfrigération au propane	24
Problématique	26
-Contamination du propane réfrigérant	27
Vérification de la 1 ère hypothèse.....	28
Interprétation des résultats	29
1- Contamination par les légers	29
2- Contamination par les lourds	29
Mauvaise condensation du propane réfrigérant	30
Niveau du propane.....	30
Perte de charge.....	30
Interprétation des résultats des prises de pression	31
CHAPITRE III : Pertes de propane réfrigérant.....	34
1-Introduction	34
2-Perte de gaz d'étanchéité	34
3-Vérification des circuits connectés à la boucle de réfrigération	34
3-1.Les soupapes de sureté et les vannes de dépressurisation	35
3-2 . Vérification des soupapes de sureté et les vanne.....	35
dépressurisation	35
a- Collecteur de torche chaude.....	35
b- Collecteur de torche froide.....	36
3-4. Appoint en propane vers la boucle MCR	37
Observation.....	38
3-5. Circuit de gaz dégivrage.....	38
Constatations.....	39
3-6.Réchauffeur des gaz procède.....	39
Interprétation des résultats.....	40
4-Purge des contaminants.....	40
4-1.Les impuretés légères.....	40
-Interprétation.....	42
4-2. Les impuretés lourdes.....	43
Interprétation des résultats.....	44
Conclusion générale.....	46
Recommandation.....	47
Bibliographique.....	48

Liste de figure :

- Figure 01. Schéma processus de démercurisation du GN.
- Figure 02. Schéma de la décarbonatation du gaz na
- Figure 03.Schéma de la section de la déshydratation du GN.
- Figure 04. Chaîne de transport du gaz naturel liquéfié.
- Figure 05. Schéma de procédé de liquéfaction
- Figure 06.Schéma de Liquéfaction et MCR.
- Figure II.1 – Schéma simplifié de la boucle propane.
- Figure 1 – La teneur en méthane dans le propane d’appoint et le propane réfrigérant.
- figure.2 – La teneur en éthane dans le propane d’appoint et le propane réfrigérant.
- Figure.3 – La teneur en butane dans le propane d’appoint et le propane réfrigérant
- Figure 4– Fuite interne de la FV416.
- Figure .5 – Appoint d’un produit non conforme via la FV416
- Figure.1 – Schéma de l’appoint en propane vers la boucle MCR.
- Figure .2 – Schéma du circuit de dégivrage de la boucle propane.
- Figure .3 – Schéma du réchauffeur F.G 357 CA/CB.
- Figure .4 – Evolution du niveau dans l’accumulateur 301 F lors de l’appoint
- Figure .5 – Abaissement de niveau après cessation d’appoint.
- Figure .6 – Appoint en propane réfrigérant avec la FV 416
- Figure.7 – Appoint en propane réfrigérant avec la FV 416.

Liste de tableaux :

- Tableau I.1.composition du MCR.
- Table I.1 – Paramètres de marche du principal équipement de la boucle propane
- Table 2– Analyse des échantillons prélevés dans la boucle de propane
- Table 3 – les pressions aux différents points des condenseurs 302 CA/CB.
- Table 4 – Distribution d'eau de mer dans un train de liquéfaction
- Table1– Groupe des équipements de sécurité de la boucle propane.
- Table .2 – Vérification du circuit torche chaude de la boucle propane.
- Table .3 – Vérification du circuit torche froide de la boucle propane
- Table .4 – Vérification du circuit CLD de la boucle propane
- Table .5 – Résultats d'analyse de F.G à l'entrée et à la sortie de 357 CA/CB
- Table .6 – Composition du gaz purgé au niveau de la XV 706.
- Table .7 – Analyse des échantillons à l'entrée du 315C.
- Table 8: Suivi de l'évolution de niveau de l'accumulateur 301F lors des derniers jours de l'étude (du 06-Mars au 22-Mars-2017)

Liste des abréviations :

APCI : Air Products and Chemical Incorporation

MCR : Multi-Composant Réfrigérant

GN : Gaz Naturel

X : Numéro du train varie de 1 à 6

P : Pression effective Barg

T:Température °C

C:échangeur

F: Ballon

E : Colonne

J : Machine tournante

LV : Level valve, vanne régulatrice de niveau

PV : Pressure valve, vanne régulatrice de pression

FV : Flow valve, vanne régulatrice de débit

HV : Hand valve, vanne commandée manuellement

XV : Vanne non classée.

MEA : mono-éthanol amine

Introduction générale :

Depuis les années soixante du siècle dernier, l'industrie gazière a affirmé son rôle majeur comme source énergétique à l'échelle mondiale, avec le déclin progressif des réserves de gaz naturel dans les pays OCDE ¹, le GNL semble devenir un vecteur essentiel de la promotion de cette industrie dans le monde, et son avantage d'écoulement de la flexibilité qu'il procure et qui permet aux utilisateurs l'accès à des sources lointaines par des voies libres et diverses, sans risque géopolitique, ajouté à cela une demande croissante en énergie respectueuse de l'environnement, à noter aussi les progrès technologiques nombreux et essentiels qui ont élargi de façon spectaculaire les possibilités de transport de cette énergie.

En effet, Le développement du commerce du GNL s'est accru grâce à l'augmentation de la consommation du gaz naturel dans le monde, et aux distances sans cesse croissantes entre régions productrices et consommatrices. Les gisements découverts dans des zones plus éloignées en Afrique, en Asie du Sud Est, au Moyen Orient, ont nécessité la mise en œuvre d'une technologie spécifique ; la liquéfaction du gaz pour l'acheminement de cette énergie vers les gros consommateurs.

Les systèmes frigorifiques jouent un rôle primordial et incontournable dans toute technologie de liquéfaction du gaz naturel.

La boucle de réfrigération au propane est utilisée dans les procédés de liquéfaction du gaz naturel comme une partie d'un cycle de réfrigération en cascade. L'objectif visé est d'éliminer la chaleur d'un cycle de réfrigérant multi composants, qu'est le MCR (Multi Composant Réfrigérant), et après-refroidir le Gaz Naturel, pour pouvoir séparerai sement ses constituants lourds et prévenir tout bouchage possible en aval du procédé de liquéfaction.

Vu l'importance de la boucle de réfrigération au propane, une étude a été étudiée et élaborée au niveau du complexe GL2/Z sur la surconsommation du propane au niveau du train 300, ce travail a pour objectif l'identification des causes perturbatrices et la recommandation des solutions adéquates.

1. Organisation de Coopération et de Développement Economiques

PARTIE I

CHAPITRE I

Chapitre I

Technologie de liquéfaction de GN

Introduction :

La liquéfaction du gaz naturel a pour objectif de réduire son volume (d'un facteur 600) pour pouvoir le transporter par bateau sur de très grandes distances (lorsque le transport par gazoduc n'est pas économique) et pour permettre de s'affranchir des contraintes géostratégiques et de ne pas dépendre d'un fournisseur unique.

La liquéfaction est également employée, en plus petite capacité, pour faire face aux variations saisonnières de consommation, en stockant une partie du gaz sous forme liquide en période de plus faible consommation, pour le vaporiser lorsque la demande est forte.

I.1.Mission de l'usine :

Le complexe **GL2/Z** a pour mission de liquéfier le gaz naturel provenant des champs gaziers de Hessi R'mel, avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gazoline. Le **GNL (Gaz Naturel Liquéfié)** est pompé et chargé dans des méthaniers spécialement conçus pour le transport cryogénique pour être expédié vers l'étranger.

I.2.Description générale du complexe

Le complexe de liquéfaction **GL2/Z** est implanté entre **GL1/Z** et **GL3/Z**. Il est situé sur la côte ouest du littoral algérien à **8 Km** au sud de la ville d'Arzew et à **2 Km** au nord de la ville de Bethioua. Il est présenté comme suit :

Procédé	: APCI (MCR).
Début de la production	: Le 20 février 1978.
Capacité de traitement	: 10,5 Milliard de Nm ³ de GN/An.
Capacité de Production	: 17,5 Millions de m ³ de GNL/An.
Superficie du complexe	: 72 hectares.
Nombre de trains	: Six trains en parallèle.
Capacité de stockage	: 3 bacs d'une capacité unitaire de 100.000m ³ de GNL.

2 bacs de gazoline : 14 000 m³ chacun.

Rénovation : 1993-1996.

Capacité Contractuelle Installée de production :

- GNL : 17,8 Millions m³ / an
- Propane : 410 000 Tonnes / an
- Butane : 327 000 Tonnes / an
- Gazoline : 196 000 Tonnes

I.3.Présentation technique du complexe :

Le complexe GL2/Z est divisé en trois zones :

- Zone utilités.
- Zone process.
- Zone stockage et chargement.

I.3.1- Zone Utilités :

Cette zone est essentiellement autonome et assure la fourniture de toutes les utilités pendant le démarrage et la mise en marche des six trains de liquéfaction, et de toutes les installations de production.

Elle consiste principalement à la production et la fourniture de ce qui suit :

I.3.2-Energie électrique :

Elle est fournie en grande partie par trois (03) turbo- générateurs d'une capacité de 20 MW chacun et un réseau Sonelgaz de 20 MW, soit un total de 80 MW.

I.3.3-Vapeur :

Elle est fournie par un ensemble de chaudières de différents tonnages réparties comme suit:

- 03 chaudières HP (Haute Pression) de 90 T /H chacune au niveau des utilités
- 01 chaudière BP (Basse Pression) de 58 T/H au niveau des utilités
- 09 chaudières HP de 136 T/H
- 06 chaudières HP de 400 T/H chacune au niveau de la zone de procédé.

I.4.1. Eau dessalée :

Elle est fournie par (05) unités de dessalement produisant chacune 45 T/H et utilisée comme eau d'appoint pour les chaudières.

I.4.2. Air :

Il est fourni par (04) compresseurs d'air permettant la production de l'air instrument servant pour toutes les installations de productions et de l'air service pour les autres besoins du complexe.

I.4.3. Eau de refroidissement:

Elle est fournie par (06) pompes d'eau de mer d'une capacité de 37 000 m³/h chacune.

I.3.2. Zone de process :

Cette zone assure le traitement et la liquéfaction du gaz ; elle se compose de :

- ❖ Section traitement.
- ❖ Section séparation.
- ❖ Section fractionnement.
- ❖ Section liquéfaction.

I.3.2.1. Section traitement :

Démercurisation :

Qui consiste à éliminer le mercure se trouvant dans le GN responsable de la corrosion des échangeurs cryogéniques. Elle est réalisée par adsorption moléculaire. Un lit de tamis moléculaire recouvert de sulfate de cuivre (CuSO₄) est contenu dans le ballon démercuriseur 142 D.

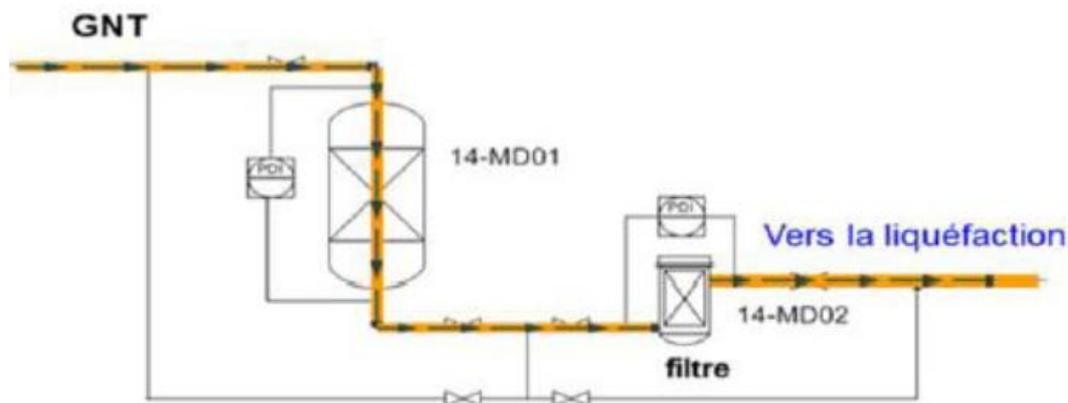


Figure 01. Schéma processus de démercurisation du GN.

Décarbonatation :

Le gaz carbonique (CO₂) est extrait du gaz naturel par lavage de celui-ci à contrecourant dans une colonne par une solution aqueuse à 15% massique de mono-éthanol amine (MEA) $H_2+H_2O+CO_2\leftrightarrow [C_2H_5ONH_3]-HCO_3$

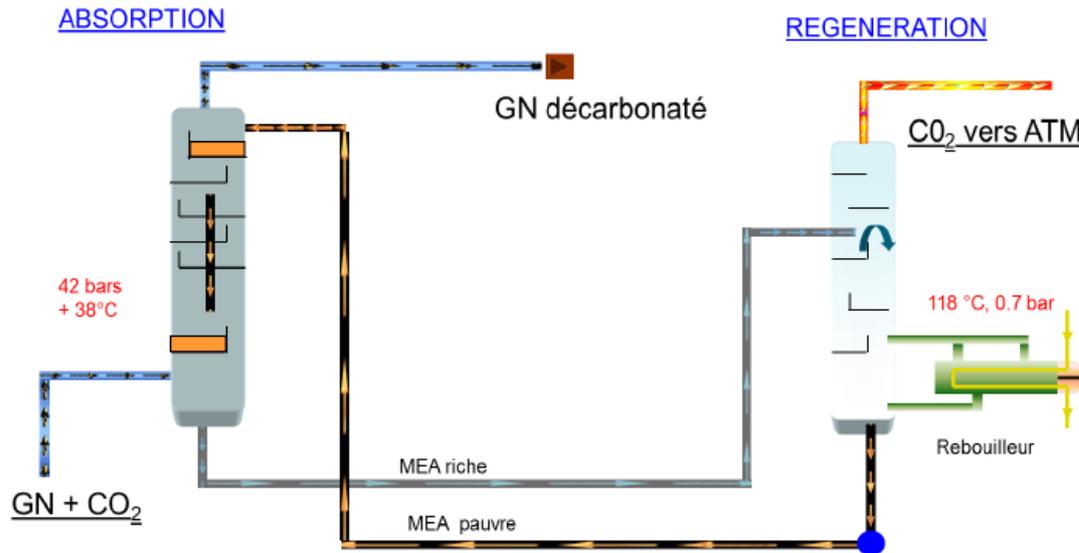


Figure 02. Schéma de la décarbonatation du gaz naturel.

Déshydratation :

Elle consiste à éliminer l'eau se trouvant dans le GN responsable de bouchage et de formation d'hydrates au niveau des vannes et tuyauteries dans la partie froide de l'usine.

En sortant de l'absorbeur, le GN se trouve saturé en eau et doit subir une déshydratation pour réduire sa teneur en humidité inférieure à 1 ppm .Pour ce faire, il entre dans un échangeur à propane X41C et il sort à une température d'environ 21°C pour condenser le maximum d'humidité.

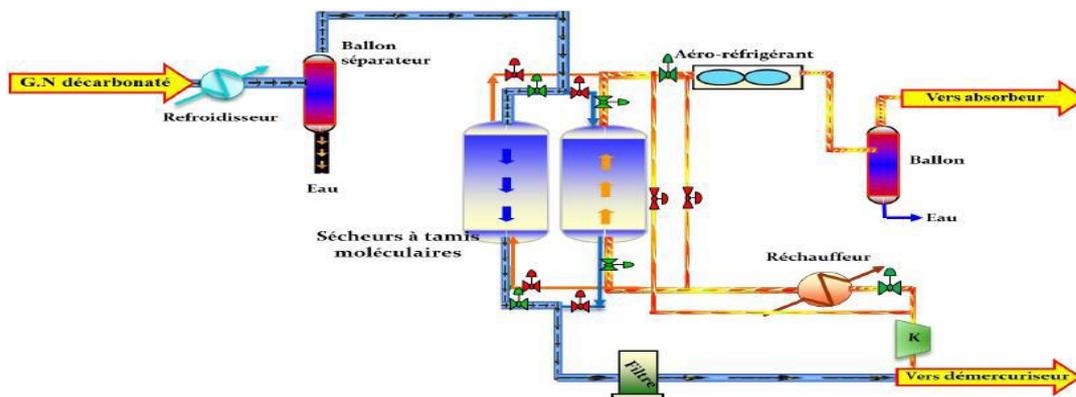


Figure 03. Schéma de la section de la déshydratation du GN.

.Adsorption de l'eau :

Le GN entre par le haut dans les sècheurs à gaz X41DA/DB/DC (deux en service et le troisième étant en régénération) et descend le long de ces sècheurs à travers des lits d'alumine et des tamis moléculaires superposés qui fixent les molécules d'eau par adsorption.

A la sortie, le GN passe dans un filtre X41LA/LB/LC (un filtre par sécheur) pour retenir les poussières entraînées et passe vers la section suivante du processus de liquéfaction.

• Régénération des sècheurs :

A tour de rôle et après un temps de service de 16 heures, chaque sécheur subit une régénération pour éliminer l'eau par désorption suivant un cycle de 08 heures. Ce cycle comprend trois phases :

Régénération chaude, régénération froide et attente.

✓ Régénération chaude (03h30)

Une proportion d'environ 10 % du GNT (Gaz Naturel Traité) prélevée en aval des sècheurs en service, est chauffée à 288°C dans un échangeur thermique X44C par le GNT de régénération quittant le sécheur en régénération chaude puis dans deux échangeurs X42C1/C2 par de la vapeur 62 bars. Ensuite, ce GNT chauffé entre dans le sécheur par le bas et entraîne l'humidité dans son mouvement ascendant. Il passe dans l'échangeur X44C pour être refroidi puis dans un aéroréfrigérant X43C pour condenser cette humidité qui sera éliminée dans un ballon de séparation X42F.

Le GN sortant, sera aspiré par un Moto-Compresseur de régénération X41J et refoulé à l'entrée de l'échangeur à propane X41C au début de la déshydratation.

✓ Régénération froide (02h30)

Durant cette phase, le GNT empreinte le même circuit de régénération, sauf que les échangeurs X44C et X42C1/C2 sont by-passés (coté calandre) et refroidit graduellement le sécheur ainsi que l'échangeur X44C.

✓ Attente (02h00)

Le sécheur ainsi régénéré reste isolé du circuit en attendant l'entrée du sécheur suivant en phase de régénération.

.séparation :

Le mélange condensats lourds/gaz venant des pré-refroidisseurs au propane, passe dans un échangeur d'alimentation où par échange avec les vapeurs de tête de la colonne de séparation appelée tour de lavage est refroidi à -47°C à 39 bars. Ce mélange est injecté au niveau du 10^{ème} plateau de la tour de lavage, les produits lourds seront séparés par distillation.

Le liquide de fond est envoyé vers le fractionnement. Les vapeurs de tête se réchaufferont, dans l'échangeur d'alimentation et passent dans le faisceau chaud de l'échangeur principal qui constitue « le condenseur de tête » de la tour de lavage. Elles seront refroidies et condensées partiellement par le MCR. Sa partie liquide riche en méthane est recueillie dans le ballon de reflux, sera acheminée vers le faisceau central de l'échangeur principal pour être liquéfiée.

Liquéfaction :

La liquéfaction d'un gaz n'est possible que si le gaz est refroidi à une température inférieure à son point de rosée, cette température est fonction de la pression.

- **Le système de propane réfrigérant :**

Le circuit propane, qui assure la réfrigération des divers fluides du procédé, est une boucle fermée à quatre niveaux de pression et de température.

Le propane gazeux à 1,31 bars absolu et -35°C est comprimé par un compresseur à quatre étages d'aspiration. Le cycle comprend quatre niveaux de détente produisant un fluide frigorigène à quatre niveaux de température et de pression :

1. **5,19bars à $3, 2^{\circ}\text{C}$.**
2. **3,25bars à $-11,7^{\circ}\text{C}$.**
3. **2,27bars à -22°C .**
4. **1,31bars à -35°C .**

L'appoint en propane du système est assuré par le propane soutiré du dépropaniseur.

.Pourquoi liquéfier le gaz naturel ?

Le Gaz Naturel Liquéfié étant avant tout du gaz naturel sous une autre forme physique, il est impossible d'en parler sans se référer à l'industrie gazière dans son ensemble, qu'il s'agisse des aspects techniques ou commerciaux. C'est pourquoi avant de présenter quelques considérations sur les marchés du Gaz Naturel Liquéfié puis sur les spécificités techniques de son exploitation, il est utile de préciser les raisons pour lesquelles l'industrie gazière a eu recours à cette transformation physique du gaz naturel pour satisfaire la demande des consommateurs. Les initiales GNL, pour Gaz Naturel Liquéfié, désignent plus précisément le gaz naturel rendu liquide à -162°C environ aux alentours de la pression atmosphérique. Sa masse volumique est alors environ 600 fois supérieure à celle du même produit à l'état gazeux

Cette transformation ouvre la possibilité de transporter et/ou de stocker d'importantes quantités d'énergies dans des volumes réduits. La réduction de volume apportée par le GNL est enfin (et surtout) utilisée pour transporter l'énergie en liquéfiant le gaz naturel à proximité de la source, en transportant le produit ainsi obtenu par voie maritime jusqu'à un terminal situé près de zones de consommation dans lesquels le GNL est regazéifié et injecté dans le réseau de gaz naturel. L'ensemble constitué de l'usine de liquéfaction, de navires méthaniers, et d'un terminal de regazéification porte le nom de chaîne de GNL

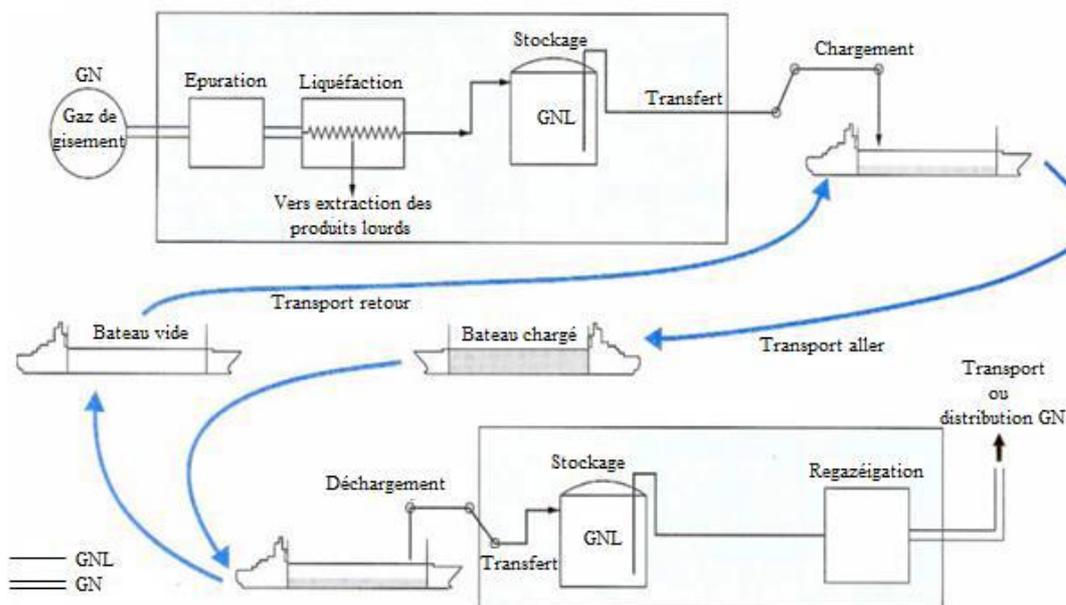


Figure 04. Chaîne de transport du gaz naturel liquéfié.

. Procédé général de liquéfaction du gaz naturel :

Le principe de la liquéfaction de gaz naturel consiste à abaisser son enthalpie par réfrigération jusqu'à une température de stockage de -162°C .

Afin de mieux discerner la diversité des besoins, il suffit d'énumérer les différentes opérations sur le GNL depuis sa production jusqu'à sa regazéification. Les principales étapes sont :

- liquéfaction.
- stockage transfert.
- transport.
- déchargement stockage.
- ajustement éventuel.
- regazéification.

Toutes ces opérations s'effectuent à des niveaux de pression et de température très différents et sont généralement le siège d'une formation de deux phases l'une liquide, l'autre gazeuse dont les compositions et les importances respectives varient selon leur nature.

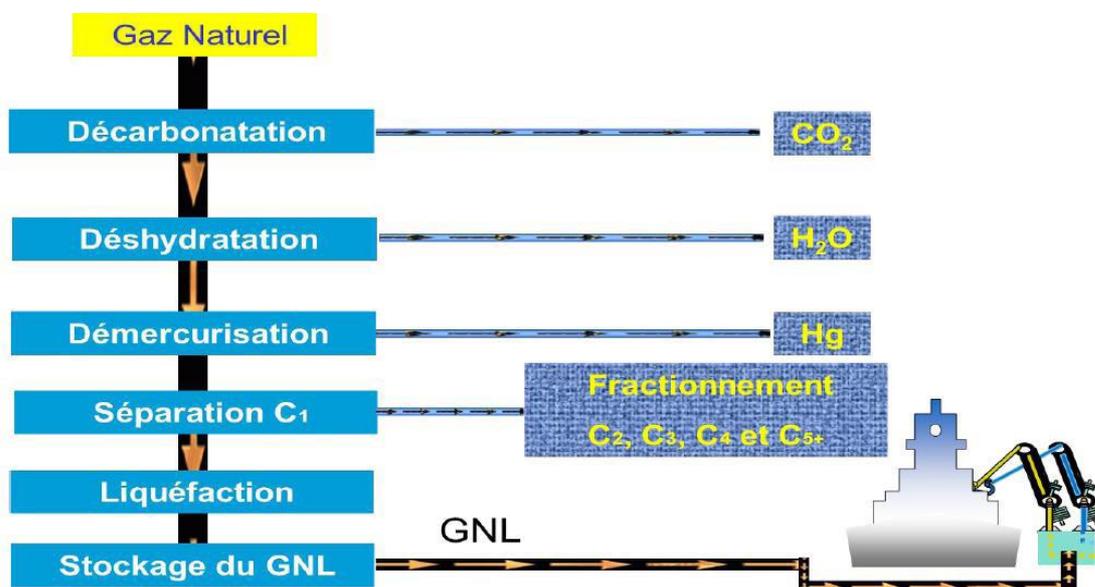


Figure 05. Schéma de procédé de liquéfaction

- **Le système de réfrigérant mixte (MCR) :**

Le réfrigérant mixte ou MCR est un mélange d'azote de méthane, éthane et de propane. Ce mélange frigorigène circule dans une boucle fermée.

Tableau I.1 : Composition du MCR :

	Composition			
	Azote	Méthane	Ethane	Propane
% mole	3,2	40,2	54,4	2,2

Ce mélange sert à liquéfier le gaz naturel traité dans le faisceau central froid de l'échangeur principal et à condenser les vapeurs de tête de la tour de lavage dans le faisceau chaud.

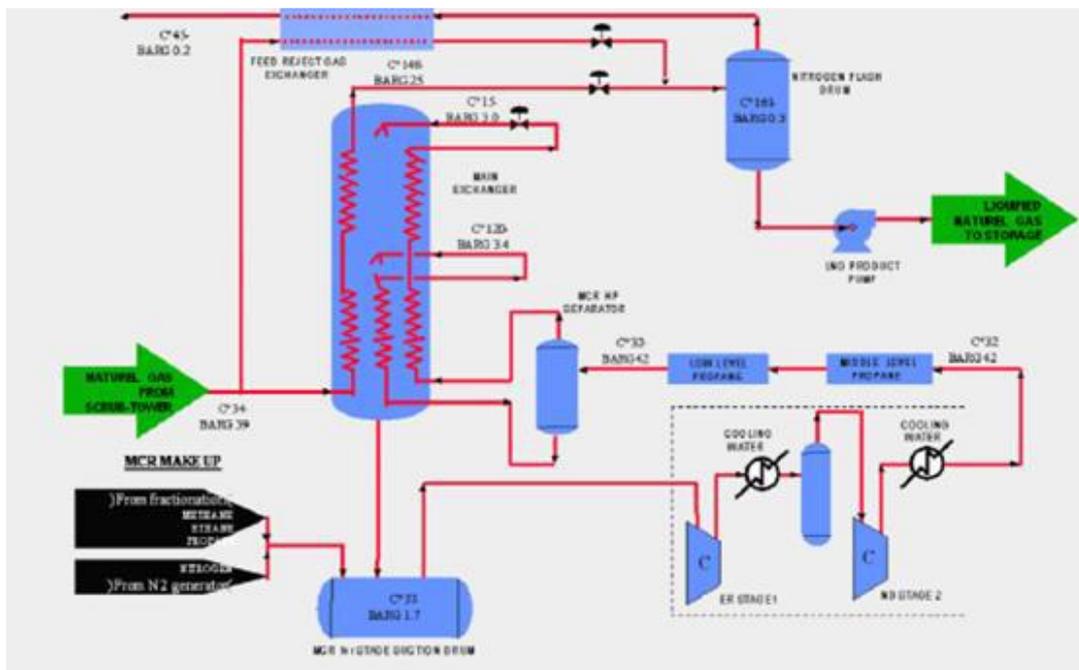


Figure 06.Schéma de Liquéfaction et MCR.

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 l'éthane, le propane, le butane et la gazoline.

-Séparation de l'Ethane :

Cette séparation s'effectue dans une colonne de distillation X51E (dééthaniseur).

-Séparation du propane :

Cette séparation s'effectue dans une colonne de distillation X52E (dépropaniseur).

-Séparation du butane et gazoline :

Cette séparation s'effectue aussi dans une colonne de distillation X53E (débutaniseur).

I.3.3. Zone terminal :

1-Stockage et chargement du GNL/gazoline :

Le GNL est stocké à -162°C dans trois bacs d'une capacité unitaire de $100\,000\text{ m}^3$ chacun. Le chargement du produit est assuré au niveau de deux quais de chargement pouvant recevoir des méthaniers d'une capacité de $40\,000$ à $145\,000\text{ m}^3$ GNL.

Le stockage de la gazoline produite est assuré par deux bacs de 14500 m^3 chacun.

2-Installations d'expédition et de chargement :

Elles sont composées de :

1. Cinq pompes de chargement d'une capacité unitaire de $2500\text{ m}^3/\text{h}$.
2. Une pompe de transfert d'une capacité de $2500\text{ m}^3/\text{h}$.
3. Deux pompes de refroidissement d'une capacité unitaire de $60\text{ m}^3/\text{h}$.
4. Deux quais de chargement composés chacun de cinq bras de chargement dont un est destiné au retour de la vapeur en provenance des navires. Chacun des deux quais est conçu pour réceptionner des méthaniers d'une capacité située entre 50.000 et 130.000 m^3 de GNL.

La production de Propane (410.000 tonnes/an) et de Butane (327.000 tonnes/an) est acheminée par canalisation vers le complexe GP1Z.

Pour des raisons de flexibilité maximale, les installations de productions, de stockage et de chargement de GNL des complexes GL1Z et GL2/Z sont interconnectées.

PARTIE II

CHAPITRE II

Chapitre II

La boucle propane

II.1.Introduction :

La boucle de réfrigération au propane est utilisée dans les procédés de liquéfaction du gaz naturel comme une partie d'un cycle de réfrigération en cascade visant à éliminer la chaleur d'un cycle de Réfrigérant multi composant qu'est le MCR, et à pré-refroidir le gaz naturel avant l'étape de la Liquéfaction.

Les propriétés physiques et chimiques du propane :

Propane, la formule chimique est $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$, et le poids moléculaire est de 44,10. C'est un gaz incolore et liquéfiable. Légèrement soluble dans l'eau, soluble dans l'éthanol et l'éther. Après mélange avec l'air, il forme un mélange explosif. Existe en gaz naturel et gaz de pyrolyse de pétrole. Les propriétés chimiques sont stables et les réactions chimiques ne se produisent pas facilement. Utilisé comme réfrigérant, carburant pour moteur à combustion interne ou matière première de synthèse organique

Propriétés physiques

La formule moléculaire du propane est C_3H_8 et le poids moléculaire est de 44,10. Le propane est un gaz incolore et inodore. Le point de fusion est de -187.6 , le point d'ébullition est de -42.1°C , légèrement soluble dans l'eau, soluble dans l'éthanol et l'éther.

Nature chimique

Il est facile de former un hydrate solide avec de l'eau à basse température, provoquant le blocage du gazoduc. Le propane réagit avec un excès de chlore à une température plus élevée pour générer du tétrachlorure de carbone et du tétrachloroéthylène $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$; réagit avec l'acide nitrique en phase gazeuse pour générer du 1-nitropropane $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NO}_2$, 2-nitropropane $(\text{CH}_3)_2\text{CHNO}_2$, nitro Mélange d'éthane $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NO}_2$ et de nitrométhane CH_3NO_2

II.2.Rôle de la boucle :

Le système propane est une boucle de réfrigération à 04 niveaux de pressions et de températures qui permet une approche précise de la température du gaz d'alimentation et du MCR, d'où son écart dans les procédés de liquéfaction. La puissance frigorifique de cette

boucle est utilisée à 75% dans les cuillers MCR, à 15% dans les cuillers GN et à 10% pour les diverses utilisations.

II.3.Description :

La boucle de réfrigération au propane se compose de 04 niveaux de pressions et de températures. Les vapeurs de propane, après compression dans le compresseur X01J sont d'esurchauffées et condensées dans les refroidisseurs X02 CA et CB à contre-courant par l'eau de mer (voir schéma 1).

Le propane sera dirige ensuite vers l'accumulateur X01F qui alimentera les circuits et les équipements suivants : X41C, X02F, X03C, X12C, X60C et X57 CA/CB.

Les vapeurs de propane, générées dans les échangeurs cités, retourneront vers le X01J en passant par les ballons d'aspiration, seront comprimées et le cycle se renouvellera.

II.3.1 Réfrigération propane 1er niveau :

Une partie du propane liquide du X01F est envoyée directement dans le ballon d'aspiration X02F par la LV 303 après détente. Le propane liquide du X01 F alimente également les échangeurs ci-dessous, et les vapeurs régénérés seront dirigées au ballon d'aspiration X02F.

- Refroidisseur de gaz d'alimentation X41 C
- Refroidisseur du gaz d'alimentation X03 C : Il refroidit le GN jusqu'à +9°C
- Refroidisseur du réfrigérant mixte où MCR X12C : Il refroidit le MCR à +9°C
- Sous refroidisseur butane X60 C
- Réchauffeurs de gaz combustible X57 CA/CB

II.3.2 Réfrigération propane 2ème niveau :

Une partie du propane liquide venant du X02 F passe après détente par la LV 305 dans le ballon X03 F (3,25 bar-g ; -10°C). Ce ballon (X02 F) alimente les équipements ci-dessous :

- Refroidisseur de gaz d'alimentation X04 C : Il permet de refroidir le GN à - 5.6°C
- Refroidisseur de MCR X13 C : Il refroidit le réfrigérant mixte également à - 5.6°C

II.3.3 Réfrigération propane 3ème niveau :

Le propane liquide venant du X03F passe après détente par la LV 307 dans le ballon X04F (2,27 bar-g ; -22 °C). Ce ballon (X03 F) alimente les équipements ci-dessous :

- Refroidisseur de gaz d'alimentation X05C : Il refroidit le GN jusqu'à -16.1°C
- Refroidisseur de MCR X14 C : Il refroidit le MCR jusqu'à -16.1°C
- Condenseur de tête X51 C du déthaniser
- Sous refroidisseur de butane X60 C.

Les vapeurs produites dans ces échangeurs sont collectées dans le ballon X04F et Envoyées vers le 2`eme étage du compresseur X01J.

II.3.4 Réfrigération propane 4ème niveau :

Le propane liquide venant du ballon X04F passe après détente par la LV 309 dans le ballon X05F (1,31 bar ; - 35°C). Ce ballon (X04 F) alimente les équipements ci-dessous :

- Refroidisseur de gaz d'alimentation X06C : Il refroidit le GN jusqu'à -30.6°C
- Refroidisseur de MCR X15 C : Il refroidit le MCR jusqu'à -30.6°C
- Refroidisseur de tête X51 C
- Sous refroidisseur de butane X60 C

Les vapeurs venant de ces échangeurs seront collectées dans le ballon X05 F et seront aspirées par le X01J.

II.4Rôle des équipements :

X01 J

C'est un compresseur multicellulaire (cinq étages) à multi étage d'aspiration, soit dans notre cas quatre étages, son rôle primordial consiste à faire passer le propane d'une pression inférieure à une pression supérieure en vue d'assurer sa circulation dans la boucle et de maintenir la détente dans les différents étages.

X02CA/CB

Ces échangeurs permettent d'éliminer la chaleur de compression en faisant condenser le propane et maintiennent en permanence un niveau de propane pour éviter le passage des vapeurs de propane vers l'accumulateur X01F. Pour une efficacité maximale, le niveau doit être maintenu au plus bas dans les X02CA/CB.

X01 F

C'est un ballon accumulateur qui sert à stocker le propane liquide. Il constitue une réserve pour la boucle et il alimente certains échangeurs.

X41C

C'est un refroidisseur de gaz d'alimentation qui permet de refroidir le GN à la sortie du X31E pour éliminer une partie de l'humidité contenue dans le GN. La pression propane dans cet échangeur est contrôlée par le PIC 210 de façon à avoir une température de GN comprise entre 18 et 24°C et ce afin d'éviter la formation d'hydrates et l'évaporation de l'eau dans le GN.

X03 à X06C

Ces refroidisseurs de gaz d'alimentation permettent de pré-refroidir le GN.

X12 à X15C

Ces refroidisseurs permettent de refroidir le MCR.

X51 C

C'est un échangeur à plaque qui sert à condenser les vapeurs de tête du déthaniser (151E).

X57 CA/CB

Ce sont des échangeurs tubulaires installés en s'écrie qui servent à d'échauffer les gaz combustibles (vapeurs issues du fractionnement et de la liquéfaction) jusqu'à la température ambiante.

X60 C

C'est un échangeur à plaques qui sert à sous-refroidie le butane produit et refroidir l'éthane de réinjection et le propane commercial.

X02 à X05 F

Ces ballons d'aspiration permettent la séparation du propane pour protéger le compresseur pour ne pas avoir des gouttelettes à l'aspiration. Ils refroidissent les vapeurs de propane quand le compresseur est en recyclage et assurent aussi une réserve de C3 liquide pour l'alimentation des refroidisseurs et des circuits annexes.

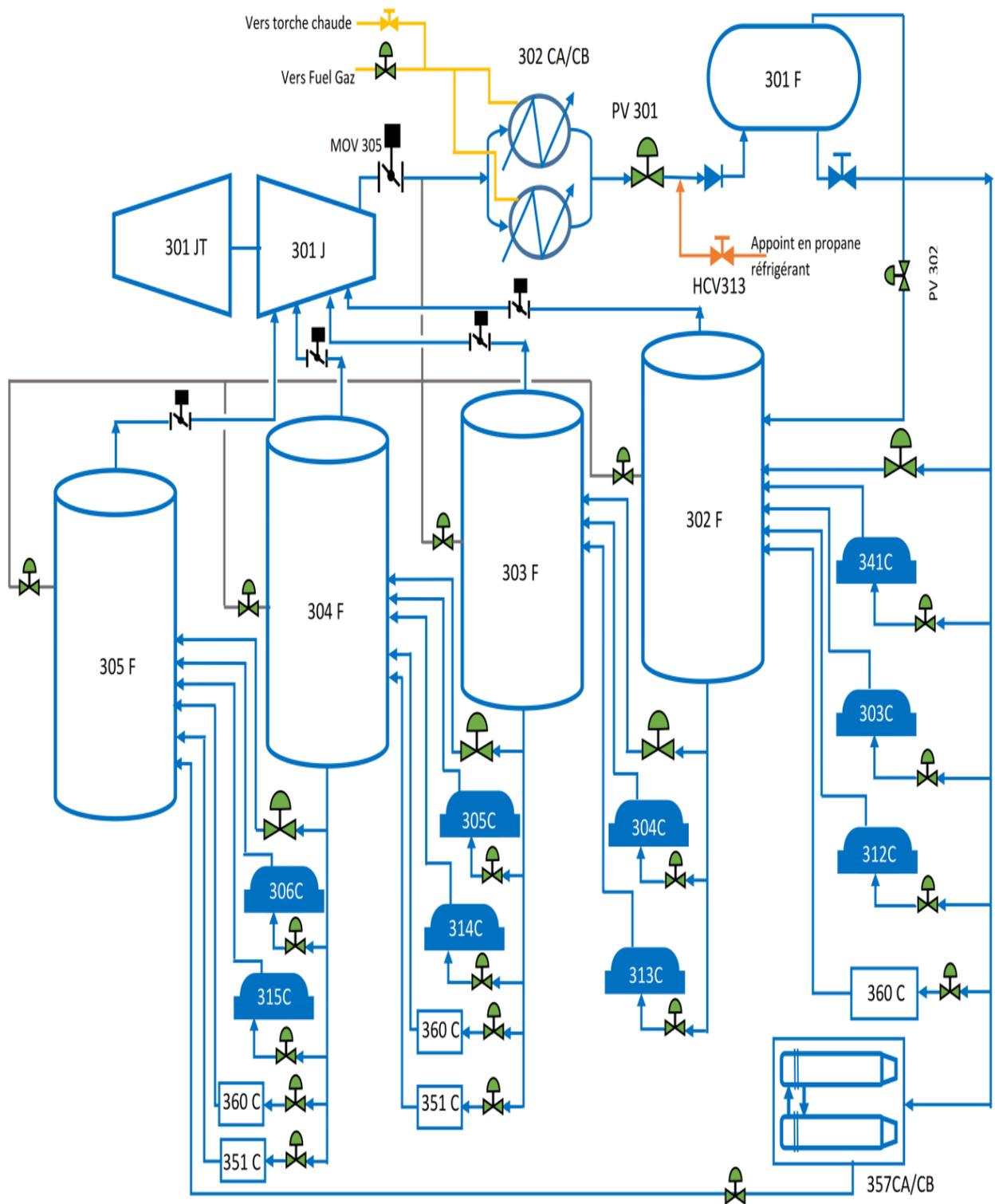


Figure II.1 – Schéma simplifié de la boucle propane.

II.5 Rôle des principales lignes :

Les lignes de drainage

Parmi les exigences irrévocables dans la conception d'un compresseur c'est d'avoir une charge à l'aspiration dont la phase est complètement gaz, la présence des gouttelettes provoque le déclenchement d'une machine par vibration, un système de protection est prévu pour éviter qu'un tel phénomène se surise, c'est la configuration d'un Switch de haut niveau dans son logique de déclenchement. Vu que les lignes de recyclage sont en contact direct avec le ballon d'aspiration du compresseur en s'injectant le gaz de refoulement dans un liquide tampon pour compenser le débit manquant, un système d'anti-pompage est prévu pour commander les vannes de recyclage en l'occurrence FV303/304/305/306. Il s'est arrivé que ces vannes soient maintenues fermées un bon moment provoquant

En conséquence la condensation du propane emprisonné, c'est le phénomène du pont thermique, en ce moment lorsque la vanne de recyclage est appelée à ouvrir le propane condensé est ajouté avec le niveau du ballon induisant en conséquence le haut niveau voire très haut provoquant le déclenchement du compresseur. Des lignes, dites lignes de drainage, sont prévues pour véhiculer un débit faible à partir du point le plus bas des vannes de recyclage via des orifices de restriction vers le ballon 302F, pour éviter la condensation du propane.

Les lignes d'équilibrage

Ces lignes servent à éviter que le propane ne soit dirigé du ballon d'aspiration vers la ligne de recyclage dans certaines phases de démarrage ou d'arrêt.

Ligne de Pr dégivrage

Les refroidisseurs GN et MCR étant le point bas de la boucle propane ; cette ligne permet d'apporter une aide lors du dégivrage (101 J en service). En phase de démarrage, elle peut être utilisée pour évaporer le propane dans les refroidisseurs et faciliter de cette manière la mise en régime de la boucle de réfrigération.

Ligne de trempe

Pendant le démarrage, elle permet de refroidir les vapeurs de recyclage et de réaliser le niveau dans les ballons.

Ligne des incondensables

Situées en tête des X02 CA/CB et du X01F, elles permettent d'évacuer les constituants légers tels que le CH₄, C₂H₆ et le N₂. Une présence des incondensables sera détectée par une augmentation de pression dans le X01F et une baisse de niveau dans les X02 CA/CB avec une ouverture de la PV301.

Piège de fond du X01F

L'accumulateur de propane est muni d'un pot afin de piéger tous les hydrocarbures lourds (C₄+), qui peuvent contaminer la boucle. La détection des lourds se fait au niveau à glace (LG) par différence de densité.

II.6 Paramètres de fonctionnement :

Les principaux paramètres de fonctionnement qui gouvernent le système de réfrigération au propane sont : la pression, le niveau et la température.

II.6.1 Pression :

La pression fournie par tout compresseur dynamique dépend de la densité du gaz comprimée qui dépend elle-même :

- 1- De la pression d'aspiration
- 2- du poids moléculaire
- 3- et de la température d'aspiration.

Un autre facteur pouvant acté l'augmentation de pression dans un compresseur dynamique est la valeur de k (rapport de chaleur massique sous pression constante et de la chaleur massique à volume constant) du gaz.

Toute variation de l'un des paramètres cités ci-dessus, ou d'une combinaison de ces paramètres, à l'admission du compresseur va se refléter par des changements sur les courbes caractéristiques d'un compresseur dynamique fonctionnant à une vitesse constante.

La pression est contrôlée et régulée à plusieurs niveaux qui sont décrits ci-après :

- Dans les conditions de marche normales, un régulateur de pression PIC301 est prévu pour maintenir environ de 12.9 bar-g en agissant sur la vanne PV301, pour permettre au propane gazeux de se condenser à :

.contre-courant avec l'eau de refroidissement dans les condenseurs de propane X02CA/CB. Du fait que la totalité du gaz se condense, le compresseur fonctionne pratiquement sous une pression de refoulement constante. La pression de refoulement peut varier si l'on modifie la vitesse de la machine.

- La pression dans le X01-F est réglée par le PIC-302 agissant sur la vanne PV-302. Cette action intervient lorsque la pression varie entre 10,3 bar-g, et 11.6 bar-g, en fonction de la quantité de vapeur que l'on désire produire dans X01 F. Par exemple, une augmentation de la charge calorifique du gaz d'alimentation provoque une augmentation du taux de vaporisation à la sortie de X03 C. Une baisse de niveau de liquide dans le refroidisseur est compensée par une augmentation du débit entre X01F et le X03 C. Le rendement du condenseur X02-CA/CB doit augmenter pour satisfaire la quantité de liquide nécessaire au maintien du niveau dans X01 F. En diminuant la pression dans X01-F, on abaisse la température de condensation du propane, ce qui permet au X02-CA/CB d'augmenter son rendement.

- La pression du propane à la sortie du X41-C est réglée par le PIC-210 agissant sur PV-210, de façon à ce que le point d'ébullition du propane ne soit pas inférieur à 18,3°C. Cette pression est normalement fixée à 7 bar-g, afin d'éviter la formation d'hydrates dans le gaz d'alimentation.

II.6.2 niveau :

Des régulateurs de niveau de liquide sont utilisés de façon généralisée dans l'ensemble du système de réfrigération. Ils remplissent deux fonctions principales, à savoir :

- Fournir à l'opérateur les moyens de faire varier la surface disponible de condensation ou de vaporisation des fluides dans les échangeurs de chaleur.
- Maintenir le niveau liquide dans les ballons d'aspiration du X01-J. par exemple, le niveau du liquide dans X02-F est réglé par LIC-303 qui actionne la vanne LV-303. Il est important de maintenir un certain niveau de liquide dans ces ballons parce qu'un joint hydraulique est prévu dans le fond de chacun des quatre ballons d'aspiration. Il a pour but :
 - De maintenir l'étanchéité entre les quatre ballons (la pression des ballons étant diésèrent) ;
 - De maintenir une température constante dans chaque ballon et par conséquent à chaque aspiration du compresseur (la pression étant maintenue constante par le gaz de recyclage) ;
 - De ramener par barbotage la température du gaz de recyclage injecté à la température du liquide.

II.6.3Débit :

Vue que le X01J est un compresseur à quatre étages d'aspiration, il convient de les protéger individuellement en faisant assurer un débit minimum à l'aspiration de chaque étage, de manière à maintenir un débit équilibrée sur chacune des roues du compresseur pouvant subir défets de pompage.

II.6.4Température :

Il est important que la température du gaz quittant les ballons d'aspiration ne dépasse pas les limites de température de la machine, pour rester également dans les limites de la température de refoulement de X01-J. Pendant le démarrage et d'autres conditions de

Service normales, il est nécessaire d'utiliser les lignes de trempe pour refroidir le courant de recyclage qui alimente le compresseur coté aspiration. Cette opération peut se faire manuellement en actionnant les vannes de trempe raccordant X01-F au ballon d'aspiration correspondant et en réglant la température sur l'indicateur de température local .

Des indicateurs de température sont utilisés dans les systèmes de réfrigération pour surveiller la régulation du procédé. La température n'est pas généralement utilisée comme une variable principale pour Contrôler le procédé. Par exemple, les circuits anti-pompage se basent sur les températures enregistrées sur la ligne d'aspiration du compresseur pour calculer la valeur corrigée du débit réel du compresseur.

Ci-après un tableau récapitulatif des paramètres de fonctionnement en marche normal :

Table I.1 – Paramètres de marche du principal équipement de la boucle propane

Equipements	Pression (bar)	Température (°C)	Niveau	débit ($Kg.h^{-1}$)
101J	12.79	52.6°C	-	-
101F	12.55	36.7°C	60%	-
102F	5.19	3.2°C	12 %	323 500
103F	3.25	-11.7 °C	12 %	172 910
104F	2.27	-22.0°C	12 %	135 930
105F	1.31	-34.3°C	12 %	127 740

II.8 Chargement de la boucle de réfrigération au propane :

Il est important de comprendre comment la production du propane au niveau du d'dépropaniser est répartie entre les différentes destinations, afin de mieux se rendre compte de la surconsommation au niveau de la boucle et donc des d'déficits du point de vue consommation.

Les vapeurs de tête sortant de la colonne sont condensées dans le condenseur X53 C et recueillies par la suite dans le ballon 353 F, la plus grande partie du propane sert comme reflux au d'propanier moyennant de deux pompes de reflux X52J/JA, l'excès de propane est envoyé vers le sous-refroidisseur de butane 360 C, et se mélange au propane venant de 12`eme plateau de dépropaniser X52 E, ce produit répond aux exigences du propane de qualité commerciale.

Le propane de qualité commerciale est refroidi à -29 °C dans le sous-refroidisseur de butane 360 C puis sous-refroidi jusqu'à -43 °C dans le sous-refroidisseur de propane X59-C avant d'être envoyé dans le collecteur de transfert de propane via la FV 437 ou vers GP1/Z pour commercialisation. En revanche, le propane de grande pureté est soutire au niveau de 8ème plateau, le soutirage de haute qualité fournit l'appoint au circuit de propane à travers FV 416. En plus de ces sources de propane d'appoint, la boucle de réfrigération peut s'en approvisionner depuis :

- 1- **Un autre train** : peut fournir l'appoint en propane via des lignes inter-train.
- 2- **GL1/Z** : une ligne d'interconnexion est disponible pour fournir le propane réfrigérant en cas de nécessité.
- 3- **dépotage par un camion propane** : appoint en propane est possible au niveau de X05-F.

Problématique :

Comme il est notoire, le complexe GL2/Z adopte le procédé sous brevet Air Product dite APCI (C3-MR) dit à cascade incorporée avec boucle propane. Il utilise comme fluide frigorigène principale un mélange de gaz appelé MCR (Mixed component réfrigérant).

Le procédé utilise en outre le propane comme fluide frigorigène auxiliaire de refroidissement pour refroidir le GN et le MCR jusqu'au -33°C avant leur entrée dans le cycle de liquéfactions proprement dit. Ce premier cycle permet en particulier d'améliorer le rendement thermodynamique de l'opération.

Vue l'importance primordiale de la boucle propane dans la chaîne production GNL toute perturbation influe pertinemment sur la performance du train de liquéfaction.

Vu que la boucle de propane est une boucle quasiment fermée en tenant compte des pertes tolérées via les purgeurs d'huile vers fuel gaz à travers X26F, notre étude est consacrée sur la surconsommation du propane réfrigérant notée au niveau du TR300 après son dernier démarrage en NOV2016 après une envergure des travaux de changement des lignes corrodées à l'instar des autres trains.

En effet, un plan d'action a été établi pour connaître et identifier les causes soupçonnées d'avoir un impact direct ou indirect sur la surconsommation du propane au niveau de ladite boucle, cependant et pour y remédier nous avons procédé aux démarches suivantes :

- 1- Vérification des paramètres de marche réels de la boucle propane.
- 2- Suivi de la quantité du propane d'appoint.
- 3- Suivi de la qualité du propane réfrigérant.
- 4- vérification du fonctionnement des condenseurs 302 CA/CB.
- 5- Inspection des circuits connectés avec la boucle.

Contamination du propane réfrigérant :

Dans notre cas, la pression de refoulement du compresseur 301J excède les 13.5 bar-g, ce qui nous amène à faire des campagnes d'analyses pour cerner la source de contamination du propane réfrigérant par les légers. Le tableau V.1 résume les résultats des analyses qualitatives du propane réfrigérant aux différents points de la boucle.

Table 2– Analyse des échantillons prélevés dans la boucle de propane.

le 06 février 2017

Constituant	Tête 302F	Tête 303F	Tête 304F	Tête 305F	Refoulement 301 J
<i>CH₄</i>	4.237	0.712	0.119	0.301	1.231
<i>C₂H₆</i>	10.398	5.197	2.060	1.369	4.752
<i>C₃H₈</i>	85.006	93.636	97.080	96.166	93.094
<i>iC₄H₁₀</i>	0.309	0.397	0.636	1.741	0.696
<i>nC₄H₁₀</i>	0.050	0.058	0.105	0.423	0.161
<i>iC₅H₁₂</i>	-	-	-	0.015	-
<i>nC₅H₁₂</i>	-	-	-	0.013	-

D'après les résultats des analyses récapitulées dans le Tableau 2. On peut ressortir que nous avons un excès des légers dans la boucle suite apparemment à deux causes probables selon les hypothèses suivantes :

- 1- **Premier hypothèse** : Contamination due à la mauvaise qualité de l'appoint en propane issu de la section fractionnement.
- 2- **Deuxième hypothèse** : Contamination due aux fuites internes dans la boucle de réfrigération au propane.

-Vérification de la 1 ère hypothèse :

Les analyses chromatographique routines établies par le service laboratoire T/L nous permettent de mieux suivre la qualité de propane d'appoint vers la boucle de réfrigération, en se référant sur les spécifications GPA [1](#) où le propane doit avoir une pureté de 99.6% au minimum.

Les analyses de propane d'appoint et de propane réfrigérant pendant le mois de Février sont représentées dans les graphes ci-dessous :

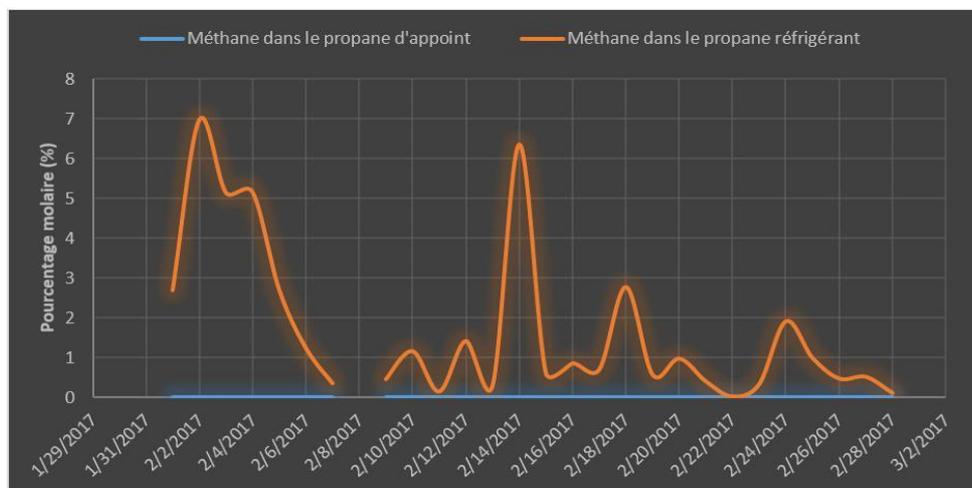


Figure 1 – La teneur en méthane dans le propane d'appoint et le propane réfrigérant.

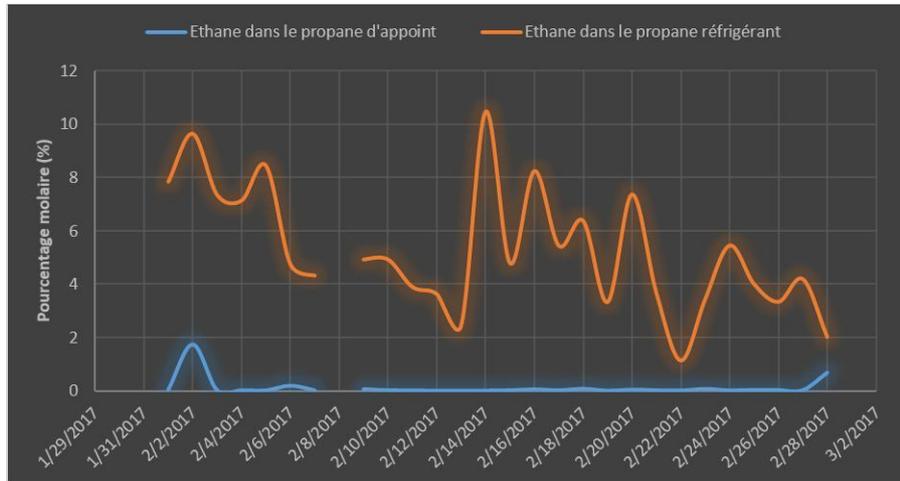


figure.2 – La teneur en éthane dans le propane d’appoint et le propane réfrigérant.

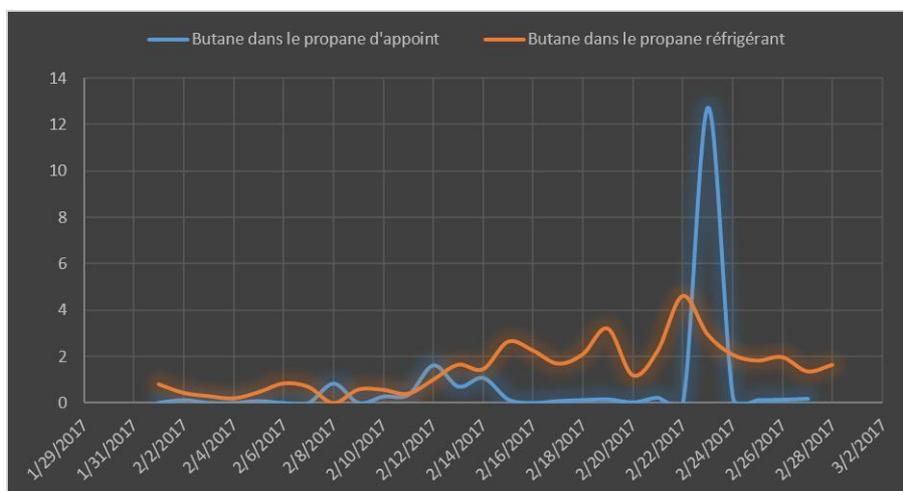


Figure.3 – La teneur en butane dans le propane d’appoint et le propane réfrigérant.

Interprétation des résultats :

Les figures précédentes, montrent l’évolution de la teneur des contaminants légers et lourds (méthane, éthane et butane) dans le propane réfrigérant et dans le propane d’appoint du train 300.

1- Contamination par les légers :

On peut confirmer que le dépropaniser n’est nullement responsable de la contamination du propane réfrigérants par les légers, car il fonctionne selon les normes ou les teneurs en méthane et en éthane sont tolérables dans le propane d’appoint, à ce stade on peut déduire que la source de contamination du propane réfrigérant se réside dans la boucle elle même, ce qui nous a recouru à la 2eme hypothèse.

2- Contamination par les lourds :

La contamination par le butane peut se produire en cas de perturbation du dépropaniseur lors de l’appoint en propane surtout que nous avons une fuite interne

de la vanne FV416 (confirmé par le passage d'un débit Moder qui varie entre 0.30 et 0.75m.h⁻¹ avec la fermeture de la vanne, voir figure.4), chaque perturbation de ladite colonne affecta en conséquence la qualité de propane réfrigérant (voir comme un exemple typique la figure.5 ou la température du 8eme plateau excède les 75°C indiqué par le TI1-411 qui est reconfigurer récemment en PHD pour un meilleur suivi). Il est à signaler que ce cas de figure peut se manifester lors de la pressurisation de ladite colonne dans la phase de démarrage dont on aura donc, une contamination par le léger venant du GN dédié pour la pressurisation.

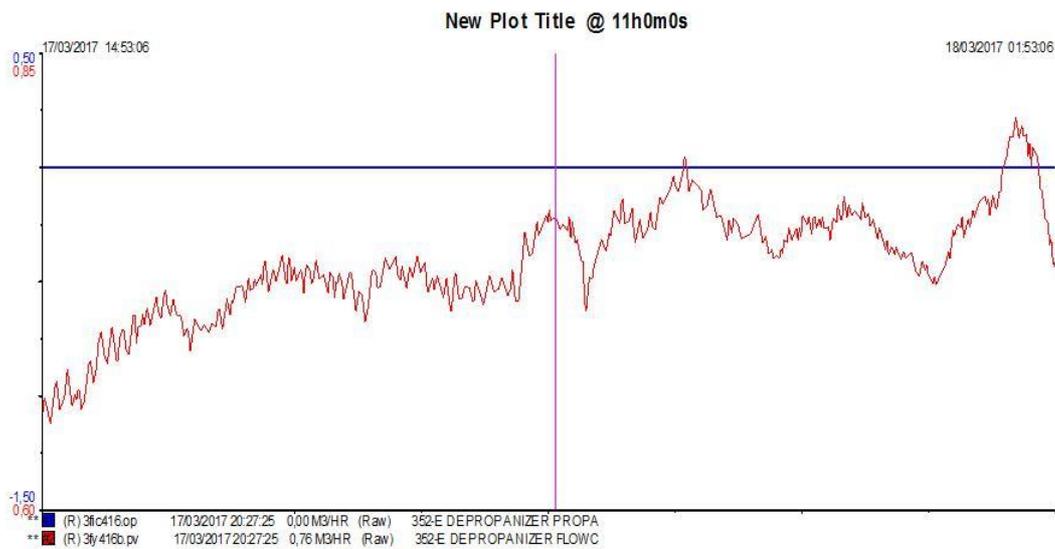


Figure 4– Fuite interne de la FV416.

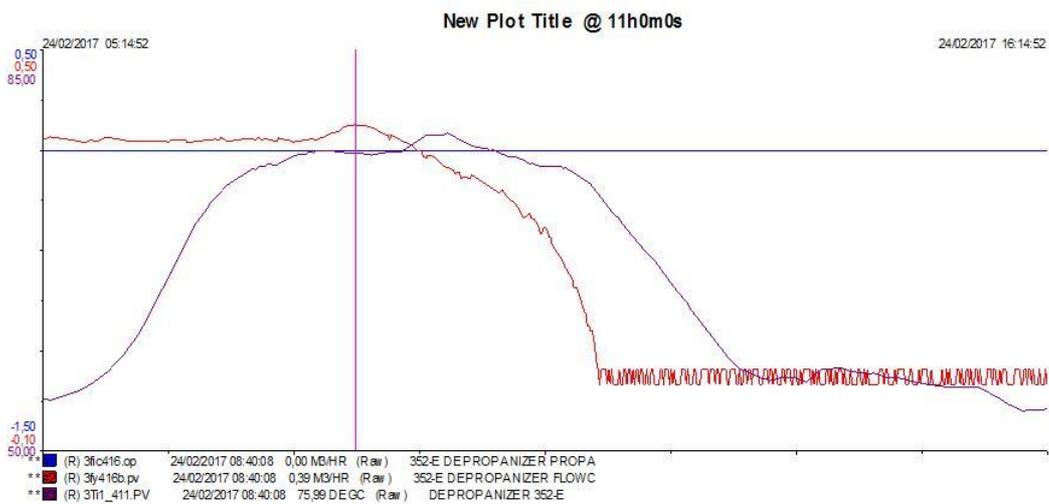


Figure .5 – Appoint d'un produit non conforme via la FV416

Mauvaise condensation du propane réfrigérant :

Après avoir passer en revue sur la contamination du propane réfrigérant, on a conclu que la surconsommation persiste toujours malgré la condamnation de la passe sujet de fuite interne au niveau de 351C, ce qui nous amène à remettre en doute la condensation du propane réfrigérant.

Historiquement parlant et après avoir consulté le back-log des demandes de travail (DT) et des demandes d'inspection (DI) dans Oracle discover, nous avons constaté que depuis 1997 le problème majeur que les condenseurs 302-CA/CB rencontrent souvent est l'encrassement des filtres et des tubes par des organismes marins et voire même des d'échés domestiques, ces condenseurs ont subi des travaux de nettoyage avec une cadence très élevé ces dernières années notamment le condenseur 302 CB.

Un suivi de fonctionnement des deux condenseurs suscites est s'impose pour palier au problème de surconsommation, en vérifiant d'abord les conditions opératoires suivantes :

-Niveau du propane

Le niveau du liquide dans le collecteur du propane réfrigérant doit être maintenu à environ 50% pour permettre à la fois que la surface d'échange utile soit la plus grande possible et empêche le passage du propane gazeux et aussi bien les gaz incondensables vers l'accumulateur. Le niveau du liquide dans le collecteur se trouve pratiquement au-dessous de la limite conseillée, la valeur lue sur le LG 306 varie en général entre 0 et 20%.

En outre, on constate que durant l'appoint du propane sous-refroidi, ce niveau oscille entre 60 et 65%, ce qui peut traduire par l'apport des frigories de propane d'appoint à la condensation du propane gazeux à la sortie des deux dits condenseurs.

-Perte de charge

La perte de charge est un paramètre très important pour décrire la résistance à l'écoulement dans les filtres et les tubes dans un échangeur de chaleur d'ou sa performance.

Les valeurs citées dans le tableau 3 sont les pressions prises en amont et en aval du filtre EDM et les condenseurs pour déterminer la perte de charge.

Table 3 – les pressions aux différents points des condenseurs 302 CA/CB.

	Entrée EDM	Aval filtre	Sortie EDM
302 CA	2	1.1	-0.45
302 CB	2	2	-0.4

Interprétation des résultats des prises de pression :

La différence de pression en amont et en aval le filtre EDM du 302CA est élevé, cette perte de charge significative est un signe de bouchage dudit filtre. Quant à la pression d'eau de mer à la sortie de ce condenseur, nous avons un vide crée par la circulation d'eau de mer dans la ligne de retour commune vers canal de rejet, ce qui est reflète le bouchage de presque la totalité des tubes. Pour le condenseur 302CB la différence de pression en amont et en aval du filtre EDM est pratiquement nulle, cela peut signifier deux choses bien distincts, soit on a un percement du filtre dont on aura aucun obstacle d'où la $4P$ nulle, soit le bouchage de la totalité des tubes dont on aura un équilibre de pression amont et aval le filtre au fur et à mesure que l'eau de mer s'écoule, quand le régime stationnaire est établi les pressions s'équilibrent.

Quant à la pression d'eau de mer à la sortie de ce condenseur, nous avons le même constat que le 302CA.

Nous avons voulu concrétisé ce bouchage par la mesure de débit de l'eau de mer à la sortie dont nous avons fait appel au service TI du GL1Z pour qu'il nous y assiste par un débitmètre portatif ultrason, une suite favorable nous a et accordée, hélas ! Par manque des conditions techniques cette mesure n'a pas été faite du fait que le débitmètre exige que la surface cible doit être aussi linéaire que possible (dix *le diamètre de la ligne).

Les condenseurs à propane reçoivent la plus grande partie d'eau de mer alimentant le train, avec un taux de 43% de la totalité du débit, ce qui les rendent les plus grands utilisateurs de l'eau de mer. Vu l'emplacement des condenseurs au bout de la ligne BONNA EDM et vu l'ampleur du débit d'eau de mer qui les traverse, la probabilité d'encrassement du filtre et des tubes des condenseurs 302 CA/CB est plus importante à cause du volume mort crée à l'extrémité de la ligne BONNA EDM juste à l'entrée des deux condenseurs, qui fait entraîné les organismes marins et la boue pour s'y pénétrer. Ce phénomène est apparu généralement au niveau du dernier échangeur qui est le 302CB.

Table 4 – Distribution d'eau de mer dans un train de liquéfaction

désignation	Repère équipement	Débit d'eau de mer ($m^3.h^{-1}$)
Condenseurs à propane	X02 CA/CB	10 922
Refroidisseur intermédiaire du circuit	MCR X10 C	1 066
Refroidisseur complémentaire du circuit MCR	X11 C	1 926
Refroidisseur complémentaire du gaz combustible	X26 C	117
Refroidisseur de MEA	X32 C	200
Condenseur de régénérateur	X35 C	224
Condenseur du dépropaniseur	X53 C	620
Condenseur du débutaniseur	X55 C	476
Refroidisseur de gazoline	X62 C	144
Condenseurs des compresseurs de propane, de MCR I et MCR II	X01-JC1, X02-JC1 et X03-JC1	10 401
Refroidisseurs d'huile de graissage et d'étanchéité des compresseurs	X01-JLC1/C2	153
Autres		48.3

CHAPITRE III

Chapitre III

Pertes de propane réfrigérant

1-Introduction :

Les inventaires de réfrigérant propane sont perdus de manière continue et de différentes manières. Les pertes de réfrigérant propane peuvent être attribuées aux facteurs suivants :

- 1- Perte de gaz d'étanchéité dans le système d'huile d'étanchéité du compresseur
- 2- Présence de fuite aux travers :
 - a- Des soupapes de sureté et des vannes de dépressurisation ;
 - b- Des vannes du circuit de dégivrage ;
 - c- De la vanne de propane d'appoint vers la boucle MCR.
- 3- Purge des contaminants du réfrigérant :
 - Les impuretés légères,
 - Les impuretés lourdes.

2-Perte de gaz d'étanchéité :

Le débit du propane récupéré depuis les purgeurs d'huile du compresseur 301 dépend en particulier de l'état des labyrinthes de l'arbre, ces derniers ont été révisés lors du dernier MP au niveau du train 300. En fonction des données obtenues auprès du fournisseur, un système compresseur propane type (20 000 kW) requiert un débit de gaz d'étanchéité vers les purgeurs d'huile d'environ 54 kg.h^{-1} .

3-Vérification des circuits connectés à la boucle de réfrigération :

La perte excessive du propane réfrigérant nous a incités à vérifier en premier lieu tous les circuits liés à la boucle de réfrigération.

En vue de détecter toutes sortes de fuites (externe ou interne) nous avons compté sur la touchée et sur le son de l'écoulement du fluide, ainsi sur la présence de givre sur la ligne

Sujette de fuite interne, quant à la fuite externe c'est à vue d'œil que l'on a constatée.

Soupapes de sureté : Vérification de l'étanchéité des soupapes en ouvrant la vanne D'évent située entre la soupape et le clapet (ou fermeture de la vanne de sortie). **Vannes de dépressurisation, d'appoint MCR et de gaz dégivrage :** vérification

De la fermeture des vannes en relevant s'il y a présence de fuite sur les presses étoupe et les raccords de brides.

3-1. Les soupapes de sureté et les vannes de dépressurisation :

Des systèmes de torches sont prévus pour l'évacuation, sans danger, des vapeurs et des liquides dégagés au démarrage et/ou au régime perturbé à l'aide de divers événements et purges.

Les équipements de la boucle propane sont protégés contre la surpression par plusieurs soupapes de sureté limitant leurs pressions internes en cas de :

- 1- Problèmes dus au procédé.
- 2- échauffement anormal dû à un incendie.

Ci-dessous un tableau récapitulatif le groupe des soupapes de sureté et des lignes de dépressurisation de la boucle :

Table1– Groupe des équipements de sécurité de la boucle propane.

	Soupape(s) de sureté		Vanne(s) de dépressurisation	Disque de rupture
	Conventionnelle	Pilotée		
Vers le collecteur de torche chaude	06	02	07	08
Vers le collecteur de torche froide	01	00	01	01
Vers le collecteur de CLD	00	01	02	02

3-2 . Vérification des soupapes de sureté et les vannes de dépressurisation :

a- Collecteur de torche chaude

Les soupapes suivantes sont installées dans la boucle propane se déchargent dans le collecteur de la torche chaude.

Table .2 – Vérification du circuit torche chaude de la boucle propane.

désignation	Soupape de sureté	Seuil (barge)	Ligne de dépressurisation	Disque de rupture	Présence de fuite
Condenseurs de propane 302-CA/CB	RV-302C	20.6	PR-313-3"	SP-159	négative
Accumulateur de propane 301-F	RV-301F	20.6	PR-323-3"	SP-160	négative
Ballon d'aspiration du compresseur de propane 4ème étage 302-F	RV-302F	15.1	PR-339-4"	SP-161	négative
Ballon d'aspiration du compresseur de propane 3ème étage 303-F	RV-303F	15.1	PR-350-4"	SP-162	négative
Ballon d'aspiration du compresseur de propane 2ème étage 304-F	RV-304F	15.1	PR-359-4"	SP-163	négative
Ballon d'aspiration du compresseur de propane 1ere étage 305-F	RV-305F	15.1	PR-374-4"	SP-164	négative
Compresseur de propane 301J	RV-301J-1	20.6	PR-304-6"	SP 154	négative
	RV-301J-2	21.6	-	SP 155	négative

b- Collecteur de torche froide

Une seule soupape est installée dans la boucle propane qui se décharge vers le collecteur de la torche froide

Table .3 – Vérification du circuit torche froide de la boucle propane

désignation	N° de repère	de	Seuil (barge)	Ligne de d'épressurisation	Disque de rupture	Présence de fuite
Ballon d'aspiration de la pompe de transfert de propane 325-F	RV-325F		15.1	PR-485-2"	SP-194	négative

c-collecteur de CLD**Table .4 – Vérification du circuit CLD de la boucle propane**

désignation	N° de repère	de	Seuil (barge)	Ligne de d'épressurisation	Disque de rupture	Présence de fuite
Réchauffeur du Procède 357-CA/CB	gaz RV-357CA/CB		21.3	PR-857-1"	SP-285	négative
Chambre de dégagement lourds PR660	de - des		24.6	CLD-302-2"	SP-389	négative

En outre, le système de transfert de propane possède une vanne commune qui se décharge vers le collecteur de CLD, cette vanne collecte tout le liquide et voire même les vapeurs de propane en provenance des ballons 305F, 325F et la pompe 325J.

En résumé, aucune fuite n'a été décelée au niveau des circuits précités, néanmoins nous avons une perte du propane réfrigérant venant du by-pass de la FV 411 vers la ligne CLD-302-2", et pour y remédie plaintivement, il est vivement recommandé d'installer un joint plein au niveau de FE-411, en attendant de solutionner ce problème à la source en réparant l'échangeur convenablement.

3-4. Appoint en propane vers la boucle MCR :

Lors du démarrage du train, le chargement de la boucle MCR se fait moyennant de :

- 1- HV 502 et HV 523 pour le méthane ;
- 2- La vanne inter-train pour l'éthane ;
- 3- HV 418 pour charger le propane depuis 302F via la ligne PR 330 1 1/2 ”.

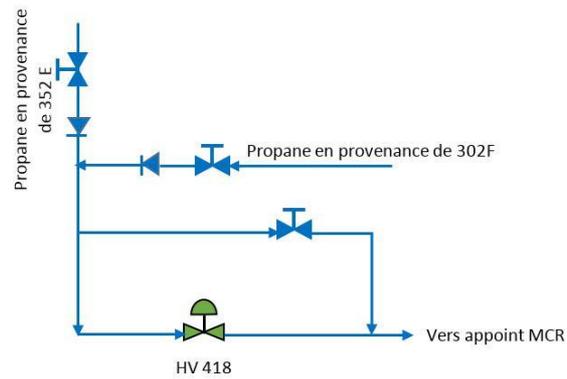


Figure.1 – Schéma de l'appoint en propane vers la boucle MCR.

Observation :

Après la visite de cette vanne nous avons constaté qu'elle est bien étanche et ne présente aucune anomalie.

3-5. Circuit de gaz dégivrage :

La boucle propane est dotée de deux lignes distinctes dédiées pour le dégivrage du circuit entier, ces lignes sont schématisées selon la figure.1 :

- 1- **Première ligne :** au niveau de la ligne de refoulement du compresseur en amont de 302CA/CB ;
- 2- **Deuxième ligne :** au niveau de l'accumulateur 301 F en aval de la PV301.

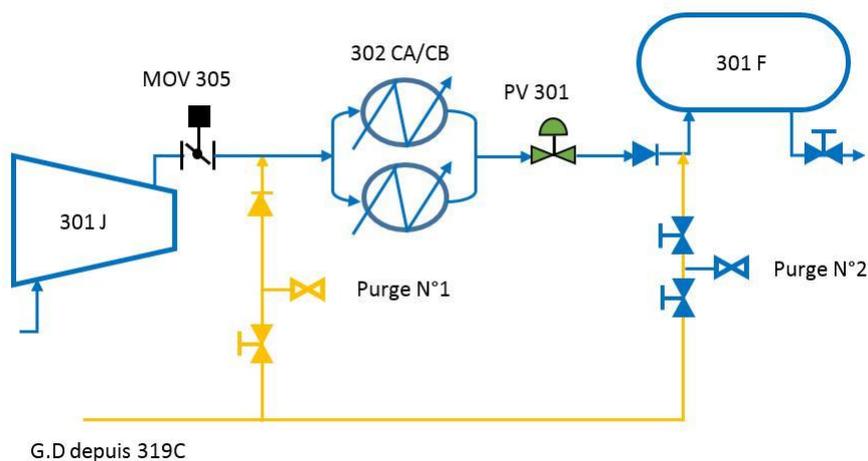


Figure .2 – Schéma du circuit de dégivrage de la boucle propane.

Constatations :

Lors de l’ouverture des purges des lignes de gaz dégivrage précitées (voir la figure.2)

Nous avons constaté ce qui suit pour :

- 1- **Purge N°1** : une fuite modérée de propane entre le clapet et la vanne d’isolement
- 2- **Purge N°2** : les deux vannes d’isolement sont parfaitement étanches.

3-6.Réchauffeur des gaz procède :

Vue la pression élevée du propane par rapport à celle du fuel gaz (F.G), Le propane réfrigérant au niveau de cet échangeur est susceptible de s’y enfuir en cas d’une fuite interne, c’est pour laquelle une analyse du courant fuel gaz à l’entrée et à la sortie du réchauffeur a été faite pour confirmer ou infirmer cette probabilité.

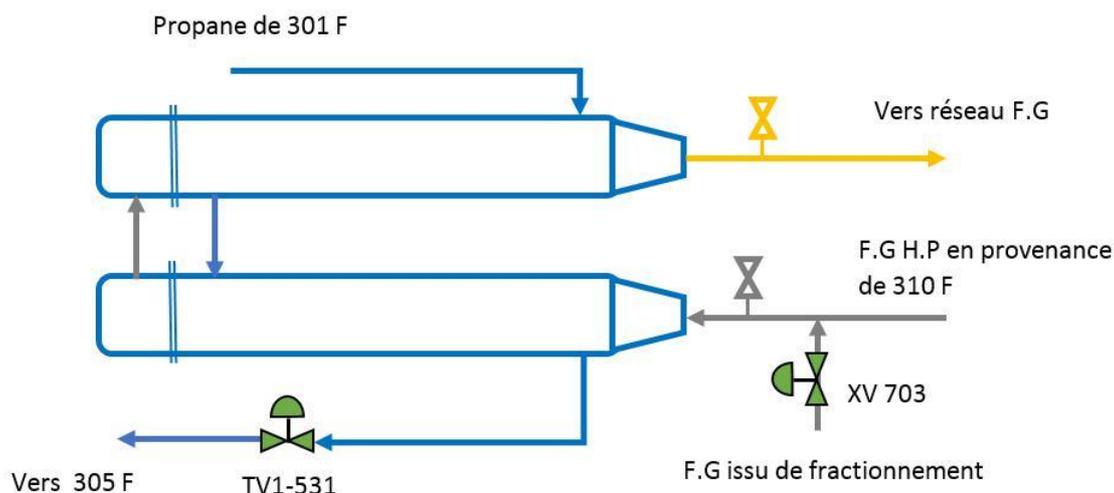


Figure .3 – Schéma du réchauffeur F.G 357 CA/CB.

Table .5 – Résultats d’analyse de F.G à l’entrée et à la sortie de 357 CA/CB

Constituant	Entrée (%)	Sortie (%)
N_2	0.060	0.035
CH_4	33.854	35.159
C_2H_6	66.064	64.788
C_3H_8	0.022	0.018

Interprétation des résultats

D’après les résultats d’analyse rapportés dans le tableau précédent, la composition de F.G à la sortie est presque similaire à celle de l’entrée, donc nous pouvons déduire qu’aucune fuite n’a été décelée à l’intérieur du réchauffeur F.G.

4-Purge des contaminants :

4-1.Les impuretés légères :

Les impuretés légères ont tendance de s’accumuler dans la section de température élevée. En conséquence, nous éliminons ces composants en dégageant une quantité de réfrigérant.

Notons que la purge des incondensables au niveau des condenseurs 302 CA/CB se fait en permanence, même après l’élimination de la source de contamination.

Des analyses prises au niveau de la XV 706 ont été faites avant et après l’élimination de la source de contamination, les résultats des analyses sont comme suit :

Table .6 – Composition du gaz purgé au niveau de la XV 706.

Constituant	Avant l'élimination	Après l'élimination
4 N ₂	1.341	0.354
CH ₄	25.258	0.924
C ₂ H ₆	11.884	5.227
C ₃ H ₈	61.382	93.275
iC ₄ H ₁₀	0.135	0.205
nC ₄ H ₁₀	-	0.012

On remarque d'après les analyses prises au niveau de la XV706 après avoir éliminé la source de contamination, que le gaz que l'on purge vers le collecteur fuel gaz est un propane réfrigérant proprement dit. Vu que les condenseurs 302CA/CB présentent un bouchage imminent, la condensation du propane devient très délicate provoquant une augmentation importante de pression de refoulement, le recours au purge des contaminants via la XV706 est en permanence d'où la perte excessive de propane réfrigérant.

Nous avons suivi l'évolution de niveau de propane dans l'accumulateur 301F au moment d'appoint et après sa cessation :

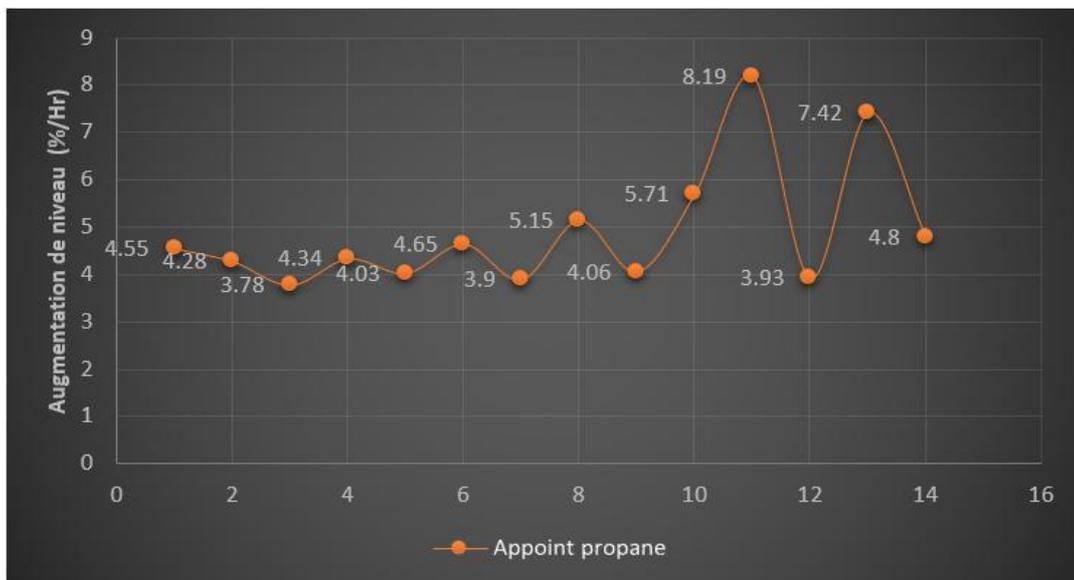


Figure .4 – Evolution du niveau dans l'accumulateur 301 F lors de l'appoint.

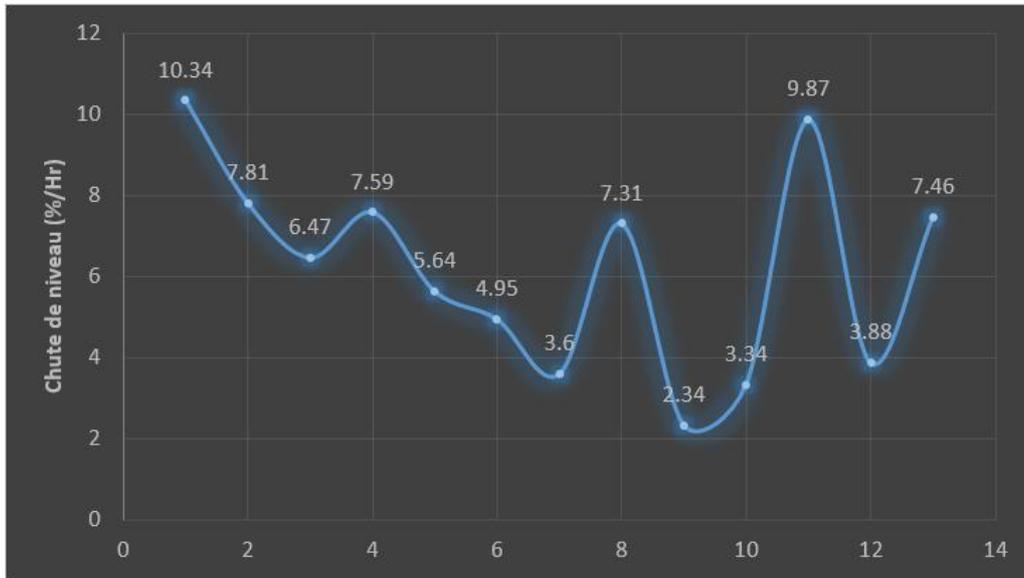


Figure .5 – Abaissement de niveau après cessation d’appoint.

Interprétation :

D’après la figure 4, on conclura que l’on n’a pas pu maintenir un niveau stable dans l’accumulateur qu’au prix d’un appoint en permanence du propane sous refroidi avec ouverture environ de 40% de la XV706, le niveau s’augmentera de 4.91% par heure en moyenne des quatorze appoints effectuée durant dix jours du 23/02/2017 au 05/03/2017.

Une tentative a été effectuée lors de l’appoint en laminant la XV706 et ouvre la PV301 à 40%, l’augmentation de niveau est devenue importante, soit 8.19%/heure.

A propos la 2^{ème} figure, on constatera que lors de la cessation d’appoint le niveau chutera librement avec un taux de 6.2% par heure en moyenne de la même durée.

Cette chute est relativement ralentie à 2.34%/heure dans l’appoint N°09, où la FV416 était ouverte à 40%, vu la température du propane d’appoint via cette vanne qu’elle est relativement élevée, le niveau de propane dans l’accumulateur ne cesse de se décroître, cela nous confirme que la condensation du propane réfrigérant n’a pas eu lieu dans les deux condenseurs et la boucle propane ne devient plus fermée. Un cas de figure a existé où le niveau de l’accumulateur est chuter en fléché avec l’ouverture à 40% de la FV416, voir les figures VI.6 et VI.7.

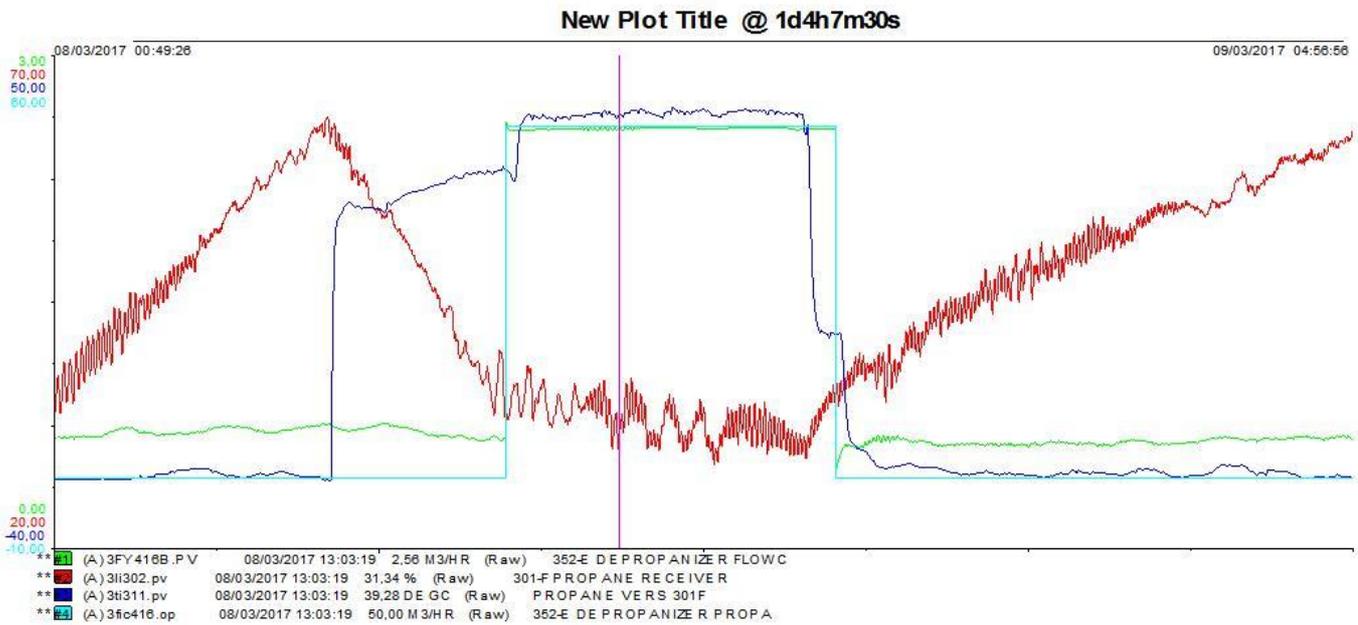


Figure .6 – Appoint en propane réfrigérant avec la FV 416.

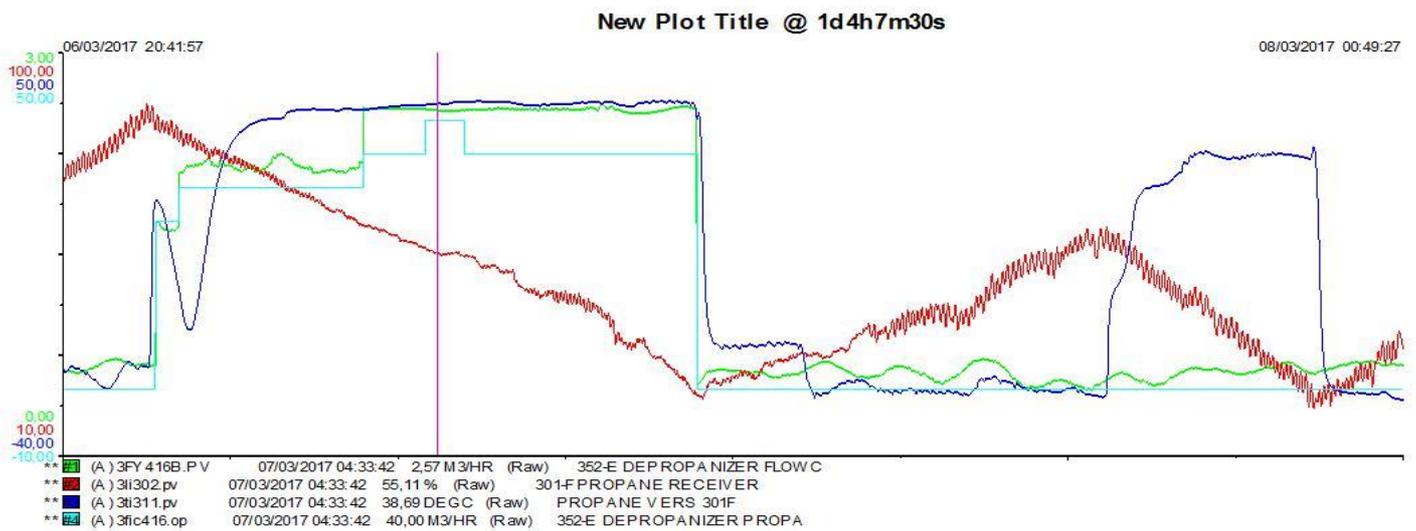


Figure.7 – Appoint en propane réfrigérant avec la FV 416.

4-2. Les impuretés lourdes :

Le tableau .7 représente les analyses du propane réfrigérant dans la calandre du chiller315C pour siéger la contamination par les lourds.

Table .7 – Analyse des échantillons à l'entrée du 315C.

Constituant	Entrée 315 C(%)
N_2	0.000
CH_4	0.005
C_2H_6	0.551
C_3H_8	87.347
iC_4H_{10}	11.523
nC_4H_{10}	0.539
iC_5H_{10}	0.015
nC_5H_{10}	0.019

Interprétation des résultats :

Selon les résultats obtenus, on peut déduire que nous avons une présence redoutable de butane dans les derniers chiller MCR et GN, notamment le 315C ,qui est le point le plus bas de la boucle de propane, où sa proportion excède les 11%, que l'on peut traduire par la contamination du propane d'appoint, cela fait appel à des chasses vers collecteur CLD via la chambre de dégagement des lourds PR660 d'où la perte de propane réfrigérant.

Il est à signaler que cette situation est si aggravée de jours en jours dont il s'est arrivé que l'appoint était en continue pendant trois jours consécutifs sans avoir autant d'augmenter le niveau de l'accumulateur considérablement, voir Tableau N°7.

Table 8: Suivi de l'évolution de niveau de l'accumulateur 301F lors des derniers jours de l'étude (du 06-Mars au 22-Mars-2017)

ΔLi (%)	Δt (heure)	$\Delta Li/\Delta t$ (%/h)	A (m ³)
51.11	13.57	3.77	144.23
35.63	8.32	4.28	122.26
39.25	7.58	5.18	94.33
42.05	20.05	2.10	225.45
27.85	5.25	5.30	60.86
53.07	9.93	5.34	115.52
21.30	9.48	2.25	108.06
44.22	31.50	1.40	390.63
45.64	33.08	1.38	461.46
39.46	88.63	0.45	1074.89
56.47	31.32	1.80	377.10
51.34	14.35	3.58	176.40
35.33	24.68	1.43	298.85

Conclusion générale :

Vu le souci d'autoconsommation qui devient un critère de performance du complexe, il nous a confié de chercher les principales causes de la surconsommation de propane réfrigérant dans le train 300, nos investigations se focalisent sur les deux causes probables à savoir la contamination par les légers ou la mauvaise condensation du propane réfrigérant.

Après avoir cherché la source de contamination du propane réfrigérant qu'elle réside dans la fuite interne de la passe C (FV411) de l'échangeur 351C, on l'a condamné par une bride pleine d'où la diminution considérable des légers dans le propane réfrigérant en attendant le temps opportun pour y solutionner à la source. La présence des hydrocarbures lourds provoque aussi la surconsommation de propane lors de l'opération de purge vers CLD via la PR660 ce qui est vécu dans le train 300.

Cette mesure palliative n'a pas résolu le problème de la surconsommation du propane réfrigérant ce qui nous a conduits à vérifier le fonctionnement des deux condenseurs en l'occurrence 302CA/CB. Vu que les condenseurs de propane sont les plus utilisateur de l'eau de mer (43% du débit total) ils sont sujet des bouchages récurrent d'où notre cas de figure.

Un simple calcul de la perte de charge au niveau de ces condenseurs a mis en évidence leurs bouchages où les différences des pressions à l'entrée et à la sortie sont relativement élevées. En résumé, on peut confirmer que les deux condenseurs ne fonctionnent plus ce qui implique de faire des appoints en permanence en propane sous-refroidi qu'il aurait du destiner vers commercialisation, d'où la surconsommation.

Recommandation :

Le problème de surconsommation a et argument par la mauvaise condensation du propane réfrigérant, de ce fait il sera préjudiciable d'émaner des recommandations que nous jugeons utile et praticables pour y remédier :

- 1- Reprendre les analyses au niveau 312C et 303C pour contrôler les huiles et les hydrocarbures lourds.
- 2- Implantation d'un récupérateur (à réfrigérant ou condenseur EDM) du propane entraîné avec les incondensables via la XV706.
- 3- Faire des analyses périodiques au niveau 315C et 306C pour contrôler les contaminants lourds tels que les iC_4H_{10} et nC_4H_{10} et agir en conséquence pour y corriger.
- 4- Installation d'un débitmètre sur la ligne de dégagement des incondensables XV706.
- 5- Installation d'un débitmètre au niveau des purgeurs d'huile pour suivre à la
Fois la Consommation du propane et l'état des labyrinthes du compresseur.

6- Réseau eau de mer :

- 6-a. Au niveau de la station de pompage d'eau de mer :
 - Réhabilitation de la station d'électro chloration.
 - Lancer une opération de dragage du bassin et les quartes canaux d'amenée de l'eau de mer.
 - Remise en état des filtres rotatifs 2200LA/ . . . /LF.
- 6-b. Au niveau du train :
 - Remise en état de la vanne de recyclage (kicks back).
 - Lavage à contre-courant au niveau des condenseurs propane X02CA/CB par le biais des lignes circulant l'eau de mer de la sortie vers l'entrée avec la pression de l'entrée.
 - Installation de deux filtres redondants en amont des condenseurs 302CA/CB pour éviter le passage des produits marin ;
 - Installation d'une ligne de by-pass de la ligne de BONNA vers le canal de rejet et qu'elle soit exploitable lors de la disposition l'EDM

Bibliographie :

- [1] Pierre PETIT. *Liquéfaction du gaz naturel*, Technique de l'ingénieur.
- [2] Mustapha BELKADI. *Technologie du gaz naturel liquéfié* : Institut Algérien du Pétrole.
- [3] SONATRACH. *Soft tableau process*, Complexe de liquéfaction de gaz naturel GL2/Z.
- [4] GL2/Z. *Turbo-compresseur propane*, Manuel opératoire de procédé volume N°5
- [5] Jean-Marc PUGNET. *Pompage des compresseurs*, Technique de l'ingénieur.
- [6] *TS3000 Control System Basis Of Design Document*, TRICONEX Avril 2006.
- [7] GL2/Z. *Système de propane*, Manuel opératoire de procédé volume N°2
- [8] SONATRACH, *Formation d'ingénieur module : Fractionnement*, Module N° 01 Bloc N° 13.
- [9] SONATRACH, *Formation d'ingénieur module : circuit de réfrigération*, Volume 28.

- [10] : CHEBLI LAID, ABBASSI YOUSEF; «Mémoire de fin d'études: Calcul des paramètres de fonctionnement du depropaniseur ((unité 38) traitement de GPL); HASSI R'MEL 2012.
- [11] : TAKIA ATIKA; «Mémoire de fin d'études: Amélioration CO2 et He avec la CPG;2003.
- [12] : Monsieur FLESCHE; «GAZ NATUREL LIQUEFIE : Procédés et Technologie» ; 1992.
- [13] : ABED HADJER, KOURAD SARAH; «MEMOIRE DE FIN D'ETUDE : L'étude de la présence des hydrocarbures légers et lourds dans la boucle propane au niveau du complexe GL1/Z»; 2013-2014.
- [14] : Comité Technique ISO /TC 193; «La norme ISO 6976 : Gaz naturel -- Calcul du pouvoir calorifique, de la masse volumique, de la densité relative à partir de la composition»; 1995.
- [15] : Elengy; «Déchargement ou chargement de la cargaison : Calculs et arrondis»; juin 2013.
- [16] : Comité Technique ISO /TC 28; «La norme ISO 8943 : Hydrocarbures liquides légers réfrigérés — Échantillonnage de gaz naturel liquéfié»; 2007.

[17] : GIIGNL: groupe international des importateurs de gaz naturel liquéfié; «LNG CUSTODY TRANSFER HANDBOOK - 3^{ème} édition» ; 2011.

[18] : FLUXYS; «Règlement d'accès au terminal de Zeebrugge»; Octobre 2014.

[19] : FRANCIS ROUESSAC, AMNICK ROUESSAC ; «Méthodes et techniques instrumentales modernes- 6^{ème} édition »; Paris 2014.