

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **INDUSTRIES PÉTROCHIMIQUES**

Option : **GÉNIE PÉTROCHIMIQUE**

THÈME

**ANALYSE DE L'IMPACT DE LA CONTAMINATION DE LA
BOUCLE PROPANE PAR LES LEGERS**

Présenté par

- LATROCHE Charef

Soutenu le 22/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	FARES Zineb	MAA	Université de Mostaganem
Examineur :	BENDAHMA Fatima	Pr	Université de Mostaganem
Rapporteur :	MEHTOUGUI Nabila	MCA	Université de Mostaganem

Remerciement

Ce travail a été réalisé au sein du complexe GL3/Z d'Arzew (Oran), auquel nous adressons nos sincères remerciements pour les moyens mis à notre disposition.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, Dr **Mehtougui Nabila**, Maître de conférences à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nous sommes également très honorées par la présence de Mme **Fares Zineb**, enseignante et adjointe au chef du département de Génie des Procédés à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Malgré ses nombreuses responsabilités et obligations professionnelles, elle a bien voulu accepter la présidence de ce jury, ce dont nous lui sommes profondément reconnaissantes.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également au Pr **Bendahma Fatima** de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, qui a aimablement accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail. Nous lui sommes très reconnaissantes pour l'intérêt qu'elle a porté à notre étude.*

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents, en témoignage de mon amour, de mon profond respect et de ma reconnaissance pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis afin de me permettre de poursuivre mes études dans les meilleures conditions. Leur soutien, leurs encouragements et leur confiance ont toujours été ma plus grande source de motivation.

À mes frères, pour leur présence, leur affection et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours.

À mes amis, qui ont su m'accompagner par leur soutien, leur écoute et leurs précieux conseils dans les moments de doute comme dans les moments de réussite.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à tous mes professeurs et enseignants qui, par la qualité de leur enseignement, leurs conseils avisés et leur disponibilité, ont contribué à ma formation et à l'aboutissement de ce travail.

À toutes les personnes qui m'ont aidée, soutenue et encouragée de près ou de loin, je dédie ce modeste travail avec toute ma reconnaissance et mon estime.

ملخص:

تعتمد هذه الدراسة على منهجية مزدوجة تجمع بين تحليل حالة تشغيل حقيقية والمحاكاة العددية بالاعتماد على النموذج الديناميكي الحراري لبنغ-روبنسون Aspen HYSYS باستخدام برنامج وقد أظهرت بيانات التشغيل، ولا سيما تحاليل التركيب المنجزة عند (Peng–Robinson)، حدوث حالات ملحوظة من تلوث الطور البخاري في دورة S009-نقطة أخذ العينات 16، وتم تحديد المصادر الرئيسية لهذا التلوث في غاز (C2) والإيثان (C1) البروبان بغازي الميثان المستخدم أثناء عمليات بدء التشغيل، وتسرب الأنابيب في بعض (Seal Gas) الإحكام (Make-up)، بالإضافة إلى تدفقات البروبان التعويضية C3/MR المبادلات الحرارية من نوع التي يتم إدخالها خلال ظروف التشغيل الانتقالية (Propane).

الكلمات المفتاحية:

، الديناميكا Aspen HYSYS ، دورة البروبان، تلوث الهيدروكربونات الخفيفة، برنامج (LNG) الغاز الطبيعي المسال بـ GL3/Z ، مركب MJ04-الحرارية، الضاغط 16

Abstract:

this study is based on a dual approach combining the analysis of a real operating case with numerical simulation using Aspen HYSYS and the Peng–Robinson thermodynamic model. Field data, particularly composition analyses performed at sampling point 16-S009, revealed significant episodes of methane (C₁) and ethane (C₂) contamination in the vapor phase of the propane loop. The main sources of contamination identified were the seal gas used during start-up operations, tube leaks in certain C3/MR heat exchangers, and propane make-up streams introduced during transient operating conditions.

Key word: LNG, propane loop, light hydrocarbons contamination, Aspen HYSYS, thermodynamics, compressor 16-MJ04, GL3/Z Arzew.

Résumé :

Cette étude repose sur une approche combinée associant l'analyse d'un cas réel d'exploitation à une simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel Aspen HYSYS, en utilisant le modèle thermodynamique de Peng–Robinson. Les données d'exploitation, notamment les analyses de composition effectuées au point d'échantillonnage 16-S009, ont mis en évidence des épisodes significatifs de contamination de la phase vapeur de la boucle propane par le méthane (C₁) et l'éthane (C₂). Les principales sources de cette contamination identifiées sont le gaz d'étanchéité (seal gas) utilisé lors des opérations de démarrage, les fuites de tubes dans certains échangeurs de chaleur C3/MR, ainsi que les apports de propane de compensation (make-up propane) introduits lors des conditions de fonctionnement transitoires.

Mots-clés : GNL, boucle propane, contamination par les légers, Aspen HYSYS, thermodynamique, compresseur 16-MJ04, GL3/Z Arzew.

TABLE DE MATIERE

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé / Abstract / ملخص	iii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	viii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
• Introduction	1
• Problématique	2
• CHAPITRE I : Description Générale	4
• I.1. Présentation du complexe	4
○ I.1.1. Emplacement	4
○ I.1.2. Mise à disposition	4
○ I.1.3. Organigramme	5
○ I.1.4. Disposition de l'usine	5
○ I.1.5. Capacité de production	5
○ I.1.6. Disponibilité de l'usine	5
○ I.1.7. Composition de gaz d'alimentation	6
• I.2. Description technique de la boucle propane	7
CHAPITRE II : Analyse de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers (Cas Réel)	12
• II.1. Problématique	12
• II.2. Objectifs	12
• II.3. Méthodologie de travail	13
• II.4. Sources de contamination de la boucle propane	14
○ II.4.1. Contamination via le seal gaz lors des phases de démarrage	14
○ II.4.2. Fissures tubulaires dans les shiller	15
○ II.4.3. Appoint de propane depuis l'unité 17	16
• II.5. Analyse d'un cas réel de contamination	17
○ II.5.1. Analyse de composition dans le ballon accumulateur (16-MD06) prélèvement au point 16-S009	17
○ II.5.2. Évolution des paramètres réels d'exploitation en situation de contamination (Cas du 18/02/2026)	18
CHAPITRE III : Simulation et Résultats	22
• III.1. Présentation de l'outil de simulation	22
• III.2. Choix du modèle thermodynamique	23
• III.3. Simulation cas de base 21°C	24

○ III.3.1. Paramètres d'entrée du logiciel HYSYS cas de base 21°C -----	24
○ III.3.2. Schéma de simulation -----	26
○ III.3.3. Comparaison entre les paramètres de sortie cas de base 21°C et les valeurs Hysys -----	27
• III.4. Analyse de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers par simulation -----	28
○ III.4.1. Effet de la contamination sur la pression du refoulement 16-MJ04	29
○ III.4.2. Effet de la contamination sur la température de sortie du GN ----	30
○ III.4.3. Effet de la contamination du propane liquide sur la composition VAP (Point 16-S009) -----	32
• III.5. Recommandations -----	34
○ III.5.1. Utilisation du propane vapeur du refoulement du compresseur 17-MJ08 comme seal gaz -----	34
○ III.5.2. Exploitation du heater 18-MC04 pour la génération de propane vapeur destiné au seal gas -----	35
○ III.5.3. Éviter l'appoint en propane en provenance de l'unité 17 en phases transitoires -----	36
• III.6. Étude de faisabilité des recommandations proposées -----	37
○ III.6.1. Faisabilité technique et opérationnelle -----	37
○ III.6.2. Faisabilité sécuritaire et économique -----	38
CONCLUSION GÉNÉRALE -----	39
BIBLIOGRAPHIE -----	39

Liste des figures

Figure I.1 : Organigramme du complexe GL3/.....	4
Figure I.2 : Schéma simplifié de la boucle propane.....	9
Figure II.1 : Évolution des paramètres lors d'un épisode de contamination	18
Figure III.1 : Représentation d'un module d'opération unitaire.....	21
Figure III.2 : Représentation schématique des boucles de recyclage.....	21
Figure III.3 : Schéma de simulation de la boucle propane sous Aspen HYSYS.....	26
Figure III.4 : Effet de la contamination sur la pression de refoulement.....	28
Figure III.5 : Effet de la contamination sur la température de sortie du GN.....	29
Figure III.6 : Effet de la contamination sur la composition vapeur au point 16-S009.....	31
Figure III.7 : Utilisation du propane vapeur comme seal gas.....	32
Figure III.8 : Exploitation du heater 18-MC04.....	33

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Composition du gaz d'alimentation.....	6
Tableau II.1 : Composition du GN (15-S002)	13
Tableau II.2 : Composition des vapeurs au point 16-S009.....	15
Tableau II.3 : Évolution des paramètres réels d'exploitation.....	16
Tableau II.4 : Composition avant et après stabilisation.....	17
Tableau III.1 a III.12 : Données des équipements simulés.....	22
Tableau III.16 : Validation du modèle HYSYS.....	27

Introduction

Générale

Introduction

Le gaz naturel liquéfié (GNL) occupe aujourd'hui une place stratégique dans le paysage énergétique mondial, en raison de sa flexibilité, de sa compétitivité et de son rôle clé dans la sécurisation de l'approvisionnement énergétique. Le processus de liquéfaction repose sur une succession d'opérations thermodynamiques complexes, dont la performance dépend étroitement de la maîtrise des paramètres opératoires et de la pureté des fluides de procédé utilisés.

Le complexe GL3Z, figure parmi les installations les plus importantes dédiées à la liquéfaction du gaz naturel. Doté de la technologie APCI C3-MR, il combine un pré-refroidissement au propane et un cycle cryogénique au mélange réfrigérant (MR) afin d'atteindre les températures nécessaires à la liquéfaction du gaz naturel. Dans ce schéma, la boucle propane joue un rôle essentiel : elle assure l'extraction progressive de chaleur du gaz naturel et du MR, garantissant les conditions thermodynamiques optimales pour le fonctionnement de l'échangeur principal (MCHE) et la stabilité de la production.

Toute perturbation affectant la composition du propane, notamment la présence des légers issus du *seal gas*, peut entraîner des écarts de fonctionnement, une dégradation des performances thermiques et, dans certains cas, des impacts sur la production et la fiabilité des équipements.

Dans ce contexte, la maîtrise des phénomènes de contamination des boucles de réfrigération constitue un enjeu technique et économique majeur pour les installations de GNL. L'identification des sources potentielles de contamination, l'évaluation de leurs effets sur le procédé et la mise en place de mesures correctives adaptées s'inscrivent dans une démarche d'optimisation continue et de sécurisation de l'exploitation.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette logique et porte sur l'analyse de la contamination de la boucle propane par les légers.

À travers une approche combinant analyse de l'existant, simulation du procédé et exploitation des données opérationnelles, ce travail vise à proposer des recommandations techniques réalistes, adaptées aux contraintes industrielles et orientées vers l'amélioration durable des performances de l'unité.

Problématique

la boucle propane du complexe GL3/Z est essentielle au procédé de liquéfaction du gaz naturel. Cependant, elle peut être contaminée par des composants légers tels que le méthane (C_1) et l'éthane (C_2), ce qui perturbe son fonctionnement. Cette contamination entraîne une diminution de l'efficacité frigorifique, une augmentation de la pression du compresseur et une baisse de la production de GNL. Il est donc nécessaire d'identifier les sources de cette contamination, d'évaluer ses impacts sur les performances du procédé et de proposer des solutions permettant d'améliorer la fiabilité et l'efficacité de l'installation.

Chapitre I

Description Générale

I.1. Présentation du complexe

Le Complexe GL3Z est le dernier complexe de liquéfaction construit où l'engineering a été assuré par la Joint-Venture Italo-Japonaise d'engineering SAIPEM-CHIYODA qui a été chargé des études de la construction et du démarrage de différents installations. [1]

I.1.1. Emplacement

L'usine se situe le long de la côte méditerranéenne à Béthioua, à l'est d'Arzew, dans la zone du port industriel d'Arzew El-Djedid ; il s'étend sur une superficie de 54,6 ha.

I.1.2. Mise à disposition

- **Juillet 2014** ⇒ Début de production de GNL.
- **Aout 2014** ⇒ Premier chargement GNL.
- **09 Mars 2015** ⇒ Réception provisoire du Complexe.
- **25 février 2018** ⇒ Réception définitive du Complexe.

I.1.3 Organigramme

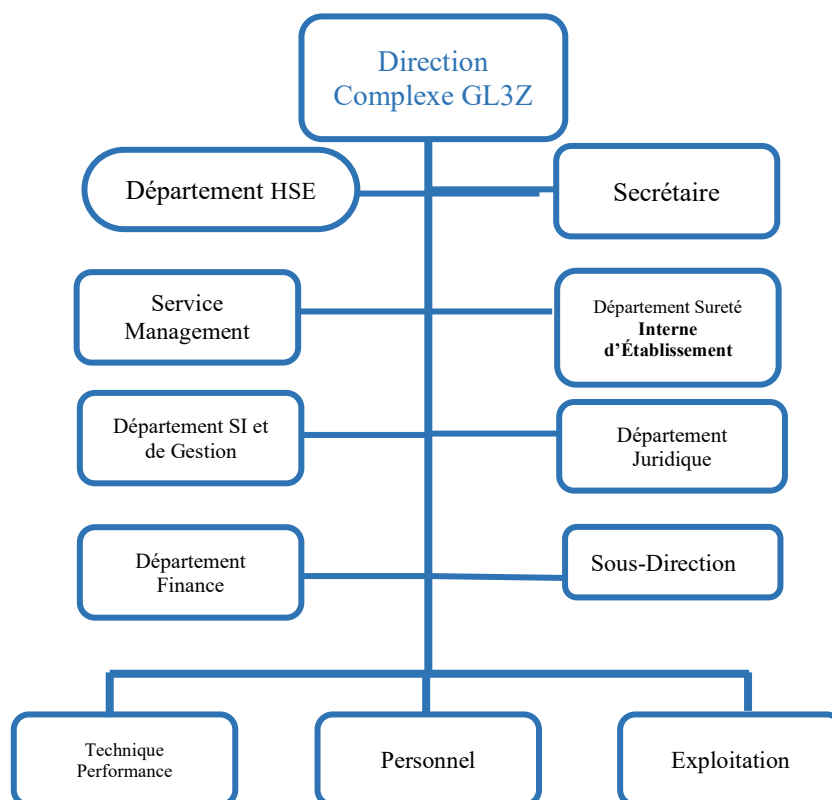


Figure I .1. Organigramme du complexe GL3Z [2]

I.1.4. Disposition de l'usine

Le complexe GL3Z comprend :

- Un train de GNL pour :
 - Traitement de gaz d'entrée
 - Fractionnement
 - Liquéfaction
- Toutes les infrastructures nécessaires

I.1.5. Capacité de production

- GNL 4 700 000 tonnes/an.
- Éthane 300 000 tonnes/an.
- Butane 58 000 tonnes/an.
- Propane 275 000 tonnes/an.
- Gazoline 47 000 tonnes/an.
- Hélium 350 000 Nm³ /jour.

I.1.6. Disponibilité de l'usine

- L'usine a été conçue pour une vie minimale de **30ans**.
- L'usine est conçue pour fonctionner au moins **330j/an**.

La disponibilité de l'usine est une partie intégrante du calcul de la production du GNL, donc la philosophie de réserve adopté doit garantir que la disponibilité soit atteinte.

I.1.7. Composition de gaz d'alimentation

L'usine est conçue pour fonctionner avec différentes compositions du gaz d'alimentation, 3 cas ont été pris en compte pendant la phase de conception :

1. **Cas de Base** : Le gaz a une masse moléculaire intermédiaire, l'usine produit 4.7 MMTPA de GNL à 21°C
2. **Cas Riche** : Le gaz a une masse moléculaire élevée, utilisé pour dimensionner le fractionnement et les unités de récupération du GPL, l'usine produit 4 MMTPA de GNL
3. **Cas Pauvre** : le gaz a une masse moléculaire basse, utilisé pour dimensionner les parties associées à l'end-flash, l'usine produit 4 MMTPA de GNL

Dans tous les cas, la capacité nominale est telle que la production de GPL et de Gazoline maximise la récupération du GPL. [3]

Tableau I.1. *Composition de gaz d'alimentation*[3]

		BASE		LOURD		LÉGER	
		21°C	38°C	21°C	38°C	21°C	38°C
Débit massique	t/h	887	590	752	621	773	618
Hélium	mol%	0.0700		0.0000		0.1000	
Azote	mol%	1.1799		0.2000		5.5296	
Méthane	mol%	84.1944		83.6144		85.8642	
Ethane	mol%	10.1893		11.9992		5.9996	
Propane	mol%	1.9999		2.7298		0.5000	
Isobutane	mol%	0.1400		0.3000		0.0000	
Iso-Pentane	mol%	0.0200		0.1100		0.0000	
Normal-Pentane	mol%	0.0100		0.1200		0.0000	
Normal-Hexane+	mol%	0.0000		0.1100		0.0000	
Dioxyde de Carbone	mol%	1.9999		0.3000		1.9999	
Eau	ppmv	50 ppm		50 ppm		50 ppm	
Teneur en Mercure	µg/Nm3	50		50		50	

I.2. Description technique de la boucle propane

Le système de réfrigération au propane utilise du propane qui s'évapore à quatre niveaux différents de pression afin de garantir :

- La réfrigération du gaz d'alimentation de l'Unité 15,
- La réfrigération du circuit de Réfrigérant Mixte et du
- Pré-refroidisseur de Gaz des Sécheurs (13-MC01).

Ces niveaux sont désignés respectivement par :

HHP pour très haute pression,

HP pour Haute Pression,

MP pour Moyenne Pression

BP pour Basse Pression.

Le Propane provenant du refoulement du Compresseur de Propane Principal (**16-MJ04**) est refroidi de **63°C** à **49,8°C** dans le Désurchauffeur de Propane Principal (**16-MC11**) ; la

température est contrôlée en sélectionnant le nombre de aéroréfrigérants nécessaires à maintenir la température 5 °C au-dessus du point de rosée afin d'éviter un entraînement de liquide lors du pompage. Le contrôleur agira sur 66% des aéroréfrigérants installés (c.-à-d. $12 \times 66\% = 8$ aéroréfrigérants). Le Propane désurchauffé à **49,8°C** environ est ensuite condensé à **43 °C** dans le Condenseur de Propane Principal (**16-MC09**). Le propane condensé est récupéré dans l'Accumulateur de Propane Principal (**16-MD06**) ; ensuite, le propane liquide est sous-refroidi à **27 °C** dans le Sous-Refroidisseur de Propane Principal (**16-MC10**) avant d'être distribué aux utilisateurs. L'inventaire du circuit du propane principal est fourni par le propane produit au niveau de l'Unité 17, durant la marche normale de l'usine. En cas de contamination du propane par de l'éthane, ce dernier tendra à s'accumuler au niveau de l'Accumulateur de Propane Principal (**16-MD06**) ; en cas d'augmentation de la pression, l'éthane excédent sera éventé vers la torche. Dans la partie supérieure de l'Accumulateur, la Colonne de Tête de l'Accumulateur de Propane Principal (**16-MD10**) et le Condenseur de Tête de l'Accumulateur de Propane Principal (**16-MC12**) sont installés afin de réduire les pertes de propane en permettant de dépressuriser principalement l'éthane.

Le gaz de la Colonne de Tête de l'Accumulateur de Principal (**16-MD10**) est condensé dans le Condenseur de Tête de l'Accumulateur de Propane Principal (**16-MC12**) en utilisant le propane refroidi provenant de la sortie du Sous-refroidisseur de Propane Principal (**16-MC10**). Le propane vaporisé provenant du condenseur est ensuite envoyé au Ballon d'Aspiration de Propane MP Principal (**16-MD03**). [4]

Le propane liquide provenant du Sous-Refroidisseur de Propane Principal (**16-MC10**) est détendu progressivement de façon à fournir 4 niveaux de réfrigération.

Le sous refroidisseur (**16-MC10**) alimente en propane le refroidisseur de déshydratation (**13MC01**). La température du gaz naturel envoyé vers la section de déshydratation est contrôlée en sortie, en se basant sur la pression, afin d'éviter la formation d'hydrates.

Les utilisateurs emploient quatre niveaux de refroidissement au propane :

- Propane Très Haute Pression (pression du Propane : **5,59 bar**)
- Propane Haute Pression (pression du Propane : **2,96 bar**)
- Propane Moyenne Pression (pression du Propane : **1,27 bar**)
- Propane Basse Pression (pression du Propane : **0,35 bar**)

Chaque niveau de refroidissement est atteint par des détentes en cascade du propane liquide. Les différents niveaux de pressions du propane liquide permettent d'abaisser la température des courants **MR** et de **gaz d'alimentation** jusqu'à atteindre une température de **-35 °C** environ.

La réfrigération du fluide MR utilise les quatre niveaux de refroidissement au propane dans les évaporateurs suivants :

- Réfrigérant à Propane **HHP** du MR **16-MC04**
- Réfrigérant à Propane **HP** du MR **16-MC05**
- Réfrigérant à Propane **MP** du MR **16-MC06**
- Réfrigérant à Propane **BP** du MR **16-MC07**

Le circuit de gaz d'alimentation utilise les quatre niveaux de refroidissement au propane dans les évaporateurs suivants :

- Réfrigérant à Propane **HHP** de Gaz Résiduel **15-MC08**
- Réfrigérant à Propane **HP** de Gaz Résiduel **15-MC01**
- Réfrigérant à Propane **MP** de Gaz Résiduel **15-MC02**
- Réfrigérant à Propane **BP** de Gaz Résiduel **15-MC03**

La vaporisation du Propane est due à la diminution de la pression et à la quantité de chaleur latente de vaporisation récupérée à chaque niveau de réfrigération au propane ; les vapeurs de propane obtenus à chacun des niveaux sont renvoyés vers le compresseur de propane principal via les ballons d'aspiration

Ces ballons sont indiqués ci-dessous :

- Ballon aspiration de propane BP principal **16-MD02**.
- Ballon aspiration de propane MP principal **16-MD03**.
- Ballon aspiration de propane HP principal **16-MD04**.
- Ballon aspiration de propane HHP principal **16-MD05**.

Le compresseur de propane principal **16-MJ04** est un compresseur multi étage.

Le gaz provenant de chacun des ballons d'aspiration **HHP/HP/MP/BP (16MD02,16MD03,16MD04,16MD05)** alimente l'étage correspondant du compresseur.

Le ballon de transfert de propane principal (**16-MD07**), d'une capacité de **15,1 m³**, est prévu recevoir le propane drainé provenant du circuit de réfrigération au propane.

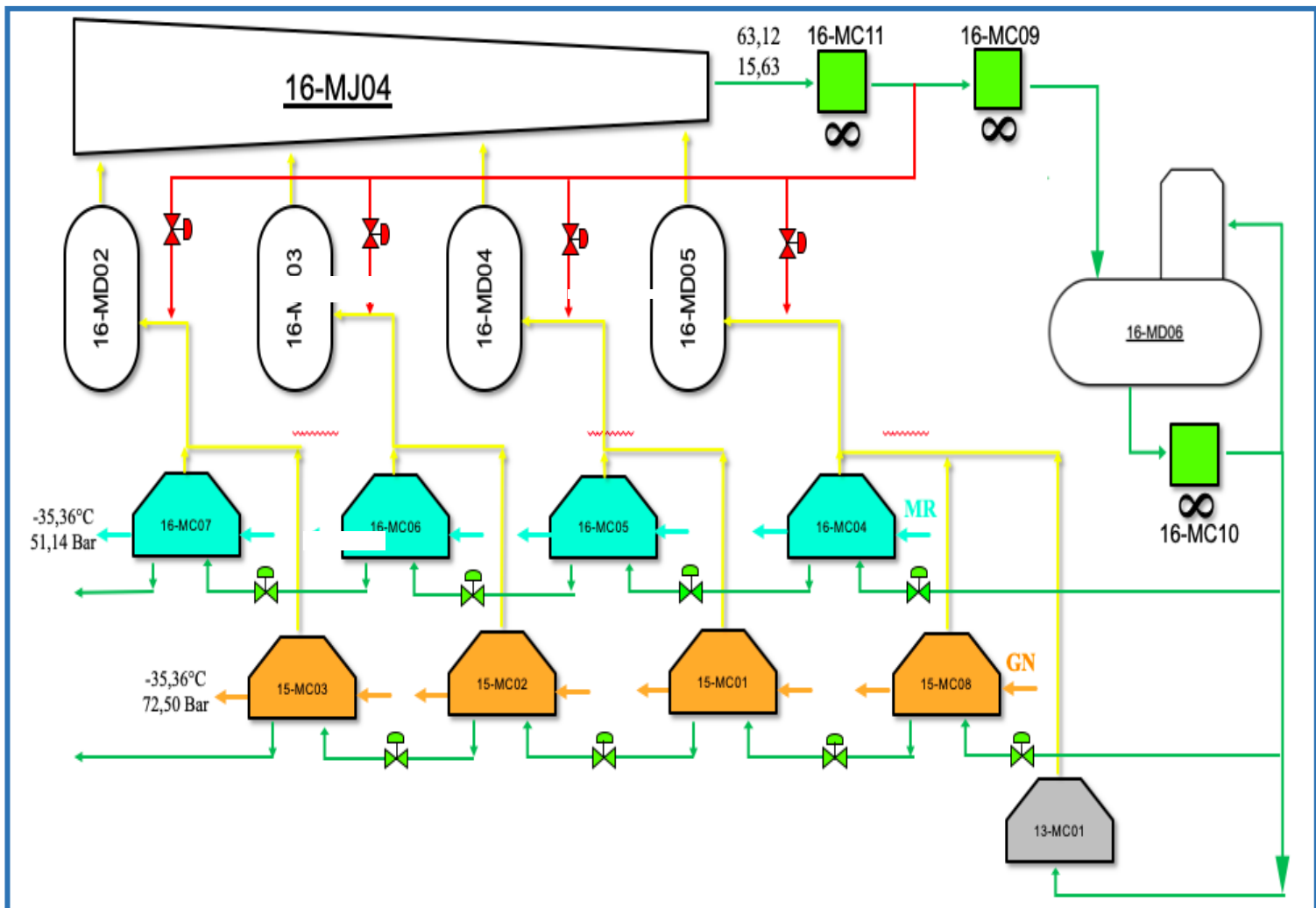


Figure I.2 : Schémas *Simplifié de la boucle propane*. [1]



Chapitre II

Analyse de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers (Cas Réel)

II.1. Problématique

En condition réel d'exploitation, la boucle propane est susceptible d'être contaminée par les légers, notamment le C_1 et le C_2

Cette contamination affecte les performances thermodynamiques du cycle frigorifique.

D'où la problématique suivante :

- Comment la présence de composant léger dans la boucle propane affecte elle la performance frigorifique du train de liquéfaction ?
- Quel est l'impact de cette contamination sur le débit de GNL produit ?
- Quelle sont les stratégies et les recommandations proposer afin de remédier à cette situation ?

II.2. Objectifs

L'objectif principal est de :

1. Fournir une compréhension approfondie du phénomène de contamination,
2. Mesurer les conséquences sur la performance frigorifique du train.
3. Analyser les conséquences sur:
 - La pression de refoulement du compresseur 16-MJ04
 - Les performances des échangeurs (C_3/GN) et (C_3/MR)
 - Les températures d'alimentation de l'échangeur principal
 - La capacité réelle de liquéfaction du train
4. Proposer des stratégies efficaces pour prévenir ou corriger ces dérives.
5. Ce travail apporte ainsi une contribution tangible à l'amélioration de la fiabilité et de l'efficacité énergétique du complexe GL3Z.

II.3. Méthodologie de travail

La méthodologie adoptée repose sur une approche combinant :

- Un diagnostic de cas réel d'exploitation,
- Une étude par simulation du procédé ;

Et cela afin d'évaluer l'impact de la contamination de la boucle par les légers sur les performances du train de liquéfaction et sur les équipements critiques.

Dans un premier temps un diagnostic du fonctionnement réel de la boucle propane est réalisé à partir des données d'exploitation et des analyses de laboratoire effectuées sur la phase vapeur du propane au point de prélèvement 16-S009.

L'examen des compositions mesurées sur différentes périodes permet d'identifier les épisodes de contaminations par les composants légers et d'en caractériser l'évolution. Un cas réel représentatif est ensuite retenu pour évaluer l'influence de cette contamination sur les paramètres opératoire critique.

Dans un second temps une modélisation du procédé est développée à l'aide de simulateur Aspen HYSYS. Le modèle est construit en condition cas design, en utilisant les paramètres d'entrée du procédé. Les résultats générés par le simulateur sont ensuite comparés aux paramètres de sortie du cas design afin de vérifier la fiabilité du logiciel et la pertinence du schéma de simulation retenue. Cette étape permet de s'assurer que le modèle est cohérent du point de vue thermodynamique est représentatif du fonctionnement de la boucle propane.

Une fois cette vérification réalisée, le modèle est utilisé pour conduire une étude paramétrique, basé sur la variation progressive de la fraction des légers dans le propane. Cette démarche permet d'évaluer l'impact de la contamination sur les paramètres critique de fonctionnement notamment :

- La pression de refoulement de Compresseur propane
- La température de sortie de gaz naturel
- La composition de la phase vapeur au niveau du ballon accumulateur 16-S009.

L'effet de la contamination sur les équipements stratégique, en particulier le compresseur propane est également examiné en terme de charge et de stabilité opérationnel.

Enfin, une confrontation des résultats issue de cas réel et de la simulation est réalisée afin de mieux comprendre les mécanismes responsables de la dégradation des performances frigorifique et de la diminution de la production du GNL, et de définir les recommandations opérationnelles adapté.

II.4. Sources de contamination de la boucle propane

La contamination de la boucle propane par les composants légers (principalement C_1 , C_2) entraîne de plusieurs mécanismes opérationnels et procéduraux. Ces sources sont généralement associées aux phases transitoires, aux interconnexions entre unités, ainsi qu'aux conditions non stationnaires des équipements de séparation. L'identification de ces sources est essentielle pour comprendre l'origine des dérives liées aux paramètres critiques du procédé.

II.4.1. Contamination via le seal gaz lors des phases de démarrage

La première source identifiée concerne le seal gaz **alimentant le compresseurs 16MJ-04**, utilisé principalement lors des phases de démarrage de l'unité.

Tableau II.1. Composition du GN, prise d'échantillon 15-S002

Date	Heure	HE	N2	C1	CO2	C2	C3
26-06-2025	08.00	0,083	1,999	89,777		8,136	0,005
26-06-2025	20.00	0,081	1,941	90,468		7,502	0,008
27-06-2025	08.00	0,075	2,117	90,265		7,533	0,01
27-06-2025	20.00	0,082	2,179	90,49		7,244	0,005
28-06-2025	08.00	0,087	2,215	90,72		6,973	0,005
28-06-2025	20.00	0,077	2,576	90,506		6,834	0,007
29-06-2025	08.00	0,084	1,903	90,39		7,619	0,004

Le seal gaz peut être fourni à partir de deux origines :

- **13MD04** : gaz naturel traité,
- **17MC03** : gaz naturel fractionné, acheminés vers le système de gaz d'étanchéité en passant par le **15MC04**.

Lors des phases de démarrage, l'utilisation de ces sources de gaz d'étanchéité, riches en composants légers, peut conduire à une **introduction progressive de légers dans la boucle propane**, en particulier lorsque les conditions opératoires (pressions, températures et équilibrage des joints) ne sont pas encore stabilisées.

II.4.2. Fissures tubulaires dans les shiller

Une autre source de contamination identifiée est liée à un **cas historique de fissures tubulaires** au niveau des refroidisseurs **C3/MR**, survenu en **2022**.

Une telle défectuosité mécanique peut induire un **passage non contrôlé de composants légers** depuis les circuits de gaz naturel ou du mélange réfrigérant (MR) vers la boucle propane, sous l'effet des gradients de pression et de température. Ce type de contamination est particulièrement critique, car il peut évoluer de manière progressive et rester difficilement détectable à court terme, tout en entraînant une **dégradation significative des performances frigorifiques** de la boucle propane.

II.4.3. Appoint de propane depuis l'unité 17

La troisième source identifiée concerne les **opérations d'appoint en propane provenant de l'unité 17**, en particulier lors des phases de démarrage. À ce stade, la colonne de distillation de l'unité 17 peut ne pas avoir encore atteint son **régime stationnaire**, ce qui se traduit par une **pureté insuffisante du produit propane**.

L'introduction de ce propane partiellement épuré dans la boucle propane peut ainsi conduire à un **enrichissement progressif en composants légers**, augmentant ainsi le risque de contamination. Cette situation est d'autant plus critique que ces nominations sont généralement réalisées dans des conditions transitoires, où le contrôle de la composition est moins rigoureux qu'en régime stabilisé.

II.5. Analyse d'un cas réel de contamination

Dans un premier temps, les tableaux d'analyse de composition sont présentés afin de mettre en évidence les cas réels de contamination de la boucle propane.

A partir de ces résultats, une date représentative est retenue pour analyser l'impact de cette contamination sur les paramètres réels d'exploitation.

Enfin, les analyses de composition correspond à cette date sont présentées à cette date sont présentées avant et après stabilisation afin d'expliquer les dérives observées et confirmer le retour à un fonctionnement normal de la boucle.

II.5.1. Analyse de composition dans le ballon accumulateur (16-MD06) prélèvement au point 16-S009

Le tableau regroupe les analyses en phase vapeur au point 16-S009, sur différentes dates. Ces analyses mettent en évidence la présence et l'évolution des composants légers et permettent de caractériser le niveau de contamination de la boucle propane.

Tableau II.2. Composition des vapeurs dans le ballon accumulateur 16-MD06, prise d'échantillon 16-S009.

	CO ₂	He	N ₂	C ₁	C ₂	C ₃
06/04/2026	0,0017	0,004	0,215	6,414	93,145	0,205
11/02/2026	0,002	0	0,028	0,028	94,557	5,385
18/02/2026	0	0,021	1,034	70,571	17,128	11,246
16/02/2026	0,0058	0,008	0,189	30,723	67,03	1,985
10/02/2026	0	0,268	4,092	72,045	10,693	12,902
13/02/2026	0	0,127	2,935	70,159	13,842	12,937
01/01/1900	0	0,058	2,099	63,551	13,955	20,337
21/02/2026	0	0	2,157	67,147	19,05	11,588
20/02/2026	0	0,014	1,336	69,802	16,012	12,836

Ces résultats confirment l'existence d'épisodes réels de contamination. À partir de ces épisodes de contamination identifiés, la date du 18/02/2026 a été retenue comme date représentatif pour analyser l'impact réel sur le fonctionnement du train.

II.5.2. Évolution des paramètres réels d'exploitation en situation de contamination de la boucle propane (Cas du 18/02/2026).

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous correspondent aux effets de la contamination de la boucle propane sur des paramètres clés, enregistrées le 18/02/2026

Tableau II.3. Évolution des paramètres réels d'exploitation en situation de contamination de la boucle propane (Cas du 18/02/2026).

Heure	P _{ref} (Bar)	T _{GN} (C°)	T _{MR} (C°)	Production (m ³ /h)	%OP. PV0115
07:20:54	16,604	-36,507	-36,376	851,241	0
07:34:39	16,625	-35,656	-35,386	850,998	20
07:36:26	16,877	-35,686	-35,559	850,449	30
07:50:59	17,162	-35,781	-35,639	850,830	50
07:56:57	17,318	-35,654	-35,501	850,780	60
08:29:25	17,966	-34,530	-34,581	850,165	70
09:48:17	19,201	-31,757	-31,873	802,015	100
09:50:53	18,801	-32,551	-32,674	801,727	100
09:53:52	18,469	-32,860	-32,880	791,779	100
09:59:15	18,115	-33,475	-33,583	810,875	100
10:15:35	17,201	-35,310	-34,129	815,089	100
10:35:30	16,877	-37,876	-35,743	824,541	0

Le tableau montre que la situation de contamination se traduit par :

- Une augmentation de la pression de refoulement du compresseur 16-MJ04 ;
- Une élévation des températures du gaz naturel et du mélange réfrigérant ;
- Une réduction temporaire de la charge de la production ;

Avant stabilisation par torchage

Les données du tableau (Tableau II.3) sont présentées ci-après sous forme de courbes afin de mieux visualiser l'évolution des paramètres et leurs interactions lors de l'épisode de contamination.

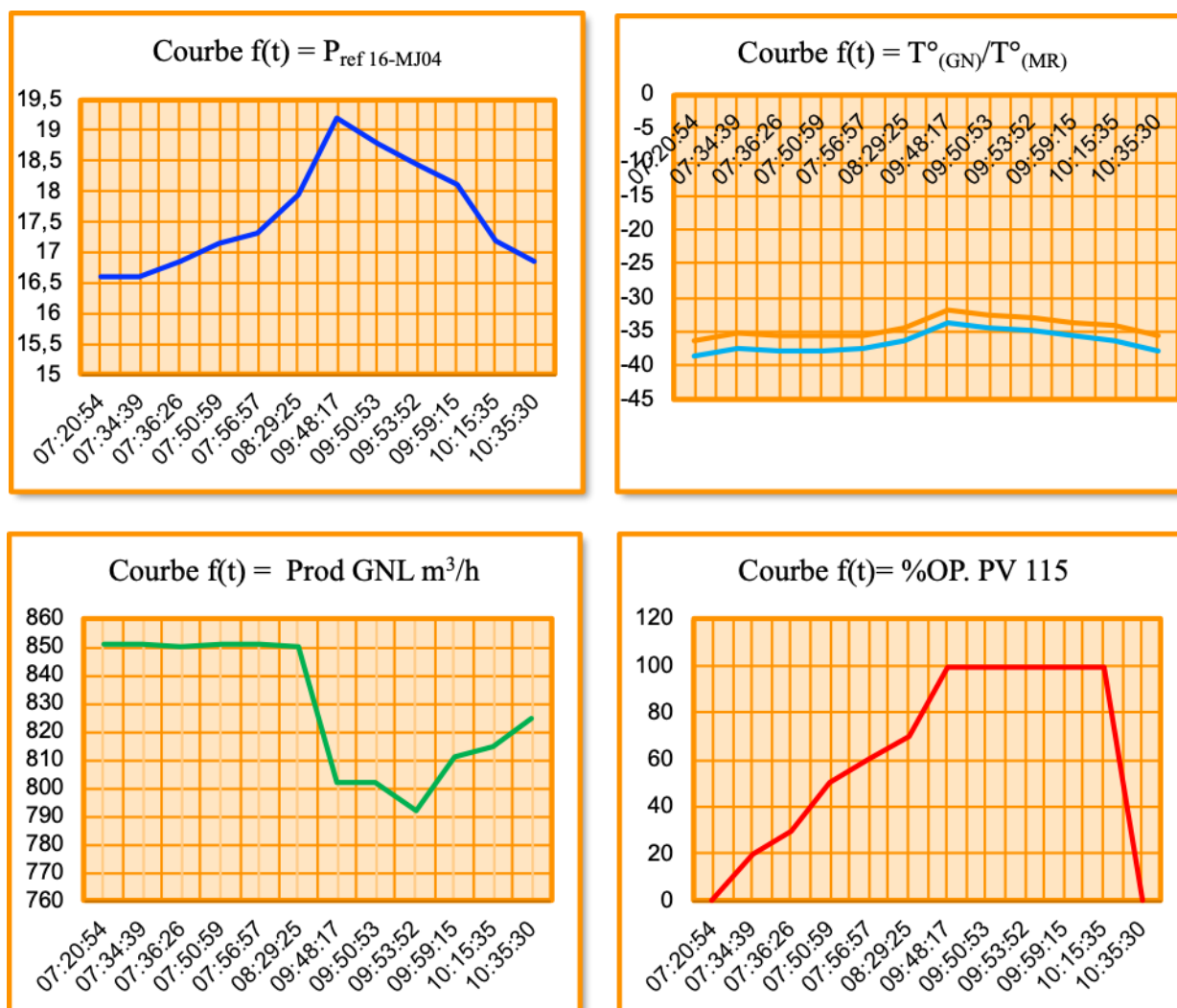


Figure II.1 : Évolution des paramètres : $P_{ref16-MJ04}$, T_{GN} , T_{MR} Production du GNL, $\%OP(PV_{115})$ lors d'un épisode de contamination.

La figure II.1. Présente l'évolution temporelle de quatre paramètres clés du procédé lors d'un épisode de contamination de la boucle propane : la pression de refoulement du compresseur propane 16-MJ04, la température de sortie du gaz naturel et du mélange MR, la charge du train de liquéfaction, ainsi que le débit de torchage. Dans une première phase, une augmentation progressive de la pression de refoulement est observée. Cette élévation s'accompagne simultanément d'une hausse des températures de sortie du gaz naturel et du MR, traduisant une dégradation des performances frigorifiques de la boucle propane ce comportement est caractéristique d'une contamination du propane par les légers, qui modifie les propriétés thermodynamiques du fluide frigorigène et réduit son efficacité de refroidissement. Face à cette

dérive des paramètres critiques et afin de maintenir le fonctionnement du compresseur dans son domaine opérationnel sécurisé une réduction de la charge du train de liquéfaction est appliquée. Cette action vise à limiter l'augmentation de la pression de refoulement et à éviter un déclenchement de l'équipement. En parallèle, le torchage de la phase vapeur est initié afin d'évacuer les composants légers accumulés dans la boucle propane et de restaurer progressivement la qualité du fluide frigorigère. Dans la phase suivante, l'augmentation du débit de torchage entraîne une diminution progressive de la fraction des légers dans la boucle. Enfin, une fois les paramètres thermodynamiques stabilisés et la boucle propane revenue à un état proche des conditions normales d'exploitation, la charge du train de liquéfaction est ré-augmentée progressivement. Le rétablissement simultané de la pression, des températures et de la charge confirme le lien direct entre la contamination de la boucle propane, la dégradation des performances frigorigères et la diminution de la production de GNL. Les analyses de composition au ballon accumulateur au point 16-S009 correspondantes à ce cas sont présentées avant et après stabilisation afin d'expliquer les dérives observées et confirmer le retour à un fonctionnement normal de la boucle.

Tableau II.3. Les analyses de composition au ballon accumulateur au point 16-S009 avant et après stabilisation de la boucle.

	CO2	He	N2	C1	C2	C3
19/02/2026	0,0058	0,008	0,189	30,723	67,03	1,985
19/02/2026	0	0,043	0,621	8,428	1,481	89,427
19/02/2026	0	0	0,32	0,098	0,074	99,796



Chapitre III

Simulation et Résultat

La simulation numérique constitue un outil essentiel pour **reproduire le comportement réel des procédés industriels**, analyser leur fonctionnement et anticiper les dérives susceptibles d'affecter leurs performances. Dans ce cadre, la simulation de la boucle propane a été mise en œuvre à l'aide du logiciel **Aspen HYSYS** dans le but de **recréer au plus près le fonctionnement réel de l'installation**, d'identifier les mécanismes physiques gouvernant son comportement et d'évaluer de manière quantitative l'impact de la contamination par les composants légers. [5]

Afin de garantir la crédibilité des résultats issus de la simulation, le travail a été structuré en deux phases complémentaires :

La première phase consiste à s'assurer de la capacité du simulateur à représenter fidèlement le comportement de la boucle propane avant d'entamer l'étude de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers sur la production du GNL, pour ce faire on commence d'abord par la réalisation de la **simulation du cas de base (cas design à 21 °C)** de la boucle propane, en s'appuyant sur les données de l'étude de conception initiale et en définissant la charge maximale de gaz naturel traitable par l'usine. Les résultats générés par Aspen HYSYS ont été comparés aux paramètres de sortie du cas design ainsi qu'aux valeurs issues du système de contrôle (DCS) en conditions de fonctionnement réel. Cette étape permet de **valider le schéma de procédé et le modèle thermodynamique retenus**, et de Une fois cette validation établie .

La deuxième phase est consacrée à l'**analyse de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers**. Une analyse paramétrique a été menée en faisant varier progressivement, par ordre croissant, la composition des composants légers dans le propane circulant dans la boucle. Cette approche permet d'évaluer l'effet de la contamination sur les **paramètres critiques du procédé**, notamment la pression de refoulement du compresseur 16MJ04, la température de sortie du gaz naturel, la température du mélange MR ainsi que la composition vapeur à des points clés du procédé. Les résultats obtenus constituent une base solide pour **quantifier la dégradation des performances frigorifiques** et mieux comprendre la sensibilité de la boucle propane aux variations de composition.

III.1. Présentation de l'outil de simulation

Le logiciel ASPEN-Plus a initialement été développé à Massachusetts Institut of Technology (MIT) dans le cadre d'une recherche menée sous l'égide du Département of Energy Américain (1975-1980). Le projet a ensuite été repris par la société ASPEN Technologie (qui regroupe nombre d'anciens chercheurs et d'enseignant du MIT), qui développent et commercialisent le logiciel depuis 1981.

Aspen est construit autour d'une architecture séquentielle-modulaire. Une opération unitaire est représentée par sous-programme auquel on fournit les variables des débits d'entrée et les paramètres de fonctionnement, et qui renvoie les variables des débits de sortie. [6]

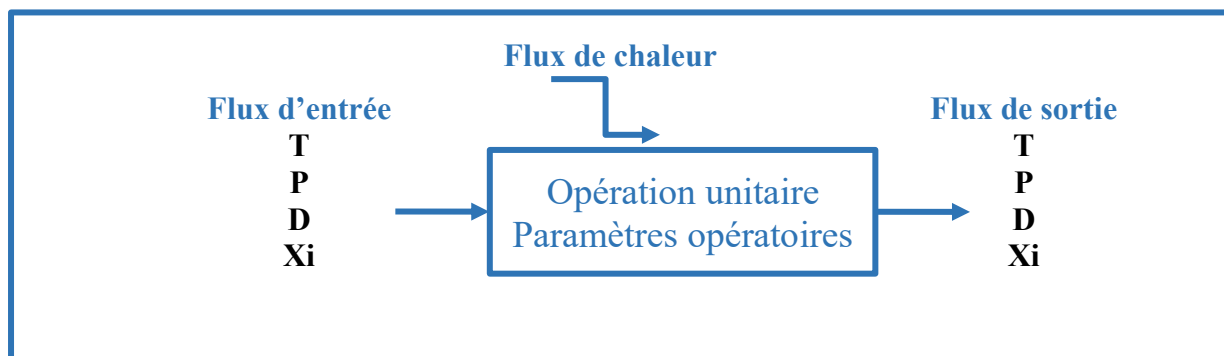


Figure III.1. Représentation d'un module d'opération unitaire

Dans une approche séquentielle-modulaire, les recyclages sont convergés itérativement : on définit un courant « coupé », et on établit un processus de convergence sur les variables de ce courant coupé, en calculant de façon itérative les opérations de la boucle de recyclage.

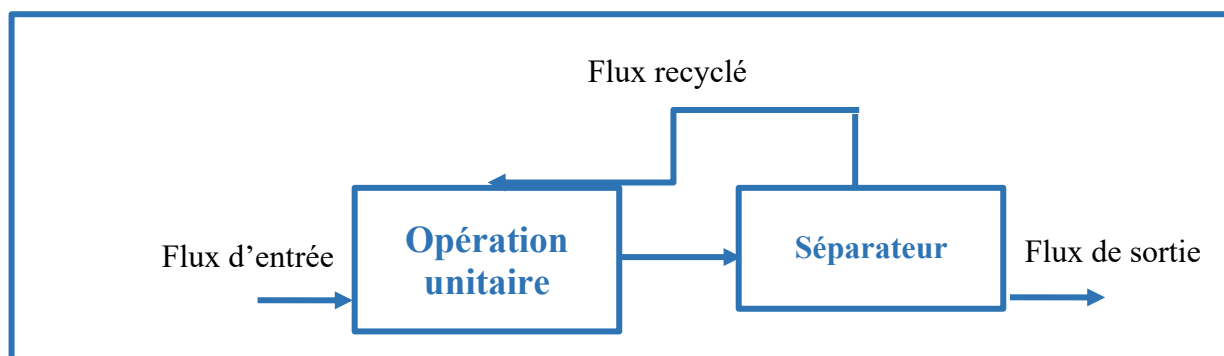


Figure III.2. Représentation schématique des boucles de recyclage

Un système de calcul donne les propriétés physiques comme fonctions des variables d'état (température, pression, composition), à partir de modèles d'origine empirique ou moléculaire, en utilisant des paramètres stockés dans des banques de données (cordonnées critiques, paramètres de corrélation (Antoine), ...). ASPEN fournit un grand nombre de « méthodes » de calculs pour ces propriétés physiques, collections de routines de calcul des propriétés physique qui sont directement utilisées par les modèles d'opérations unitaires. Le choix raisonné des modèles et corrélations adaptées au calcul des propriétés thermodynamiques et de transport pour un type de mélange donné est souvent un domaine de spécialiste.

III.2. Choix du modèle thermodynamique

La simulation représente de façon cohérente l'ensemble des sections de l'unité 16 « Boucle propane ». L'objectif était de recréer le comportement de l'unité.

Après plusieurs itérations on constate que le modèle le plus convenable pour le processus de simulation est le modèle **PINGROBINSON**.

Et avant d'entamer l'étude de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers, nous avons jugé utile de procéder en premier à la validation du modèle thermodynamique qui sera utilisé pour effectuer les calculs de simulation. Cette validation consistera à la comparaison des résultats des calculs générés par le logiciel Aspen HYSYS et ceux fournis par l'étude de conception initiale (design). [6]

III.3. Simulation cas de base 21°C

III.3.1. Paramètres d'entrée du logiciel HYSYS cas de base 21°C

III.3.1.1. Compresseur 16MJ-04

Tableau III.1. Données principales du compresseur de propane principal (16-MJ04)

Condition de fonctionnement				
Étage de compresseur	1st	2 nd	3rd	4th
Débit massique	321584	779936	1387620	2056104
Conditions d'aspiration				
Pression (barg)	1,193	2,107	3,801	6,419
Températures (°C)	-35,85	-18,031	1,249	21,19
Conditions de refoulement				
Pression (barg)	2,107	3,801	6,419	15,721
Températures (°C)	-11,69	7,01	25,88	63,82

III.3.1.2. Échangeur C₃/MR

Tableau III.2. Données principales du 16-MC04

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	26,45			
TEMA TYPE	BK			
	TUBE		CALANDRE	
PRESSION DE CALCUL (barg)	75		14,5/FV	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-19/65		-45/65	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	60,53	60,13	6,59	6,59
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	30	13,73	11,23	11,23

Tableau III.3. Données principales du 16-MC05

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	38,41			
TEMA TYPE	KM			
	TUBE		CALANDRE	
PRESSION DE CALCUL (barg)	75		14,5/FV	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-22/65		-45/65	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	60,13	59,73	2,95	2,95
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	13,73	-3,25	-5,75	-5,75

Tableau III.4. Données principales du 16-MC06

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	32,7			
TEMA TYPE	BK			
	TUBE		CALANDRE	
PRESSION DE CALCUL (barg)	75		14,5/FV	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-71/65		-45/65	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	59,73	59,33	1,26	1,26
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	-3,25	-19,5	-22	-22

Tableau III.5. Données principales du 16-MC07

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	24,84			
TEMA TYPE	KM			
	TUBE		CALANDRE	
PRESSION DE CALCUL (barg)	75		14,5/FV	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-75/65		-45/65	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	59,33	58,93	0,34	0,34
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	-19,50	-32,79	-35,29	-35,29

Tableau III.6. Données principales du 15-MC020

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	11,06			
Type	BK			
	TUBE		CALANDRE	
PRESSION DE CALCUL (barg)	82		14,5/FV	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-45/65		-45/65	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	72,09	71,79	1,26	1,26
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	-3,25	-19,5	-22,0	-22,0

Tableau III.7. Données principales du 15-MC03

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	12,33			
TYPE	KM			
	TUBE		CALANDRE	
PRESSION DE CALCUL (barg)	82		14,5/FV	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-45/65		-45/65	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	71,79	71,49	0,34	0,34
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	-19,50	-32,79	-35,29	-35,29

III.3.1.4. Désurchauffeur de propane (16-MC11)

Tableau III.8. Données principales du 16-MC11

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	53,11	
PRESSION DE CALCUL (barg)	26	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-45/165	
	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	14,66	14,31
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	63,12	49,78

III.3.1.5. Condenseur de propane (16-MC09)

Tableau III.9. Données principales du 16-MC09

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	181,06	
PRESSION DE CALCUL (barg)	26	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-45/130	
	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	14,26	13,91
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	49,8	43

III.3.1.6. Sous refroidisseur (16-MC10)

Tableau III.10. Données principales du 16-MC10

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	29,1	
PRESSION DE CALCUL (barg)	26	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-45/85	
	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	12,37	11,87
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	39	27

III.3.1.7. Condenseur de tête de l'accumulateur de propane (16-MC11)

Tableau III.11. Données principales du 16-MC12

PUISSANCE DE CALCUL (MW)	0,86			
	TUBE		CALANDRE	
PRESSION DE CALCUL (barg)	26		14,5/FV	
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-45/85		-45/65	
	ENTREE	SORTIE	ENTREE	SORTIE
PRESSION OPERATOIRE (barg)	13,42	13,32	1,47	1,37
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	38,3	33,8	-19,9	-20,9

III.3.1.8. Condenseur de tête de l'accumulateur de propane (16-MC11)

Tableau III.12. Données principales du 16-MD06

ID (mm) x TL-TL (mm)	5 300 X 13 250
PRESSION DE CALCUL (barg)	26
TEMPERATURE DE CALCUL MIN./MAX. (°C)	-45/85
PRESSION OPERATOIRE (barg)	13,67
TEMPERATURE OPERATOIRE (°C)	43

III.3.2. Schéma de simulation

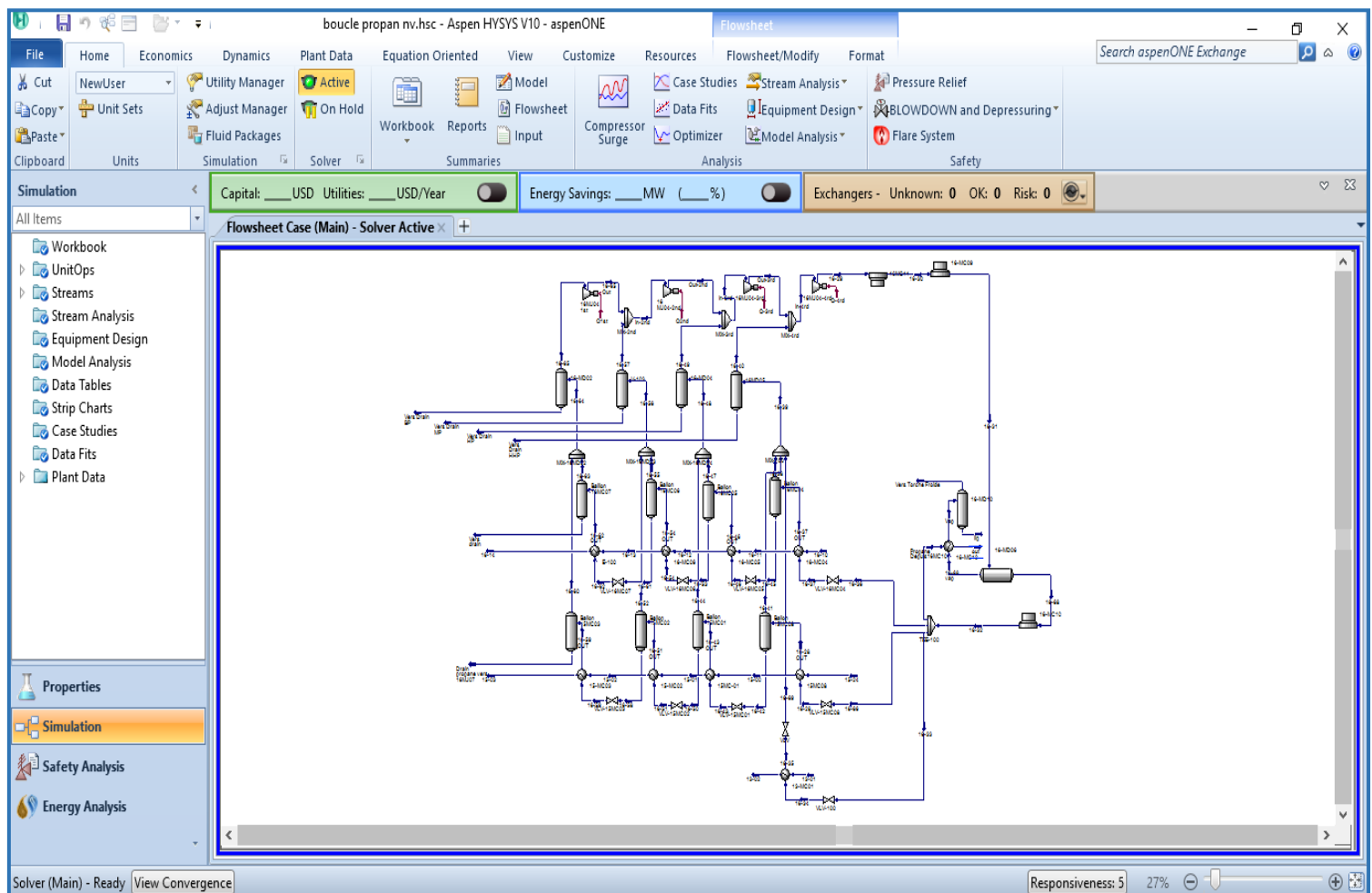


Figure III.3. Schéma de simulation de la boucle propane par Aspen HYSYS.5

III.3. 3. Comparaison entre les paramètres de sortie cas de base 21°C et les valeurs générés par Aspen Hysys.

Tableau III.16. Comparaison entre les valeurs générées par HYSYS et paramètre de sortie cas désigne 21°C

	Valeurs générées par HYSYS	Paramètre de sortie cas design	%Erreur
P _{ref} 16-MJ04 (Bar)	15,76	15,67	0,50%
T _{ref} 16-MJ04 (°C)	63,40	63,12	0,40%
T _{GN} sortie de (°C)	-35,55	-35,36	0,50%
P _{GN} sortie de (Bar)	72,50	72,50	0,00%
Débit _{GN} (Kg/h)	628000	627929	0,01%
T _{MR} sortie de (°C)	-35,36	-35,36	0,00%
P _{MR} sortie de (Bar)	51,14	51,14	0,00%
Débit _{MR} (Kg/h)	45389,1	45374,1	0,03%

En comparant les valeurs générées par Aspen HYSYS à ce du paramètre de sortie cas design on constate que l'erreur est minime donc la simulation est validée et on peut entamer l'analyse de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers.

III.4. Analyse de l'impact de la contamination de la boucle propane par les légers par simulation

III.4.1. Effet de la contamination de la boucle propane sur la pression du refoulement 16-MJ04

La figure suivante présente l'évolution de la **pression de refoulement du compresseur propane** en fonction de l'augmentation progressive de la **teneur en composants légers dans la boucle propane**, telle qu'obtenue par simulation. Cette courbe permet de mettre en évidence l'influence directe de la contamination du fluide frigorigère sur le comportement du compresseur et d'évaluer la sensibilité de ce paramètre critique aux variations de composition du propane.

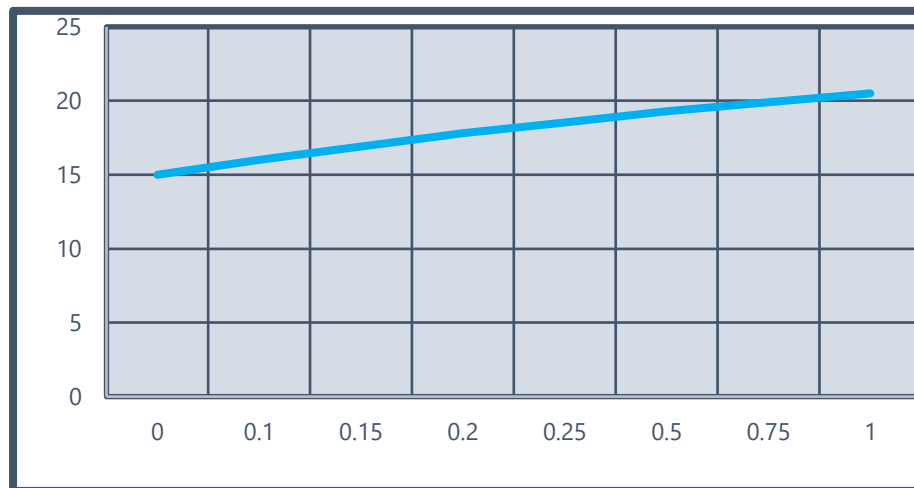


Figure III.4. *Effet de la contamination de la boucle propane sur la pression du refoulement du compresseur 16-MJ04 en fonction du % des légers dans le propane*

Les résultats de la simulation montrent une augmentation progressive de la pression de refoulement du compresseur propane avec l'élévation du taux de contamination de la boucle propane par les légers. Cette évolution met en évidence une relation croissante entre la fraction des composants légers dans le propane et la pression de refoulement, traduisant une dépendance directe du comportement du compresseur à la composition du fluide frigorigère. La présence accrue des légers, tels que le méthane et l'éthane, entraîne une augmentation de la pression de vapeur du mélange propane, ce qui modifie les conditions thermodynamiques de compression. En conséquence, le compresseur est soumis à un rapport de compression plus élevé afin d'atteindre les conditions souhaitées, ce qui se traduit par une hausse de la pression de refoulement. D'un point de vue opérationnel, cette augmentation de la pression de refoulement constitue une contrainte critique pour le compresseur propane, rapprochant son point de fonctionnement des limites admissibles en termes de sécurité et de fiabilité. Au-delà d'un certain niveau de contamination, la pente de la courbe tend à s'accroître, indiquant une sensibilité accrue du système et un risque élevé de déclenchement automatique de l'équipement. Cette situation impose alors des actions correctives telles que la réduction de charge du train de liquéfaction et/ou le torchage de la phase vapeur afin de préserver l'intégrité des équipements. Les tendances observées à travers cette simulation sont en cohérence avec les comportements relevés en exploitation réelle, confirmant que la contamination de la boucle propane par les légers est un facteur déterminant dans la dégradation des performances du cycle frigorigère et dans la limitation de la capacité de production de GNL.

III.4.2. Effet de la contamination de la boucle propane sur la température de sortie du GN

La figure suivante illustre l'évolution de la **température du gaz naturel** en fonction de l'augmentation progressive de la **teneur en composants légers dans la boucle propane**, telle qu'obtenue par simulation.

$$\text{Courbe } f(\% \text{légers}) = T_{\text{GN}}$$



Figure III.5. Effet de la contamination de la boucle propane sur la température de sortie du GN en fonction du % des légers dans le propane.

Cette représentation permet d'apprécier l'influence directe de la contamination du propane sur les conditions thermiques du procédé, en mettant en évidence la sensibilité de la température du gaz naturel aux variations de composition du fluide de réfrigération. Les résultats de la simulation mettent en évidence une **augmentation progressive de la température de sortie du gaz naturel** avec l'élévation du taux de contamination de la boucle propane par les légers. Cette évolution traduit une **dégradation graduelle des performances frigorifiques** de la boucle propane lorsque la composition du fluide de réfrigération s'éloigne de ses spécifications nominales. L'enrichissement du propane en composants légers modifie les propriétés thermodynamiques du mélange, en particulier sa capacité à absorber la chaleur au niveau des échangeurs de pré-réfrigération. La présence des légers réduit l'efficacité du transfert thermique, ce qui se traduit par une **diminution du gradient thermique disponible** entre le propane et le gaz naturel. En conséquence, le gaz naturel quitte les échangeurs à une température plus élevée. La relation observée entre le taux de contamination et la température de sortie du gaz naturel est **croissante et continue**, indiquant une sensibilité directe de la température aux variations de composition du propane. Au-delà d'un certain niveau de contamination, l'augmentation de la

température devient plus marquée, traduisant une **perte significative de la capacité frigorifique** du cycle propane.

D'un point de vue opérationnel, l'élévation de la température de sortie du gaz naturel constitue une **contrainte majeure pour le procédé de liquéfaction**. Afin de maintenir la stabilité globale du train et d'éviter le déclenchement des équipements, des actions correctives telles que la réduction de charge devient nécessaire, ce qui se traduit par une **diminution de la production de GNL**. Les tendances mises en évidence par la simulation sont en **cohérence avec les observations du cas réel**, confirmant que la contamination de la boucle propane par les légers affecte directement le niveau de pré-refroidissement et limite les performances globales du train de liquéfaction.

III.4.3. Effet de la contamination du propane liquide sur la composition VAP - point 16-S009

La courbe ci-dessous illustre l'évolution de la fraction des légers dans la phase vapeur prélevée au point 16-009 en fonction de leur teneur dans le propane liquide circulant dans la boucle. La simulation met en évidence une corrélation directe entre la contamination du propane liquide et l'enrichissement de la phase vapeur en composants légers.

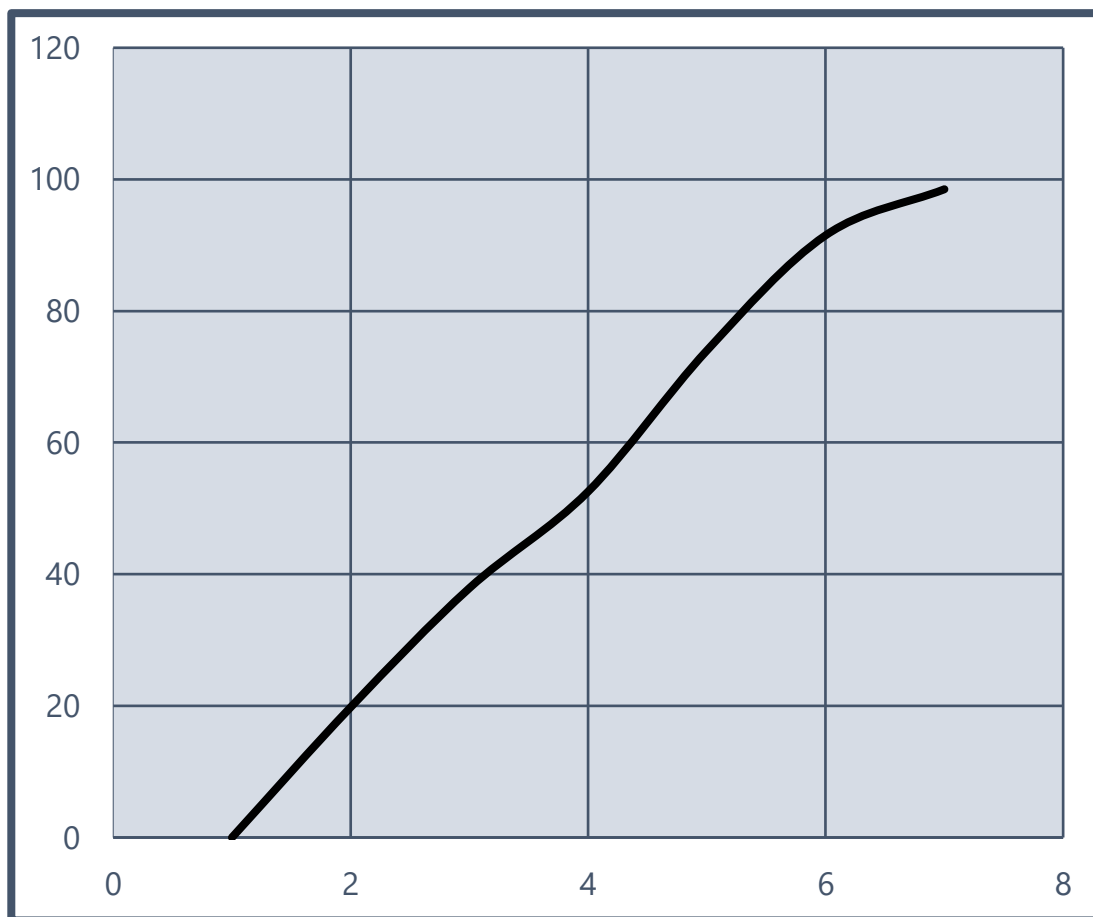


Figure III.6. Effet de la contamination du propane liquide par les légers sur la composition VAP au ballon accumulateur 16-MD06 - prise d'échantillon 16-S009

Cette courbe permet de relier directement ce que nous observons sur les analyses vapeurs terrain à l'état réel du propane liquide dans la boucle. Elle montre que même une faible augmentation de la teneur en composants légers dans le propane liquide se traduit par une augmentation significative de leur fraction dans la phase vapeur, ce qui explique la rapidité de détection de la contamination au point 16-009.

III.5. Recommandations

III.5.1. Utilisation du propane vapeur issu du refoulement du compresseur 17MJ08 comme seal gaz

Il est recommandé d'utiliser le propane vapeur provenant du refoulement du compresseur 17-MJ08 comme gaz d'étanchéité (seal gas), en remplacement du seal gas actuellement fourni par l'unité 13 et 17. Cette recommandation tient compte du fait que le compresseur 17-MJ08 est mis en service en premier lors des phases de démarrage, ce qui garantit la disponibilité d'un propane vapeur pur. Cette configuration permet de réduire significativement le risque

d'introduction des légers dans la boucle propane et par conséquent, de limiter les phénomènes de contamination.

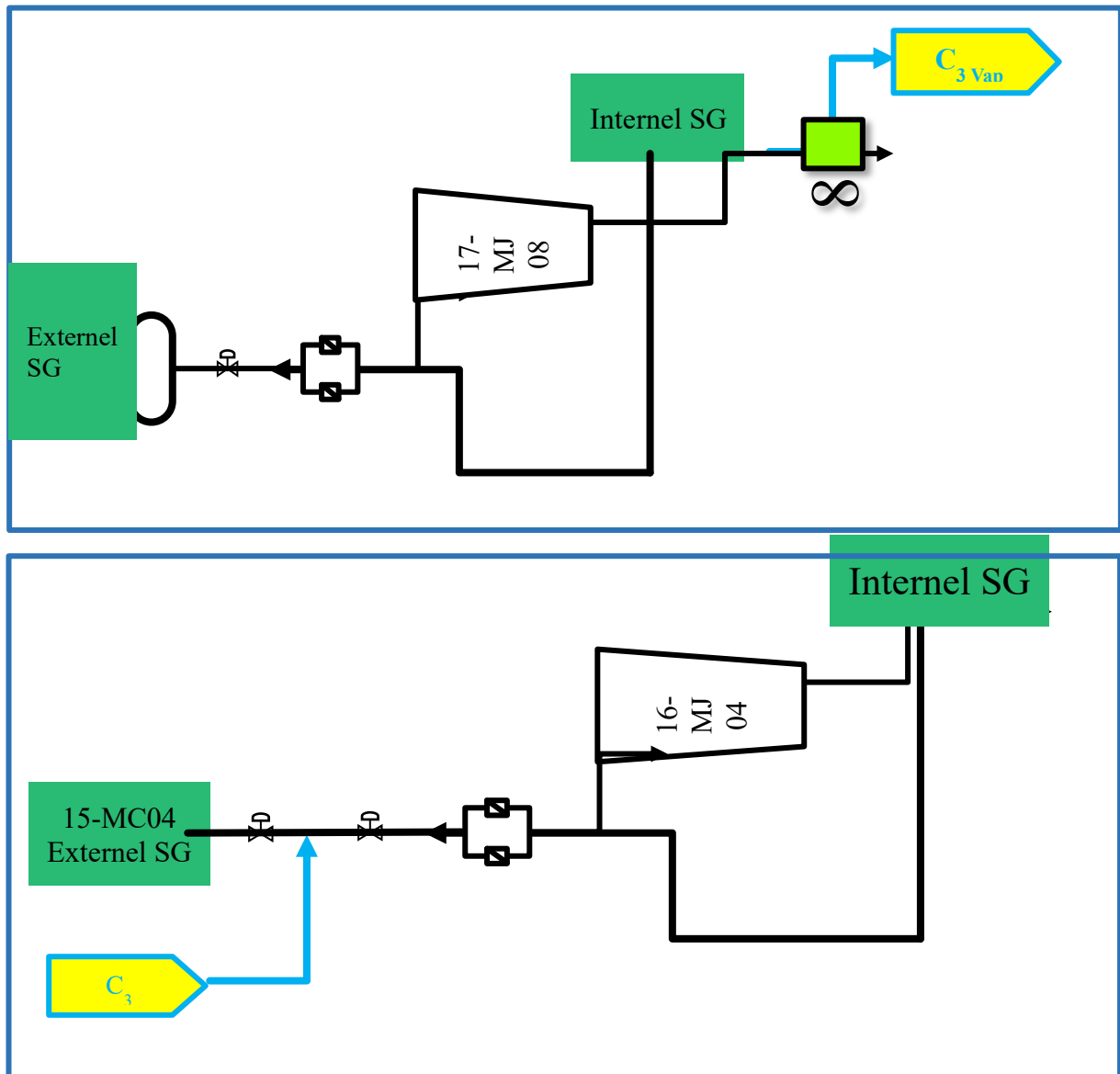


Figure III.7. Shéma Utilisation du propane vapeur issu du refoulement du compresseur 17-MJ08 comme seal gaz

III.5.2. Exploitation du heater 18MC04 pour la génération de propane vapeur destiné au seal gas

Il est recommandé de mettre en exploitation le heater 18MC04, actuellement non exploité, afin d'assurer la vaporisation contrôlée du propane liquide et son utilisation comme gaz d'étanchéité.

Cette solution permet de garantir une qualité maîtrisée du propane vapeur, et de sécuriser l'alimentation en seal gas tout en éliminant le risque de contamination de la boucle propane.

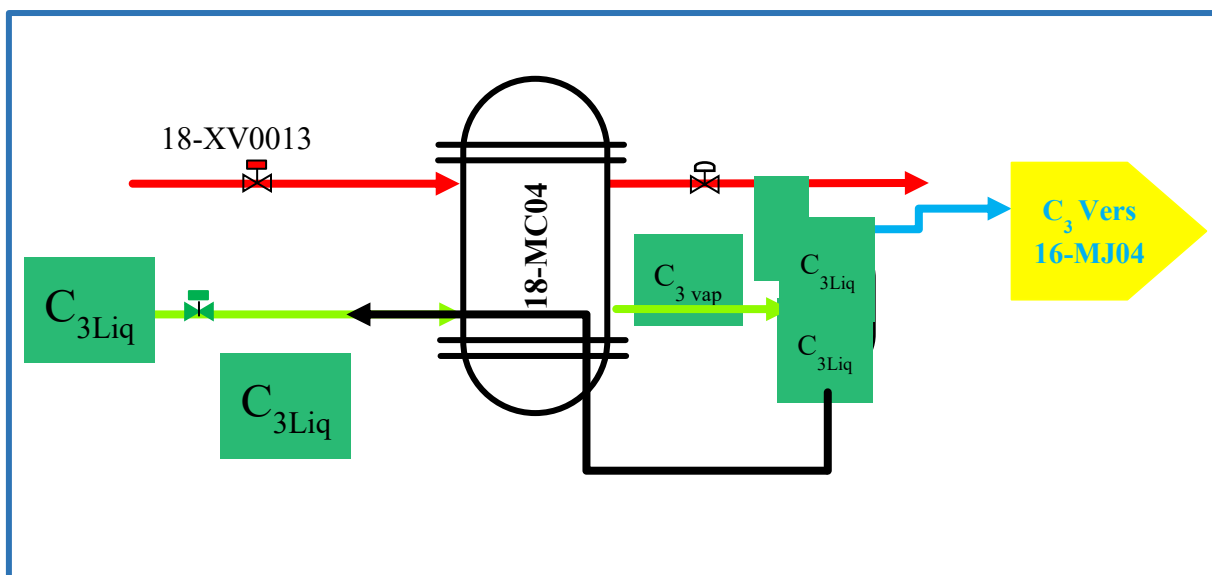


Figure III.8. Shéma exploitation du heater 18MC05 pour la génération de propane vapeur destiné au seal gas.

III.5.3. Éviter l'appoint en propane en provenance de l'unité 17 en phases transitoires

Il est recommandé d'éviter l'alimentation de la boucle propane par un appoint provenant de l'unité 17, en particulier lors des phases transitoires de fonctionnement lorsque la colonne de distillation n'a pas encore atteint son régime permanent.

En effet, durant ces conditions, la séparation n'est pas totalement établie et le propane produit peut présenter une pureté insuffisante, augmentant ainsi le risque d'introduction des légers notamment le C₂ dans la boucle propane.

III.6. Étude de faisabilité des recommandations proposées

Les recommandations formulées à l'issue de l'analyse du cas réel et de l'étude par simulation visent principalement à **réduire le risque de contamination de la boucle propane par les composants légers**, tout en garantissant la continuité et la sûreté de fonctionnement de l'unité. Leur faisabilité a été évaluée selon les aspects **technique, opérationnel et sécuritaire**, sans nécessiter de modifications majeures de l'installation existante.

III.6.1. Faisabilité technique et opérationnelle

La première recommandation consiste à **utiliser le propane vapeur issu du refoulement du compresseur de l'unité 17 (17MJ08)** comme (seal gas), en remplacement du gaz actuellement prélevé sur l'unité 13. Cette solution est techniquement faisable, dans la mesure où le propane vapeur disponible au refoulement du compresseur est pur et présente **une composition stable**, notamment lors des phases de démarrage. De plus, l'unité 17 étant la première à démarrer, cette configuration permet de disposer rapidement d'un propane conforme, réduisant ainsi le risque d'introduction de légers dans la boucle. La deuxième recommandation concerne la **mise en service du réchauffeur 18MC04**, actuellement non exploité, afin de vaporiser le propane liquide et de l'utiliser comme source de seal gas. D'un point de vue technique, cette option est pleinement réalisable puisque l'équipement est déjà installé. Son utilisation permettrait de **maîtriser l'état thermodynamique du propane**, d'assurer une vaporisation complète et d'éliminer le risque d'entraînement de phase liquide, contribuant ainsi à la stabilité et à la fiabilité du système de SEAL GAZ.

Enfin, la troisième recommandation vise à **éviter tout appoint en propane provenant de l'unité 17**, en particulier lors des phases transitoires, tant que la colonne de distillation propane n'a pas atteint son **régime stationnaire**. Cette mesure est techniquement simple à mettre en œuvre, et elle est déjà appliquée puisqu'elle repose essentiellement sur une **restriction opérationnelle** et sur une meilleure coordination entre les unités, sans modification matérielle du procédé.

III.6.2. Faisabilité sécuritaire et économique

Du point de vue de la sécurité, les recommandations vont dans le sens d'une **réduction des risques opérationnels**, en limitant la contamination de la boucle propane et les dérives de pression et de température associées. L'utilisation d'équipements existants, notamment le

heater 18MC04, permet de **minimiser les investissements supplémentaires**, rendant ces solutions économiquement attractives.

En outre, la réduction de la contamination contribue indirectement à **limiter les opérations de torchage**, à stabiliser les conditions de fonctionnement et à préserver les équipements critiques tels que les compresseurs, ce qui se traduit par des gains en fiabilité et en coûts de maintenance. L'analyse de faisabilité montre que les recommandations proposées sont **techniquement réalisables, opérationnellement applicables et économiquement pertinentes**. Elles reposent principalement sur l'optimisation de ressources existantes et sur l'amélioration des pratiques d'exploitation, sans nécessiter de modifications lourdes du procédé. Leur mise en œuvre permettrait de réduire significativement le risque de contamination de la boucle propane par les légers et d'améliorer durablement les performances et la stabilité de l'unité.

Conclusion

Générale

Conclusion

Ce mémoire a été consacrée à l'étude de la contamination de la boucle propane par les hydrocarbures légers et à son impact sur les performances du procédé de pré-refroidissement du gaz naturel dans une unité de liquéfaction de GNL. À travers l'analyse d'un **cas réel de contamination**, complétée par une **étude par simulation sous Aspen HYSYS**, ce travail a permis de mieux comprendre les mécanismes à l'origine des dérives opérationnelles liées sur le terrain.

L'analyse du cas réel, basée sur les résultats des analyses de laboratoire et l'évolution des paramètres critiques de fonctionnement, a mis en évidence une corrélation directe entre l'augmentation de la fraction des composants légers dans la boucle propane et la dégradation des performances thermodynamiques du cycle. Cette dégradation se manifeste principalement par une élévation de la température du gaz naturel en sortie de pré-refroidissement, une augmentation de la pression de refoulement des compresseurs propane, ainsi qu'une instabilité globale du procédé, pouvant conduire à des contraintes d'exploitation et à une réduction de la capacité de production.

La simulation du procédé à l'aide du logiciel Aspen HYSYS a permis de reproduire de manière cohérente les tendances enregistrées en conditions réelles. La variation progressive et contrôlée de la composition du propane a mis en évidence l'influence significative des hydrocarbures légers sur les propriétés thermodynamiques du fluide de réfrigération, confirmant la sensibilité du procédé à toute dérive de composition. La concordance entre les résultats issus de la simulation et ceux du cas réel valide la pertinence du modèle développé et son utilité comme outil d'aide à l'analyse et à la prise de décision opérationnelle.

Sur le plan opérationnel, ce travail souligne l'importance du **choix adéquat de la source du gaz de scellement**, de la maîtrise des conditions de démarrage des unités et du contrôle rigoureux de la pureté du propane, en particulier lors des phases transitoires. Les recommandations proposées, telles que l'utilisation du propane vaporisé issu d'unités déjà stabilisées ou l'exploitation d'équipements actuellement non utilisés, visent à réduire significativement les risques de contamination et à améliorer la fiabilité du procédé.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Service formation GL3/Z : soft tableau Process.
- [2] Manuel opératoire, système propane et réfrigérant mixte, Vol 2, GL3/Z 1981.
- [3] Manuel opératoire GL3/Z, Section fractionnement, Vol 3, 1981.
- [4] Manuel opératoire GL3/Z, le turbo compresseur Vol. 4 1981.
- [5] HYSYS technical support.
- [6] Aspen Technology, Inc. (2021). *Empowering the Self-Optimizing Plant with Industrial AI*. White Paper, Bedford, MA.
- [7] Qin, S. J., & Chiang, L. H. (2019). *Advances and opportunities in machine learning for process data analytics*. Computers & Chemical Engineering, 126, 148-159.