



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم : / ج.م. / ك.ع.ت. / 2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DEMASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option: **GÉNIE DES PROCÉDÉS DE L'ENVIRONNEMENT**

ET

GÉNIE CHIMIQUE

THÈME

Contribution à la réduction de l'autoconsommation énergétique dans les trains de liquéfaction du complexe GL2/Z par la cartographie et l'analyse des pertes énergétiques

Présenté par :

Melle BESSEGHIR Ahlam

Melle OUALID Ahlem

Soutenu le 23 /09/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	FEDDAL Iman	Pr	Université de Mostaganem
Examineur :	BOUBEGRA Naima	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	KHELLADI Malika	MCA	Université de Mostaganem

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante, Madame la Docteure Khelladi Malika, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Madame la Professeure Feddal Iman et à Madame la Docteure Boubegra Naima, pour l'honneur qu'elles nous font en acceptant de participer au jury de soutenance, ainsi que pour l'intérêt qu'elles portent à notre travail.

Nous remercions vivement Madame Sassi Meriem Samira, cheffe du service Planning et Programmation au sein de SONATRACH, pour son accueil, son soutien et ses orientations durant notre stage. Son accompagnement et ses précieux conseils ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur Chahida Abderrahmane, employé de l'entreprise Sorfert, pour son accueil, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de notre stage.

Nous adressons aussi nos remerciements à Monsieur Nefoussi Mohamed, employé de Sonatrach, pour son aide, sa disponibilité et la pertinence de ses conseils.

Nous remercions enfin l'ensemble du personnel du complexe GNL2/Z pour son accueil chaleureux, sa collaboration et sa disponibilité.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à nos parents, à nos familles et à toutes les personnes qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de notre parcours universitaire.

À toutes ces personnes, nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude.



Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

À nos très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible, leurs sacrifices et leurs encouragements constants tout au long de notre parcours. Aucun mot ne saurait exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude envers eux.

À nos familles, qui ont toujours cru en nous et nous ont entourés d'affection, de confiance et de bienveillance.

À nos amis, pour leur présence, leur soutien moral et les précieux moments de partage qui ont rendu ce parcours plus agréable.

À tous nos enseignants, qui nous ont transmis leur savoir, guidés avec dévouement et contribué à notre formation académique et humaine.

À toutes les personnes qui nous ont aidés, encouragés et soutenus, de près ou de loin, dans la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous dédions ce travail à tous ceux qui aspirent à la connaissance, à l'innovation et au progrès.

Avec toute notre reconnaissance et notre gratitude.



ملخص

في سياق عالمي يتسم بتزايد مستمر في الطلب على الطاقة وبضرورة الحفاظ على الموارد الطبيعية، أصبح تحسين النجاعة الطاقوية رهانًا استراتيجيًا رئيسيًا بالنسبة للصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة، على غرار مجمعات إسالة الغاز الطبيعي. تندرج هذه الدراسة ضمن هذا الإطار، وتهدف إلى تقييم الاستهلاك الذاتي للطاقة على مستوى مجمع GL2/Z التابع لفرع إسالة وتحويل المحروقات.

تعتمد هذه الدراسة على منهجية مُهيكلّة تجمع بين جمع ومعالجة بيانات الاستغلال، وإعداد موازنات طاقوية مفصلة، وحساب معدل الاستهلاك الذاتي، إضافة إلى تحليل مقارن لمؤشرات الأداء بالنسبة للقيم المرجعية. كما تم إنجاز مخطط طاقي (كارتوغرافيا) لقطارات الإسالة سمح بتحديد المصادر الرئيسية للفقدان الطاقي، لا سيما تلك المرتبطة بفائض غاز التبخّر (BOG)، وبفراط استهلاك غاز الوقود، وبالانحرافات المسجلة على مستوى شبكة البخار.

أظهرت النتائج المتحصّلة عليها أن هذه الفوارق في الاستهلاك تؤثر بشكل مباشر وملحوظ على معامل الاستهلاك الذاتي الطاقي الإجمالي للمجمع. كما كشف التقييم التقني-الاقتصادي عن إمكانية استرجاع مهمة للفقدان غير المستغلّ حاليًا. وعلى هذا الأساس، تم اقتراح عدة توصيات تقنية، منها تركيب خزّان مزج ومطيايف كروماتوغرافي أني على شبكة غاز الوقود، إلى جانب استرجاع غاز التبخّر وإعادة إسالته، بهدف الحدّ من الفقدان الطاقي وتحسين الأداء الطاقي والاقتصادي والبيئي للمجمع بشكل مستدام.

الكلمات المفتاحية: الاستهلاك الذاتي للطاقة، الغاز الطبيعي المسال، الموازنة الطاقوية، المخطط الطاقي، غاز التبخّر، النجاعة الطاقوية، مجمع GL2/Z.

Résumé

Dans un contexte mondial marqué par une demande énergétique croissante et par la nécessité de préserver les ressources naturelles, l'amélioration de l'efficacité énergétique constitue un enjeu stratégique majeur pour les industries fortement consommatrices d'énergie, à l'image des complexes de liquéfaction du gaz naturel (GNL). Le présent travail s'inscrit dans cette problématique et porte sur l'évaluation de l'autoconsommation énergétique du complexe GL2/Z, appartenant à la branche Liquéfaction et Transformation des Hydrocarbures (LTH).

L'étude repose sur une démarche méthodologique structurée combinant la collecte et le traitement des données d'exploitation, l'établissement de bilans énergétiques détaillés, le calcul du taux d'autoconsommation ainsi que l'analyse comparative des indicateurs de performance par rapport aux valeurs de référence. Une cartographie énergétique des trains de liquéfaction a ensuite permis de localiser les principales sources de pertes, notamment celles liées à l'excès de Boil-Off Gaz (BOG), à la surconsommation de Fuel Gaz et aux dérives observées au niveau de la filière vapeur.

Les résultats obtenus montrent que ces écarts de consommation exercent une influence directe et significative sur le coefficient d'autoconsommation énergétique global du complexe. L'évaluation technico-économique réalisée révèle par ailleurs un potentiel de valorisation important pour les pertes actuellement non exploitées. Sur cette base, plusieurs recommandations techniques ont été proposées, telles que l'installation d'un ballon mélangeur et d'un chromatographe en ligne sur le réseau Fuel Gaz, ainsi que la récupération et la reliquéfaction du BOG, afin de réduire les pertes énergétiques et d'améliorer durablement la performance énergétique, économique et environnementale du complexe.

Mots clés : autoconsommation énergétique, GNL, bilan énergétique, cartographie énergétique, Boil-Off Gaz, efficacité énergétique, complexe GL2/Z.

Abstract

In a global context marked by continuously rising energy demand and the need to preserve natural resources, improving energy efficiency has become a major strategic concern for energy-intensive industries, particularly liquefied natural gas (LNG) liquefaction complexes. This study addresses this issue by evaluating the

internal energy consumption (self-consumption) of the GL2/Z complex, part of the Hydrocarbon Liquefaction and Processing branch (LTH).

The research is based on a structured methodology combining the collection and processing of operational data, the establishment of detailed energy balances, the calculation of the self-consumption rate, and a comparative analysis of performance indicators against reference values. An energy mapping of the liquefaction trains was subsequently carried out to identify the main sources of energy loss, in particular those related to excess Boil-Off Gas (BOG), fuel gas overconsumption, and deviations observed in the steam network.

The results show that these consumption gaps have a direct and significant impact on the complex's overall energy self-consumption coefficient. The techno-economic assessment further reveals a substantial recovery potential for currently unexploited losses. On this basis, several technical recommendations were proposed, including the installation of a mixing drum and an online chromatograph on the fuel gas network, as well as the recovery and reliquefaction of BOG, in order to reduce energy losses and durably improve the energy, economic, and environmental performance of the complex.

Keywords: energy self-consumption, LNG, energy balance, energy mapping, Boil-Off Gas, energy efficiency, GL2/Z complex.

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
Introduction Générale	1

Chapitre I : Cadre général du complexe GNL2/Z et fondements de l’autoconsommation énergétique

Introduction	4
I.1 Situation géographique du complexe	4
I.2 Historique du complexe GL2/Z	4
I.3 Description générale du complexe	5
I.3.1 Caractéristiques générales du complexe GL2/Z	5
I.3.2 Zone des Utilités	5
I.3.3 Zone de process.	6
I.3.3.1 Section traitement de gaz :.....	7
I.3.3.2 Section de séparation.....	11
I.3.3.3 Section de liquéfaction	11
I.3.3.4Section de fractionnement	15
I.3.4 Le stockage et le chargement du GNL.....	17
I.3.4.1 : Stockage du GNL.....	17
I.3.4.2 Le chargement.....	17
I.4 : Composition du Gaz d’Alimentation de GL2/Z	18
I.5 Notions théoriques relatives à l’efficacité énergétique	19

Chapitre II : Méthodologie d’évaluation de l’autoconsommation énergétique

Introduction.....	22
II.1. Démarche méthodologique de l’étude	22
II.1.1. Étapes de la démarche méthodologique.....	22
II.1.2. Sources et nature des données utilisées	23

II.2. Méthode d'établissement du bilan énergétique	24
II.2.1. Calcul de l'énergie à l'entrée	24
II.2.2. Calcul de l'énergie à la sortie	25
II.2.3. Calcul de l'énergie totale à la sortie pour la période d'étude.....	26
II.3. Calcul de l'autoconsommation énergétique	26
II.4. Calcul des principaux indicateurs énergétiques.....	27
II.5. Méthodologie d'évaluation et de cartographie des dérives de la filière vapeur	29
II.5.1. Bilan massique de vapeur et calcul des écarts par équipement.....	30
II.5.2. Évaluation du taux de perte de vapeur non condensée à l'atmosphère	30
II.5.3. Équivalence énergétique : conversion des surconsommations de vapeur en gaz naturel	31
II.5.4. Calcul de l'impact direct des dérives sur le coefficient d'autoconsommation (ΔAC_i)..	32
II.6. Méthode d'évaluation technico-économique des pertes énergétiques :.....	33
II.5.1. Valorisation du BOG	33
II.5.2. Valorisation de la vapeur économisable :	34

Chapitre III : Analyse des résultats et recommandations d'amélioration énergétique

Introduction	36
Problématique	36
III.1. Analyse de l'autoconsommation énergétique.....	37
III.1.1. Évolution historique de l'autoconsommation	37
III.1.2. Établissement du bilan d'autoconsommation pour juin 2026	37
III.1.3. Comparaison des ratios énergétiques	38
III.2. Analyse des causes de l'augmentation du ratio GN/GNL	39
III.2.1. Excès de Boil-Off Gaz (BOG)	39
III.2.2. Excès de Fuel Gaz	39
III.2.2.1. Identification du problème	39
III.2.2.2. Les sources de fuel gaz	39
III.2.2.3. Variation du PCS du Fuel Gaz	41
III.2.3. Excès de consommation de vapeur	42

III.2.3.1 : Description des équipements de production et de consommation de vapeur du complexe GL2Z	42
III.2.3.2. Établissement du bilan massique de vapeur (Période d'étude : Juin 2026)	43
III.2.3.3. Diagnostic et justification des écarts de consommation	45
III.2.3.4. Impact des pertes de vapeur sur la consommation de gaz naturel :	47
III.2.3.5 Constat global et poids des pertes vapeur	49
III.2.3.6 Répartition de l'impact par poste d'équipement	49
III.2.3.7. Synthèse	50
III.3. Cartographie énergétique train de liquéfaction GL2Z (500)	51
III.4. Recommandations pour l'amélioration de l'autoconsommation énergétique	52
III.5. Évaluation technico-économique des pertes énergétiques	57
III.5.1. Quantités potentiellement valorisables	57
III.5.2. Gains économiques potentiels	57
Conclusion générale	59
Bibliography	60

Liste des figures

Figure I.1 : La zone industrielle d’Azrew et localisation du GL2Z.	4
Figure I.2 : La zone d’utilité.	6
Figure I.3 : Zone des procédés.	6
Figure I.4 : Procédé de traitement et de liquéfaction du gaz naturel (GNL).	7
Figure I.5: Absorption CO2 et Réfrigération MEA	9
Figure I.6 : Déshydratation.	11
Figure I.7: Séparation et liquéfaction.	13
Figure I.8 : Fractionnement.	17
Figure I. 9 : Zone de stockage et de chargement de GNL.	18
Figure I.10: Composition du Gaz d’Alimentation de GL2/Z	18
Figure I.10 : Composition du GN à l’entrée de l’usine GL2/Z.	18
Figure III.1 : Évolution du taux d’autoconsommation durant le mois de juin 2026.	38
Figure III.2 : Schéma des différentes sources d’alimentation en Fuel Gaz [8].	41
Figure III.3 : Consommation de vapeur réelle vs référence par équipement - Juin 2026.	44
Figure III.4 : Répartition du surplus de gaz naturel consommé par équipement.	48
Figure III.5 : Ballon mélangeur.	53
Figure III.6 : Chromatogramme.	54

Liste de tableaux

Tableau I.1: Composition du GN à l'entrée de l'usine GL2/Z	18
Tableau II.1: Données énergétiques journalières utilisées pour l'évaluation des performances du complexe GL2/z.	24
Tableau II.2: Bilan énergétique journalier et évolution de l'autoconsommation énergétique du complexe GNL2/Z durant le mois de juin 2026.....	27
Tableau II.3: Évolution journalière et résultats mensuels des ratios de production des hydrocarbures - Juin 2026.....	29
Tableau III.1: Évolution de l'autoconsommation annuelle du complexe GNL2/Z (2020–2024).....	37
Tableau III.2 : Bilan d'autoconsommation en fonction du gaz d'entrée GN et des produits sortis du complexe durant juin 2026 (pour le train 500).....	37
Tableau III.3 : Comparaison des ratios énergétiques de référence et des valeurs réelles du complexe GL2/Z.....	38
Tableau III.4 : Variation du PCS du gaz naturel alimentant les chaudières ABB.	41
Tableau III.5 : Production totale de vapeur par les chaudières ABB.	43
Tableau III.6 : Bilan massique de vapeur par équipement — Juin 2026 (29 jours).....	43
Tableau III.7 : Bilan global de consommation de vapeur — Train 500 (Juin 2026).	44
Tableau III.8 : Répartition du surplus de gaz naturel consommé par équipement.....	47
Tableau III.9 : Impact des dérivés de consommation vapeur sur le coefficient.....	48
Tableau III.10 : Quantités potentiellement récupérables de BOG et de vapeur.....	57
Tableau III.11 : Gains économiques potentiels associés à la récupération du BOG et à la réduction des pertes de vapeur.	58

Introduction Générale :

Dans un contexte mondial marqué par une croissance constante de la demande en énergie et par la nécessité de préserver les ressources naturelles, l'amélioration de l'efficacité énergétique est devenue un enjeu stratégique majeur pour les industries énergivores. Le secteur du gaz naturel liquéfié (GNL) occupe une place importante dans cette dynamique, en raison de la complexité de ses procédés industriels et des quantités considérables d'énergie requises pour assurer les différentes opérations de traitement, de refroidissement et de liquéfaction du gaz naturel.

Les complexes de liquéfaction du gaz naturel figurent parmi les installations industrielles les plus consommatrices d'énergie. Une partie importante de l'énergie produite est réutilisée pour garantir le fonctionnement des équipements et des systèmes nécessaires au procédé. Cette autoconsommation énergétique influence directement les performances opérationnelles, économiques et environnementales des installations. De plus, les pertes énergétiques observées au niveau des équipements, des réseaux de distribution et des différents systèmes auxiliaires contribuent à réduire l'efficacité globale du complexe.

Dans ce cadre, l'identification et l'analyse des pertes énergétiques constituent une étape essentielle pour toute démarche d'optimisation de la consommation énergétique. Parmi les outils les plus efficaces utilisés dans ce domaine, la cartographie énergétique qui permet de représenter et de visualiser les flux d'énergie au sein des installations industrielles. Elle facilite la localisation des principales sources de pertes et met en évidence les opportunités d'amélioration susceptibles d'accroître les performances énergétiques du procédé.

Le présent travail a été réalisé au sein du complexe GL2/Z dans le cadre d'une étude portant sur l'autoconsommation énergétique des trains de liquéfaction. Cette étude repose sur l'établissement d'un bilan énergétique détaillé, d'une cartographie des flux énergétiques ainsi que l'analyse des pertes enregistrées au niveau des principales unités du procédé.

L'objectif principal de ce mémoire est d'identifier les sources de pertes énergétiques les plus importantes, d'évaluer leur impact sur l'autoconsommation énergétique du complexe et de proposer des actions d'amélioration permettant de réduire ces pertes et d'optimiser l'efficacité énergétique des installations.

Introduction Générale :

Afin d'atteindre ces objectifs, une méthodologie basée sur la collecte et l'analyse des données d'exploitation, l'élaboration des bilans énergétiques ainsi que l'évaluation des indicateurs de performance énergétique a été adoptée.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente le cadre général du complexe GNL2/Z et les fondements de l'autoconsommation énergétique. Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie d'évaluation de l'autoconsommation énergétique. le troisième chapitre porte sur l'analyse des résultats, la cartographie des pertes énergétiques au niveau des trains de liquéfaction et les recommandations d'amélioration énergétique proposées pour réduire l'autoconsommation énergétique et améliorer les performances énergétiques.

**Chapitre I : Cadre général
du complexe GNL2/Z et
fondements de
l'autoconsommation
énergétique**

Introduction :

Le gaz naturel est une source d'énergie fossile composée principalement d'un mélange d'hydrocarbures à l'état gazeux. Afin de faciliter son transport et son stockage, il est transformé en gaz naturel liquéfié (GNL).

Le complexe GL2/Z, appartenant à la branche LTH (Liquéfaction et Transformation des Hydrocarbures), assure la liquéfaction du gaz naturel provenant de HassiR'Mel. La production de GNL y est réalisée par plusieurs trains de liquéfaction fonctionnant de manière indépendante, chacun étant constitué d'un ensemble d'équipements assurant les différentes étapes du procédé.

I.1 Situation géographique du complexe :

Le complexe de liquéfaction GL2/Z occupe une position stratégique, niché entre les complexes GL1/Z et GL3/Z sur la côte ouest du littoral algérien. Sa localisation précise se situe à 8 kilomètres au sud d'Arzew et à 2 kilomètres au nord de Bethioua.



Figure I.1:La zone industrielle d'Arzew et localisation du GL2Z.

I.2 Historique du complexe GL2/Z :

Le complexe GL2/Z est la dernière usine de liquéfaction où l'engineering a été assuré par la société américaine d'engineering « PULLMAN KELLOGG » qui a été chargée des études de la construction et du démarrage des différentes installations [1].

Signature du contrat	09 février 1976
Ouverture du chantier	15 mars 1977
Pose de la première pierre	21 février 1978
Première production du GNL	20 janvier 1981
Première expédition du GNL	29 janvier 1981

I.3 Description générale du complexe :

I.3.1 Caractéristiques générales du complexe GL2/Z :

Procédé : APCI (MCR),

Capacité de traitement : 10,5 Milliard de Nm³ de GN/an,

Superficie du complexe : 72 hectares ;

Nombre de trains : Six trains en parallèle ;

Capacité totale de stockage :

- 03 bacs aériens de stockage GNL : 100 000 m³ chacun.
- 02 bacs de gazoline : 14 000 m³ chacun.

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 / an

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

Zone utilités, zone process et zone stockage et chargement.

I.3.2 Zone des Utilités :

Ils permettent également d'assurer la fourniture de tous les besoins pendant le démarrage et la marche normale des trains de liquéfaction (voir figure I.2).

Source d'énergie : La vapeur d'eau constitue le vecteur énergétique principal du complexe, générée par des chaudières haute pression opérant à 62 bars.

Source de refroidissement: L'eau est la source de refroidissement transportée par un ensemble de six (06) pompes de grande puissance de 175000 m³ /h.

Production d'électricité : La production d'électricité est assurée par trois (03) alternateurs entraînés par des turbines à vapeurs. Les turbo-alternateurs fournissent l'énergie de 36 MW par générateur.

Unité de dessalement : Elle permet de produire l'eau distillée à l'alimentation des chaudières de 225 m³ /h.

Production d'air comprimé: Une grande partie de l'instrumentation du complexe est pneumatique. La production de l'air comprimé est assurée par un ensemble de quatre (04) compresseurs et d'un compresseur d'air secours [2].



Figure I.2: La zone d'utilité.

I.3.3 Zone de process : Dans cette zone, six trains de liquéfaction identiques fonctionnent chacun de manière indépendante (Figure I.3).



Figure I.3: Zone des procédés.

Chaque train contient une variété d'équipements principalement assemblés en série, ce qui permet de convertir le gaz GN en liquide (Figure I.4). Les sept parties d'un train gèrent les opérations de :

- Démercurisation ;
- Décarbonatation ;
- Dshydratation ;
- Séparation ;
- Liquéfaction ;
- Fractionnement.

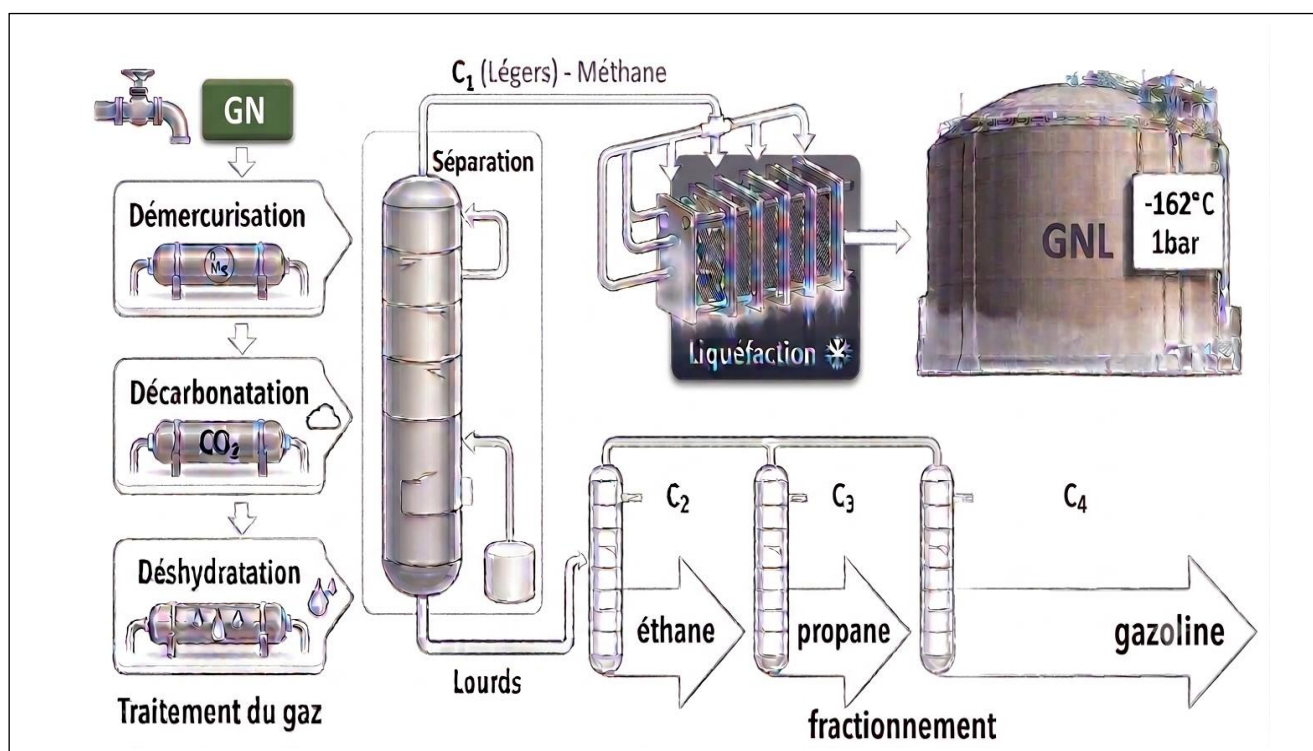


Figure I.4: Procédé de traitement et de liquéfaction du gaz naturel (GNL).

I.3.3.1 Section traitement de gaz :

a) Démercurisation :

Le GN, à son entrée dans le train, passe à travers une vanne, PV101, pour réguler sa pression à 42 bars puis dans un ballon séparateur X31F où tous les hydrocarbures liquides en suspension sont séparés et éliminés pour ne pas encrasser le circuit. Il est ensuite chauffé à 38°C dans le préchauffeur X31C, utilisant de la vapeur 4.5 bars, avant d'entrée dans le démercuriseur X42D à billes d'alumines pour retenir le mercure [3].

b) Décarbonatation :

- **Absorption du Gaz Carbonique :**

En provenance de X42D, le GN entre à la base de la colonne d'absorption X31E pour en extraire le CO₂ par absorption au contact d'une solution de MEA (Mono Ethanol Amine) circulant à contre courant. La colonne fonctionne à 42 bars et 38 °C, conditions optimales pour une bonne absorption; la teneur en CO₂ doit être inférieure à **70 ppm** à la sortie de l'absorbeur. Le GN sort en tête de colonne X31E, lavé de toute MEA entraînée par une eau déminéralisée qui est injectée au moyen des pompes X36J/JA.

La MEA quittant la colonne est partiellement filtrée par passage à travers les filtres X31L et X75L [3].

- **Régénération de la MEA :**

La solution MEA pauvre en CO₂ en sortant riche de l'absorbeur et doit être donc régénérée pour être utilisée de nouveau. Cette opération s'effectue dans la colonne de régénération X32E.

La MEA riche est d'abord détendue dans un ballon X37F pour séparer les hydrocarbures éventuellement dissous puis chauffée jusqu'à 102 °C par échange thermique avec la MEA pauvre (régénérée) successivement dans quatre échangeurs X33C1/C2/C3/C4.

La MEA riche est alors introduite en tête de la colonne de régénération fonctionnant à 110 °C et 01 bar au fond de colonne. La solution descend dans la colonne pour y être épurée par les gaz ascendants provenant de l'évaporation du produit de fond grâce à un rebouilleur X34C utilisant de la vapeur 4,5 bars.

Les vapeurs de tête de colonne sont condensées dans un échangeur à eau de mer X35C, puis débarrassée du CO₂ dans le ballon X33F et sont réinjectées dans la colonne comme reflux au moyen des pompes de reflux X32J/JA.

La MEA pauvre sort par le fond de colonne, passe dans les échangeurs X33C1/C2/C3/C4 puis dans un autre Echangeur à eau de mer X32C pour être refroidie à 38 °C et sera refoulée vers la colonne d'absorption au moyen des pompes X31J/JA (une partie de cette MEA pauvre est filtrée dans un filtre à charbon X32F en continu).

L'étape de régénération comporte également un vaporisateur X36C utilisant de la vapeur 17 bars pour épurer en continu une partie de la MEA pauvre, à la sortie du régénérateur X32E, des résidus décomposés.

Le circuit MEA comporte également un réservoir X35F pour stockage, muni d'une pompe X33J pour le refoulement et un puisard X34F pour la préparation et les appoints de MEA dans le circuit [3].

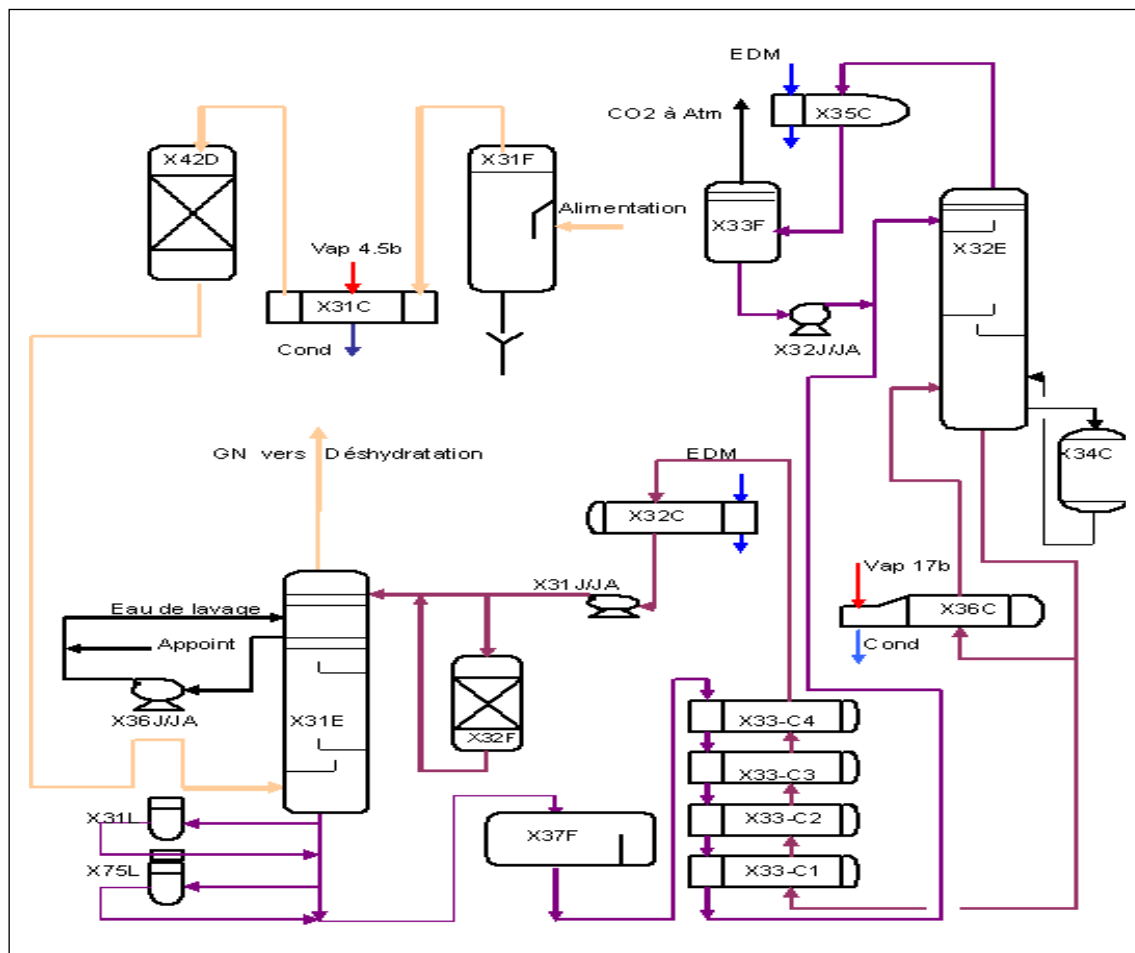


Figure I.5 : Absorption CO_2 et Régénération MEA.

En sortant de l'absorbeur de CO_2 X31E, 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 l'échangeur à propane X41C à 39,4 °C et en sort à une température d'environ 21 °C pour condenser le maximum d'humidité et éviter la formation d'hydrates dont la présence perturberait les sections suivantes dans le procédé; Il entre ensuite dans un ballon séparateur X41F où l'eau partiellement condensée est séparée puis évacuée par le fond du ballon [3].

- **Adsorption de l'eau :**

Le GN entre par le haut dans les sécheurs à gaz X41DA/DB/DC (deux en service et le troisième étant en régénération) et descend le long de ces sécheurs 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 va vers la section suivante du processus de liquéfaction [3].

- **Régénération des sécheurs :**

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 qui durera 08 heures. Ce cycle comprend trois phases : régénération chaude, régénération froide et attente [3].

- **Régénération chaude (3h30) :**

Une proportion d'environ 10 % du GNT (Gaz Naturel Traité) prélevée en aval des sécheurs 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 l'aéroréfrigérant X43C pour condenser cette humidité qui sera éliminée dans un ballon de séparation X42F. Le GN qui en sort, sera aspiré par un Motocompresseur de régénération X41J et refoulé à l'entrée de l'échangeur à propane X41C au début de la déshydratation [3].

- **Régénération froide (2h30) :**

Durant cette phase, le GNT emprunte le même circuit de régénération, sauf que les échangeurs X44C et X42C1/C2 sont by-passés (coté calandre) et refroidi graduellement le sécheur ainsi que l'échangeur X44C [3].

- **Attente (2h00) :**

Le sécheur ainsi régénéré reste isolé du circuit en attendant l'entrée du sécheur suivant en phase de régénération [3].

La section de déshydratation est représentée sur la figure ci-dessous.

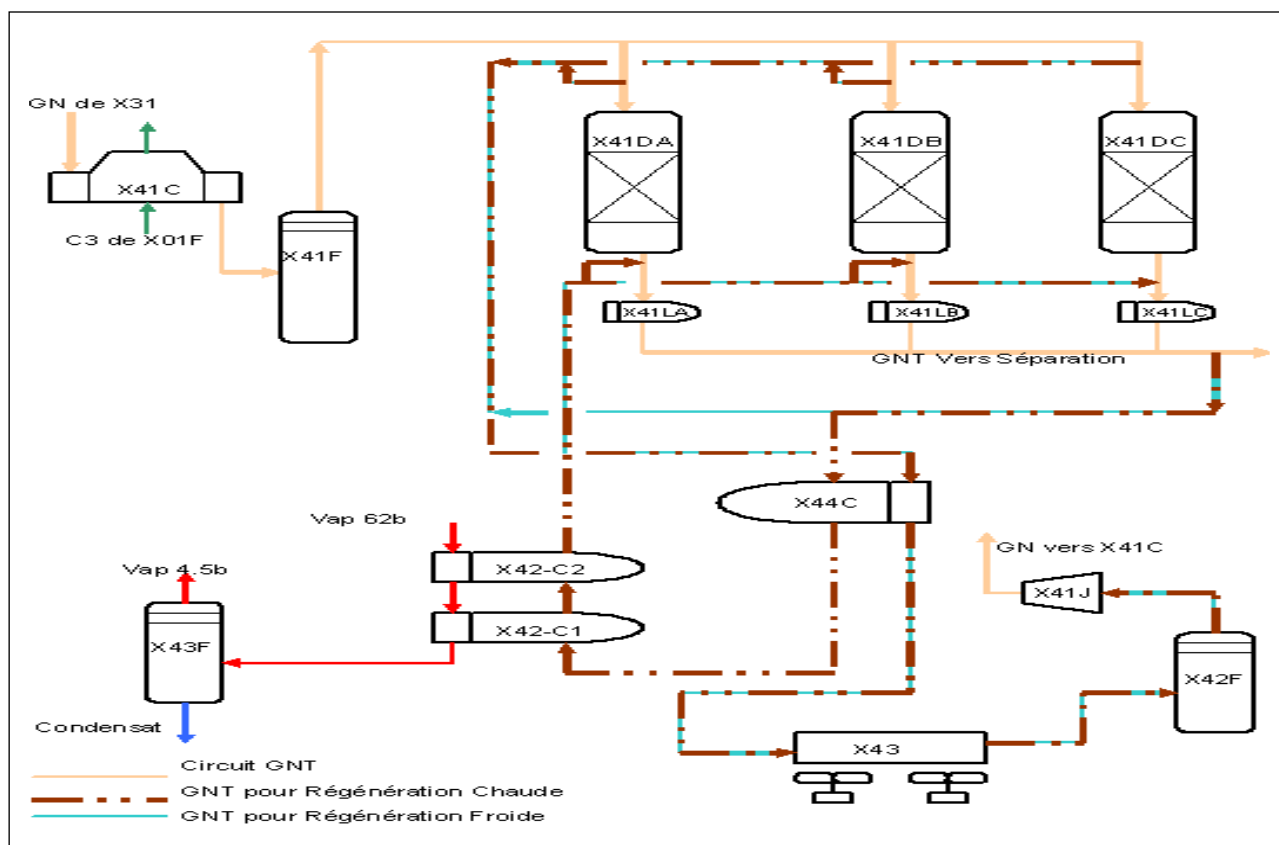


Figure I.6:Déshydratation.

I.3.3.2 Section de séparation :

Le mélange de condensats lourds et de gaz provenant des pré-refroidisseurs au propane passe d'abord dans un échangeur d'alimentation X07C, où il est refroidi jusqu'à -47°C par échange thermique avec les vapeurs de tête de la tour de lavage, comme le montre la figure I.7. Ce mélange est ensuite injecté au niveau du 10ème plateau de la tour de lavage X01E, où les produits lourds seront séparés par distillation et envoyés à la section de fractionnement. Les vapeurs de tête du X01E traversent l'échangeur d'alimentation, puis se dirigent vers le faisceau chaud de l'échangeur principal X16C, qui sert de condenseur de tête pour cette tour de lavage. Le MCR les refroidira et les condensera partiellement. Le gaz se dirige ensuite vers le ballon de reflux X08 F dans lequel se fait la séparation liquide-gaz. Le liquide est envoyé par pompage comme reflux pour la tour de lavage, or les vapeurs légères sont dirigées vers le faisceau central de l'échangeur pour y être refroidi et transformé en GNL [4].

I.3.3.3 Section de liquéfaction :

En entrant dans le faisceau froid de l'échangeur principal X16C, le GNT va subir le processus de liquéfaction. La réfrigération s'effectuera grâce au MCR en deux temps, en se refroidissant d'abord par le passage, côté tubes, de sa phase liquide et sa phase vapeur séparément.

Le MCR liquide sortira de l'échangeur principal X16C, au niveau de sa partie froide à -117.7 °C et 36.4 bars environ, passera à travers une vanne de Joule Thomson, dite JT Chaude, pour subir une détente à 1.2 bars et retourne dans l'échangeur, côté calandre.

Le MCR vapeur, quant à lui, sortira par la tête de l'échangeur principal à -150.6 °C et 29 bars environ, passera à travers une autre vanne de Joule Thomson, dite JT froide pour subir, lui aussi, une détente à 0.65 bars et retournera dans l'échangeur, côté calandre.

Dans son mouvement descendant dans la calandre de l'échangeur principal, le MCR va refroidir le GNT et les deux phases du MCR passant côté tubes (le circuit complet du MCR sera décrit ultérieurement dans la boucle MCR).

Le GNL quittant le haut de l'échangeur principal à -148 °C et 28 bars, passera dans un échangeur multi-passes X17C X10F pour être refroidi à -149 °C et entre dans un ballon de détente HP X10F (Haute Pression) où sa pression chutera à 3.8 bars et sa température à -150 °C. Ce ballon HP sépare le GNL, qui sortira par le fond, des vapeurs de tête constituant le Fuel Gaz HP.

Le Fuel Gaz HP étant riche en hélium passera dans l'échangeur multi-passes X17C et sortira avec une température comprise entre -28 et -35 °C pour alimenter l'Unité HELIOS comme gaz de charge.

En cas d'augmentation de pression dans le ballon de détente HP X10F, l'excès du Fuel Gaz à la sortie du X17C, passera dans des échangeurs thermiques X57CA/CB pour être réchauffé avec de la vapeur du propane du X04F (boucle propane) et sera injecté dans le gaz combustible pour les chaudières.

Le GNL, quant à lui, passe dans un échangeur X24C qui est le rebouilleur d'une colonne dite Déazoteur X02E pour réchauffer le GNL de fond avant de servir d'alimentation pour cette colonne. La pression de service de cette colonne est légèrement supérieure à la pression atmosphérique, le liquide de fond (GNL) est extrait à -160 °C puis refoulé vers la zone de stockage au moyen des pompes cryogéniques X10J/JA. Cette colonne représente la dernière phase de la liquéfaction.

Les vapeurs de tête constituant le Fuel Gaz BP (Basse Pression) composées de méthane et d'azote vont servir comme réfrigérant dans l'échangeur multi-passes X17C avant d'entrer dans le ballon X26F ; ce ballon sert pour l'aspiration du compresseur Fuel Gaz X04J qui refoule le Fuel Gaz BP vers le réseau de gaz combustible des chaudières [4].

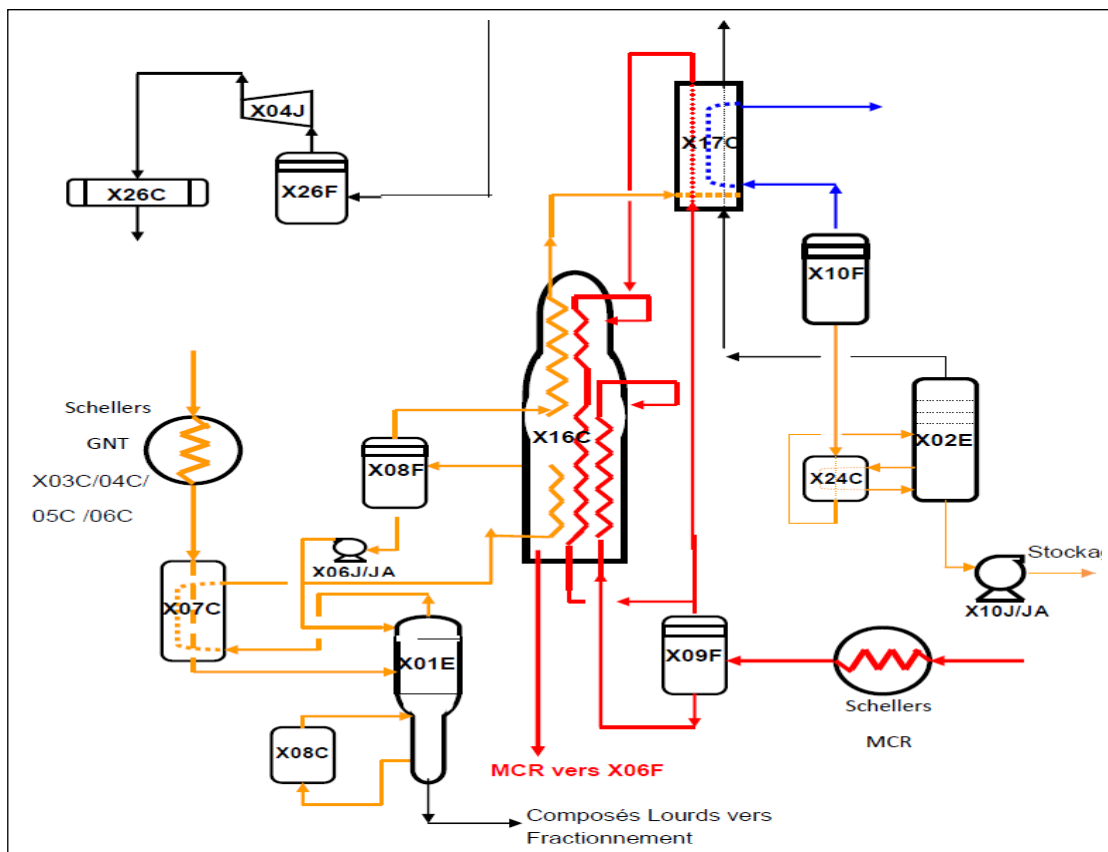


Figure I.7:Séparation et liquéfaction.

Boucle propane :

Le propane est utilisé dans une boucle fermé, destinée principalement à assurer le pré-refroidissement du :

- a) GN dans les échangeurs, dits Schillers GN, X03/04C/05C & 06C.
- b) MCR dans les échangeurs, dits Schillers MCR, X12/13C/14C & 15C.

La boucle propane est constituée des équipements suivants :

- ✓ Un accumulateur X01F qui est le réservoir principale du propane à une pression de 10.3 bars et température de 33°C. il est le point de départ de la boucle en alimentant les premiers Schillers GN X03C et MCR X12C ainsi que le premier ballon d'aspiration X02F.
- ✓ Les quatre ballons X02/03/04 & 05F qui sont des accumulateurs de propane à différentes pression et température décroissantes, qui sont respectivement 4.5 bars/05°C, 2.4 bars/-10°C, 1.3 bars/-21°C, et 0.3bars/ -35°C, et à partir des quels :
 - a) Le propane de fond, liquide, alimente les Schillers GN, les Scillers MCR et le ballon suivant ; chaque ballon est associé à un Schillers GN, un Schillers et le ballon qui le suit dans le sens croissant correspondant à l'écoulement de ces deux produits (X02F alimente le X04C, X13C et le ballon X03F).

- b) Le propane vapeur est aspiré par le compresseur propane à quatre étages d'aspiration dont chaque étage correspond à un ballon (1^{er} ballon X02F avec le 1^{er} étage et ainsi de suite).
- ✓ Un compresseur propane X01J, entraîné par une turbine à vapeur 62 bars, qui aspire donc de chaque ballon et refoule vers les échangeurs X02CA/CB à une pression de 12.9 bars et température de 63°C.

Deux condenseurs ou échangeurs X02CA/CB qui refroidissent le propane par l'eau de mer à une température de 36.7°C et une pression de 11.6 bars pour être accumulé dans le réservoir X01F sous une pression de 10.3 bars et une température de 33°C [3].

Boucle MCR :

Le MCR est le produit réfrigérant entrant dans la liquéfaction du GN au niveau de l'échangeur principal X16C. Cette boucle, dans le sens de l'écoulement du MCR, comprend :

- ✓ Les quatre Schillers MCR, X12C/13C/14C & 15C, où le MCR est refroidi progressivement par le propane à -31°C.
- ✓ Un ballon de séparation X09F où la phase liquide est séparée de la phase vapeur.
- a) La partie liquide du MCR entre dans l'échangeur principale, coté tube, se refroidit dans son ascension, sort au niveau de la section froide de l'échangeur, passe par la vanne de détente Joule Thomson (JT chaude) et rentre dans l'échangeur par coté calandre.
- b) La partie vapeur entre dans un faisceau tubulaire, distinct, de l'échangeur principal pour se refroidir dans son ascension. Elle sort au niveau de la partie supérieure, passe par la vanne de détente Joule Thomson (JT froide) et rentre dans l'échangeur par le coté calandre. Avant d'entrer dans le faisceau tubulaire, une fraction avant la JT froide.

Le MCR détendu dans les JT va contribuer à la réfrigération du GN, du MCR liquide et MCR vapeur passant chacun dans les faisceaux tubulaires distincts de l'échangeur principal. Il s'évapore dans la calandre en cédant ses frigories.

- ✓ Un ballon séparateur X06F qui recueille le MCR issu de la calandre du X16C.
- ✓ Un premier compresseur X02J qui aspire du ballon X06F et refoule le MCR à une pression de 12.3 bars et 73°C. Ce compresseur est entraîné par une turbine à vapeur 62 bars.
- ✓ Un premier échangeur à eau de mer X10C, placé au refoulement du compresseur X02J, va refroidir le MCR vapeur à 32°C.
- ✓ Un autre ballon séparateur X07F qui recueille les vapeurs MCR à la sortie du X10C.
- ✓ Un deuxième compresseur X03J aspire du ballon X07F et refoule à 44.7 bars et 132°C. Ce compresseur est aussi entraîné par une turbine à vapeur 62 bars.

- ✓ Un deuxième échangeur à eau de mer X11C, placé au refoulement du compresseur X03J, refroidit le MCR vapeur à 32°C.

A partir de l'échangeur X11C, le MCR va passer à travers les Schillers MCR pour reprendre le circuit de nouveau [3].

I.3.3.4 Section de 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 [3].

a) Séparation de l'éthane :

Cette séparation s'effectue dans une colonne de distillation X51E (dééthaniseur) qui fonctionnant à 29.9 bars et une température de 105°C en fond de la colonne. Cette colonne possède les équipements propres à une colonne de distillation, à savoir :

- a) Un rebouilleur de fond X52C réchauffé par la vapeur 4.5 bars.
- b) Un condenseur de tête X51C qui est du type échangeur à plaques avec trois passes :
 - ✓ Une passe pour le fluide chaud, c'est-à-dire les vapeurs de tête de la colonne (éthane).
 - ✓ Deux passes pour les fluides réfrigérants qui sont le propane correspondant aux deux ballons d'aspiration du Compresseur propane X03F & X04F (boucle propane).
- c) Un ballon de reflux X52F dont l'éthane incondensé est utilisé dans le gaz combustible pour les chaudières.
- d) Deux pompes de reflux X51J/JA qui refoulent vers:
 - ✓ La Colonne X51E pour assurer le reflux.
 - ✓ La sortie de la passe éthane de réinjection de l'Echangeur Multi-passes X60C.
 - ✓ Le sous refroidisseur propane X59C.
- e) L'Ethane de soutirage de la colonne est destiné à servir :
 - ✓ Comme réinjection dans le GNL (en cas de besoin) en passant d'abord par l'échangeur X60C.
 - ✓ Comme appoint pour le MCR vers le 1^{er} Ballon d'aspiration X06F du 1^{er} Compresseur MCR X02J (boucle MCR).
 - ✓ Comme produit du gaz combustible des chaudières en passant d'abord par le sous refroidisseurs propane X59C.
- f) Le sous tirage de fond de colonne sert comme charge pour la séparation du propane [3].

b) Séparation du propane :

Cette séparation s'effectue dans une colonne de distillation X52E (Dépropaniseur), fonctionnant à 18 bars et une température de 122°C en fond de colonne. Cette colonne possède aussi les équipements propres à une colonne de distillation dans cette colonne, à savoir :

- a) Un rebouilleur de fond X54C réchauffé par la vapeur 4.5 bars ;
- b) Un condenseur de tête X53C qui est un échangeur tubulaire à eau de mer ;
- c) Un ballon de reflux X53F ;
- d) Deux pompes de reflux X52J/JA qui refoulent vers :
 - ✓ La Colonne X52E pour assurer le reflux.
 - ✓ La passe propane de l'Echangeur Multi-passes X60 C.
- e) Le Propane de soutirage de la colonne passe dans l'échangeur X60 C pour :
 - ✓ être expédié vers le Complexes GP1Z en passant par le sous refroidisseur propane X59C.
 - ✓ être injecté dans le GNL (en cas de besoin) en passant par l'échangeur X17C.
- f) Un autre soutirage du propane de la colonne assure l'appoint pour la boucle propane au niveau de l'accumulateur X01F.
- g) A la sortie des vapeurs de tête, des piquages peuvent servir :
 - ✓ D'appoint pour le MCR vers le 1er Ballon d'aspiration X06F.
 - ✓ De produit pour le gaz combustible des chaudières.
- h) Le soutirage de fond de colonne sert comme charge pour la séparation du butane et de la gazoline [3].

c) Séparation du butane et gazoline :

Cette séparation s'effectue aussi dans une colonne de distillation X53E (Débutaniseur) fonctionnant à 4.9 bars et à une température de 114°C en fond de la colonne. Cette colonne possède aussi les équipements propres à une colonne de distillation, à savoir :

- a) Un rebouilleur de fond X56C réchauffé par la vapeur 4.5 bars ;
- b) Un condenseur de tête X55C qui est un échangeur tubulaire à eau de mer ;
- c) Un ballon de reflux X54F ;
- d) Deux pompes de reflux X53J/JA qui refoulent vers :
 - ✓ La Colonne X53E pour assurer le taux de reflux ;
 - ✓ La passe butane de l'Echangeur Multi-passes X60C pour être refroidi et expédié vers le Complexe GP1Z au moyen des pompes X56J/JA.
- e) A la sortie des vapeurs de tête, un piquage peut fournir le produit au gaz combustibles des chaudières.
- f) Le soutirage de fond de colonne, constituant la gazoline, sera refroidi dans un échangeur X62C, à eau de mer, et dirigé vers le stockage [3].

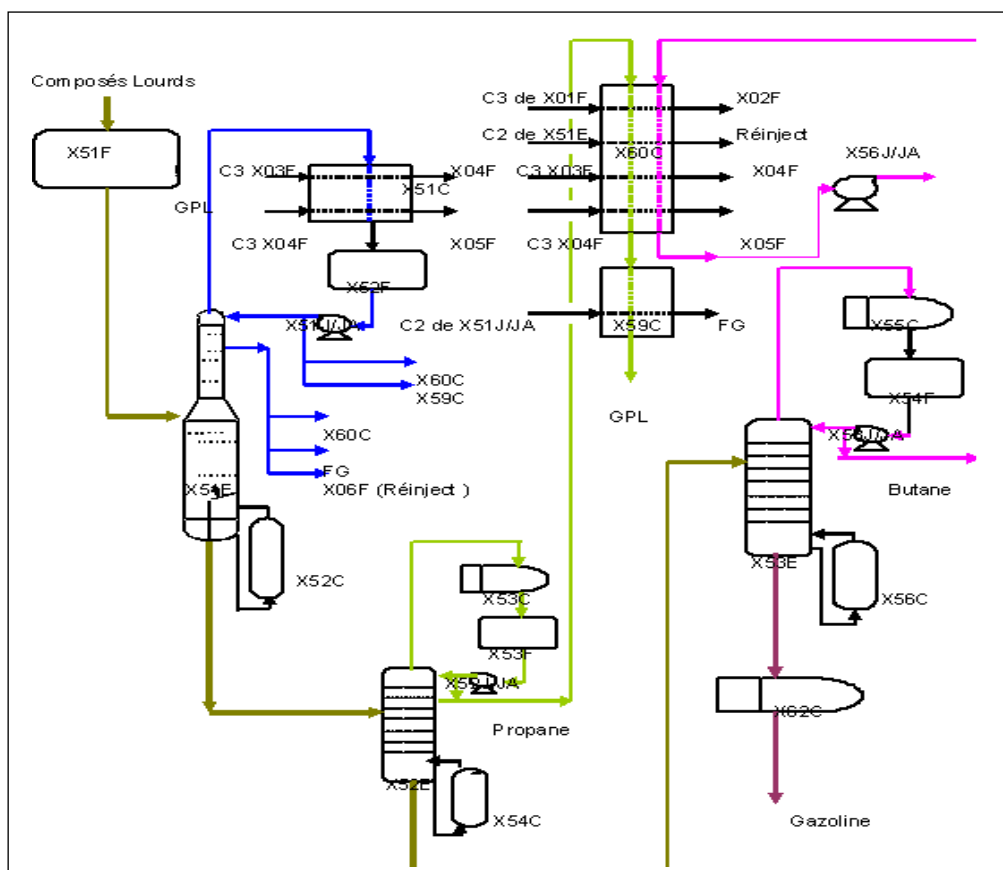


Figure I.8 : Fractionnement.

I.3.4 Le stockage et le chargement du GNL :

I.3.4.1 : Stockage du GNL :

La proximité de la zone de stockage du GNL facilite le chargement des méthaniers. Trois réservoirs de 100.000 m³ de GNL sont installés dans cette zone pour diverses fonctions, y compris deux pompes pour la circulation de GNL, cinq pompes pour le chargement et trois pompes pour le transfert de GNL, et deux soufflantes pour récupérer les émissions de méthaniers. Le stockage du GNL se fait à 1.03 bar et à -162°C [5].

I.3.4.2 Le chargement :

Le chargement du GNL se fait à partir de deux quais et cela par refoulement à travers un collecteur commun jusqu'aux quatre bras de chargement installés sur le quai, et sont articulés pour permettre le raccordement aux brides du navire avec une certaine liberté de mouvement. Un cinquième bras est destiné à la collecte des vapeurs du méthanier lors de la mise en froid et du chargement ; ces vapeurs sont acheminées soit vers la torche du terminal, soit vers le système du gaz combustible [5].



Figure I. 9: Zone de stockage et de chargement de GNL.

I.4 : Composition du Gaz d'Alimentation de GL2/Z :

Tableau I.1: Composition du GN à l'entrée de l'usine GL2/Z.

Composants	N ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆ ⁺	He	CO ₂	H ₂ O
% Molaire	5,429	83,234	8,710	1,627	0,186	0,248	0,04	0,04	0,03	0,189	0,266	0,000

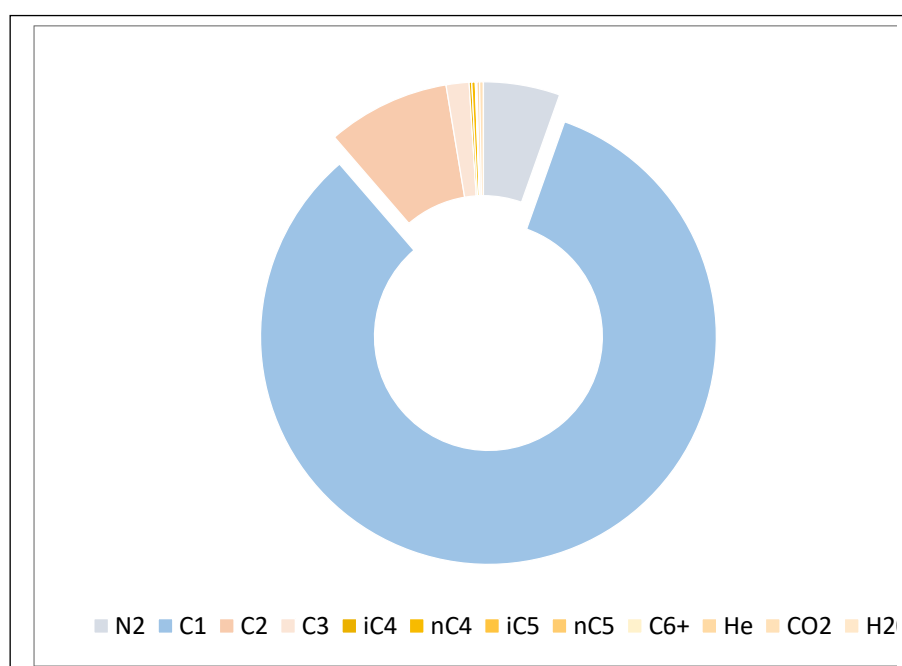


Figure I.110: Composition du GN à l'entrée de l'usine GL2/Z.

I.5 Notions théoriques relatives à l'efficacité énergétique :

Le cadre théorique sur lequel repose cette étude, expose les principales notions relatives à l'efficacité énergétique, aux bilans énergétiques et à la cartographie énergétique. Ces concepts constituent des outils indispensables pour comprendre, analyser et évaluer la performance énergétique des installations industrielles, en particulier dans les complexes de liquéfaction du gaz naturel. Ils serviront ainsi de base à l'analyse de l'autoconsommation énergétique du complexe GL2/Z et à l'identification des possibilités d'amélioration qui seront développées dans les chapitres suivants.

L'autoconsommation : correspond à la quantité de gaz naturel consommé dans le complexe pour produire du GNL, et les sous-produits. Cet indicateur concerne uniquement le bilan GN-GNL et sous-produits [6].

L'autoconsommation Design ou contractuelle : AC calculée et obtenue suite à des scénarios définis durant la phase d'Engineering, en commun accord entre le constructeur et le maître de l'ouvrage, principalement pour un nouveau projet [6].

L'autoconsommation garantie : AC calculée et obtenue suite à des scénarios définis durant les tests de performance, établie en commun accord entre l'entrepreneur et le maître de l'ouvrage [6].

L'autoconsommation Objectif : AC cible, calculée en se basant sur les performances réelles du complexe [6].

Autoconsommation Nette : (consommation interne) : la consommation d'énergie effective du complexe (exprimée en Eq.GN) qui représente la quantité de gaz naturel consommée par les différents équipements du complexe (les turbines à gaz, les fours, les incinérateurs, les chaudières....etc.) en terme d'utilités nécessaires pour le procédé de liquéfaction du gaz naturel [6].

Le taux d'autoconsommation (AC) : est le rapport de l'énergie GN autoconsommée en thermies à l'énergie GN entrant dans le complexe en thermies $\times 100$ [6].

L'énergie autoconsommée : représente la différence entre l'énergie GN entrée et l'énergie commercialisable [6].

L'énergie commercialisable : est la somme algébrique de l'énergie vendue et de la variation des stocks [6].

$$AC (\%) = \frac{\text{Energies Entrées} - \text{Energie Sortie}}{\text{Energies Entrées}} = \frac{\text{Energie Consommée}}{\text{Energie recue}}$$

Energie entrée : GN

Energie sortie : GNL, Sous-produits (SP)

Pouvoir calorifique supérieure (PCS) : la quantité de chaleur libérée par la combustion de l'unité de volume ou de poids du combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée. La mesure du PCS peut être faite :

- Par calorimètre
- Par calcul après analyse par chromatographe [6].

Energie électrique : c'est l'énergie électrique consommée en MWH convertie en thermies. La conversion de l'énergie électrique doit être actualisée périodiquement en se référant à des données transmises par le ministère de l'énergie et/ou la CREG [6].

Arrêt total : Arrêt général du complexe, qui peut être programmé ou imprévu [6].

Le ratio GN/GNL : représente le rapport entre la quantité de gaz naturel consommée et la quantité de gaz naturel liquéfié produite. Il constitue un indicateur important pour évaluer la performance énergétique du procédé de liquéfaction. Une augmentation de ce ratio traduit une consommation plus importante de gaz naturel pour une même quantité de GNL produite [6].

Le torchage ou brulage des gaz « Flaring » : est l'action de bruler, par des torchères, des rejets de gaz à différentes étapes d'exploitation. Les gaz torchés peuvent être dus à des dysfonctionnements des installations et à l'indisponibilité de certains équipements tels que le compresseur de fuel gaz [6].

An aerial night photograph of a large industrial complex, likely a refinery or chemical plant, with numerous illuminated structures and pipes. A blue banner with a white border is superimposed over the center of the image, containing the chapter title in white text.

Chapitre II : Methodologie d'évaluation de l'autoconsommation énergétique

Introduction :

Ce chapitre présente la démarche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude. Il vise à définir les différentes étapes suivies pour analyser la performance énergétique du complexe GL2/Z et évaluer son niveau d'autoconsommation énergétique. La méthodologie retenue permet d'assurer une approche structurée et cohérente de l'étude, depuis la collecte et l'exploitation des données jusqu'à l'analyse des résultats. Cette démarche constitue ainsi une base essentielle pour la compréhension et l'interprétation des résultats présentés dans le chapitre suivant.

II.1. Démarche méthodologique de l'étude :

Dans le cadre de cette étude, une démarche méthodologique a été adoptée afin d'évaluer la performance énergétique du complexe GL2/Z, en particulier son niveau d'autoconsommation énergétique. Cette démarche vise à fournir une approche structurée permettant de caractériser le fonctionnement énergétique du complexe, d'évaluer son niveau de consommation et de mettre en évidence les éventuelles possibilités d'amélioration.

La méthodologie adoptée est présentée à travers plusieurs étapes successives, détaillées dans la section suivante.

II.1.1. Étapes de la démarche méthodologique :

La démarche adoptée dans cette étude est organisée selon les principales étapes suivantes :

- **Collecte des données énergétiques** : disponibles au niveau du complexe GL2/Z ;
- **Organisation et traitement des données** : afin de faciliter leur exploitation et leur analyse ;
- **Établissement des bilans énergétiques** : à partir des différents flux d'entrée et de sortie ;
- **Calcul du taux d'autoconsommation énergétique** : et des principaux indicateurs associés ;
- **Comparaison des performances réelles aux valeurs de référence** afin d'identifier les écarts ;
- **Analyse des écarts observés** et recherche des principaux facteurs susceptibles d'expliquer les niveaux élevés d'autoconsommation ;
- **Identification des principales sources de pertes et de surconsommation énergétique** ;
- **Proposition de pistes d'amélioration** visant à réduire l'autoconsommation et à améliorer l'efficacité énergétique du complexe.

- **Évaluation technico-économique des pertes énergétiques** afin d'estimer les quantités d'énergie potentiellement récupérables ainsi que les gains économiques associés.

II.1.2. Sources et nature des données utilisées :

L'étude porte sur une période historique couvrant plusieurs années, permettant d'analyser l'évolution des performances énergétiques du complexe GL2/Z. En complément, des données d'exploitation relatives au mois de juin 2026 ont été utilisées afin de réaliser une analyse détaillée de l'autoconsommation énergétique sur une période représentative.

Les données exploitées dans le cadre de cette étude proviennent principalement des documents techniques, des données d'exploitation et des relevés disponibles au niveau du complexe GL2/Z. Elles portent notamment sur les quantités de gaz naturel consommées, les productions de GNL et de sous-produits, ainsi que sur les différents flux énergétiques entrant et sortant du procédé.

L'étude s'appuie également sur des données historiques permettant d'analyser l'évolution des performances énergétiques du complexe sur plusieurs années. En complément, des données d'exploitation relatives au mois de juin 2026 ont été utilisées afin de réaliser une analyse détaillée de l'autoconsommation énergétique sur une période représentative.

Ces données constituent la base de l'évaluation énergétique et permettent de calculer les différents indicateurs nécessaires à l'analyse, notamment le rapport **GN/GNL**, considéré comme l'un des principaux indicateurs retenus dans cette étude.

Tableau II.1:Données énergétiques journalières utilisées pour l'évaluation des performances du complexe GL2/Z [7].

	consommation/produit					PCS				
	GN	QTGNL	QC ₃	QC ₄	QC ₅	GN	QTGNL	QC ₃	QC ₄	QC ₅
	10 ³ Cm ³	m ³	TM	TM	TM	Th/Cm ³	Th/m ³	Th/m ³	Th/TM	Th/TM
01/06/2026	7244	9353	112	61	38	9,392	5816	12062	11850	11702
02/06/2026	7255	9329	112	72	39	9,399	5851	12062	11849	11701
03/06/2026	7291	9307	117	79	39	9,396	5836	12062	11849	11700
04/06/2026	7414	9213	96	76	27	9,394	5838	12061	11849	11698
05/06/2026	7367	9216	104	75	22	9,395	5832	12061	11849	11698
06/06/2026	7280	9253	137	73	25	9,403	5839	12062	11849	11704
07/06/2026	7299	9254	104	81	31	9,404	5829	12064	11851	11700
08/06/2026	2412	2603	47	24	14	9,353	5825	12062	11850	11700
09/06/2026	5771	6322	28	28	17	9,394	5827	12061	11845	11700
10/06/2026	7092	9286	124	87	19	9,412	5862	12062	11848	11700
11/06/2026	6871	8260	71	86	32	9,357	5867	12062	11848	11700
12/06/2026	7428	9288	138	83	36	9,409	5821	12062	11849	11697
13/06/2026	7440	9250	80	91	36	9,412	5819	12062	11850	11697
14/06/2026	7429	9223	132	83	38	9,388	5847	12061	11849	11700
15/06/2026	7288	9014	98	77	30	9,411	5847	12061	11849	11698
16/06/2026	6881	8536	119	70	29	9,4	5870	12062	11849	11702
17/06/2026	6976	8639	111	95	29	9,474	5834	12061	11849	11698
18/06/2026	6963	8587	101	71	22	9,367	5873	12062	11850	11700
19/06/2026	6972	8591	103	63	31	9,403	5864	12062	11850	11700
20/06/2026	6956	8584	96	74	38	9,405	5825	12061	11852	11698
21/06/2026	6960	8519	129	72	32	9,405	5833	12060	11850	11697
22/06/2026	6990	8549	108	71	26	9,407	5844	12061	11847	11698
23/06/2026	6988	8569	103	70	30	9,41	5846	12061	11850	11698
24/06/2026	7029	8569	50	65	30	9,406	5855	12062	11849	11697
25/06/2026	7085	8555	73	60	30	9,411	5838	12062	11849	11703
26/06/2026	7010	8560	58	37	29	9,407	5830	12062	11849	11699
27/06/2026	7014	8600	64	36	29	9,405	5852	12062	11849	11699
28/06/2026	6996	8589	95	74	29	9,399	5837	12062	11849	11699
29/06/2026	6002	6972	76	62	31	9,406	5840	12062	11849	11701
Total	199703	246590	2786	1996	858					

II.2. Méthode d'établissement du bilan énergétique :

II.2.1. Calcul de l'énergie à l'entrée :

L'énergie à l'entrée correspond à l'énergie contenue dans le gaz naturel alimentant le complexe GL2/Z. Elle est déterminée à partir du débit de gaz naturel entrant et de son pouvoir

Calorifique supérieur (PCS). Le calcul permet d'exprimer la quantité de gaz naturel introduite dans le complexe sous forme d'énergie, en thermies.

$$EI = Q \text{ (GN)} \times PCS \text{ (GN)}$$

$$EI = 7244 \times 10^3 \times 9,392$$

$$EI = 68\,035\,648 \text{ (Th)}$$

Ei = énergie à l'entrée

Q(GN) = le débit moyen de gaz nature entrant dans l'usine, en Cm³ par jour

Cm³ = Le Contra m³ (mètre cube contractuel) représente un volume de gaz naturel mesuré dans des conditions de référence contractuelles, généralement à une température de 15 °C et une pression absolue de 1,01325 bar.

II.2.2. Calcul de l'énergie à la sortie :

L'énergie à la sortie représente l'énergie contenue dans les produits et sous-produits obtenus à l'issue du procédé. Elle est calculée pour chaque produit à partir de sa quantité produite et de son pouvoir calorifique supérieur. Dans cette étude, les principaux produits considérés sont le GNL, le propane, le butane et la gazoline.

$$ES(i) = Q(i) \times PCS(i)$$

Es = énergie à la sortie

II.2.2.1. Énergie du GNL produit :

L'énergie contenue dans le GNL produit est calculée à partir de la quantité de GNL produite et de son PCS :

$$ES(\text{GNL}) = Q(\text{GNL}) \times PCS(\text{GNL})$$

$$ES(\text{GNL}) = 9353 \times 5816$$

$$ES(\text{GNL}) = 54\,397\,048 \text{ (Th)}$$

Q(GNL) = volume de GNL produit, exprimé en mètres cubes (m³)

II.2.2.2. Énergie du propane produit :

De la même manière, l'énergie du propane produit est déterminée par :

$$ES(C_3) = Q(C_3) \times PCS(C_3)$$

$$ES(C_3) = 112 \times 12\,062$$

$$ES(C_3) = 1\,350\,944 \text{ (Th)}$$

Q(C₃) = masse de propane exprimée en tonne métrique (TM) par jour.

TM : La tonne métrique (t) est une unité de masse correspondant à 1000 kg. Elle est couramment utilisée dans l'industrie pétrolière et gazière pour exprimer les quantités de produits hydrocarbonés.

II.2.2.3. Énergie du butane produit :

$$ES(C_4) = Q(C_4) \times PCS(C_4)$$

$$ES(C_4) = 61 \times 11\,850$$

$$ES(C_4) = 722\,850 \text{ (Th)}$$

$Q(C_4)$ = masse de butane exprimée en tonne métrique (TM) par jour.

II.2.2.4. Énergie de la gazoline produite :

$$ES(C_{5+}) = Q(C_{5+}) \times PCS(C_{5+})$$

$$ES(C_{5+}) = 38 \times 11\,702$$

$$ES(C_{5+}) = 444\,676 \text{ (Th)}$$

$Q(C_{5+})$ = masse de gazoline exprimée en tonne métrique (TM) par jour.

II.2.3. Calcul de l'énergie totale à la sortie pour la période d'étude :

L'énergie totale à la sortie correspond à la somme des énergies contenues dans les différents produits et sous-produits considérés dans le bilan énergétique durant la période d'étude

$$ES = \sum ES(GNL) + \sum ES(C_3) + \sum ES(C_4) + \sum ES(C_{5+})$$

$$ES = 1440480612 + 33603806 + 23651013 + 10038101$$

$$ES = 1507773532 \text{ (Th)}$$

II.3. Calcul de l'autoconsommation énergétique :

L'énergie autoconsommée correspond à la différence entre l'énergie contenue dans le gaz naturel entrant dans le complexe et l'énergie valorisable contenue dans les produits et sous-produits à la sortie. Elle permet ainsi de déterminer la quantité d'énergie non valorisée sous forme de produits commercialisables (durant la période d'étude).

$$EC = \text{Entrée} - \text{Esortie}$$

$$EC = 1\,877\,601\,375 - 1\,507\,773\,532$$

$$EC = 369\,827\,843 \text{ (Th)}$$

II.3.1. Calcul du taux d'autoconsommation :

Le taux d'autoconsommation représente la part de l'énergie du gaz naturel entrant qui n'est pas retrouvée sous forme d'énergie valorisable dans les produits et sous-produits. Il est exprimé en pourcentage de l'énergie totale à l'entrée.

$$AC(\%) = (E_{\text{entrée}} - E_{\text{sortie}}) / E_{\text{entrée}} \times 100$$

$$AC(\%) = (1877601375 - 1507773532) / 1877601375 \times 100$$

$$AC = 19,70 \%$$

AC = l'autoconsommation par rapport au gaz naturel entrant dans l'usine en %

Tableau II.2: Bilan énergétique journalier et évolution de l'autoconsommation énergétique du complexe GNL2/Z durant le mois de juin 2026.

	Energie					Autoconsommation			
	GN	QTGNL	QC ₃	QC ₄	QC ₅	Entrée	Sortie	AC	AC
	Th	Th	Th	Th	Th	Th	Th	Th	%
01/06/2026	68035648	54397048	1350944	722850	444676	68035648	56915518	11120130	16,3446
02/06/2026	68189745	54583979	1350944	853128	456339	68189745	57244390	10945355	16,0513
03/06/2026	68506236	54315652	1411254	936071	456300	68506236	57119277	11386959	16,6218
04/06/2026	69647116	53785494	1157856	900524	315846	69647116	56159720	13487396	19,3653
05/06/2026	69212965	53747712	1254344	888675	257356	69212965	56148087	13064878	18,8763
06/06/2026	68453840	54028267	1652494	864977	292600	68453840	56838338	11615502	16,9684
07/06/2026	68639796	53941566	1254656	959931	362700	68639796	56518853	12120943	17,6588
08/06/2026	22559436	15162475	566914	284400	163800	22559436	16177589	6381847	28,2890
09/06/2026	54212774	36838294	337708	331660	198900	54212774	37706562	16506212	30,4471
10/06/2026	66749904	54434532	1495688	1030776	222300	66749904	57183296	9566608	14,3320
11/06/2026	64291947	48461420	856402	1018928	374400	64291947	50711150	13580797	21,1236
12/06/2026	69890052	54065448	1664556	983467	421092	69890052	57134563	12755489	18,2508
13/06/2026	70025280	53825750	964960	1078350	421092	70025280	56290152	13735128	19,6145
14/06/2026	69743452	53926881	1592052	983467	444600	69743452	56947000	12796452	18,3479
15/06/2026	68587368	52704858	1181978	912373	350940	68587368	55150149	13437219	19,5914
16/06/2026	64681400	50106320	1435378	829430	339358	64681400	52710486	11970914	18,5075
17/06/2026	66090624	50399926	1338771	1125655	339242	66090624	53203594	12887030	19,4990
18/06/2026	65222421	50431451	1218262	841350	257400	65222421	52748463	12473958	19,1253
19/06/2026	65557716	50377624	1242386	746550	362700	65557716	52729260	12828456	19,5682
20/06/2026	65421180	50001800	1157856	877048	444524	65421180	52481228	12939952	19,7795
21/06/2026	65458800	49691327	1555740	853200	374304	65458800	52474571	12984229	19,8357
22/06/2026	65754930	49960356	1302588	841137	304148	65754930	52408229	13346701	20,2976
23/06/2026	65757080	50094374	1242283	829500	350940	65757080	52517097	13239983	20,1347
24/06/2026	66114774	50171495	603100	770185	350910	66114774	51895690	14219084	21,5067
25/06/2026	66676935	49944090	880526	710940	351090	66676935	51886646	14790289	22,1820
26/06/2026	65943070	49904800	699596	438413	339271	65943070	51382080	14560990	22,0812
27/06/2026	65966670	50327200	771968	426564	339271	65966670	51865003	14101667	21,3770
28/06/2026	65755404	50133993	1145890	876826	339271	65755404	52495980	13259424	20,1648
29/06/2026	56454812	40716480	916712	734638	362731	56454812	42730561	13724251	24,3102
totale	1877601375	1440480612	33603806	23651013	10038101	1877601375	1507773532	369827843	20,01

II.4. Calcul des principaux indicateurs énergétiques :

Exemple de calcul des ratios pour le 01/06/2026

II.4.1. Ratio GN/GNL :

Le ratio GN/GNL est déterminé en rapportant la quantité de gaz naturel consommée à la quantité de GNL produite. Cet indicateur permet d'évaluer la quantité de gaz naturel nécessaire pour produire une unité de GNL et de comparer les performances réelles aux valeurs de référence

$$\text{Ratio GN/GNL} = \frac{Q(\text{GN})}{Q(\text{GNL})}$$

$$\text{Ratio GN/GNL} = \frac{7244 * 10^3}{9353}$$

$$\text{Ratio GN/GNL} = 774.51 \text{ Cm}^3/\text{m}^3$$

II.4.2. Ratio C₃/GNL :

Le ratio **C₃/GNL** est calculé en rapportant la quantité de propane (C₃) produite à la quantité de GNL produite :

$$\text{Ratio C3/GNL} = \frac{Q(\text{C3})}{Q(\text{GNL})}$$

$$\text{Ratio C3/GNL} = \frac{112 * 10^3}{9353}$$

$$\text{Ratio C3/GNL} = 11.97 \text{ Kg/m}^3$$

Avec : **Q(C₃)** : quantité de propane produite en Kg par jour.

II.4.3. Ratio C₄/GNL :

Le ratio **C₄/GNL** est déterminé selon la relation :

$$\text{Ratio C4/GNL} = \frac{Q(\text{C4})}{Q(\text{GNL})}$$

$$\text{Ratio C4/GNL} = \frac{61 * 10^3}{9353}$$

$$\text{Ratio C4/GNL} = 6.52 \text{ Kg/m}^3$$

Avec : **Q(C₄)** : quantité de butane produite en Kg par jour.

II.4.4. Ratio C₅₊/GNL :

Le ratio **C₅₊/GNL** est calculé comme suit :

$$\text{Ratio C5 +/GNL} = \frac{Q(\text{C5+})}{Q(\text{GNL})}$$

$$\text{Ratio C5 +/GNL} = \frac{38 * 10^3}{9353}$$

$$\text{Ratio C5 +/GNL} = 4.06 \text{ Kg/m}^3$$

Avec : **Q(C₅₊)** : quantité de gazoline produite en Kg par jour.

Ces indicateurs permettent de suivre les proportions des sous-produits associés à la production de GNL et de comparer les valeurs réelles aux valeurs de référence.

Tableau II.3:Évolution journalière et résultats mensuels des ratios de production des hydrocarbures - Juin 2026

Jour	GN/GNL	C₃/GNL	C₄/GNL	C₅/GNL
	Cm³/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³
01/06/2026	774,5109	11,97477	6,521972	4,062868
02/06/2026	777,6825	12,00557	7,717869	4,180512
03/06/2026	783,3888	12,57118	8,488235	4,190394
04/06/2026	804,7324	10,42006	8,249213	2,930641
05/06/2026	799,3707	11,28472	8,138021	2,387153
06/06/2026	786,7719	14,80601	7,889333	2,701826
07/06/2026	788,74	11,23838	8,752972	3,349903
08/06/2026	926,6231	18,05609	9,220131	5,37841
09/06/2026	912,844	4,428978	4,428978	2,689022
10/06/2026	763,7303	13,35344	9,368942	2,046091
11/06/2026	831,8402	8,595642	10,41162	3,874092
12/06/2026	799,7416	14,85788	8,936262	3,875969
13/06/2026	804,3243	8,648649	9,837838	3,891892
14/06/2026	805,4863	14,31205	8,999241	4,120134
15/06/2026	808,5201	10,87198	8,542268	3,328156
16/06/2026	806,1153	13,94096	8,200562	3,397376
17/06/2026	807,5009	12,84871	10,99664	3,35687
18/06/2026	810,8769	11,76197	8,268313	2,562012
19/06/2026	811,547	11,98929	7,333256	3,608427
20/06/2026	810,3448	11,1836	8,62069	4,426841
21/06/2026	816,9973	15,14262	8,451696	3,756309
22/06/2026	817,6395	12,63306	8,305065	3,041291
23/06/2026	815,4977	12,02007	8,168981	3,500992
24/06/2026	820,2824	5,834987	7,585483	3,500992
25/06/2026	828,1707	8,533022	7,013442	3,506721
26/06/2026	818,9252	6,775701	4,32243	3,38785
27/06/2026	815,5814	7,44186	4,186047	3,372093
28/06/2026	814,5302	11,06066	8,615671	3,376412
29/06/2026	860,8721	10,90075	8,892714	4,446357
Résultat mensuel	814,5927	11,36182	8,084962	3,52578

II.5. Méthodologie d'évaluation et de cartographie des dérives de la filière vapeur :

Sur la base du diagnostic qualitatif établi précédemment concernant le fonctionnement du réseau vapeur du complexe, cette section développe le cadre méthodologique retenu pour quantifier, de façon systématique, les dérives observées au niveau des principaux équipements consommateurs de vapeur, puis pour évaluer leur incidence sur la consommation de gaz naturel des chaudières sur le coefficient d'autoconsommation énergétique global du complexe. La démarche proposée s'articule en quatre étapes successives et complémentaires :

1. Le calcul des écarts massiques de vapeur par équipement ;
2. L'évaluation du taux de perte de vapeur non condensée à l'atmosphère ;

3. La conversion de ces écarts en équivalent gaz naturel ;
4. La traduction de ces surconsommations en impact chiffré sur le coefficient d'autoconsommation.

II.5.1. Bilan massique de vapeur et calcul des écarts par équipement :

Le diagnostic des performances de la filière vapeur repose, en première approche, sur une comparaison systématique entre la consommation réelle de vapeur relevée pour chaque équipement consommateur sur la période d'étude considérée et sa consommation de référence, dite consommation de design, correspondant aux conditions nominales de fonctionnement fixées par le constructeur. Cette confrontation permet de mettre en évidence, équipement par équipement, l'existence éventuelle d'une dérive de consommation, qu'elle soit imputable à une dégradation des performances internes de la machine, à un mode de conduite non optimal, ou à un écart des conditions opératoires réelles par rapport aux hypothèses de design.

$$\Delta Mv_i = Mv_{i,r\acute{e}el} - Mv_{i,r\acute{e}f}$$

$$\Delta Mv_i (\%) = (Mv_{i,r\acute{e}el} - Mv_{i,r\acute{e}f}) / Mv_{i,r\acute{e}f} \times 100$$

Nomenclature :

- $Mv_{i,r\acute{e}el}$: consommation réelle de vapeur de l'équipement i , relevée sur la période d'étude considérée, exprimée en tonnes (t) ;
- $Mv_{i,r\acute{e}f}$: consommation de référence (design) de l'équipement i pour une durée équivalente, exprimée en tonnes (t) ;
- ΔMv_i : écart massique absolu entre consommation réelle et consommation de référence, exprimé en tonnes (t) ;
- $\Delta Mv_i (\%)$: écart massique relatif, grandeur sans dimension exprimée en pourcentage.

Cette double relation est destinée à être appliquée de façon systématique à l'ensemble des équipements consommateurs de vapeur jugés les plus représentatifs du périmètre étudié, notamment les turbines d'entraînement des compresseurs de réfrigération, les turbogénérateurs, les rebouilleurs des colonnes de fractionnement, ainsi que les condenseurs de vapeur. L'application numérique de cette méthodologie à chacun de ces équipements, la présentation des écarts obtenus sous forme de tableaux de synthèse, ainsi que la discussion des résultats, font l'objet du chapitre III.

II.5.2. Évaluation du taux de perte de vapeur non condensée à l'atmosphère :

Au-delà des écarts de consommation observés au niveau de chaque équipement, le réseau vapeur peut également présenter des pertes directes à l'atmosphère, résultant d'un déséquilibre entre la production de vapeur Moyenne Pression (MP) détendue vers le réseau Basse Pression (BP) et la capacité maximale de condensation disponible sur ce réseau. Lorsque le débit de

vapeur BP excède cette capacité, le surplus non condensé est évacué à l'atmosphère, ce qui constitue une perte énergétique nette pour le complexe : cette vapeur a nécessité une consommation de combustible pour sa production sans qu'aucun travail utile n'en soit tiré en aval.

$$T_{\text{perte}} (\%) = M_{v,\text{perdue à l'atm}} / M_{v,\text{produite totale}} \times 100$$

Nomenclature :

- $M_{v,\text{perdue à l'atm}}$: quantité de vapeur évacuée à l'atmosphère sans être condensée sur la période d'étude, exprimée en tonnes (t) ;
- $M_{v,\text{produite totale}}$: quantité totale de vapeur produite par le parc de chaudières sur la même période, exprimée en tonnes (t) ;
- $T_{\text{perte}} (\%)$: taux de perte relatif, exprimé en pourcentage, traduisant la part de la production vapeur totale évacuée à l'atmosphère sans valorisation énergétique.

L'estimation de ces grandeurs pour la période d'étude retenue, ainsi que l'interprétation du taux de perte obtenu au regard des seuils habituellement admis pour ce type d'installation, sont présentées au chapitre III.

II.5.3. Équivalence énergétique : conversion des surconsommations de vapeur en gaz naturel :

La vapeur consommée en excès par les équipements présentant une dérive n'est pas produite de façon autonome : elle résulte, en amont, de la combustion de gaz naturel dans les chaudières du complexe. Tout écart massique de vapeur relevé au niveau d'un équipement se traduit donc, in fine, par une surconsommation proportionnelle de gaz naturel au niveau de la chaufferie. L'établissement d'un facteur d'équivalence unique, propre au parc de chaudières considéré, permet de convertir directement chaque écart massique de vapeur en un volume équivalent de gaz naturel supplémentaire brûlé.

$$VGN_i = \Delta M_{v,i} \times F_{\text{conversion}}$$

Le facteur de conversion $F_{\text{conversion}}$ représente le volume de gaz naturel nécessaire, au niveau des chaudières, pour produire une tonne supplémentaire de vapeur ; il est exprimé en mètres cubes de gaz naturel par tonne de vapeur ($m^3(\text{GN})/t(\text{vapeur})$). Ce facteur dépend essentiellement du rendement thermique des chaudières; rapport entre l'énergie utile transférée à la vapeur et l'énergie apportée par le combustible ; et du pouvoir calorifique supérieur (PCS) du gaz naturel consommé. Il peut être établi soit à partir des caractéristiques thermodynamiques nominales des générateurs de vapeur, soit, de façon plus représentative des conditions réelles d'exploitation, à partir du rapport entre le surplus total de gaz naturel imputable à la filière

vapeur sur la période d'étude et l'écart massique total de vapeur relevé sur l'ensemble des équipements étudiés.

$$P_i (\%) = VGN_{i} / \Sigma VGN_{surplus} \times 100$$

Nomenclature :

- VGN_{i} : volume de gaz naturel supplémentaire imputable à la dérive de l'équipement i , exprimé en $m^3(GN)$;
- $\Sigma VGN_{surplus}$: volume total de gaz naturel supplémentaire imputable à l'ensemble des dérives identifiées sur la filière vapeur, exprimé en $m^3(GN)$;
- $P_i (\%)$: part relative de l'équipement i dans le surplus global de gaz naturel, exprimée en pourcentage.

La détermination du facteur $F_{conversion}$ pour la période d'étude retenue, ainsi que l'application de cette méthodologie à l'ensemble des équipements étudiés et la hiérarchisation de leur contribution respective au surplus global de gaz naturel, sont détaillées au chapitre III.

II.5.4. Calcul de l'impact direct des dérives sur le coefficient d'autoconsommation (ΔAC_i)

La dernière étape de la démarche consiste à traduire les surconsommations de gaz naturel calculées précédemment en un impact chiffré sur le coefficient d'autoconsommation énergétique global (AC) du complexe. Ce coefficient, qui exprime la part de l'énergie primaire entrante consommée par le complexe pour ses propres besoins de fonctionnement, constitue un indicateur de performance énergétique de référence ; toute dérive au niveau de la filière vapeur se répercute directement sur sa valeur, dans la mesure où elle se traduit par une consommation additionnelle de gaz naturel non productive.

$$\Delta AC_i (\%) = VGN_{i} / VGN_{entrée} \times 100$$

$$\Delta AC_{total} (\%) = \Sigma \Delta AC_i = \Sigma VGN_{i} / VGN_{entrée} \times 100$$

$$AC_{optimisé} = AC_{réel} - \Delta AC_{total}$$

Nomenclature :

- $VGN_{entrée}$: volume total de gaz naturel alimentant le complexe sur la période d'étude considérée, exprimé en mètres cubes standard (m^3) ;
- $AC_{réel}$: coefficient d'autoconsommation énergétique réellement observé pour le complexe sur la période d'étude, exprimé en pourcentage ;
- ΔAC_{total} : impact cumulé de l'ensemble des dérives de la filière vapeur sur ce coefficient, exprimé en points de pourcentage ;
- $AC_{optimisé}$: coefficient d'autoconsommation théorique qui serait obtenu si l'ensemble des dérives identifiées sur la filière vapeur étaient intégralement corrigées, toutes choses égales par ailleurs.

Cette approche permet ainsi de hiérarchiser la contribution de chaque équipement à la dérive globale du coefficient d'autoconsommation et d'évaluer, par différence, le gain théorique maximal mobilisable par la seule correction des dérives de la filière vapeur. L'application numérique de cette méthodologie, la présentation des résultats obtenus par équipement sous forme de tableaux de synthèse, ainsi que l'estimation du coefficient d'autoconsommation optimisé pour la période d'étude, sont présentées et discutées au chapitre III.

En résumé, l'articulation successive de ces quatre étapes méthodologiques écart massique par équipement, taux de perte à l'atmosphère, équivalence en gaz naturel, puis impact sur le coefficient d'autoconsommation permet d'établir un diagnostic quantitatif complet de la filière vapeur, depuis l'écart physique relevé au niveau de chaque équipement jusqu'à sa traduction en indicateur de performance énergétique globale du complexe. Le chapitre III sera consacré à l'application intégrale de cette méthodologie aux données d'exploitation relevées sur la période d'étude retenue.

II.6. Méthode d'évaluation technico-économique des pertes énergétiques :

L'évaluation technico-économique a pour objectif d'estimer le gain économique potentiel associé à la récupération des principales pertes énergétiques identifiées au niveau du complexe GNL2/Z. La méthode adoptée repose sur la conversion des quantités récupérables en une même base énergétique, puis sur leur valorisation selon le prix de référence du gaz naturel.

Deux sources de pertes sont considérées dans cette évaluation : le Boil-Off Gaz (BOG) et la vapeur potentiellement économisable.

II.6.1. Valorisation du BOG :

Le volume de BOG identifié étant exprimé en **m³ de GNL**, sa valorisation économique est réalisée directement à partir de l'équivalence énergétique retenue dans l'étude.

$$\text{BOG} = 17\,046 \text{ m}^3 \text{ GNL}$$

La conversion est effectuée selon la relation :

$$1 \text{ m}^3 \text{ de GNL} = 23 \text{ MMBTU}$$

Ainsi : L'énergie équivalente du BOG est déterminée par :

$$E = V_{\text{GNL}} * 23 \text{ MMBTU}$$

$$E = 17\,046 \text{ m}^3 * 23 \text{ MMBTU}$$

$$E = 392\,058 \text{ MMBTU}$$

La valeur énergétique obtenue est ensuite convertie en dollars américains en utilisant le prix de référence de : **1 MMBTU = 6,8 USD**

$$\text{GUSD} = 392\,058 \text{ MMBTU} * 6,8$$

$$\text{GUSD} = 2\,665\,994.4 \text{ USD}$$

Enfin, le gain économique est converti en dinars algériens selon le taux de change retenu dans l'étude, soit **1 USD = 133 DA** :

$$\begin{aligned} \text{GDA} &= \text{GUSD} \times 133 \\ \text{GDA} &= 2665994.4 \times 133 \\ \text{GDA} &= 354\,577\,255.2 \text{ DA} \end{aligned}$$

MMBTU : (Million British Thermal Units) est une unité de mesure de l'énergie thermique couramment utilisée dans le secteur du gaz naturel. Il correspond à un million de BTU.

II.6.2. Valorisation de la vapeur économisable :

Contrairement au BOG, la quantité de vapeur économisable est exprimée en m³ de GN équivalent. Elle doit donc être convertie en volume équivalent de GNL avant d'effectuer la valorisation économique.

Cette conversion est réalisée à partir du ratio réel **GN/GNL = 814,59 Cm³/m³**, déterminé lors de l'analyse énergétique du complexe :

$$\begin{aligned} \text{VGNL} &= \text{VGN} / 814,59 \\ \text{VGNL} &= 6\,206\,502 \text{ Cm}^3 / 814,59 \text{ Cm}^3/\text{m}^3 \\ \text{VGNL} &= 7619.17 \text{ m}^3 \text{ de GNL} \end{aligned}$$

Où VGN représente la quantité de GN équivalent correspondant aux pertes de vapeur.

Le volume équivalent de GNL obtenu est ensuite valorisé selon la même démarche que le BOG :

$$\begin{aligned} E &= \text{VGNL} \times 23 \text{ MMBTU} \\ &= 7619.17 \times 23 \text{ MMBTU} \\ &= 175240.97 \text{ MMBTU} \end{aligned}$$

Après :

$$\begin{aligned} \text{GUSD} &= \text{EMMBTU} \times 6,8 \text{ USD} \\ &= 175240.97 \times 6.8 \text{ USD} \\ &= 1191638.63 \text{ USD} \end{aligned}$$

Enfin :

$$\begin{aligned} \text{GDA} &= \text{GUSD} \times 133 \\ &= 1191638.63 \times 133 \\ &= 158487937.98 \text{ DA} \end{aligned}$$

An aerial night photograph of a large industrial complex, likely a refinery or chemical plant, with numerous illuminated structures and pipes. A blue banner with a white border is superimposed over the center of the image.

Chapitre III :Analyse des résultats et recommandations d'amélioration énergétique

Introduction

Le complexe GNL2/Z enregistre, depuis plusieurs années, une augmentation progressive de son coefficient d'autoconsommation énergétique, ce qui constitue un enjeu important en matière de performance énergétique. L'analyse de ce phénomène représente un sujet vaste qui ne peut être abordé dans tous ses aspects dans le cadre de ce mémoire. C'est pourquoi cette étude se concentre sur les principaux facteurs susceptibles d'influencer l'évolution de ce coefficient.

L'étude de cas réalisée au niveau du complexe GNL2/Z repose sur l'analyse des consommations énergétiques nécessaires à la production du gaz naturel liquéfié (GNL) et des autres produits commercialisés, notamment le propane, le butane et la gazoline. Elle s'appuie sur un audit énergétique permettant d'évaluer l'autoconsommation, d'identifier les principales sources de pertes énergétiques et d'apprécier les performances des installations. Cette démarche conduit à formuler la problématique de recherche qui orientera l'ensemble de cette étude.

Problématique :

Le complexe GNL2/Z est l'une des installations industrielles dont le procédé de liquéfaction du gaz naturel nécessite une consommation énergétique importante. Cette consommation, appelée autoconsommation énergétique, représente une part significative de l'énergie produite et influence directement les performances techniques et économiques du complexe. Une augmentation de cette autoconsommation peut être le signe de pertes énergétiques, d'une baisse du rendement de certains équipements ou d'un fonctionnement non optimal des procédés.

Dans ce contexte, il devient essentiel d'évaluer les performances énergétiques du complexe afin d'identifier les principales sources de consommation et de pertes d'énergie, puis de proposer des actions susceptibles d'améliorer son efficacité énergétique.

III.1. Analyse de l'autoconsommation énergétique :

III.1.1. Évolution historique de l'autoconsommation :

Tableau III.1: Évolution de l'autoconsommation annuelle du complexe GNL2/Z (2020–2024) [7].

Année	AC	GN/GNL	C ₃ /GNL	C ₄ /GNL	C ₅ /GNL
2020	16.8	794	9.3	11.4	5.7
2021	17.2	799	10.1	9.6	5.1
2022	16.4	794	10.9	12.7	5.6
2023	16.5	790	10.5	12.0	5.4
2024	17.1	786	8.6	10.5	5.3

Interprétation :

Le tableau montre que le taux d'autoconsommation reste supérieur à la limite de 14.8 % durant toute la période 2020–2024, avec des valeurs comprises entre 16,4 % et 17,2 %. La valeur maximale est enregistrée en 2021 (17,2 %) et la minimale en 2022 (16,4 %). Cette situation met en évidence une autoconsommation élevée, justifiant la recherche des principales causes de cette surconsommation au niveau du complexe GL2/Z.

III.1.2. Établissement du bilan d'autoconsommation pour juin 2026 :

Tableau III.2: Bilan d'autoconsommation en fonction du gaz d'entrée GN et des produits sortis du complexe durant juin 2026 (pour le train 500).

Période	Entrée	Sortie	AC	AC
Juin 2026	Th	Th	Th	%
	1 877 601 375	1 507 773 532	369 827 843	20,01

Interprétation :

Le bilan énergétique du mois de juin 2026 montre que l'énergie GN entrant dans le complexe s'élève à 1 877 601 375 (Th), contre 1 507 773 532 TH d'énergie contenue dans les produits et sous-produits. L'énergie autoconsommée atteint ainsi 369 827 843 (Th), correspondant à un taux d'autoconsommation de 20,01 %. Ce taux reste supérieur à la valeur de référence de 14.8 %, ce qui traduit un niveau d'autoconsommation élevé durant la période étudiée.

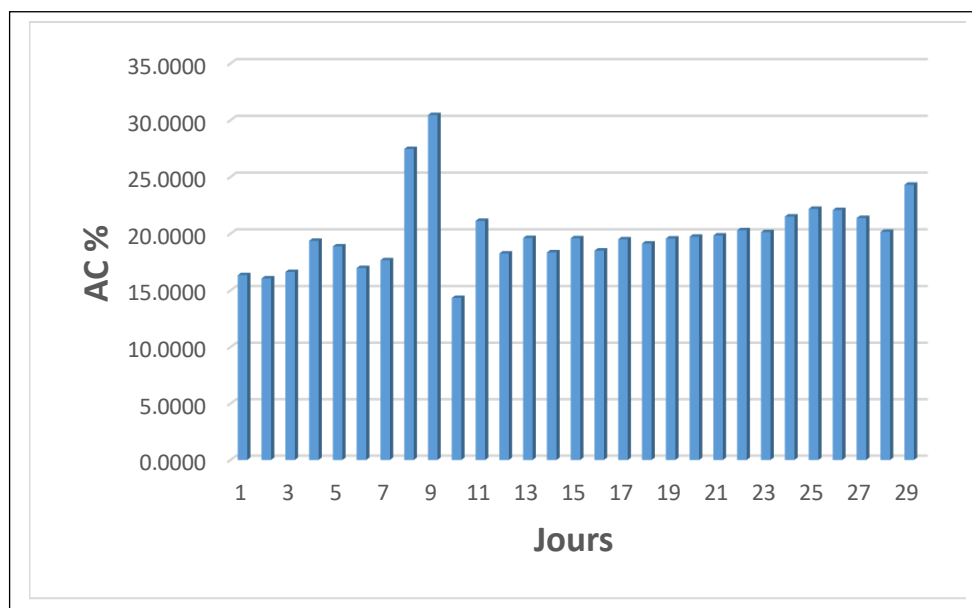


Figure III.1: Évolution du taux d'autoconsommation durant le mois de juin 2026.

L'analyse du graphe permet de constater que le taux global d'autoconsommation énergétique du complexe GL2/Z au cours du mois de juin 2026 est de 20,01%, une valeur supérieure à la valeur de référence fixée à 14.8 %. Le taux d'autoconsommation a atteint sa valeur maximale de 30,45 % le 09/06/2026, tandis que la valeur minimale de 14,33 % a été enregistrée le 10/06/2026.

III.1.3. Comparaison des ratios énergétiques :

Tableau III.3: Comparaison des ratios énergétiques de référence et des valeurs réelles du complexe GL2/Z.

Les ratios	GN/GNL	C ₃ /GNL	C ₄ /GNL	C ₅ /GNL
L'unité	Cm ³ /m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
référence	771.1086	12.8862	9.1502	3.1241
réelle	814,5927	11,36182	8,084962	3,52578

La comparaison entre les valeurs de référence et les valeurs réelles met en évidence une augmentation du ratio GN/GNL, qui passe de 771,11 Cm³/m³ à 814,59 Cm³/m³, soit un écart d'environ 5,64 %. Cette hausse traduit une consommation plus importante de gaz naturel pour produire une même quantité de GNL, ce qui reflète une dégradation de la performance énergétique du procédé de liquéfaction ainsi qu'une augmentation de l'autoconsommation énergétique.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse est principalement centrée sur le ratio GN/GNL, considéré comme l'indicateur le plus pertinent pour l'évaluation de l'autoconsommation énergétique au sein du complexe GNL2/Z, car il permet d'apprécier directement l'efficacité d'utilisation du gaz naturel dans le procédé de liquéfaction. Les ratios C_3/GNL , C_4/GNL et C_5/GNL sont présentés uniquement à titre indicatif, leur impact étant jugé secondaire par rapport à l'objectif principal de l'étude.

III.2.Analyse des causes de l'augmentation du ratio GN/GNL :

III.2.1.Excès de Boil-Off Gaz (BOG) :

L'excès de Boil-Off Gaz (BOG) constitue l'une des principales causes de l'augmentation du ratio GN/GNL au sein du complexe GNL2/Z. Au cours du mois de juin 2026, le volume total de BOG généré a atteint 17 046 m³, soit environ 6,91 % de la production totale de GNL (246 590 m³) et l'impact sur le GN consommé (m³) s'établit à 6,95 %. Les principales causes de cet excès de BOG sont :

- Une température du GNL en sortie de liquéfaction supérieure à la valeur de conception ($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$), favorisant l'évaporation du produit.
- Des conditions de stockage non optimales dans les bacs de GNL, entraînant une augmentation des pertes par évaporation.

Conséquences : Une partie du BOG, provenant de l'évaporation du GNL produit, est réutilisée comme Fuel Gaz. Cependant, un volume élevé de BOG représente une perte de GNL commercialisable et entraîne une augmentation de l'autoconsommation énergétique du complexe.

III.2.2.Excès de Fuel Gaz :

III.2.2.1. Identification du problème :

L'analyse du réseau Fuel Gaz montre la présence de plusieurs flux gazeux provenant de différentes sections du complexe GNL2/Z. Ces flux sont introduits dans le réseau dans des conditions d'exploitation variables, ce qui peut entraîner des variations de la quantité et de la composition du gaz disponible. Cette situation peut se traduire par un excès de Fuel Gaz destiné aux équipements consommateurs, notamment les chaudières, ainsi que par des fluctuations de ses caractéristiques énergétiques.

III.2.2.2.Les sources de fuel gaz :

Section liquéfaction :

- **Ballon de détente FG H .P :** (110F):les vapeurs de détente sont générées par la réduction de la pression du GNL de 23,1bar à 3,8bar .Ce ballon est la première étape de

la réduction de la teneur en azote du GNL .Ce gaz contient environ 43% de N₂ .Il est acheminé vers HELIOS directement et peut être envoyé vers le collecteur FG sans qu'il

- soit nécessaire de le comprimer (cas de non conformité aux analyses ou d'augmentation de la pression du collecteur d'alimentation d'HELIOS) [8].
- **Déazoteur 102E** : les vapeurs de détente sont générées par la réduction de la pression du GNL de 3,8bars à 0,2bars .Cette colonne est l'étape finale de la réduction de la teneur en azote du GNL avant son stockage .Ce gaz contient environ 45 % de N₂ .Il est nécessaire de le comprimer avant de l'envoyer vers le collecteur FG [8].
- **Gaz d'étanchéité des compresseurs** : Les gaz venant des purgeurs d'huile des compresseurs 101J ,102J ,103J et 104J ne constituent qu'un apport minime de gaz combustible [8].

Section fractionnement

- **Dééthanisation**: L'éthane, en excès lorsqu'on ne peut pas le réinjecter dans le GNL quand les spécifications sont atteintes, et l'éthane réfrigérant, sera utilisé comme gaz combustible [8].
- **Dépropanisations et débutanisation**: Le propane et le butane, qui sont hors spécifications ou en cas d'augmentation de pression, sont envoyés vers le collecteur gaz combustible [8].

Autre sources :

- **Le gaz de régénération des sécheurs** : Normalement, ce gaz est comprimé et réinjecté dans le circuit du gaz d'alimentation .Dans le cas où le compresseur de régénération 141 JA est indisponible, ce gaz sera envoyé vers le collecteur FG [8].
- **Ballon d'hydrocarbures 137F** : en cas d'augmentation de pression dans ce ballon, l'excès est envoyé vers le collecteur FG [8].

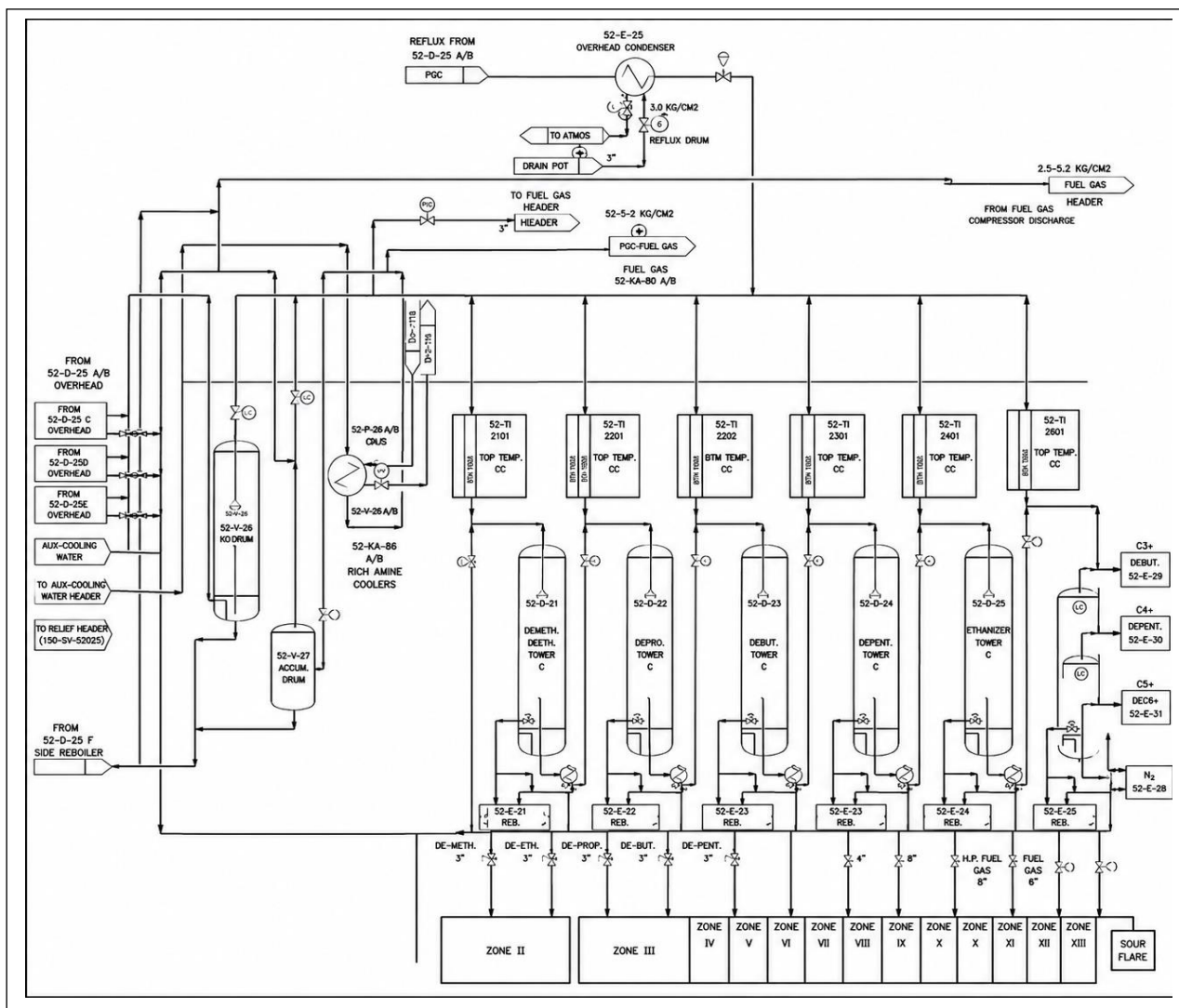


Figure III.2:Schéma des différentes sources d'alimentation en Fuel Gaz [8].

III.2.2.3. Variation du PCS du Fuel Gaz :

Pour mettre en évidence les variations des caractéristiques énergétiques du Fuel Gaz, les valeurs du PCS relevées au niveau des chaudières ABB et IHI sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau III.4:Variation du PCS du gaz naturel alimentant les chaudières ABB.

Les chaudière ABB		Les chaudière IHI	
Jour	PCS (Kcal/nm ³)	Jour	PCS (Kcal/nm ³)
04/06/2026	8021.1	08/10/2025	10599.1
10/06/2026	7880.8	13/10/2025	9853.6
18/06/2026	9291.5	22/10/2025	9839.7
23/06/2026	8241.3	30/10/2025	9221.2
08/07/2026	7796.8	06/11/2025	9709.1

Analyse du tableau :

L'analyse des valeurs présentées dans le tableau montre une variation du PCS du Fuel Gaz alimentant les chaudières ABB et IHI. Pour les chaudières ABB, les valeurs enregistrées varient entre 7 796,8 et 9 291,5 kcal/Nm³, tandis que celles relevées pour les chaudières IHI sont comprises entre 9 221,2 et 10 599,1 kcal/Nm³. Ces fluctuations mettent en évidence une variation des caractéristiques énergétiques du Fuel Gaz au cours des périodes étudiées.

Cette variation peut être associée à la diversité des flux alimentant le réseau Fuel Gaz, ces derniers provenant de différentes sections du complexe et pouvant présenter des compositions et des caractéristiques énergétiques différentes.

III.2.3. Excès de consommation de vapeur :

La vapeur d'eau, produite par la combustion de gaz naturel ou de gaz de procédé dans les générateurs de vapeur (chaudières ABB), constitue, au même titre que le gaz naturel, un vecteur énergétique central du complexe GL2/Z. Elle assure trois fonctions principales au sein des trains de liquéfaction :

- **L'entraînement des équipements rotatifs** : (compresseurs, pompes et ventilateurs) par l'intermédiaire des turbines à vapeur, après transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique [9].
- **La production d'électricité** : via les turbogénérateurs, après transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique puis électrique [9].
- **L'apport calorifique** : aux réchauffeurs et aux rebouilleurs des colonnes de fractionnement, en tant qu'agent caloporteur [9].

III.2.3.1 : Description des équipements de production et de consommation de vapeur du complexe GL2Z :

a) Architecture du réseau et niveaux de pression :

Le réseau de distribution de vapeur du complexe GL2Z s'articule principalement autour de trois niveaux de pression :

1. **Réseau Haute Pression (HP 62 bars, ~440°C)** : Alimenté par les chaudières principales du complexe et les chaudières ABB (770UB et 770UD). Ce réseau alimente en priorité les turbines à vapeur à condensation entraînant les grands compresseurs de réfrigération (boucles MCR et Propane) ainsi que les turbogénérateurs (TG).
2. **Réseau Moyenne Pression (MP 17 bars, ~ 260°C)** : Alimenté par détente de la vapeur HP ou soutirage de turbines, ce réseau intermédiaire alimente des équipements d'entraînement/auxiliaires (turbo ventilateur, turbine 531JT, turbopompes 501JLJ1/J3),

des unités thermiques et de procédé (dessaleur 2010LC, condenseurs 536C et 2109C), ainsi que les systèmes d'étanchéité et d'extraction d'air (501JC2, 501JCC1/2).

- 3. Réseau Basse Pression (BP 4.5 bars, ~150°C) :** Alimenté par la détente de la vapeur MP à travers des stations de détente/désurchauffe. Il est principalement dédié aux besoins thermiques du procédé (rebouilleurs de distillation des colonnes de fractionnement).

b) Principaux équipements consommateurs de vapeur :

Au niveau d'un train de liquéfaction (Train 500) et de la zone utilités, les principaux équipements consommateurs sont récapitulés ci-dessous :

- Turbines des compresseurs du procédé (Section Liquéfaction) :

501JT, 502JT, 503JT et 504JT.

- Rebouilleurs et échangeurs thermiques (Section Fractionnement) :

508C, 534C, 552C, 554C (débutaniseur) et 556C.

- Équipements de la zone Utilités :

Turbogénérateurs (2070JA/JC), chaudières utilités (770UB/UD), dessaleur 2010LC, pompes d'alimentation d'eau 2070JA/JC et condenseurs (2203C).

III.2.3.2. Établissement du bilan massique de vapeur (Période d'étude : Juin 2026) :

L'étude du bilan massique de vapeur a été réalisée sur la base des données d'exploitation du mois de juin 2026 (29 jours) pour le Train 500 et la zone des utilités associées.

1. Production totale de vapeur par les chaudières ABB :

Pendant la période d'étude, la production totale de vapeur Haute Pression a été assurée par les chaudières ABB (770UB et 770UD) :

Tableau III.5: Production totale de vapeur par les chaudières ABB.

Chaudières ABB	La quantité (tonne)
770UB	155 887
770UD	167 490
Total	323 377

2. Bilan massique de vapeur par équipement consommateur :

Le bilan massique établi pour la période d'étude (juin 2026, 29 jours) a été restreint aux équipements les plus représentatifs de l'écart entre la consommation de vapeur réelle et la consommation de référence (design), à savoir les turbines des turbocompresseurs de réfrigération 501JT, 502JT et 503JT, le rebouilleur du dépropaniseur 554C, le turbogénérateur 2070JC et le condenseur 2203C. Le tableau III.6 compare, pour chacun de ces équipements, la consommation de référence à la consommation réellement enregistrée.

Tableau III.6: Bilan massique de vapeur par équipement-Juin 2026 (29 jours).

Équipement	Référence (t)	Réel (t)	Écart (t)	Écart (%)
501JT	48 778	65 628	16 850	34,54
502JT	57 072	72 638	15 566	27,27
503JT	61 944	71 791	9 847	15,90
554C	1 653	4 138	2 485	150,33
2070JC	4 600	9 513	4 913	106,80
2203C	16 704	29 261	12 557	75,17

L'examen du **tableau III.6** met en évidence un dépassement systématique de la consommation de vapeur réelle par rapport à la valeur de référence pour l'ensemble des équipements considérés. Cet écart est particulièrement marqué, en valeur relative, pour le rebouilleur 554C (+150,3 %) et pour le turbogénérateur 2070JC (+106,8 %), tandis qu'en valeur absolue, ce sont les turbines 501JT et 502JT qui contribuent le plus fortement à la

Surconsommation globale, avec respectivement 16850 (t) et 15566 (t) de vapeur consommées en excès sur la période. **La figure III.3** illustre cette comparaison.

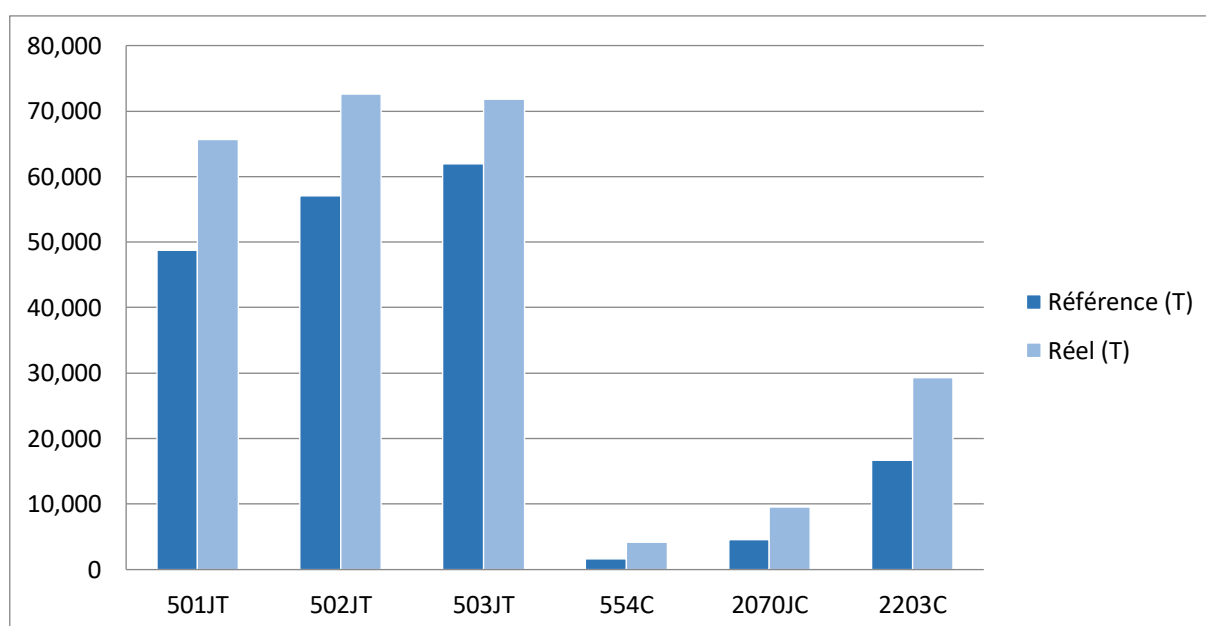


Figure III.3:Consommation de vapeur réelle vs référence par équipement - Juin 2026.

3. Bilan global du réseau vapeur du Train 500 :

À l'échelle du Train 500 et de la zone utilités associée, la vapeur Haute Pression produite par les chaudières ABB (770UB et 770UD) s'est élevée à 323 377 tonne sur la période d'étude. Rapportée aux besoins de référence des postes consommateurs, la consommation réelle de vapeur atteint 310 820t, contre 269 500t attendues, soit un excédent de consommation de 41 320t, équivalent à un dépassement de 15,33 % par rapport au design.

Tableau III.7:Bilan global de consommation de vapeur - Train 500 (Juin 2026).

Grandeur	Valeur
Vapeur produite (t)	323 377
Vapeur consommée — référence (t)	269 500
Vapeur consommée — réelle (t)	310 820
Écart de consommation (t)	41 320
Écart de consommation (%)	15,33
Pertes non condensées à l'atmosphère (t)	12 557
Taux de perte non condensée (%)	3,88

Ce bilan confirme que la dérive constatée sur le coefficient d'autoconsommation énergétique du complexe (Partie1) trouve, pour une part importante, son origine dans la filière vapeur : l'écart de 41 320 tonne entre consommation réelle et consommation de référence traduit un besoin accru de production de vapeur, donc de combustion de gaz naturel dans les chaudières,

Pour compenser le fonctionnement dégradé des équipements consommateurs. Les paragraphes suivants (III.2.3.3) précisent, équipement par équipement, l'origine technique de ces écarts.

III.2.3.3. Diagnostic et justification des écarts de consommation :

L'analyse des écarts mis en évidence au tableau III.6 a été confrontée à l'état mécanique réel des équipements concernés, tel que rapporté par les fiches de constat technique du Train 500. Elle permet d'expliquer, pour chaque poste, l'origine du dépassement observé.

1. Turbines 502JT et 503JT dégradations mécaniques internes :

La turbine 502JT : Présente un 9^{ème} étage d'aubage manquant, ayant fait l'objet d'une élimination. Cette configuration perturbe l'écoulement de la vapeur au niveau des aubages, ce qui réduit le rendement aérodynamique de la turbine et diminue la puissance mécanique transmise au compresseur de MCR1 qu'elle entraîne. Pour compenser cette perte de puissance et maintenir le niveau de compression requis par le procédé, un débit de vapeur plus important doit être admis à la turbine, d'où l'augmentation de sa consommation spécifique. Cette dégradation favorise en outre l'apparition de vibrations, qui accélèrent à leur tour l'usure de la machine **[10]**.

La turbine 503JT : Est quant à elle affectée par une dégradation des bords d'attaque des ailettes et par une fissuration du disque du 9^{ème} étage. Cette fissure fragilise l'équilibrage du rotor et constitue un risque de vibrations accrues, pouvant conduire, dans le cas le plus défavorable, à la rupture du disque. Sur le plan des performances, cette dégradation se traduit par une baisse du rendement isentropique de la turbine, une diminution du débit ou du rapport de compression disponible, ainsi qu'une augmentation de la température d'échappement. Il en résulte une hausse de la consommation spécifique de vapeur et une réduction de la disponibilité de la machine, cohérentes avec l'écart de +27,3 % (502JT) et de +15,9 % (503JT) relevé sur la période d'étude.

Ces deux turbines entraînant des compresseurs de la chaîne de réfrigération, leur dégradation se répercute directement sur les performances globales du procédé de liquéfaction [10].

2. Turbine 501JT contamination du circuit propane par l'éthane :

Contrairement aux turbines 502JT et 503JT, l'écart constaté sur la turbine 501JT (+34,5 %, soit le plus élevé du parc turbines) ne résulte pas d'une dégradation mécanique de la machine elle-même, mais d'une anomalie sur le fluide de travail du compresseur qu'elle entraîne.

Le circuit de propane du turbocompresseur 501J est en effet contaminé par l'éthane. Cette contamination modifie les propriétés thermodynamiques du fluide réfrigérant (masse molaire, pression et température de saturation, chaleur latente de vaporisation), ce qui dégrade l'efficacité du cycle de réfrigération au propane. Pour maintenir le niveau de réfrigération requis par le procédé malgré cette dégradation du fluide, le compresseur 501J doit être sollicité au-delà de ses conditions nominales, ce qui accroît la puissance mécanique demandée à la turbine 501JT et, par conséquent, sa consommation de vapeur.

3. Rebouilleur 554C : fuites sur le réseau vapeur :

Le rebouilleur du dépropaniseur 554C présente l'écart relatif le plus important de l'ensemble des équipements étudiés (+150,3 %). Ce résultat s'explique par la présence de fuites au niveau de son réseau d'alimentation en vapeur. Une fuite se traduit par un débit de vapeur soutiré au réseau sans contrepartie en énergie thermique effectivement transférée au procédé de rebouillage, la consommation apparente de l'équipement augmente donc mécaniquement, sans que le bilan thermique de la colonne de dépropanisation n'en bénéficie. Ce type d'anomalie, bien que localisé, pénalise directement le bilan massique global de vapeur du train.

4. Condenseur 2203C : limitation de capacité et pertes à l'atmosphère :

L'écart observé sur le condenseur 2203C (+75,2 %) résulte d'un mécanisme différent, propre à la conduite du réseau de distribution de vapeur. Lorsque les postes consommateurs de vapeur Moyenne Pression (MP, 17 bars) sont indisponibles, tout ou partie de la vapeur produite à ce niveau de pression ne peut plus être valorisée par ces postes. Cette vapeur est alors détendue de 17 bars à 4,5 bars (réseau BP) afin d'être évacuée du réseau, puis dirigée vers le condenseur 2203C. Or, la capacité maximale de condensation du 2203C est limitée à 24 (t/h). Lorsque le débit de vapeur détendue orienté vers cet équipement dépasse cette capacité, l'excédent ne peut pas être condensé et se trouve, par conséquent, évacué et perdu à l'atmosphère. Ce mécanisme explique à la fois la surconsommation apparente imputée au 2203C dans le bilan (tableau III.6) et le taux de pertes non condensées de 3,88 (%) identifié à l'échelle du train (tableau III.7).

5. Turbogénérateur 2070JC : anomalies mécaniques internes :

Le turbogénérateur 2070JC affiche un écart de +106,8 %, le second plus élevé après celui du 554C. Ce mauvais fonctionnement est imputable à la présence de problèmes mécaniques internes à la machine, qui dégradent son rendement de conversion de l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique puis électrique. Pour une puissance électrique produite donnée, un rendement dégradé impose un débit de vapeur d'admission plus élevé, ce qui se traduit directement par la surconsommation spécifique constatée sur la période d'étude.

III.2.3.4. Impact des pertes de vapeur sur la consommation de gaz naturel :

Les écarts de consommation de vapeur identifiés se traduisent, en amont, par une surconsommation de gaz naturel au niveau des chaudières ABB, nécessaire pour produire la vapeur supplémentaire consommée par les équipements dégradés. Le tableau III.8 exprime, pour chaque équipement, le volume de gaz naturel correspondant à l'écart de vapeur relevé, ainsi que sa part dans le surplus total de gaz naturel imputable aux pertes vapeur (6 734 029 (m³) sur la période d'étude).

Tableau III.8:Répartition du surplus de gaz naturel consommé par équipement.

Équipement	GN consommé (m³)	Part du surplus (%)
501JT (compresseur propane)	1 823 723	27,08
502JT (compresseur MCR1)	1 684 752	25,02
503JT (compresseur MCR2)	1 065 768	15,83
554C	268 959	3,99
Turbogénérateur 2070JC	531 748	7,90
Condenseur 2203C	1 359 079	20,18
Total	6 734 029	100

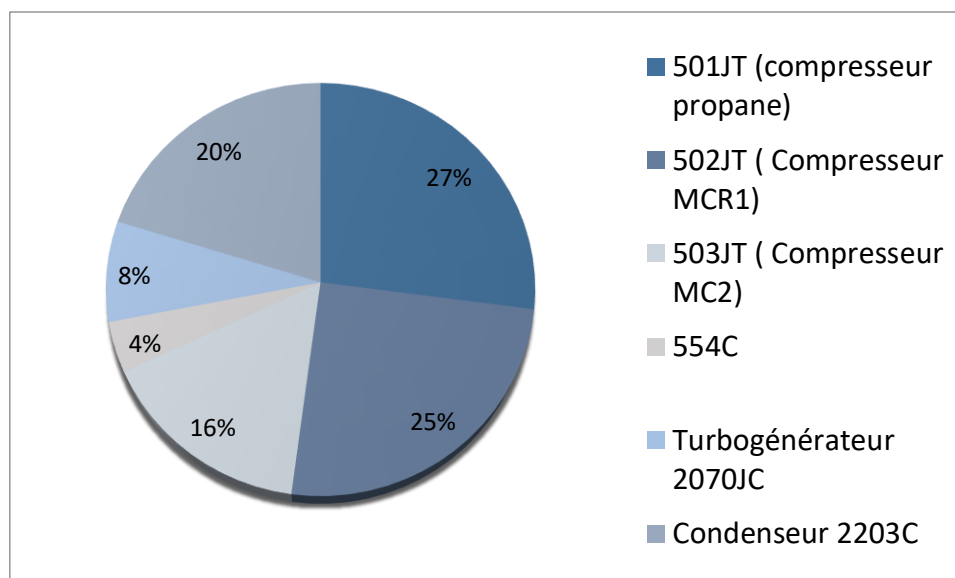


Figure III.4:Répartition du surplus de gaz naturel consommé par équipement.

Les turbines 501JT et 502JT concentrent, à elles seules, plus de la moitié du surplus de gaz naturel imputable aux pertes de vapeur (52,1 %), ce qui en fait les postes prioritaires pour toute action corrective visant à réduire l'autoconsommation énergétique du complexe. Le condenseur 2203C, bien que ne consommant pas directement de vapeur pour un besoin process, représente néanmoins 3.37 % du surplus, du fait des pertes non condensées évacuées à l'atmosphère. Rapporté à la consommation globale de gaz naturel du complexe sur la période (35 000 000 m³), l'ensemble de ces pertes de vapeur représente un impact sur le gaz naturel autoconsommé, ce qui confirme le rôle déterminant du réseau vapeur dans la dérive du coefficient d'autoconsommation énergétique du complexe GNL2/Z évoquée en Partie 1.

Tableau III.9: Impact des dérivés de consommation vapeur sur le coefficient D'autoconsommation énergétique (juin 2026).

Équipement	GN consommé (m ³)	L'impact (%)
501JT (Compresseur propane)	1 823 723	0,91
502JT (CompresseurMCR1)	1 684 752	0,84
503JT (Compresseur MCR2)	1 065 768	0,53
Dépropaniseur 554C	268 959	0,13
Turbogénérateur 2070JC	531 748	0,27
Condenseur 2203C	1 359 079	0,68
Total	6 734 029	3,37

Le **Tableau III.9** met en évidence la contribution directe de chaque équipement dégradé sur le coefficient d'autoconsommation énergétique (AC) du complexe GNL2/Z pour le mois de juin 2026.

III.2.3.5 Constat global et poids des pertes vapeur :

Au cours du mois de juin 2026, le coefficient d'autoconsommation global de l'usine atteint **20,01%**. L'analyse de la filière vapeur montre que les surconsommations et pertes de vapeur engendrent un surplus total de gaz naturel brûlé dans les chaudières de **6 734 029 m³**.

Ce surcoût énergétique induit un **impact direct de +3,37 %** sur le taux d'autoconsommation. En d'autres termes, sans les dérives et anomalies constatées sur la filière vapeur, le coefficient d'autoconsommation du complexe serait ramené de **20,01% à 16,64 %** ($20,01\% - 3,37\%$), se rapprochant ainsi considérablement de la valeur de référence ciblée (**14,8 %**).

III.2.3.6 Répartition de l'impact par poste d'équipement :

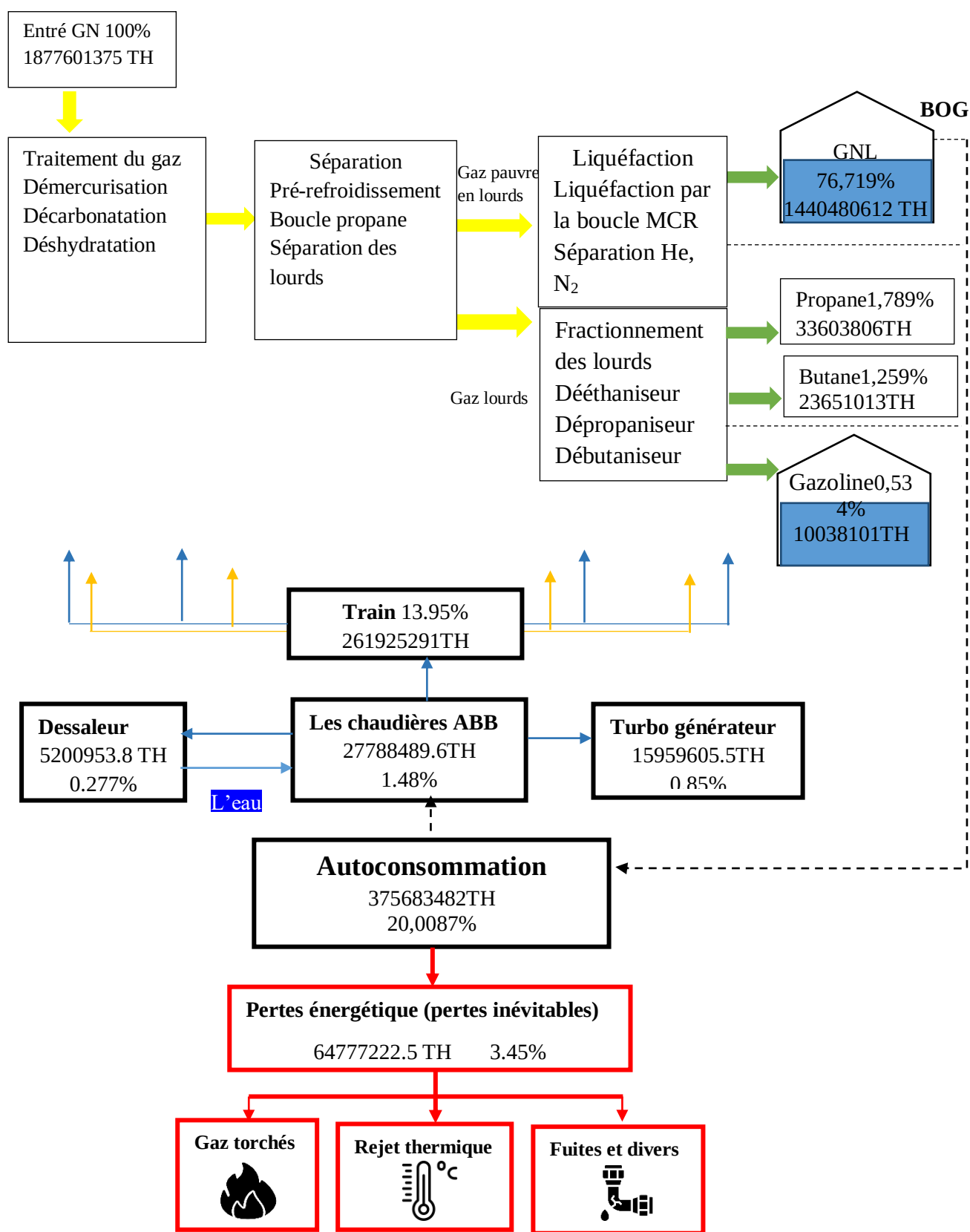
- **Turbines de réfrigération (501JT, 502JT, 503JT) - Impact majeur (+2,28 %) :**
 - La turbine du compresseur de propane **501JT** représente à elle seule le plus fort impact sur l'autoconsommation (**+0,91 %**, soit près du tiers de l'impact total des pertes vapeur). Cela confirme que la contamination de la boucle de propane par l'éthane pénalise lourdement le bilan énergétique global du procédé.
 - Les turbines **502JT (MCR1)** et **503JT (MCR2)** contribuent respectivement à hauteur de **+0,84 %** et **+0,53 %**. Leurs dégradations mécaniques internes (aubage manquant au 9^e étage pour la 502JT, fissuration de disque et altération des ailettes pour la 503JT) obligent à un surdébit de vapeur continu pour maintenir la production, ce qui pèse directement sur la consommation de combustible.
 - Ensemble, ces trois turbocompresseurs de la section liquéfaction sont responsables de **2,28 % sur les 3,37 %** d'impact (soit environ 68 % du poids total des dérives vapeur).
- **Condenseur 2203C - Poids des pertes à l'atmosphère (+0,68 %) :**
 - Le condenseur 2203C génère à lui seul une hausse de **+0,68 %** du coefficient d'autoconsommation. Cet impact n'est pas lié à un besoin thermique du procédé, mais à l'évacuation sous forme de pertes non condensées à l'atmosphère de la vapeur détendue en excès (dépassant la capacité de 24 t/h de l'équipement).
- **Turbogénérateur 2070JC et Rebouilleur 554C - Impacts secondaires (+0,27 % et +0,13 %) :**

- Le mauvais rendement mécanique du turbogénérateur **2070JC** rajoute **+0,27 %** d'autoconsommation.
- Les fuites physiques sur le réseau d'alimentation du rebouilleur de dépropaniseur **554C**, bien qu'impressionnantes en pourcentage d'écart individuel (+150,3 %), ont un impact plus modéré de **+0,13 %** sur le coefficient global, en raison du débit massique plus faible par rapport aux grandes turbines.

III.2.3.7. Synthèse :

Cette analyse quantitative prouve scientifiquement que la filière vapeur constitue le levier prioritaire d'optimisation énergétique du complexe GNL2/Z. Toute intervention de maintenance ciblée (remise en état des aubages des turbines 502JT/503JT, élimination de la contamination éthane dans le propane de la 501JT, et résorption des fuites/mises à l'atmosphère) permettrait de regagner immédiatement jusqu'à 3,37 points de rendement global sur le coefficient d'autoconsommation du complexe.

III. 3.Cartographie énergétique train de liquéfaction GL2Z (500) :



Légende :



La cartographie énergétique du train de liquéfaction GL2/Z (500) permet de visualiser les principaux flux énergétiques entrant et sortant du procédé, ainsi que les différents postes d'autoconsommation et les pertes énergétiques. Elle met notamment en évidence la consommation interne du complexe, principalement au niveau du train, des chaudières ABB, du turbogénérateur et du dessaleur, ainsi que les pertes liées au torchage, aux rejets thermiques et aux fuites. Cette représentation permet ainsi d'identifier les principaux postes énergétiques et de faciliter l'analyse des sources de surconsommation.

III.4. Recommandations pour l'amélioration de l'autoconsommation énergétique :

III.4.1 Installation d'un ballon mélangeur sur le réseau Fuel Gaz :

Il est proposé d'installer un ballon mélangeur alimenté par les deux collecteurs principaux du réseau Fuel Gaz, à savoir le collecteur Nord et le collecteur Sud. Le ballon permettra de réunir et d'homogénéiser les différents flux de gaz provenant de ces deux collecteurs avant leur distribution vers les chaudières. Cette disposition favorisera une composition plus stable du Fuel Gaz et permettra de mieux maîtriser ses caractéristiques avant son utilisation par les équipements du complexe.

Fonctions principales du ballon :

- réception des flux provenant du collecteur Nord et du collecteur Sud ;
- homogénéisation des différents flux de Fuel Gaz ;
- stabilisation de la composition du gaz avant sa distribution ;
- réduction des variations de qualité du Fuel Gaz ;
- amélioration de la régulation et de la maîtrise de la consommation.



Figure III.5: Ballon mélangeur.

III.4.2 Installation d'un chromatographe en ligne :

L'installation d'un chromatographe en ligne à la sortie du ballon mélangeur permettrait d'assurer une surveillance continue de la composition du Fuel Gaz après l'homogénéisation des flux provenant des collecteurs Nord et Sud. Contrairement aux analyses réalisées périodiquement en laboratoire, cette instrumentation fournirait des informations en temps réel sur les principaux constituants du gaz.

Cette mesure permettrait de :

- suivre en continu la composition du Fuel Gaz après son homogénéisation ;
- détecter rapidement les variations de composition ;
- contrôler notamment les teneurs en méthane, azote et hydrocarbures ;
- identifier l'arrivée d'un flux gazeux de qualité différente ;
- vérifier la qualité du gaz à la sortie du ballon mélangeur avant son acheminement vers les consommateurs ;
- faciliter la régulation du réseau Fuel Gaz ;
- contribuer à une meilleure maîtrise de la consommation énergétique.



Figure III.6: Chromatographe.

III.4.3 Récupération et reliquéfaction du Boil-Off Gaz (BOG) :

Il est recommandé de récupérer le Boil-Off Gaz (BOG) généré au niveau des bacs de stockage et de procéder à sa reliquéfaction. Le GNL obtenu après reliquéfaction sera ensuite réintroduit dans les bacs de stockage, permettant ainsi de récupérer une partie du produit qui aurait autrement été perdue sous forme de vapeur. Cette solution contribuerait à réduire les pertes de GNL, à limiter la valorisation du BOG comme Fuel Gaz et à améliorer la maîtrise de l'autoconsommation énergétique du complexe GNL2/Z.

III.4.4 Optimisation de la boucle propane et de la turbine 501JT :

Pour corriger la surconsommation critique de la turbine 501JT (écart de **+34,54 %** générant l'impact le plus lourd sur le bilan vapeur avec **+0,91 %** sur le coefficient d'autoconsommation), il est recommandé de traiter directement la cause en surveillant la qualité du réfrigérant grâce à l'installation d'un chromatographe en ligne sur la boucle propane, ainsi qu'en identifiant l'origine de la contamination afin de la traiter durablement.

1. Recommandation et action préconisée :

- **Analyse continue par chromatographie en ligne :** Assurer un suivi en temps réel de la pureté du propane afin de détecter immédiatement toute dérive de la teneur en éthane.

2. Impacts et dysfonctionnements réduits :

- **Prévention de la sursollicitation mécanique** : Élimination de la dégradation des propriétés thermodynamiques du fluide réfrigérant qui forçait jusqu'ici le compresseur 501J et sa turbine d'entraînement à surconsommer (sans qu'il n'y ait de défaut mécanique sur la machine elle-même).
- **Localisation de la source de contamination** : La contamination du propane par l'éthane ayant été identifiée à ce niveau, il est recommandé de procéder à un contrôle d'étanchéité interne (tubes/faisceaux) de chaque échangeur de pré-refroidissement afin d'identifier précisément le point de fuite croisée entre circuits, par exemple via un test de pression ou un contrôle d'intégrité ciblé, complété par des analyses chromatographiques en entrée et sortie de chaque échangeur pour isoler l'unité défaillante.
- **Réduction de la surconsommation vapeur** : Élimination progressive de l'écart massique le plus élevé du parc turbines.
- **Gain énergétique majeur** : Récupération potentielle du gain maximal estimé à **+0,91 %** sur le coefficient d'autoconsommation du complexe.

III.4.5 Maintenance préventive et corrective des turbines et du turbogénérateur :

Pour éliminer la surconsommation de vapeur due aux dégradations mécaniques de ces équipements, il est recommandé de déployer un plan de maintenance ciblé combinant des actions correctives immédiates et un suivi préventif pérenne.

1. Plan d'action et recommandations par équipement :

- **a) Turbine 502JT (Aubage du 9^e étage)** : Procéder au remplacement complet du jeu d'aubages manquant au 9^e étage (actuellement éliminé) pour restaurer l'écoulement nominal de la vapeur et le rendement aérodynamique.
- **b) Turbine 503JT (Fissuration du disque et usure des ailettes)** : Remplacer le disque fissuré du 9^e étage et reprofiler ou remplacer les ailettes dont les bords d'attaque sont dégradés afin de restaurer le rendement isentropique.
- **c) Turbogénérateur 2070JC (Anomalies mécaniques internes)** :
 - Effectuer un diagnostic mécanique interne complet (paliers, garnitures d'étanchéité, accouplement, régulation).
- Réaliser une révision générale suivie d'un essai de performance pour valider la restauration du rendement de conversion thermique-électrique par rapport aux données de design.

2. Impacts et dysfonctionnements réduits :

- **Suppression des surdébits de compensation** : Élimination du surplus de vapeur consommé pour maintenir la puissance requise malgré les défauts mécaniques internes.
- **Fiabilisation des machines** : Réduction des risques d'avaries graves (rupture de disque, usure prématurée par vibrations) et amélioration de la disponibilité des équipements.
- **Gain énergétique majeur** : Récupération cumulée de **+1,64 point sur le coefficient d'autoconsommation** du complexe (soit près de la moitié du potentiel de gain de la filière vapeur), répartie comme suit :
 - **Turbine 502JT** : +0,84 %
 - **Turbine 503JT** : +0,53 %
 - **Turbogénérateur 2070JC** : +0,27 %

III.4.6.Extension de la capacité de condensation du réseau vapeur :

Pour éliminer définitivement les pertes de vapeur à l'atmosphère lors de l'indisponibilité des consommateurs Moyenne Pression (MP), il est recommandé d'installer un second condenseur monté en parallèle et identique à l'équipement existant 2203C.

1. Fiche technique du condenseur à ajouter :

Paramètre technique	Valeur de conception
Débit de vapeur admissible	24 000 Kg/h
Surface d'échange thermique	110 m ²
Débit d'eau de refroidissement	730 m ³ /h
La température de fonctionnement	24 °C à 43 °C
Pression de service	10 bars

2. Impacts et gains attendus :

- **Doubler la capacité de condensation** : La capacité globale du Train 500 passera de 24 t/h à **48 t/h**, absorbant ainsi la totalité de la vapeur MP détendue vers le réseau Basse Pression (BP).
- **Éliminer les pertes vapeur** : Suppression totale des fuites/évacuations à l'atmosphère, soit une économie directe de **3,88 % du bilan vapeur** du train.
- **Améliorer l'efficacité énergétique** : Gain estimé à **+0,68 % sur le coefficient d'autoconsommation** du complexe.
- **Intégration simplifiée** : Mise en œuvre directe sur le réseau BP existant, sans modification du procédé amont.

III.4.7 Lutte contre les fuites de vapeur sur le réseau d'alimentation du rebouilleur 554C :

Pour corriger la surconsommation anormale du rebouilleur du dépropaniseur 554C (qui affiche un écart de **+150,33 %** dû à des fuites physiques sur son alimentation), il est recommandé d'exécuter un plan d'action préventif ciblé sur les organes d'étanchéité et de purge.

1. Recommandations et actions à mener :

- **Détection ciblée par thermographie** : Effectuer une campagne de contrôle par caméra thermique infrarouge sur l'ensemble de la ligne pour localiser précisément les fuites (brides, vannes, purgeurs, joints).
- **Maintenance et remise en état immédiates** : Remplacer ou réparer sans délai les équipements défectueux identifiés (joints usés, vannes fuyardes et purgeurs bloqués ouverts).

2. Impacts et gains attendus :

- **Suppression des pertes pures** : Élimination du débit de vapeur soutiré du réseau sans transfert thermique utile.
- **Retour aux valeurs nominales** : Alignement de la consommation réelle du rebouilleur 554C sur sa valeur de référence théorique.
- **Amélioration de l'efficacité énergétique** : Gain direct de **+0,13 % sur le coefficient d'autoconsommation** globale du complexe.

III.5. Évaluation technico-économique des pertes énergétiques :

III.5.1. Quantités potentiellement valorisables :

L'analyse des données relatives au mois de juin 2026 a permis d'identifier deux principales sources de pertes énergétiques potentiellement valorisables : le BOG et la vapeur économisable. Le volume de BOG identifié est de 17 046 m³ de GNL, tandis que la quantité de vapeur économisable est estimée à 6 206 502 m³ de GN équivalent.

Tableau III.10:Quantités potentiellement récupérables de BOG et de vapeur.

Source de perte	Quantité potentiellement valorisable	Unité
BOG	17 046	m ³ GNL
Vapeur	6 206 502	Cm ³ GN

III.5.2. Gains économiques potentiels

L'application de la méthode de valorisation présentée au chapitre II permet d'estimer les gains économiques potentiels associés aux deux sources de pertes identifiées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau III.11:Gains économiques potentiels associés à la récupération du BOG et à la réduction des pertes de vapeur.

Source de perte	Quantité potentiellement valorisable	Unité	Gain potentiel
BOG	17 046	m ³ GNL	354 577 255 DA
Vapeur	7 619.17	m ³ GNL	158 487 938 DA
Total	24 665.17	m ³ GNL	513 065 134 DA

Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus pour le mois de juin 2026 montrent que la récupération du BOG et la réduction de la surconsommation de vapeur représentent un potentiel économique important. La valorisation du BOG permettrait de récupérer une quantité de 17 046 m³, correspondant à un gain potentiel estimé à 354 577 255 DA. Par ailleurs, la réduction de la consommation excessive de vapeur permettrait d'économiser environ 7 619.17 m³, pour un gain potentiel de 158 487 879 DA.

Ainsi, le gain économique global pouvant être obtenu à partir des deux actions est estimé à 513 065 134 DA pour le mois de juin 2026. Ce résultat met en évidence l'intérêt économique des solutions proposées, en complément de leur contribution à la réduction des pertes énergétiques et à l'amélioration de la performance énergétique du complexe GL2/Z.

Conclusion générale

Au terme de cette étude consacrée à l'analyse de l'autoconsommation énergétique du complexe GL2/Z, l'objectif principal était d'évaluer les performances énergétiques de l'installation, d'identifier les principales causes de surconsommation et de mettre en évidence les possibilités d'amélioration et de valorisation des pertes énergétiques.

La démarche adoptée a reposé sur l'exploitation des données d'exploitation disponibles, l'établissement des bilans énergétiques, le calcul du taux d'autoconsommation ainsi que l'analyse de plusieurs indicateurs de performance, notamment les ratios de consommation et de production. Cette approche a permis de caractériser le fonctionnement énergétique du complexe et de mettre en évidence les écarts entre les performances réelles et les valeurs de référence.

L'analyse réalisée a montré que l'autoconsommation énergétique constitue un enjeu important pour la performance globale du complexe. Les écarts observés sont liés à plusieurs facteurs, notamment les consommations supplémentaires de gaz naturel, les dérives de certains équipements consommateurs de vapeur ainsi que les pertes énergétiques associées au BOG et à la vapeur. L'étude des équipements a également permis de mettre en évidence l'influence de leurs performances sur la consommation énergétique globale.

Par ailleurs, l'évaluation technico-économique a montré que certaines pertes actuellement non valorisées présentent un potentiel énergétique et économique significatif. La récupération et la valorisation du BOG ainsi que la réduction des pertes de vapeur constituent ainsi des leviers importants pour améliorer l'efficacité énergétique du complexe et limiter les consommations inutiles.

Ainsi, l'amélioration de la performance énergétique du GL2/Z nécessite une approche globale fondée sur le suivi régulier des indicateurs énergétiques, la maîtrise des consommations, l'optimisation du fonctionnement des équipements et la récupération des flux énergétiques perdus. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de l'autoconsommation et constituent une base pour orienter les futures actions d'optimisation énergétique.

En définitive, cette étude met en évidence l'importance de la maîtrise de l'énergie dans un procédé industriel aussi énergivore que la liquéfaction du gaz naturel. La mise en œuvre des actions d'amélioration proposées pourrait contribuer à réduire les pertes, à améliorer l'efficacité énergétique du complexe et à renforcer sa performance économique et environnementale.

Bibliographie

- [1] :Manuel opératoire, volume1, description général du procédé, GL2/Z, 1979.
- [2] : MW. PULLMAN KELLOGG COMPANY; ‘Manuel opératoire’ Volume V (utilities) USA.
- [3] Manuel interne d’organisation Sonatrach, “Description du procédé de fabrication de GL2Z”, page 1-17, Août 2006.
- [4] Manuel Opératoire Process, volume 4,, Décembre 1977.
- [5] Formation d’ingénieur, module 11: décarbonatation, volume 26,, 1994.
- [6] Manuel Interne d’Organisation LRP/LQS.E.024, page 5-7.
- [7] Service Planning et Programmation, GL2/Z,, juin 2026.
- [8] SONATRACH, Complexe GL2Z, Le système Fuel Gaz, Chapitre 7, Service Formation, Document interne, 2026.
- [9] A. K. SABRINA, « ANALYSE ET REEVALUATION DE L’AUTOCONSOMMATION D’ENERGIE DANS UNE UNITEDE LIQUEFACTION DE GAZ NATUREL A PROCEDE APCI » MEMOIRE DE MAGISTERE page 41., 2011.
- [10] Complexe GL2/Z, État de la turbine T500, Document interne, 2026.