

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Département du second cycle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Procédés Organiques

Thème :

**Évaluation des pertes par évaporation au niveau des bacs de
stockage du GNL**

Présenté par : BORDJIBA Chayma

Encadré (e) par : BERKACHE Kamel

Soutenu le : 24/06/2023

Devant le jury composé de :

Mr. KHERFI Hamza

MCA

ESSA-Alger

President

Mme. BOUDERDARA Nabila

MCB

ESSA-Alger

Examinatrice

Mr. BERKACHE Kamel

MCA

ESSA-Alger

Encadreur

Binôme N° : 17PO/MASTER/2023

Résumé

Dans le cadre du complexe GLIK, Mon travail de recherche se focalise sur l'évaluation des pertes par évaporation au niveau des réservoirs de stockage, tout en mettant l'accent sur la gestion efficace du boil-off. En maintenant ce dernier, je reconnais qu'une certaine quantité de gaz va naturellement s'évaporer en raison de l'entrée de chaleur dans les réservoirs de stockage. Cependant, mon étude vise à estimer les pertes de manière précise et à proposer des mesures pour minimiser ces pertes, tout en assurant une gestion adéquate du boil-off. Grâce à cette approche, je vise à trouver un équilibre entre la conservation du gaz naturel liquéfié et la gestion appropriée du boil-off, en maximisant l'utilisation efficace des ressources tout en réduisant les impacts environnementaux.

Summary

Within the framework of the GLIK complex, my research work focuses on evaluating the evaporative losses in storage tanks while emphasizing the effective management of boil-off. By maintaining the boil-off, I acknowledge that a certain amount of gas will naturally evaporate due to the heat input into the storage tanks. However, my study aims to accurately estimate these losses and propose measures to minimize them while ensuring proper boil-off management. Through this approach, my goal is to strike a balance between the conservation of liquefied natural gas (LNG) and the appropriate management of boil-off, thereby maximizing the efficient utilization of resources while reducing environmental impact.

ملخص

في إطار مجمع سوناطراك يتمحور عمل بحثي حول تقييم الخسائر التبخرية في خزانات التخزين، مع التركيز على إدارة التبخر الفعالة. عن طريق الحفاظ على التبخر، أعترف بأن كمية معينة من الغاز ستتبخر بشكل طبيعي بسبب دخول الحرارة إلى خزانات التخزين. ومع ذلك، يهدف بحثي إلى تقدير هذه الخسائر بدقة واقتراح تدابير لتقليلها، مع ضمان إدارة مناسبة للتبخر من خلال هذا النهج، أهدف إلى إيجاد توازن بين الحفاظ على الغاز الطبيعي المسال وإدارة التبخر المناسبة، مع تعظيم استخدام الموارد بكفاءة وتقليل التأثيرات البيئية

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le Dieu, le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadrant M, Berkache pour sa rigueur, sa disponibilité et ses qualités humaines, Je n'oublierai pas de remercier les membres de jury qui m'ont fait le grand honneur d'évaluer ce travail.

Je tiens également à exprimer notre sincère gratitude au président du jury et l'examinatrice, Mr. KHERFI Hamza et Mme. BOUDERDARA Nabila, pour leurs précieux commentaires et leurs critiques constructives, qui ont grandement amélioré la qualité globale de ce projet ainsi que le temps qu'ils ont consacré à étudier ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à l'équipe du complexe GL1K du Sonatrach pour leur accueil chaleureux et leur soutien tout au long de mon stage pratique. Leur expertise et leur engagement ont grandement contribué à mon apprentissage et à mon développement professionnel.

Je suis reconnaissante envers mon co-encadrant, M. Ouldjaoui, pour son encadrement attentif, ses conseils avisés et sa disponibilité constante. Ses précieuses orientations m'ont permis d'acquérir une compréhension approfondie des opérations au sein du complexe Sonatrach.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers M. Siab pour son soutien précieux. De la recherche du stage jusqu'à la fin de cette expérience.

C. Bordjiba.

Dédicaces

*Louange à Dieu, source de toute grâce et de toute
miséricorde,*

À mon père mon modèle de force,

À ma tendre mère,

À mes confidentes sœurs : Imane, Bouchra, Marwa et Ines,

À mes beaux-frères : Adil et Amine,

*À mes très chers neveux et ma nièce : Tamer Salah, Yanis,
Ghazal Layen et Massim,*

À tous mes chers,

*Et enfin, à la personne la plus inestimable dans ma vie, mon
pilier, mon soutien infaillible et mon inspiration constante, à
mon frère bien-aimé Amine,*

Je dédie ce modeste travail.

BORDJIBA Chayma

Table des matières

Résumé	ii
<i>Remerciements</i>	iii
Table des matières.....	v
Liste des abréviations	vii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures	ix
Introduction.....	1
Chapitre 1 Généralités.....	2
1.1. Présentation du complexe.....	2
1.1.1 Situation géographique (ANNEXE A.1).....	2
1.1.2 Direction du complexe	2
1.2 Procédé de liquéfaction	4
1.3 Echangeurs cryogéniques du complexe GL1K	5
1.3.1 Echangeurs à plaques et ailettes en aluminium brasé	5
1.3.2 Echangeurs bobinés.....	6
1.4 Description de l'unité stockage et expédition du GNL	6
Chapitre 2 Réservoirs cryogéniques	7
2.1 Introduction	7
2.2 La cryogénie	7
2.3 Différentes conceptions des réservoirs.....	8
2.4 Description des bacs de stockage du complexe GL1K	8
2.4.1 : Caractéristiques du réservoir TK-102 (annexe B.1)	9

2.5	Problèmes liés au stockage cryogéniques	10
2.5.1	Problèmes mécaniques du stockage cryogénique	10
2.5.2	Le problème thermique du stockage cryogénique.....	11
Chapitre 3 Partie calcul-Estimation boil off.....		12
3.1	Problématique.....	12
3.2	Calcul du taux d'évaporation du GNL dans un bac de stockage GL1K.....	13
3.2.1	Données	13
3.2.2	Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers les parois du réservoir.....	14
3.2.3	Calcul de la masse évaporée par jour	18
3.2.4	Calcul du taux d'évaporation E	20
3.3	Calcul de la quantité de GNL évaporée du complexe GL1K.....	20
3.3.1	Calcul de la quantité du boil-off annuelle	21
3.3.2	Détermination de la quantité du boil-off design.....	21
3.3.3	Détermination de la quantité du boil-off réelle	21
3.4	Résultats et interprétation	21
3.5	Proposition de l'installation d'une boucle de récupération du boil-off.....	22
Conclusion		24
Annexe A.....		25
A.1	Situation Géographique du complexe GL1K	25
Annexe B Fiches techniques des réservoirs TK-102, TK-103 et TK-104		26
B.1	Fiche technique du réservoir TK-102.....	26
B.2	Fiches techniques du réservoirs TK-103 et TK-104.....	27
Annexe C		28
C.1	Propriétés physiques des constituants d'hydrocarbures	28
Bibliographie		30

Liste des abréviations

GNL : Gaz naturel liquéfié

GL1K : Gaz naturel liquéfié pole 1 SKIKDA

GNL2K : Le nouveau méga train

C6+: Hexane +

He: Helium

N2: Azote

CO2: Dioxyde de Carbone

H2O: Monoxyde d'hydrogène

CH4: Methane

C2H6: Ethane

C3H8: Propane

I-CH10: Iso CH10

N-CH10: Normal CH10

CBI: Chicago Bridge & Iron Company

BS 4360 Gr 43A: le réservoir extérieur est construit en utilisant de l'acier conforme à la norme BS 4360, grade 43A.

A553 Gr A : le réservoir intérieur est construit en utilisant de l'acier conforme à la norme A553, grade A

AL5083-0 : le toit est construit en utilisant un alliage d'aluminium 5083 non traité thermiquement.

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Caractéristiques d'un bac de stockage du complexe GL1K (ANNEXE C.1).....	13
Tableau 3-2 : Caractéristiques de l'isolation thermique du bac de stockage (ANNEXE C.1).....	13
Tableau 3-3 : Caractéristiques du GNL du complexe GL1K.(ANNEXE C.1)	14
Tableau 3-4 : Calcul la chaleur latente de vaporisation moyenne du GNL (Lvm).	19
Tableau 3-5 : Production de GNL de l'année 2009 des unités de liquéfaction GL1K.	20
Tableau 3-6 : Les quantités du boil-off (calculée, design et réelle).	22

Liste des figures

Figure 1.1 : Organisation du complexe GL1K de Skikda.	3
Figure 1.1.2 : Schéma synoptique du fractionnement [3].	5
Figure 2.1 : un schéma simplifié de la conception d'un bac de stockage cryogénique [5].	8
Figure 3.1 : Diffusion de la chaleur à travers les parois d'un bac de stockage.	14
Figure 3.2 : Schéma de la boucle de récupération du boil-off.	22

Introduction

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est devenu une composante majeure de l'industrie énergétique mondiale. Il est produit en refroidissant le gaz naturel à des températures très basses, ce qui le transforme en une forme liquide à haute densité énergétique. Cette transformation permet de réduire considérablement son volume, facilitant ainsi son stockage et son transport sur de longues distances. Le gaz naturel liquéfié (GNL) stocké dans des réservoirs cryogéniques subit une évaporation naturelle due à l'entrée de chaleur à travers les parois, appelée "boil-off"

La gestion efficace du boil off est essentielle dans l'industrie du GNL. Des technologies avancées sont utilisées pour minimiser les pertes en récupérant et en recyclant le gaz vaporisé. Cette étude vise à effectuer une évaluation détaillée des pertes qui se produisent dans le cadre du phénomène de boil-off, qu'il soit rejeté directement dans l'atmosphère ou brûlé dans des torchères. Ces pratiques entraînent d'importantes pertes de GNL produit et une augmentation des émissions de gaz toxiques à effet de serre.

La structure de ce mémoire est composée de trois chapitres qui abordent différents aspects liés à la gestion des pertes dans le complexe GL1K. Le premier chapitre introductif traite la présentation du complexe GL1K en fournissant une vue d'ensemble de ses installations et opérations. Le deuxième chapitre se concentre sur les réservoirs cryogéniques utilisés dans le complexe GL1K tout en décrivant leurs caractéristiques et leur fonctionnement, en mettant l'accent sur leur rôle dans les pertes de gaz. Le dernier chapitre est consacré à l'évaluation des pertes et aux résultats des calculs effectués dans le cadre de l'étude. Ce qui permet de présenter de manière cohérente les différentes étapes de l'étude sur la gestion des pertes dans le complexe GL1K.

Chapitre 1

Généralités.

1.1. Présentation du complexe

Dans le cadre de la stratégie de valorisation des ressources en gaz naturel, en particulier celles provenant du gisement de HASSI R'MEL, des usines de liquéfaction de gaz naturel (GNL) ont été construites dans le nord du pays. L'objectif principal de ces installations est d'exporter du GNL vers l'Europe et les États-Unis à l'aide de navires méthaniers [1].

Parmi ces usines, nous citons le complexe GL1/K de SKIKDA. Sa capacité annuelle de production est de 6,678 millions de m³ de GNL avec une capacité de stockage de 196 000 m³.

1.1.1 Situation géographique (ANNEXE A.1)

Le Nouveau Train de GNL de Skikda (Algérie) est situé à l'intérieur de l'enceinte du complexe GL1/K, au Nord-Ouest des trains de liquéfaction existants, le nouveau train arrive pour réaliser la production en GNL qui permet de répondre à la demande toujours croissante des clients notamment avec l'arrêt des unités U20, U30 et U40 suite à l'incident du 19/01/2004.

1.1.2 Direction du complexe

L'organisation du complexe GL1K est représentée dans l'organigramme suivant [1]:

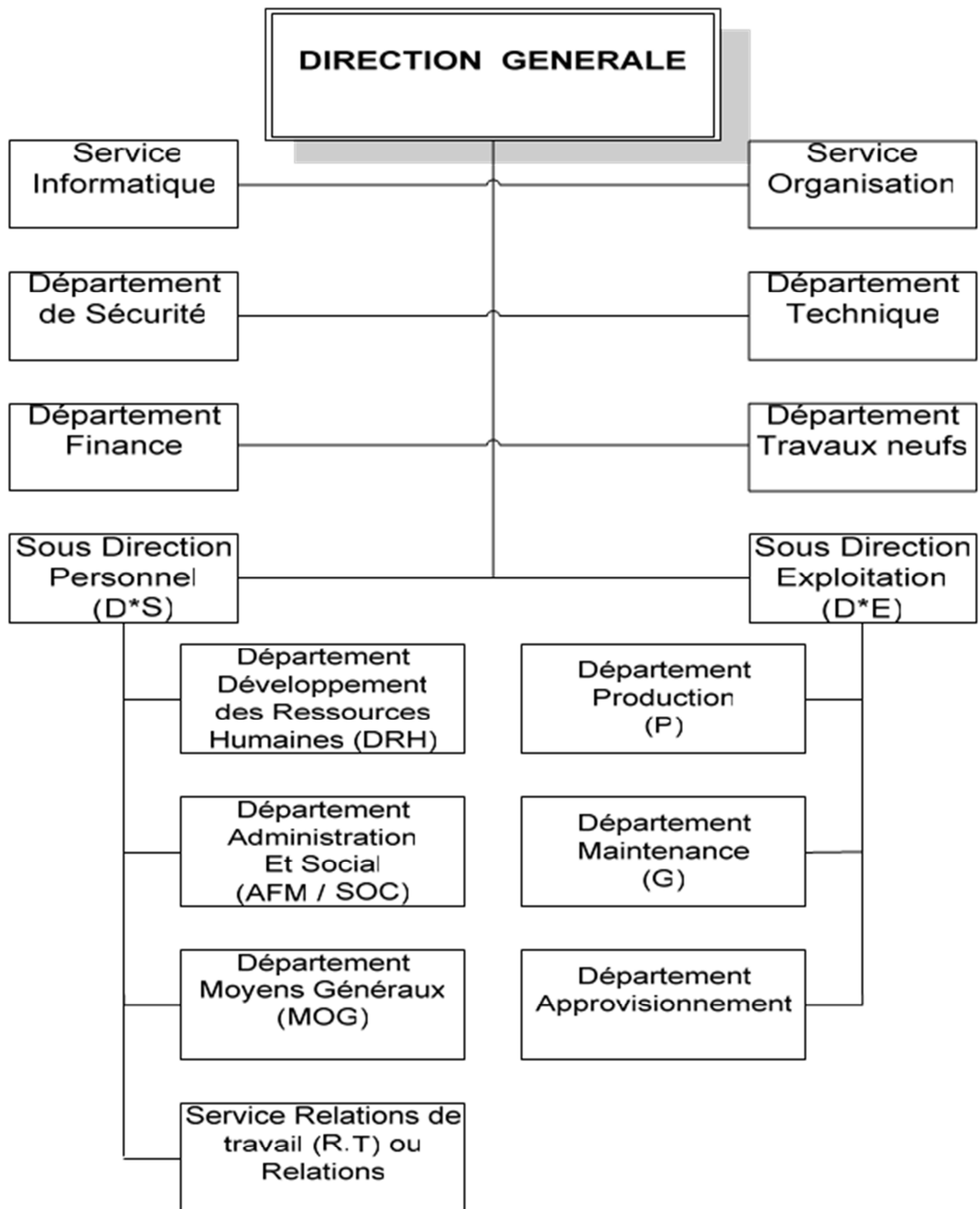


Figure 1.1 : Organisation du complexe GL1K de Skikda.

1.2 Procédé de liquéfaction

Le gaz naturel extrait du gisement de HASSI RMEL est un mélange d'hydrocarbures caractérisé par une concentration en méthane supérieure à 80 %. En plus du méthane, il contient également de l'éthane, du propane, du butane, du pentane et de petites quantités d'hydrocarbures lourds (C6+) en traces [2].

On y trouve également d'autres constituants tels que : He, N₂, CO₂ et H₂O, ainsi que des impuretés sous forme de poussière et de traces d'huile.

Le principal objectif du complexe est de procéder à la liquéfaction du gaz naturel en vue de son exportation, tout en extrayant les autres sous-produits qu'il renferme, tels que l'éthane, le propane, le butane et le pentane.

Chaque unité de liquéfaction est composée de trois sections distinctes :

- Section traitement du gaz.
- Section liquéfaction.
- Section de fractionnement.

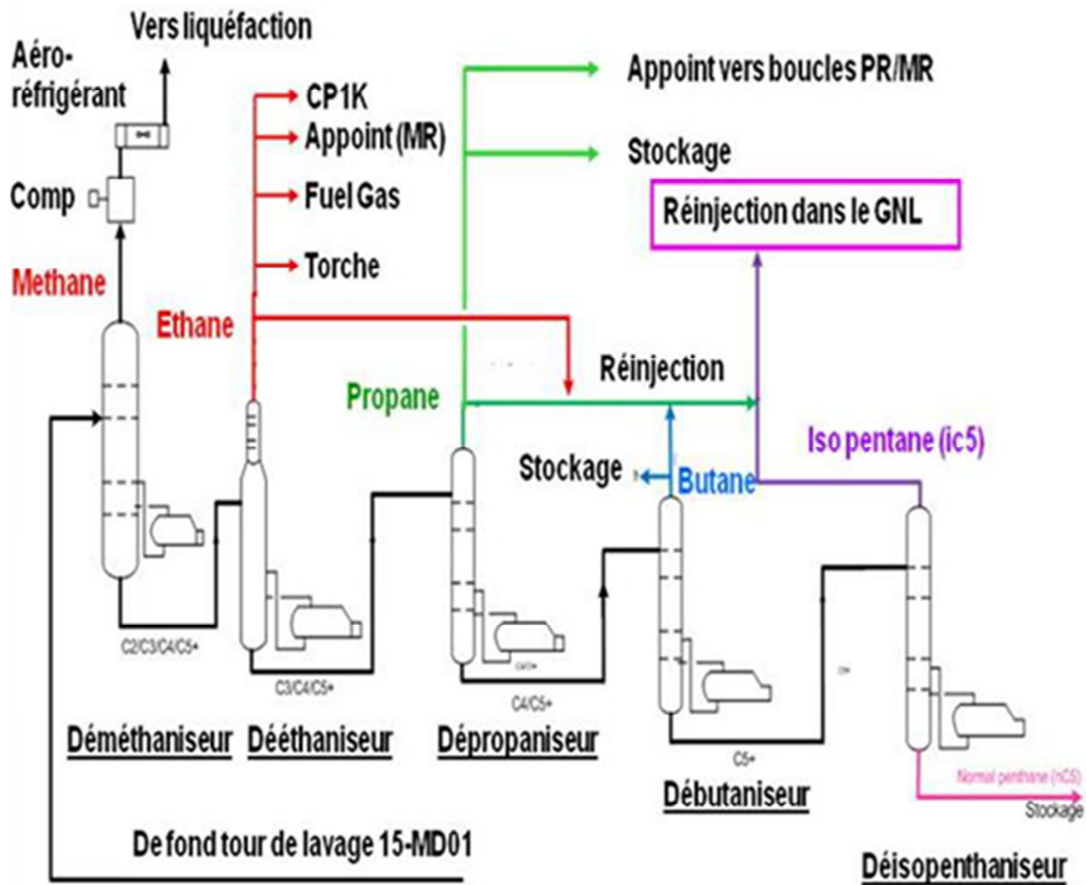


Figure 1.1.2 : Schéma synoptique du fractionnement [3].

1.3 Echangeurs cryogéniques du complexe GL1K

1.3.1 Echangeurs à plaques et ailettes en aluminium brasé

Les échangeurs présents dans les unités 5P et 6P du complexe GL1K se présentent sous forme de batteries d'échangeurs. Ils sont assemblés en blocs de 6 m de hauteur, avec une section maximale de 4 m x 1,4 m. Chaque échangeur a une masse d'environ 12 tonnes. Ces échangeurs sont caractérisés par leur compacité, avec une surface spécifique atteignant 1500 m²/m³. Grâce à un espacement très réduit entre les ailettes, leur diamètre hydraulique est très petit, d'environ 2 mm. Cette conception permet d'obtenir des performances très élevées pour ces échangeurs.

1.3.2 Echangeurs bobinés

Les échangeurs cryogéniques utilisés dans les cycles à cascades incorporés sont de grande taille, et pour des raisons de poids et de coût, les tubes sont fabriqués en aluminium. Ces tubes sont enroulés en forme d'hélice sur un noyau central, formant de nombreuses couches superposées. Deux technologies ont été développées pour la construction de ces échangeurs de grande taille. Au sein de l'unité 10 du complexe GL1K, des échangeurs de ce type sont installés, et leur bobinage est réalisé en position verticale du faisceau.

1.4 Description de l'unité stockage et expédition du GNL

Une fois produit par les unités de liquéfaction du complexe (unités 10, 5P et 6P), le gaz naturel liquéfié (GNL) est acheminé vers l'unité de stockage. De là, il est chargé à bord des méthaniers pour être expédié vers les pays consommateurs [4].

L'unité comprend tous les équipements essentiels pour le stockage et le chargement du GNL. Elle dispose d'une capacité de stockage de 196 000 m³, répartie de la manière suivante :

- Le bac TK 102 d'une capacité de 56 000 m³.
- Les bacs TK 103 / 104 d'une capacité de 70 000 m³.
- Deux pomperies ;

Chapitre 2

Réservoirs cryogéniques

2.1 Introduction

En règle générale, un système de stockage est conçu pour atténuer les déséquilibres entre l'offre et la demande. Son objectif principal, quel qu'il soit, est de compenser les variations dans l'approvisionnement, la consommation, ou les deux, afin de maintenir une certaine stabilité.

En moyenne, le gaz naturel liquéfié (GNL) a une densité moyenne d'environ 480 kg/m³ et un pouvoir calorifique de 25 GJ. Sa forte volatilité présente un risque potentiellement élevé en termes de sécurité. Celui-ci s'analyse en plusieurs aspects :

- La sécurité "passive" implique la conception du réservoir de stockage de manière à réduire au minimum la probabilité des incidents et leurs conséquences. Ces incidents peuvent être d'origine interne ou externe.
- La sécurité "active" se réfère aux mesures mises en place pour faire face aux conséquences des incidents. Cela comprend l'installation de cuvettes de rétention pour contenir les fuites, la mise en place de dispositifs de lutte contre l'incendie.

2.2 Cryogénie

La cryogénie se réfère à la science et à la technologie utilisée pour atteindre et maintenir des températures très basses, allant jusqu'à -235 °C. À l'heure actuelle, les techniques cryogéniques sont largement utilisées dans de nombreux domaines, notamment dans le

secteur énergétique, pour l'exploitation et la valorisation du gaz naturel. Cette utilisation a connu une expansion significative.

2.3 Différentes conceptions des réservoirs

On distingue actuellement les principales variantes suivantes [5]:

- a) Réservoirs aériens à pression atmosphérique avec cuve interne "autoportante".
- b) Réservoirs aériens dits à "membrane".
- c) Réservoirs "enterré" ou "semi enterré".
- d) Réservoirs souterrains en "sol gelé".
- e) Réservoirs aériens sous pression.

2.4 Description des bacs de stockage du complexe GL1K

Le complexe GL1K de Skikda comprend trois réservoirs de stockage de GNL, nommés TK-102, TK-103 et TK-104, qui sont des réservoirs aériens à pression [5].

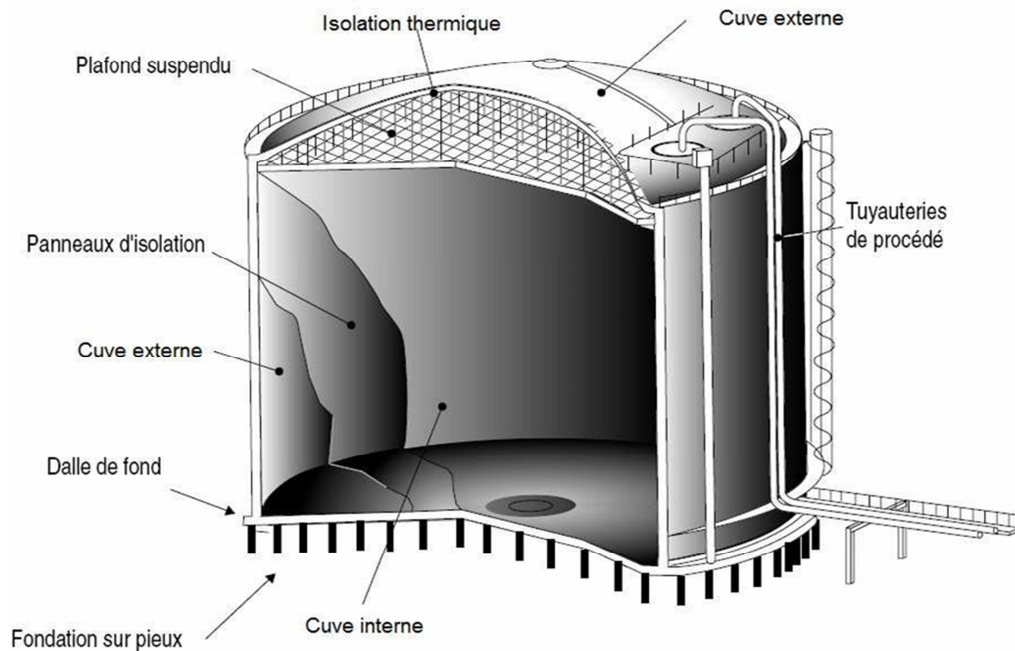


Figure 2.1 : un schéma simplifié de la conception d'un bac de stockage cryogénique [5].

2.4.1 : Caractéristiques du réservoir TK-102 (annexe B.1)

Ce réservoir, construit par CBI pour PRITCHARD-RHODES, est à double enveloppe métallique et toit suspendu. Sa capacité est de 56 000 m³. La cuve externe repose sur une plateforme circulaire en béton armé de 50 m de diamètre et de 0,5 m d'épaisseur au centre, qui elle-même s'appuie sur 544 pieux circulaires de 18 m de haut complétés par environ 400 piliers supportés par une dalle conique rajoutée en sous œuvre, laquelle réduit à 1,2 m l'espace disponible au centre [5].

Le réservoir extérieur à 47,9 m de diamètre pour 48,11 m de hauteur dont 9,61 m de calotte sphérique, le tout en acier BS 4360 Gr 43A.

Le réservoir intérieur à 46 m de diamètre pour 36,2 m de hauteur en acier à 9 % nickel A553 Gr A, avec un toit suspendu en aluminium et situé à 35,89 m du fond intérieur.

L'isolation est constituée :

- Au fond et haut en bas, de sable sec (0,025 m), de foam-glass (0,5 m) et de béton (0,102 m).
- Sur la robe de haut en bas, de laine de verre (0,15 m) et de perlite expansée (0,8 m)
- Sur le toit, de laine de verre (1,17 m).

2.3.2 Caractéristiques des réservoirs TK-103 et TK-104 (annexe B.2)

Ces deux réservoirs, construits par CBI pour PULLMAN-KELLOGG, sont identiques, à double enveloppe métallique et toit suspendu. Leur capacité est de 70 000 m³. Leur cuve externe repose sur un anneau en béton armé de 58,93 m de diamètre extérieur et de 54,43 m de diamètre intérieur et sur une galette de sable de 0,3 m d'épaisseur, à même le sol, rendant nécessaire un réchauffage par résistances électrique.

Le réservoir extérieur à 57,92 m de diamètre pour 44,82 m de hauteur dont 10,22 m de calotte sphérique, le tout en acier BS 4360 Gr 43A [5].

Le réservoir intérieur à 56,09 m de diamètre pour 31,55 m de hauteur en acier à 9 % nickel A553 Gr A, avec un toit suspendu en aluminium AL5083-0 situé à 30,95 m du fond intérieur. Le fond de la cuve interne est de 1,77 m au-dessus de celui du réservoir TK-102.

L'isolation est constituée :

- Au fond et haut en bas, de sable sec (0,025 m), de foam-glass (0,5 m) et de béton (0,102 m).
- Sur la robe de haut en bas de laine de verre (0,15 m) et de perlite expansée (0,75 m)
- Sur le toit, de laine de verre (1,5 m).

2.5 Problèmes liés au stockage cryogéniques

2.5.1 Problèmes mécaniques du stockage cryogénique

En termes "d'analyse de la vapeur", les diverses fonctions d'ordre mécanique que doit assurer un réservoir sont les suivantes [6] :

- a) Contenir le produit (problème d'étanchéité).
- b) Supporter son poids (problème de fondations).
- c) Encaisser les efforts hydrostatiques du liquide : C'est là que le problème mécanique rejoint le problème thermique car les matériaux utilisés et les taux de travail retenus doivent être compatibles avec la température de fonctionnement.
- d) Supporter la pression du gaz surmontant le liquide. Cette pression exerce sur le toit une force qui tend à soulever l'enveloppe externe du réservoir.
- e) Résister aux éléments extérieurs, par exemple la poussée du vent et le poids de la neige pour les réservoirs aériens ou bien la poussée d'Archimède pour les réservoirs enterrés.
- f) résister aux événements exceptionnels déjà mentionnés (séismes, chutes d'objets volants, projectiles...).

2.5.2 Problème thermique du stockage cryogénique

Les échanges de chaleur dans un réservoir de GNL se font par l'un ou plusieurs des trois modes de transmission de la chaleur: rayonnement, convection et conduction. En pratique :

- Le rayonnement, proportionnel à la puissance 4 de la température absolue, ne joue qu'un rôle négligeable dans les réservoirs moyens et grands. Il ne devient notable que pour des réservoirs spéciaux de très petite taille.
- La convection ne joue qu'un faible rôle si l'on prend la précaution d'éviter les mouvements gazeux d'ensemble au sein de l'espace calorifugé.
- La conduction est le mode essentiel de transmission de la chaleur, d'où l'importance du choix du calorifuge. Sur le plan thermique, un matériau est caractérisé par sa conductivité thermique (λ) qui s'exprime en watts par mètre et par degré. A travers une plaque d'épaisseur (e) et de surface (s), soumise à une différence de température ΔT .

La conservation du produit stocké exige évidemment de réduire le taux d'évaporation (E) autant que possible. Car s'il est relativement élevé, le réservoir devra être équipé de dispositifs d'évacuation des évaporations (tuyauteries, robinetterie, compresseurs, etc.) plus importants. Il y a donc un optimum économique à atteindre entre, d'une part, celui de l'augmentation des moyens de reprise des évaporations et d'autre part, celui de l'augmentation de l'épaisseur du calorifuge. Les grands réservoirs des terminaux ont des taux d'évaporation variant de 0,04 à 0,1 % par jour.

Une solution à ce problème consiste alors à reliquéfier ces évaporations. Ce qui présente l'avantage de conserver le stock de GNL et la composition initiale, mais présente l'inconvénient d'un coût élevé.

Chapitre 3

Partie calcul-Estimation boil off.

3.1 Problématique

Pour stocker et transporter le gaz naturel sous forme liquéfiée (GNL), il est nécessaire de le maintenir à une pression atmosphérique. Le transport sous pression a été éliminé en raison de considérations économiques et de sécurité. Le GNL est stocké à des températures proches de la température d'ébullition du méthane (-161,49 °C), ce qui permet de le maintenir dans un état liquide.

Notre étude menée au sein du complexe GL1K vise spécifiquement à évaluer les pertes par évaporation dans les réservoirs de stockage et à proposer des solutions de récupération de ces pertes. L'objectif principal est d'identifier et d'estimer les sources des pertes, de réduire l'autoconsommation du complexe, ce qui se traduirait par une diminution des coûts de production. De plus, en minimisant les pertes par évaporation, nous contribuons à la préservation de l'environnement en réduisant les émissions de gaz toxiques à effet de serre. Cette approche permet ainsi d'allier des avantages économiques et environnementaux pour le complexe GL1K.

3.2 Calcul du taux d'évaporation du GNL dans un bac de stockage GL1K

3.2.1 Données

Les tableaux suivants fournissent une représentation détaillée des caractéristiques spécifiques liées à la conception du bac de stockage, ainsi que des propriétés spécifiques du gaz naturel liquéfié (GNL). sachant que :

- Masse volumique du GNL. ($\rho = 480 \text{ Kg / m}^3$).
- Température ambiante maximum : 47 °C.
- Température intérieur du bac maximum : - 162 °C.
- Température du sol : 15 °C.

Tableau 3-1 : Caractéristiques d'un bac de stockage du complexe GL1K (ANNEXE C.1)

Parois	Cuve interne	Cuve externe	Toit suspendu
Diamètre (m)	56,098	57,927	56,098
Hauteur (m)	31,551	34,587	59,60
Épaisseurs des parois (m)	$13,05 \cdot 10^{-3}$	$12,3 \cdot 10^{-3}$	$13,05 \cdot 10^{-3}$
Conductivité thermique (W / m K)	30	20	186

Tableau 3-2 : Caractéristiques de l'isolation thermique du bac de stockage (ANNEXE C.1)

Position	Matériaux utilisés	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W / m K)
Toit	Laine de verre	1,5	0,036
Inter parois latérales	Perlite	0,15	0,036
	laine de verre	0,75	0,036
Fond	sable	0,025	0,46
	Foam glass	0,5	0,046
	Béton	0,102	1,74

Tableau 3-3 : Caractéristiques du GNL du complexe GL1K.(ANNEXE C.1)

Constituants	Yi (% mole)	Mi (g / mole)	T _{nbi} (K)	T _{ci} (K)	P _{ci} (atm)
N ₂	0,018	28,0134	77,352	126,21	33,524
CH ₄	0,9257	16,043	111,64	190,56	45,374
C ₂ H ₆	0,0506	30,070	184,561	305,44	48,150
C ₃ H ₈	0,0049	44,097	231,077	369,77	41,837
i-CH ₁₀	0,0004	58,123	261,361	407,82	35,911
n-CH ₁₀	0,0004	58,123	272,64	425,1	37,33

3.2.2 Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers les parois du réservoir.

Le schéma simplifié ci-dessous montre une visualisation détaillée du processus de diffusion de la chaleur à travers le toit, les parois latérales et le fond du réservoir.

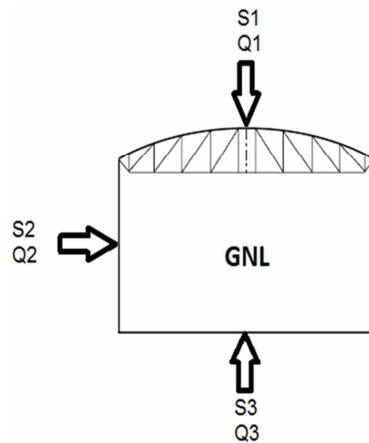


Figure 3.1 : Diffusion de la chaleur à travers les parois d'un bac de stockage.

Où :

S₁ : La surface externe du toit.

Q_1 : La quantité de chaleur diffusée à travers le toit.

S_2 : La surface externe de la paroi latérale.

Q_2 : La quantité de chaleur diffusée à travers la paroi latérale.

S_3 : La surface externe du fond.

Q_3 : La quantité de chaleur diffusée à travers le fond.

La relation suivante donne la quantité de chaleur échangée à travers les parois externes :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (S \cdot \lambda \cdot \Delta T) / e$$

Où :

- S : Surface d'échange du bac de stockage avec le milieu extérieur. (m^2)
- λ : Conductivité thermique. ($W / m K$)
- ΔT : Différence de température. ($^{\circ}C$)
- e : Epaisseur de la paroi. (m)

a. Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers le toit (Q_1)

$$Q_1 = (S_1 \cdot \lambda_1 \cdot \Delta T_1) / e_1 = (S_1 \cdot \Delta T_1) / R_1$$

- S_1 : Surface d'une demi-sphère.

$$S_1 = (\Pi \cdot D^2) / 2 = 3,14 * (57,927 + 2 * 12,3 \cdot 10^{-3})^2 / 2$$

$$S_1 = 5,273 \cdot 10^3 \text{ m}^2$$

- La résistance totale au transfert de chaleur à travers le toit R_1 :

La résistance au transfert de chaleur par conduction est définie comme le rapport entre l'épaisseur (e) et la conductivité thermique de la paroi (λ).

$$R1 = R1' + R1'' + R1'''$$

Où :

- $R1'$: La résistance par conduction du Toit suspendu.
- $R1''$: La résistance par conduction d'Isolation thermique (Toit : laine de verre).
- $R1'''$: La résistance par conduction du Cuve externe.

$$R1 = (13,05 \cdot 10^{-3} / 186) + (1,5 / 0,036) + (12,3 \cdot 10^{-3} / 20)$$

$$R1 = 41,667 \text{ (m}^2 \text{ K / W)}.$$

$$\Delta T1 = T1 - t1 = (47 + 273,15) - (-162 + 273,15)$$

$$\Delta T1 = 209 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{D'où : } Q1 = 26\,450 \text{ W} = 26,45 \text{ KW}$$

b. Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers la paroi latérale (Q2)

$$Q2 = (S2 \cdot \lambda2 \cdot \Delta T2) / e2 = (S2 \cdot \Delta T2) / R2$$

$$\bullet S2 = (\Pi \cdot D \cdot H) = 3,14 \cdot (57,927 + 2 \cdot 12,3 \cdot 10^{-3}) \cdot 34,587.$$

$$S2 = 6,294 \cdot 10^3 \text{ m}^2$$

- La résistance totale au transfert de chaleur à travers la paroi latérale $R2$:

$$R2 = R2' + R2'' + R2'''$$

Où :

- $R2'$: La résistance par conduction du Cuve interne.
- $R2''$: La résistance par conduction d'Isolation thermique (Paroi latérale : perlite+ laine de verre).
- $R2'''$: La résistance par conduction du Cuve externe.

$$R2 = (13,05 \cdot 10^{-3} / 30) + [(0,15 + 0,75) / 0,036] + (12,3 \cdot 10^{-3} / 20)$$

$$R2 = 25,001 \text{ (m}^2 \text{ K / W)}$$

- $\Delta T2 = T2 - t2 = (47 + 273,15) - (-162 + 273,15)$

$$\Delta T2 = 209 \text{ }^\circ\text{C}$$

D'où : $Q2 = 52\,616 \text{ W} = 52,616 \text{ KW}$

c. Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers le fond (Q3)

$$Q3 = (S3 \cdot \lambda3 \cdot \Delta T3) / e3 = (S3 \cdot \Delta T3) / R3$$

- $S3 = \Pi (D^2/4) = 3,14 * (57,927 + 2 * 12,3 \cdot 10^{-3})^2 / 4$

$$S3 = 2,636 \cdot 10^3 \text{ (m}^2\text{)}.$$

- La résistance totale au transfert de chaleur à travers le fond $R3$:

$$R3 = R3' + R3'' + R3'''$$

Où :

- $R3'$: La résistance par conduction du Cuve interne.
- $R3''$: La résistance par conduction d'Isolation thermique (Fond : Sable +Foam glass).
- $R3'''$: La résistance par conduction du Fond (Béton).

$$R3 = (13,05 \cdot 10^{-3} / 30) + [(0,025 / 0,46) + (0,5 / 0,046)] + (0,102 / 1,74)$$

$$R3 = 10,983 \text{ (m}^2 \text{ K / W)}$$

- $\Delta T3 = T3 - t3 = (15 + 273,15) - (-162 + 273,15)$

$$\Delta T3 = 177 \text{ }^\circ\text{C.}$$

D'où : $Q3 = 42\,481 \text{ W} = 42,481 \text{ KW}$

La quantité de chaleur totale diffusée à travers les parois du réservoir $Q = Q1 + Q2 + Q3$.

$$Q = 121\,552 \text{ W} = 121,55 \text{ KW}$$

3.2.3 Calcul de la masse évaporée par jour

La masse évaporée par seconde est calculée en divisant Q par Lvm, où Lvm représente la chaleur latente de vaporisation moyenne du GNL. Cela correspond à un volume liquide $Q / (\rho \cdot Lvm)$ qui s'évapore chaque seconde, où ρ désigne la densité moyenne du GNL.

a. Détermination de la chaleur latente de vaporisation (Lvm) du GNL

Pour le calcul de la chaleur latente de vaporisation du GNL, on applique la relation

« Riedel » :

$$[L_{vap, ni} / T_{nbi}] = 2,17 * [\ln P_c - 1] / [0,930 - T_{nri}]$$

Avec : $T_{nri} = T_{nbi} / T_{ci}$

- $L_{vap, ni}$: La chaleur latente de vaporisation au point de ébullition normale du constituant i, [cal / g].
- T_{nbi} : La température d'ébullition normale du constituant i, [K].

- T_{nri} : La température réduite au point d'ébullition du constituant i , [K].
- P_{ci} : La pression critique du constituant i , [atm].
- T_{ci} : La température critique du constituant i , [K]. Pour les valeurs T_{nri} , P_{ci} , T_{ci} et T_{nbi}

Exemple : Calcul la chaleur latente de vaporisation pour le méthane (CH4) :

$$T_{nri} = T_{nb(CH4)} / T_{c(CH4)} = 111,64 / 190,561 = 0,586$$

$$[L_{vap,n(CH4)} / T_{nb(CH4)}] = 2,17 * [\ln P_{c(CH4)} - 1] / [0,930 - T_{n,r(CH4)}]$$

$$L_{vap,n(CH4)} = [2,17 * (\ln P_{c(CH4)} - 1) / (0,930 - T_{n,r(CH4)})] * T_{nb(CH4)}$$

$$L_{vap,n(CH4)} = [2,17 * (\ln 45,374 - 1) / (0,930 - 0,586)] * 111,64$$

$$L_{vap,n(CH4)} = 1982,400 \text{ [cal / mole]}$$

NB: Le tableau représente les résultats du calcul effectué de manière uniforme pour tous les composants du GNL.

Tableau 3-4 : Calcul la chaleur latente de vaporisation moyenne du GNL (L_{vm}).

Constituants	Yi % mole	Mi g / mole	T_{nbi} K	T_{ci} K	T_{nri} K	P_c atm	L_i Cal / mole	L_i / M_i Cal / g	$Y_i * (L_i / M_i)$ Cal / g
N ₂	0,018	28,0134	77,352	126,21	0,613	33,524	1330,261	47,48	0,854
CH ₄	0,9257	16,043	111,64	190,56	0,586	45,374	1982,4	123,56	114,386
C ₂ H ₆	0,0506	30,07	184,561	305,44	0,604	48,15	3531,16	117,43	5,942
C ₃ H ₈	0,0049	44,097	231,077	369,77	0,625	41,837	4494,5	101,92	0,499
i-CH ₁₀	0,0004	58,123	261,361	407,82	0,641	35,911	5065,216	87,14	0,035
n-CH ₁₀	0,0004	58,123	272,64	425,1	0,641	37,33	5363,305	92,27	0,037
$L_{vm} = \text{somme } (Y_i * L_i)$									121,754

$$L_{vm} = 121,754 \text{ (cal / g)} = 121,754 * 4,18 * 10^3 \text{ (J / Kg)} = 0,508 \text{ 106 (J / Kg)}$$

La masse évaporée est :

$$Q / Lvm = (121,55 \cdot 10^3 / 0,508 \cdot 10^6) = 0,239 \text{ kg / s.}$$

$Q / Lvm = 861,37 \text{ kg / heure} = 20673,07 \text{ kg / jour.}$ Le volume évaporé par jour est :

$$Q / \rho Lvm = (20673,07 / 480) = 43,07 \text{ m}^3 / \text{jour.}$$

3.2.4 Calcul du taux d'évaporation E

Le taux d'évaporation (E) est déterminé en calculant le rapport entre le volume évaporé par jour et la capacité totale du réservoir.

$$E = (Q / \rho Lvm) * (1 / V) * 100$$

Le volume interne est : $V = 70 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

$$E = (43,07 / 70 \cdot 10^3) * 100.$$

$$E = 0,0615 \% \text{ par jour}$$

3.3 Calcul de la quantité de GNL évaporée du complexe GL1K

Le tableau ci-dessous présente la production de GNL de l'année 2009 des unités de liquéfaction situées au niveau du complexe GL1K.

Tableau 3-5 : Production de GNL de l'année 2009 des unités de liquéfaction GL1K.

Unités de liquéfaction	Quantité m ³	Pourcentage %
10	981 201	22,79
5P	1 490 504	34,62
6p	1 833 572	42,59
Total	4 305 277	100

La quantité du GNL vendue et le reste au stock en 31 / 12 / 2009 est de 4 075 322,162 m³.

3.3.1 Calcul de la quantité du boil-off annuelle

La quantité du boil-off annuel est le produit du taux d'évaporation multiplié par la production annuelle :

$$Q_{\text{boil-off annuelle}} = E_{\text{Calculé}} * Q_{\text{Produite}}$$

3.3.2 Détermination de la quantité du boil-off design

Le Boil-off correspond à environ 0,08 % du volume total de GNL produit qui s'évapore dans les réservoirs de stockage. Le phénomène de boil-off est inévitable en raison des échanges thermiques avec l'environnement, qui se produisent par le biais de trois mécanismes de transfert de chaleur : le rayonnement, la convection et la conduction. Le coefficient de 0,08 % représente le pourcentage de GNL qui s'évapore, et il est généralement fourni par le fabricant lors de la conception des réservoirs.

$$Q_{\text{boil-off annuelle}} = E_{\text{Design}} * Q_{\text{Produite}}$$

$$Q_{\text{boil-off design annuelle}} = 0,0008 * 4305277 = 3444,22 \text{ m}^3$$

3.3.3 Détermination de la quantité du boil-off réelle

La quantité du boil-off durant l'année 2020 est donnée par la relation :

$$Q_{\text{boil-off réelle}} = Q_{\text{GNL produite}} - (Q_{\text{GNL vendue}} + Q_{\text{GNL stockée}}).$$

$$Q_{\text{boil-off réelle}} = 4\,305\,277 \text{ m}^3 - 4\,075\,322,162 \text{ m}^3.$$

$$Q_{\text{boil-off réelle}} = 229,955\,103 \text{ m}^3$$

La quantité du GNL évaporée (boil-off) durant l'année 2020 est de 229,955 103 m³, ce qui correspond à 5,34 % de la production.

3.4 Résultats et interprétation

Les résultats des calculs effectués sont précisément représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3-6 : Les quantités du boil-off (calculée, design et réelle).

Boil-off	Quantité (m ³)	% par rapport à la production
Calculé	2647,74	0,0615 %
Design	3444,22	0,08 %
Réel	229,955 10 ³	5,34 %

L'analyse du tableau révèle une légère variation entre la quantité de boil-off calculée et la valeur prévue par les spécifications de conception (Design). Par contre la quantité du boil-off réelle est de 67 fois plus grande que la quantité design. Cette variation est due à l'influence de plusieurs paramètres tels que l'état des équipements, les problèmes opérationnels, et d'autres facteurs qui peuvent affecter le système. Afin de réduire les pertes, il est important de prendre des mesures immédiates en mettant en place des solutions à court terme.

3.5 Proposition de l'installation d'une boucle de récupération du boil-off

Le schéma suivant illustre les divers équipements qui composent la boucle de récupération du boil-off :

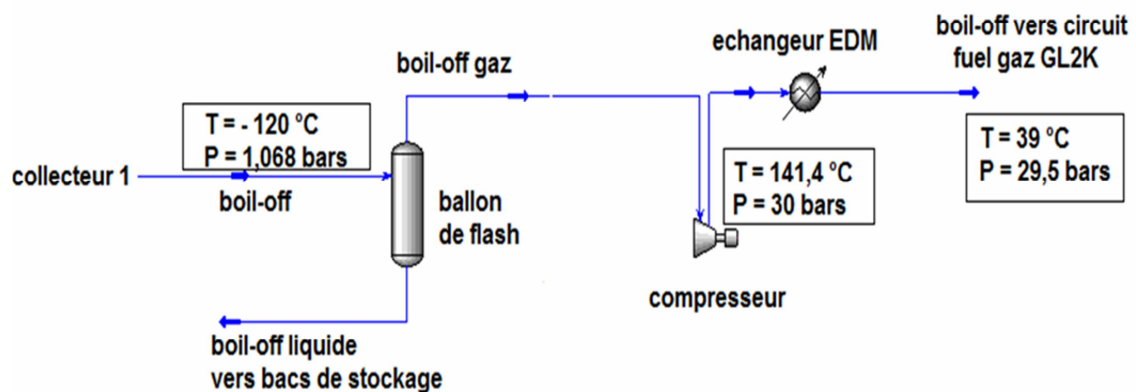


Figure 3.2 : Schéma de la boucle de récupération du boil-off.

Le boil-off qui s'évapore des trois réservoirs de stockage de GNL, TK-102, TK-103 et TK-104, est acheminé vers un collecteur commun (1) à une température de -120 °C et une pression de 1,068 bars absolue. Le flux de gaz provenant du boil-off passe à travers un ballon de flash, dont le rôle est de retenir le liquide susceptible d'être entraîné avec le gaz. Ceci afin d'éviter une détérioration du compresseur.

Le liquide récupéré au fond du ballon de flash est dirigé vers le bac de stockage à l'aide des pompes de retour de GNL. Les vapeurs du ballon sont comprimées par le compresseur pour atteindre une pression de 30 bars, ce qui entraîne une augmentation de température à 141,4 °C.

Le boil-off, après avoir été comprimé, est dirigé vers un échangeur à eau de mer afin de réduire sa température à 39 °C et sa pression à 29,5 bars. Ensuite, il est acheminé vers le circuit fuel gaz du complexe GL2K de Skikda (MEGATRIN).

Conclusion

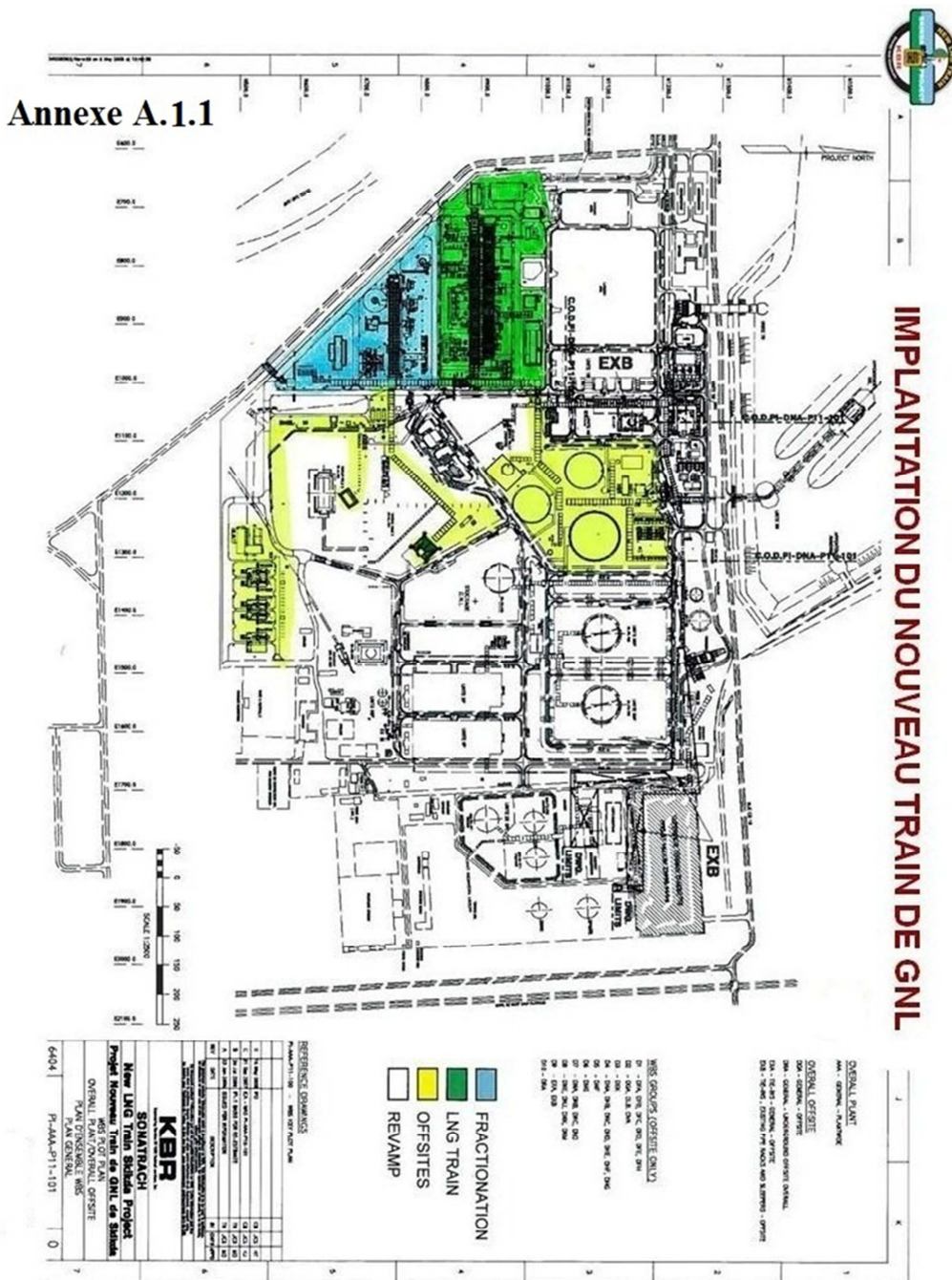
Les pertes par évaporation au sein du complexe GL1K de Skikda sont significatives, atteignant $229\,955\,10^3\text{ m}^3$ de la production de l'année 2009. Ces pertes représentent environ 5,34% de la production totale.

La mise en évidence des principales causes des pertes par évaporation (boil-off) : l'état des équipements (calorifuge, échangeurs cryogénique et à eau de mer,...) et les problèmes d'exploitation (la température de coulée, nombre d'arrêts...) a conduit à la proposition de la création d'une boucle de récupération dédiée au boil-off.

La perspective du domaine de la récupération du boil-off est prometteuse, avec des avancées technologiques continues et un accent croissant sur la durabilité environnementale. Les efforts visent à réduire les pertes de GNL, maximiser l'utilisation du gaz et répondre aux exigences réglementaires. Cela offre des avantages économiques, énergétiques et environnementaux significatifs. La collaboration entre les acteurs de l'industrie est essentielle pour favoriser l'innovation et la mise en œuvre de pratiques durables.

Annexe A

A.1 Situation Géographique du complexe GL1K



Annexe B

Fiches techniques des réservoirs TK-102, TK-103 et TK-104

B.1 Fiche technique du réservoir TK-102.

Capacité nominale m ³		56.000
Type	Aérien double enveloppe métallique, toit suspendu, Dalle ventilée	
Cuve interne	Diamètre m	46.0
	Hauteur m	36.2
	Surépaisseur corrosion mm	néant
Cuve extérieure	Diamètre m	47.9
	Hauteur m	38.5
Calorifuge	Robe	Perlite + laine de verre
	Fond	Foam glass + sable
	toit	Laine de verre
Pression	Service mbar	1.050 (absolu)
	Calcul mbar	120 (relatif)
Dépression	Calcul mbar	- 5 (relatif)
température	Service °C	- 16.2
	Calcul °C	- 1.65
GNL	Masse volumique t/m ³	0.48
Matériau	Cuve intérieure	Acier 9% nickel A353 et A553
	Cuve extérieure	Acier carbone BS 4360
	Toit suspendu	Alliage aluminium AL 5083-0
Taux d'évaporation/capacité totale < 0.08 % jour		
Construction	CHICAGO BRIDGE INTERNATIONAL	1972

B.2 Fiches techniques du réservoirs TK-103 et TK-104

Capacité nominale	m ³	56.000
Type	Aérien double enveloppe métallique, toit suspendu, Dalle ventilée	
Cuve interne	Diamètre	m 46.0
	Hauteur	m 36.2
	Surépaisseur corrosion	mm néant
Cuve extérieure	Diamètre	m 47.9
	Hauteur	m 38.5
Calorifuge	Robe	Perlite + laine de verre
	Fond	Foam glass + sable
	toit	Laine de verre
Pression	Service	mbar 1.050 (absolu)
	Calcul	mbar 120 (relatif)
Dépression	Calcul	mbar - 5 (relatif)
température	Service	°C - 16 2
	Calcul	°C - 1 65
GNL	Masse volumique	t/m ³ 0.48
Matériau	Cuve intérieure	Acier 9% nickel A353 et A553
	Cuve extérieure	Acier carbone BS 4360
	Toit suspendu	Alliage aluminium AL 5083-0
Taux d'évaporation/capacité totale < 0.08 % jour		
Construction	CHICAGO BRIDGE INTERNATIONAL	1972

Annexe C

C.1 Propriétés physiques des constituants d'hydrocarbures

NOTE: Numbers in this table do not have accuracies greater than 1 part in 1000; in some cases extra digits have been added to calculated values to achieve internal consistency or to permit recalculation of experimental values.

PHYSICAL CONSTANTS

*See the Table of Notes and References.

Number	Compound	Formula	A. Molar mass (molecular weight)	B. Boiling point, °F 14.696 psia	C. Vapor pressure, psia 100 °F	D. Freezing point, °F 14.696 psia	E. Refractive index, n_D 60 °F	Critical constants			Number
								Pressure, psia	Temperature, °F	Volume, ft ³ /lb	
1	Methane	CH ₄	16.043	-258.72	(5000)*	-296.41 *	1.00041*	667.0	-116.66	0.0988	1
2	Ethane	C ₂ H ₆	30.070	-127.46	(600)*	-297.02*	1.20971*	707.8	90.07	0.0783	2
3	Propane	C ₃ H ₈	44.097	-43.73	188.68	-305.72*	1.29480*	615.0	205.92	0.0727	3
4	Isobutane	C ₄ H ₁₀	58.123	10.78	72.598	-255.26	1.3245*	527.9	274.41	0.0714	4
5	n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.123	31.08	51.719	-217.03	1.33588*	548.8	305.51	0.0703	5
6	Isopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	82.09	20.450	-255.80	1.34771	490.4	368.96	0.0684	6
7	n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.150	96.89	15.580	-201.48	1.35165	488.1	385.7	0.0695	7
8	Neopentane	C ₅ H ₁₂	72.150	49.10	36.72	2.16	1.342*	464.0	321.01	0.0673	8
9	n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.177	155.70	4.9614	-139.56	1.37708	439.5	451.8	0.0688	9
10	2-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	140.44	6.769	-244.60	1.36571	436.6	435.76	0.0682	10
11	3-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.177	145.86	6.103	-261.20	1.37090	452.5	448.2	0.0682	11
12	Neohexane	C ₆ H ₁₄	86.177	121.50	9.859	-147.68	1.36283	446.7	419.92	0.0667	12
13	2,3-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	86.177	136.33	7.406	-199.35	1.36938	454.0	440.08	0.0665	13
14	n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.204	209.07	1.6211	-130.99	1.38234	397.4	510.9	0.0682	14
15	2-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	194.05	2.273	-180.87	1.37940	396.0	494.44	0.0673	15
16	3-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.204	197.33	2.130	—	1.38326	407.6	503.62	0.0646	16
17	3-Ethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	200.26	2.012	-181.44	1.38800	419.2	513.16	0.0665	17
18	2,2-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	174.50	3.494	-190.80	1.37667	401.8	476.98	0.0665	18
19	2,4-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	176.85	3.294	-182.59	1.37591	397.4	475.72	0.0667	19
20	3,3-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.204	186.87	2.775	-209.99	1.38564	427.9	505.60	0.0662	20
21	Triptane	C ₇ H ₁₆	100.204	177.54	3.376	-12.21	1.38411	427.9	496.24	0.0636	21
22	n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.231	258.17	0.5374	-70.17	1.39248	361.1	563.5	0.0673	22
23	Diisobutyl	C ₈ H ₁₈	114.231	228.34	1.102	-132.09	1.38738	361.1	530.26	0.0676	23
24	Isooctane	C ₈ H ₁₈	114.231	210.58	1.709	-161.23	1.38624	372.7	519.28	0.0657	24
25	n-Nonane	C ₉ H ₂₀	128.258	303.40	0.1716	-64.26	1.40054	330.7	610.8	0.0693	25
26	n-Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.285	345.40	0.06091	-21.33	1.40720	304.6	652.2	0.0702	26
27	Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	70.134	120.60	9.917	-136.89	1.40050	653.8	461.1	0.0594	27
28	Methylcyclopentane	C ₆ H ₁₂	84.161	161.29	4.491	-224.38	1.40400	548.8	499.28	0.0607	28
29	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.161	177.40	3.267	43.79	1.42053	590.7	536.6	0.0586	29
30	Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	98.188	213.69	1.609	-195.87	1.41778	503.4	570.20	0.0600	30
31	Ethene(Ethylene)	C ₂ H ₄	28.054	-154.71	(1400)*	-272.48*	(1.228)*	731.0	48.54	0.0746	31
32	Propene(Propylene)	C ₃ H ₆	42.081	-53.83	232.8	-301.45*	1.3006*	676.6	198.31	0.0717	32
33	1-Butene(Butylene)	C ₄ H ₈	56.108	20.79	62.55	-301.63*	1.3386*	586.4	296.18	0.0683	33
34	cis-2-Butene	C ₄ H ₈	56.108	38.69	45.97	-218.01	1.3556*	615.4	324.31	0.0667	34
35	trans-2-Butene	C ₄ H ₈	56.108	33.58	49.88	-157.97	1.3487*	574.9	311.80	0.0679	35
36	Isobutene	C ₄ H ₈	56.108	19.57	64.95	-220.60	1.3473*	509.5	292.49	0.0681	36
37	1-Pentene	C ₅ H ₁₀	70.134	85.92	19.12	-265.37	1.36487	509.5	376.86	0.0674	37
38	1,2-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	51.52	36.53	-213.14	—	(656.)*	(354.)*	(0.070)*	38
39	1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	24.06	59.46	-164.00	1.3975*	620.3	306.	0.0653	39
40	Isoprene	C ₅ H ₈	68.119	93.29	16.68	-230.71	1.41472	(582.)*	(403.)*	(0.066)*	40
41	Acetylene	C ₂ H ₂	26.038	-119.21*	—	-113.4*	—	890.4	95.29	0.0693	41
42	Benzene	C ₆ H ₆	78.114	176.13	3.225	41.96	1.49436	710.4	552.15	0.0531	42
43	Toluene	C ₇ H ₈	92.141	231.08	1.033	-138.96	1.49102	595.5	605.50	0.0549	43
44	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.167	277.10	0.3716	-138.933	1.49022	523.0	651.22	0.0564	44
45	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	291.91	0.2643	-13.32	1.50017	541.6	674.85	0.0557	45
46	m-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	282.35	0.3265	-54.16	1.49177	512.9	650.95	0.0567	46
47	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.167	280.98	0.3424	55.87	1.49039	509.2	649.47	0.0572	47
48	Styrene	C ₈ H ₈	104.152	293.40	0.2582	-23.14	1.54937	587.8	(703.)*	0.0534	48
49	Isopropylbenzene	C ₉ H ₁₂	120.194	306.27	(0.188)	-140.838	1.48607	465.4	676.2	0.0569	49
50	Methyl alcohol	CH ₃ O	32.042	148.41	4.631	-143.77	1.32443	1174.	463.01	0.0590	50
51	Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ O	46.069	172.87	2.313	-173.4	1.35717	891.7	465.31	0.0581	51
52	Carbon monoxide	CO	28.010	-312.61	—	-336.99*	1.00028*	506.8	-220.51	0.0527	52
53	Carbon dioxide	CO ₂	44.010	-109.235*	—	-69.81*	1.00038*	1069.5	87.73	0.0342	53
54	Hydrogen sulfide	H ₂ S	34.082	-76.49	394.67	-121.86*	1.00057*	1300.	212.40	0.0461	54
55	Sulfur dioxide	SO ₂	64.065	14.11	85.46	-103.84*	1.00059*	1143.	315.7	0.0305	55
56	Ammonia	NH ₃	17.0305	-27.98	211.9	-107.85*	1.00033*	1647.	270.2	0.0681	56
57	Air	N ₂ +O ₂	28.9625	-317.61	—	—	1.00028*	546.9	-221.30	0.0517	57
58	Hydrogen	H ₂	2.0159	-423.130*	—	-434.824*	1.00013*	187.5*	-400.3*	0.5101*	58
59	Oxygen	O ₂	31.9988	-297.317*	—	-361.826*	1.00027*	731.4	-181.41	0.0367	59
60	Nitrogen	N ₂	28.0134	-320.436	—	-345.995*	1.00028*	492.8	-232.49	0.0510	60
61	Chlorine	Cl ₂	70.9054	-29.12	157.3	-149.70*	1.3735*	1157.	290.69	0.0280	61
62	Water	H ₂ O	18.0153	211.953*	0.95014	32.018	1.33335	3200.1	705.11	0.04975	62
63	Helium	He	4.0026	-452.110	—	—	1.00003*	32.99	-450.31	0.2300	63
64	Hydrogen chloride	HCl	36.4606	-121.25	906.71	-173.50*	1.00039*	1205.	124.75	0.0356	64

NOTE: Numbers in this table do not have accuracies greater than 1 part in 1000; in some cases extra digits have been added to calculated values to achieve internal consistency or to permit recalculation of experimental values.

PHYSICAL CONSTANTS

*See the Table of Notes and References.

Number	E			F	G	H	L			J		Number			
	Density of liquid 14.696 psia, 60 °F						Temperature coefficient of density, 1/T	Acentric factor, ω	Compressibility factor of real gas, Z 14.696 psia, 60 °F	Ideal gas 14.696 psia, 60 °F			Specific Heat 60 °F 14.696 psia Btu/(lb °F)		
	Relative density (specific gravity) 60 °F/60 °F	lb/gal (wt in vacuum)	gal/lbmol							Relative density (specific gravity) Air = 1	cu ft gas/lb		cu ft gas/gal liquid	C _p Ideal gas	C _p Liquid
1	(0.3)*	(2.5)*	(6.4172)	—	0.0108	0.9980	0.5539	23.654	(59.135)*	0.52669	—	1			
2	0.35619*	2.9696*	10.126*	—	0.0972	0.9919	1.0382	12.620	37.476*	0.40782	0.97225	2			
3	0.50698*	4.2268*	10.433*	-0.00168*	0.1515	0.9825	1.5226	8.6059	36.375*	0.38852	0.61996	3			
4	0.56286*	4.6927*	12.386*	-0.00122*	0.1852	0.9711	2.0068	6.5291	30.639*	0.38669	0.57066	4			
5	0.58402*	4.8691*	11.937*	-0.00109*	0.1981	0.9667	2.0068	6.5291	31.791*	0.39499	0.57272	5			
6	0.62441	5.2058	13.860	-0.00090	0.2286	—	2.4912	5.2596	27.380	0.38440	0.53331	6			
7	0.63108	5.2614	13.713	-0.00089	0.2510	—	2.4912	5.2596	27.673	0.38825	0.54363	7			
8	0.59665*	4.9744*	14.504*	-0.00106*	0.1965	0.9582	2.4912	5.2596	26.163*	0.39038	0.55021	8			
9	0.66404	5.5363	15.566	-0.00076	0.2990	0.9879	2.9755	4.4035	24.379	0.38628	0.53327	9			
10	0.65788	5.4849	15.712	-0.00078	0.2780	0.9846	2.9755	4.4035	24.153	0.38526	0.52732	10			
11	0.66909	5.5783	15.449	-0.00076	0.2736	0.9860	2.9755	4.4035	24.564	0.37902	0.51876	11			
12	0.65408	5.4532	15.803	-0.00081	0.2334	0.9795	2.9755	4.4035	24.013	0.38231	0.51367	12			
13	0.66630	5.5551	15.513	-0.00076	0.2481	0.9837	2.9755	4.4035	24.462	0.37762	0.51308	13			
14	0.68805	5.7364	17.468	-0.00068	0.3483	0.9947	3.4598	3.7872	21.725	0.38446	0.52802	14			
15	0.68316	5.6956	17.593	-0.00071	0.3312	0.9930	3.4598	3.7872	21.570	0.38170	0.52199	15			
16	0.69165	5.7664	17.377	-0.00069	0.3231	0.9934	3.4598	3.7872	21.838	0.37882	0.51019	16			
17	0.70284	5.8597	17.101	-0.00069	0.3111	0.9938	3.4598	3.7872	22.192	0.38646	0.51410	17			
18	0.67842	5.6561	17.716	-0.00072	0.2870	0.9901	3.4598	3.7872	21.421	0.38651	0.51677	18			
19	0.67721	5.6460	17.748	-0.00072	0.3035	0.9906	3.4598	3.7872	21.382	0.39627	0.52440	19			
20	0.69690	5.8102	17.246	-0.00053	0.2687	0.9919	3.4598	3.7872	22.004	0.38306	0.50194	20			
21	0.69561	5.7994	17.278	-0.00087	0.2501	0.9905	3.4598	3.7872	21.963	0.37724	0.49920	21			
22	0.70678	5.8926	19.385	-0.00064	0.3978	0.9977	3.9441	3.3220	19.575	0.38331	0.52406	22			
23	0.69804	5.8197	19.628	-0.00067	0.3571	0.9958	3.9441	3.3220	19.333	0.37571	0.51130	23			
24	0.69629	5.8051	19.678	-0.00066	0.3043	0.9939	3.9441	3.3220	19.285	0.38222	0.49006	24			
25	0.72193	6.0189	21.309	-0.00061	0.4425	0.9990	4.4284	2.9588	17.808	0.38246	0.52244	25			
26	0.73417	6.1209	23.246	-0.00057	0.4881	0.9996	4.9127	2.6671	16.325	0.38179	0.52103	26			
27	0.75077	6.2593	11.205	-0.00072	0.1938	0.9842	2.4215	5.4110	33.869	0.27122	0.42182	27			
28	0.75467	6.2918	13.376	-0.00069	0.2266	0.9903	2.9059	4.5090	28.370	0.30027	0.44126	28			
29	0.78339	6.5313	12.886	-0.00066	0.2094	0.9927	2.9059	4.5090	29.449	0.29012	0.43584	29			
30	0.77395	6.4526	15.217	-0.00062	0.2352	0.9952	3.3902	3.8649	24.939	0.31902	0.44012	30			
31	—	—	—	—	0.0860	0.9936	0.9686	13.527	—	0.35789	—	31			
32	0.52098*	4.3435*	9.6883*	-0.00171*	0.1404	0.9844	1.4529	9.0179	39.169*	0.35683	0.57201	32			
33	0.60035*	5.0052*	11.210*	-0.00109*	0.1914	0.9699	1.9373	6.7636	33.853*	0.35535	0.52581	33			
34	0.62858*	5.2406*	10.706*	-0.00107*	0.2054	0.9665	1.9373	6.7636	35.445*	0.33275	0.52980	34			
35	0.61116*	5.0954*	11.012*	-0.00110*	0.2034	0.9667	1.9373	6.7636	34.463*	0.35574	0.54215	35			
36	0.60153*	5.0151*	11.188*	-0.00116*	0.1953	0.9700	1.9373	6.7636	33.920*	0.36636	0.54839	36			
37	0.64538	5.3807	13.034	-0.00086	0.2313	0.9487	2.4215	5.4110	29.115	0.35944	0.51782	37			
38	0.65798*	5.4857*	9.8605*	-0.00101*	0.2557	(0.969)	1.8677	7.0156	38.485*	0.34347	0.54029	38			
39	0.62722*	5.2293*	10.344*	-0.00110*	0.1956	0.9723	1.8677	7.0156	36.687*	0.34223	0.53447	39			
40	0.68614*	5.7205*	11.908*	-0.00082*	0.1745	—	2.3520	5.5710	31.869*	0.35072	0.51933	40			
41	—	—	—	—	0.1949	0.9930	0.8990	14.574	—	0.39754	—	41			
42	0.88458	7.3749	10.592	-0.00067	0.2090	0.9937	2.6971	4.8581	35.828	0.24295	0.40989	42			
43	0.87191	7.2693	12.675	-0.00059	0.2632	0.9970	3.1814	4.1184	29.938	0.26005	0.40095	43			
44	0.87168	7.2674	14.609	-0.00056	0.3027	0.9985	3.6657	3.5744	25.976	0.27768	0.41139	44			
45	0.88467	7.3757	14.394	-0.00052	0.3113	0.9989	3.6657	3.5744	26.363	0.28964	0.41620	45			
46	0.86894	7.2445	14.655	-0.00055	0.3257	0.9987	3.6657	3.5744	25.894	0.27427	0.40545	46			
47	0.86570	7.2175	14.710	-0.00056	0.3214	0.9986	3.6657	3.5744	25.798	0.27470	0.40255	47			
48	0.91069	7.5926	13.718	-0.00056	(0.241)*	—	3.5961	3.6435	27.664	0.26682	0.41261	48			
49	0.86635	7.2229	16.641	-0.00055	0.3260	0.9991	4.1500	3.1573	22.805	0.30704	0.42053	49			
50	0.79620	6.6381	4.8270	-0.00065	0.5649	—	1.1063	11.843	78.618	0.32429	0.59192	50			
51	0.79395	6.6193	6.9598	-0.00060	0.6446	—	1.5906	8.2372	54.525	0.33074	0.56381	51			
52	0.78938*	6.5812*	4.2561*	—	0.0477	0.9996	0.9671	13.548	89.163*	0.24847	—	52			
53	0.81801*	6.8199*	6.4532*	-0.00583*	0.2667	0.9964	1.5196	8.6229	58.807*	0.19908	—	53			
54	0.80143*	6.6817*	5.1005*	-0.00157*	0.0948	0.9846	1.1767	11.1351	74.401*	0.23839	0.50418	54			
55	1.3974*	11.650*	5.4991*	—	0.2548	0.9802	2.2120	5.9235	69.008*	0.14802	0.32458	55			
56	0.61831*	5.1550*	3.3037*	—	0.2558	0.9877	0.5880	22.283	114.87*	0.49678	1.1209	56			
57	0.87475*	7.2930*	3.9713*	—	—	0.9996	1.0000	13.103	95.557*	0.23980	—	57			
58	0.071069*	0.59252*	3.4022*	—	-0.2216*	1.0006	0.06960	188.25	111.54*	3.4066	—	58			
59	1.1421*	9.5221*	3.3605*	—	0.0216	0.9992	1.1048	11.859	112.93*	0.21898	—	59			
60	0.80940*	6.7481*	4.1513*	—	0.0370	0.9997	0.9672	13.546	91.413*	0.24828	—	60			
61	1.4243*	11.875*	5.9710*	—	0.0878	(0.98875)	2.4482	5.3519	63.554*	0.11375	—	61			
62	1.00000	8.33720	2.1608	-0.00013	0.3445	—	0.62202	21.065	175.62	0.44469	0.99974	62			
63	0.12510*	1.0430*	3.8376*	—	0.	1.0006	0.1382	94.814	98.891*	1.2404	—	63			
64	0.85128*	7.0973*	5.1372*	-0.00300*	0.1259	0.9923	1.2589	10.408	73.869*	0.19086	—	64			

Bibliographie

- [1] KBR, "Historique du complexe GL1K de Skikda," ed.
- [2] KBR, "DESCRIPTION DES FONCTIONS DE CONTRÔLE ET DE SÉCURITÉ UNITÉ 15 – LIQUÉFACTION," ed.
- [3] KBR, "DESCRIPTION DES FONCTIONS DE CONTRÔLE ET SÉCURITÉ UNITÉ 07 – FRACTIONNEMENT," ed.
- [4] KBR, "STOCKAGE ET EXPÉDITION DU GNL," ed.
- [5] E.-I. training, " TUYAUTERIE - ROBINETTERIE - MATÉRIEL DE STOCKAGE 2 ", ed.
- [6] E.-I. training, "TUYAUTERIE - ROBINETTERIE - MATÉRIEL DE STOCKAGE," ed.