



Department of Process Engineering

قسم هندسة الطرائق

Ref :...../U.M/F.S.T/2024

رقم : / ج.م.ك.ع.ت//2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option: **GÉNIE CHIMIQUE**

THÈME

**Calcul du taux d'évaporation pour vérifier la couche isolante
d'un bac de stockage de GNL**

Présenté par

1-Mlle. BEKADA Nacera

2-Mlle. AOUDJA Sara

Soutenu le 12 /06/ 2024 devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------|--------------------------|
| Président : | KHELLADI Malika | Grade MCB | Université de Mostaganem |
| Examineur : | MEKHATRIA Djilali | Grade MCB | Université de Mostaganem |
| Rapporteur : | MOHAMED SEGHIR Zahira | Grade MCB | Université de Mostaganem |

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Un grand merci à **ALLAH** Tout-Puissant qui nous a donné la force, la volonté et la patience, nous a guidé et a éclairé notre chemin.

Nous adressons aussi nos remerciements aux membres de jury Mme M. KHELLADI et Mr D. MEKHATRIA qui feront l'honneur de juger notre travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur **Dr. Zahira MOHAMED SEGHIR** pour ses orientations, ses conseils et l'aide qu'elle nous a apportée durant la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à **Mr MEZIRI Ibrahim** pour sa sympathie, son aide précieuse dans cette lourde tâche.

Nous remercions très vivement le personnel du département de technique qui nous a accueillis au sein du complexe GL3/Z, pour leurs encouragements et leurs aides.

Mes collègues de la promotion de Génie chimique. Merci pour cette belle aventure riche en expérience.

En fin, nous remercions nos parents et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.



Dédicace

Avec joie, fierté et respect. Je dédie ce travail

A ma très chère Mère

Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.

Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte.

J'avoue vraiment que vous êtes pour moi la lumière qui me guide vers le chemin de la réussite. C'est à vous que je dois mon succès.

A mon très cher père

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie.

A mes sœurs. Rania, Aya et Amina

Puisse dieu vous garde, éclaire votre route et vous aide à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

A mes grands parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous.

A toute ma famille et tous mes amis sans exception.

BEKADA Nacera

Dédicace

Je tiens à remercier dans un premier temps **ALLAH** le tout puissant qui me représente la source de force et de puissance pour la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail à mes parents, qui se sont sacrifiés pour ma réussite et la réalisation de mes objectifs, en particulier ma mère décédée, que Dieu ait pitié d'elle, que j'espérais être en vie en ce beau moment.

Je dédie cette note :

A mes frères et sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis et copines sans exception.

Aoudja Sara

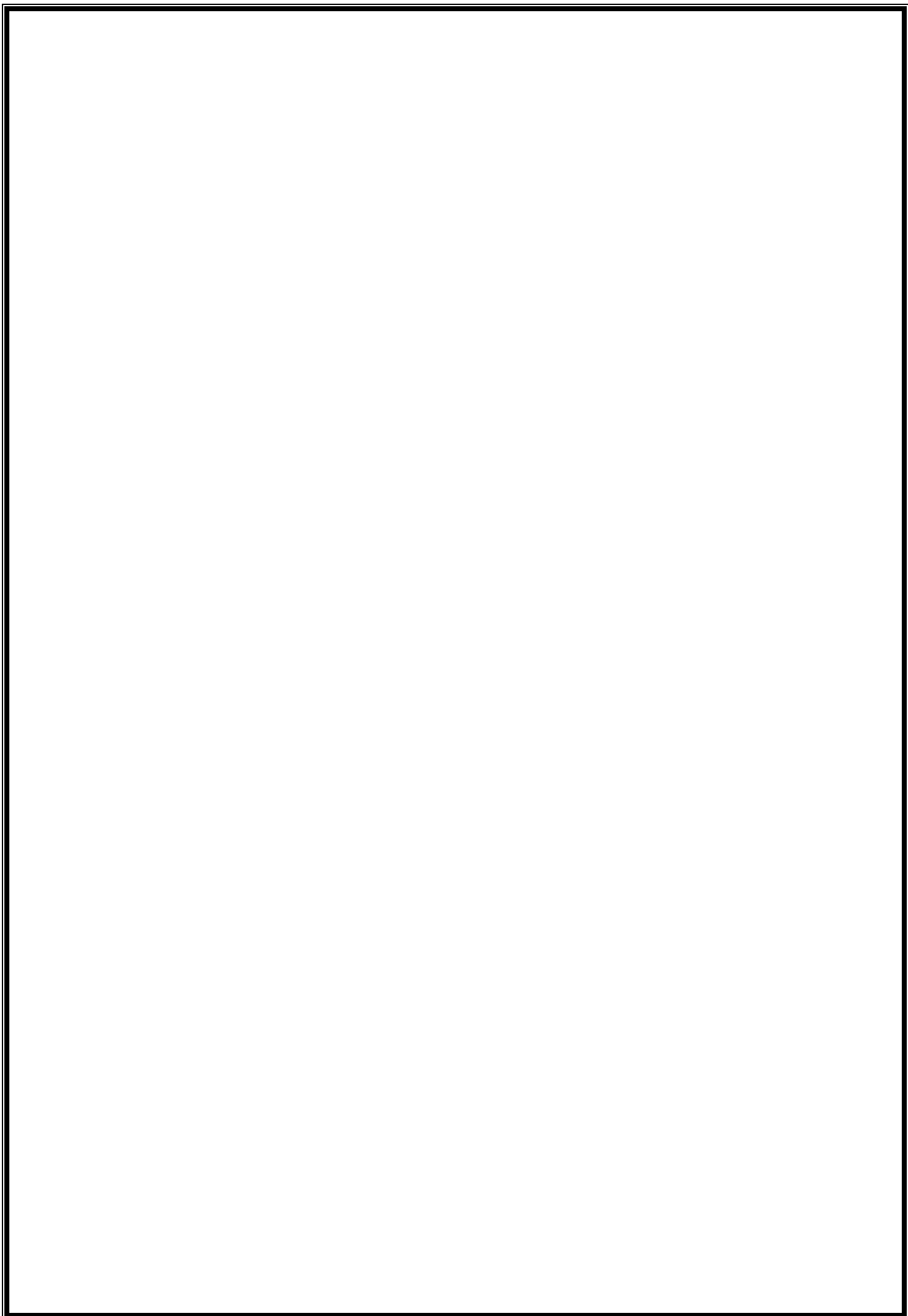


Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Évolution attendue de la croissance de la consommation de gaz naturel dans le monde, pour la période 2004-2030 et par secteur d'activités..... | 8 |
| Figure I.2: Situation géographique du complexe GL3/Z | 9 |
| Figure I.3: Maquette 3D montre les différentes sections de l'usine..... | 11 |
| Figure II.1: Schéma synoptique du processus du MEGA-TRAIN..... | 17 |
| Figure II.2: Réservoir aérien à double enveloppe métallique..... | 19 |
| Figure II.3: Réservoir aérien en béton précontraint | 20 |
| Figure II.4: Réservoir en terre gelée | 21 |
| Figure III.1: Structure du bac de GNL | 29 |
| Figure III.2: Schématisation des transferts de chaleur à travers le toit de bac 71-MF01..... | 33 |
| Figure III.3: Schéma de la surface latéral du bac 71-MF01..... | 35 |
| Figure III.4: Schéma de la surface du fond du bac..... | 36 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I.1: Quelques compositions types de gaz naturel ne contenant pas de H ₂ S..... | 6 |
| Tableau I.2: Les principales caractéristiques du complexe GNL3/Z..... | 10 |
| Tableau II.1: Comparaison de différents isolants..... | 25 |
| Tableau III.1: Caractéristiques des réservoirs du complexe GL3/Z..... | 30 |
| Tableau III.2: Caractéristiques et construction du toit de bac de GNL. | 30 |
| Tableau III.3: Caractéristiques et construction de paroi latérale de bac de GNL. | 31 |
| Tableau III.4: Caractéristiques et construction du fond de bac de GNL. | 31 |
| Tableau III.5: Caractéristiques du GNL du complexe GL3/Z. | 32 |
| Tableau III.6: Calcule de la quantité de chaleur diffusée à travers le réservoir de GNL. | 36 |
| Tableau III.7: Quantité de boil-off réel par barémage..... | 38 |
| Tableau III.8: Quantités du boil-off et taux d'évaporation par rapport à la production. | 38 |



NOMENCLATURE

| | |
|------------------------|--|
| GNL : | Gaz naturel liquéfié. |
| GPL : | Gaz de Pétrole liquéfié. |
| GN : | Gaz naturel. |
| BOG : | Section de reliquéfaction des vapeurs. |
| APCI : | Air Product and Chemicals Incorporation. |
| PR : | Ping Robinson. |
| MR : | Multi réfrigérant. |
| MDEA : | Méthyle Di éthanol Amine active. |
| TGE : | Tokyo Gas Engineering. |
| He: | Hélium. |
| Hg: | Mercure. |
| CH₄: | Méthane. |
| THT: | Tetra-hydrothiophene |
| N₂: | Nitrogène. |
| e : | Épaisseur (m). |
| Q: | Quantité de chaleur totale transmise au méthane à travers la surface du bac (W). |
| V : | Volume total du bac (m ³). |
| λ : | Conductivité thermique du matériau (W/m.K). |
| ρ : | Masse volumique (kg/m ³). |
| ΔT : | Différence de température. |
| T₀ : | Température ambiante (°C). |
| T₁ : | Température moyenne de liquide de la surface des parois et du toit du bac (°C). |
| T₂ : | Température moyenne de liquide de la surface de fond du bac (°C). |
| H : | Hauteur de la surface d'échange (m). |
| L_v : | Chaleur latente d'évaporation du GNL (kJ.kg ⁻¹). |
| τ: | Taux d'évaporation (%). |
| D : | Diamètre intérieur et extérieur de l'isolant (m). |
| H : | Hauteur de la surface d'échange (m). |

Tables des matières

| | |
|--|-----------|
| Remerciement..... | I |
| Dédicaces | II |
| Liste des figures | IV |
| Liste des tableaux | V |
| Nomenclature..... | VI |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I :Généralité sur le gaz naturel et description du GL3/ | 3 |
| I.1Introduction | 4 |
| I.2Généralité sur le gaz naturel | 4 |
| I.2.1L'origine de gaz naturel | 4 |
| I.2.2Les différents types de gaz naturel | 5 |
| I.2.3Composition du gaz naturel | 6 |
| I.2.4Caractéristiques du gaz naturel | 7 |
| I.2.5Utilisations du gaz naturel | 7 |
| I.3Description du GNL3/Z | 8 |
| I.3.1Présentation du complexeGL3/Z | 8 |
| I.3.2Emplacement et disposition de l'usine | 9 |
| I.3.3Principales caractéristiques du complexe GNL3/Z | 10 |
| I.3.4Zone d'usine de base du complexe GL3/Z..... | 10 |
| I.3.5Les Unités du complexe | 11 |
| I.4 Conclusion | 12 |
| Chapitre II : liquéfaction du GN et types de bacs de stockage ... | 13 |
| II.1Introduction | 14 |
| II.2Procédé de liquéfaction | 14 |
| II.2.1Unités de traitement | 14 |
| II.2.1.1Unité de décarbonatation | 15 |
| II.2.1.2Unité de déshydratation | 15 |
| II.2.1.3Unité de démercurisation | 15 |
| II.2.2L'unité de liquéfaction | 15 |
| II.2.3 L'unité de fractionnement | 16 |

| | |
|--|-----------|
| II.2.4 L'unité de stockage | 16 |
| II.3 Différents types de stockage..... | 17 |
| II. 3.1 Réservoir aérien à double enveloppe métallique..... | 18 |
| II.3.2 Réservoir aérien en béton précontraint | 19 |
| II.3.3 Réservoir en béton moulé dans le sol | 20 |
| II.3.4 Réservoir en terre gelée | 20 |
| II.4 Les différents types d'isolations..... | 21 |
| II.4.1. Poudre | 21 |
| II.4.1.1 Perlite..... | 22 |
| II.4.1.2 Aérogel de Silice | 22 |
| II.4.2 Les mousse | 22 |
| II.4.2.1 Mousses de polyuréthane | 22 |
| II.4.2.2 Mousse de verre | 22 |
| II.4.2.3 Mousse de polyéthylène..... | 23 |
| II.4.2.4 Mousses de polystyrène..... | 23 |
| II.4.3 Les fibres..... | 23 |
| II.4.4 Isolation sous vide..... | 23 |
| II.4.5 Super Isolation | 24 |
| II.5 Comparaison de l'efficacité des différents types d'isolation | 24 |
| II.6 Conclusion | 25 |
| Chapitre III : Détermination de taux d'évaporation du GNL | |
| dans un bac de stockage | 27 |
| III.1 Introduction | 28 |
| III.2 Le problème thermique du stockage..... | 28 |
| III.3 Le problème d'évaporation | 28 |
| III.4 Description des bacs de GNL | 29 |
| III.4.1 Matériaux de construction du bac 71-MF01 et 71-MF-02..... | 30 |
| III.5 Caractéristiques du GNL du GL3/Z..... | 31 |
| III.6 Calcul le taux d'évaporation du GNL dans un bac de stockage | |
| GL3/Z..... | 32 |
| III.6.1 Les hypothèses..... | 32 |

| | | |
|----------------|---|-----------|
| III.6.2 | Calcul de la quantité de chaleur diffusée par unité de temps | 32 |
| III.6.3 | Calculs du taux d'évaporation..... | 36 |
| III.7 | Calcul de la quantité de GNL évaporée..... | 37 |
| III.7.1 | Calcul de la quantité du boil-off annuel..... | 37 |
| III.7.2 | Détermination de la quantité du boil-off design | 37 |
| III.7.3 | Détermination de la quantité du boil-off réel..... | 37 |
| II.8 | Conclusion | 39 |
| | Conclusion générale..... | 40 |
| | Références bibliographiques | 41 |

Résumé :

Le but de ce travail est d'étudier le phénomène de Boil-Off qui se produit dans les bacs de stockage de méthane du complexe GL3/Z qui appartiennent à la société nationale SONATRACH. Au niveau de ce complexe, deux bacs sont installés afin de stocker le gaz naturel traité et liquéfié, contenant plusieurs couches et isolation. A cet effet nous avons mené une étude sur l'effet des isolants sur les pertes et le taux d'évaporation pour les bacs 71-MF01 et 71-MF02.

Le méthane qui est stocké à une température cryogénique (-162 °C), joue un rôle important sur le marché mondial du GNL. Lors du stockage du méthane, une partie de ce méthane s'évapore en phase gazeuse en raison des infiltrations thermiques. Ce phénomène d'évaporation peut provoquer des modifications dans la composition du liquide stocké, affectant négativement la stabilité et la sécurité du processus de stockage. Le taux d'évaporation doit être déterminé avec précision, et pour cela nous utilisons des relations et des équations bien étudiées.

Les résultats montrent que le taux d'évaporation est principalement affecté par le milieu environnant.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة ظاهرة التبخر التي تحدث في صهاريج تخزين غاز الميثان التابعة لمجمع GL3/Z التابع للشركة الوطنية سونا طراك. تم تركيب خزانين في هذا المجمع لتخزين الغاز الطبيعي المعالج والمسال يحتويان على عدة طبقات وعوازل. ولهذا الغرض قمنا بدراسة تأثير العوازل على معدل التبخر للخزانين الميثان، الذي يتم تخزينه في درجة حرارة مبردة (-162 درجة مئوية)، دورًا مهمًا في سوق الغاز الطبيعي المسال العالمي. أثناء عمليات تخزين الميثان، يتبخر جزء منه إلى الطور الغازي بسبب التسرب الحراري. وتؤدي ظاهرة التبخر هذه إلى تغيير في تركيبة السائل المخزن ولها تأثير سلبي على استقرار وسلامة عملية التخزين. ويجب تحديد معدل التبخر بدقة، ولهذا استخدمنا علاقات ومعادلات مدروسة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن معدل التبخر يتأثر بشكل رئيسي بالبيئة المحيطة .

Abstract:

The aim of this work is to study the Boil-Off phenomenon that occurs in the methane storage tanks of the GL3/Z complex belonging to the national company SONATRACH. At this complex, two tanks are installed to store processed and liquefied natural gas under various insulation constructions. To this end, we carried out a study on the effect of insulation on losses and evaporation rates for tanks 71-MF01 and MF02.

Methane, which is stored at cryogenic temperature (-162°C), plays an important role in the global LNG market. During methane storage processes, some of the gas evaporates due to thermal infiltration. This evaporation phenomenon leads to a change in the composition of the stored liquid, and has a negative effect on the stability and safety of the storage process. The evaporation rate needs to be accurately determined, and for this purpose we have used well-studied relationships and equations.

The results obtained show that the evaporation rate is mainly affected by the ambient environment.

Les mots clés :

Boil-Off, les pertes , le taux d'évaporation, GNL, bac de stockage

Introduction

Générale

Introduction générale :

À l'instar du pétrole, l'énergie gazière occupe une position importante sur le marché mondial en raison de ses grandes réserves. En raison de sa souplesse et de sa facilité d'utilisation, elle possède certaines qualités qui lui permettent de devenir une source d'énergie importante et occupant une position de premier plan pour répondre aux besoins énergétiques du monde.

Le GNL est une technologie éprouvée qui existe depuis près de 60 ans. Cette technologie a été introduite en Algérie en 1963 et a été utilisée pendant de nombreuses années par un certain nombre de nations, notamment les États-Unis, la France, la Belgique, l'Espagne et la Corée.

L'industrie de liquéfaction du gaz naturel est donc en pleine expansion et l'Algérie y joue un rôle très important, elle exporte 94% des importations en gaz naturel de toute la région méditerranéenne. Elle est le troisième pourvoyeur de l'Union européenne et le quatrième exportateur sur le marché mondial.

Le gaz naturel, avant d'être exporté vers les pays consommateurs, ce gaz est refroidi à une température de -162 °C , au point où il devient liquide. Avant son acheminement vers les méthaniers, il est stocké dans des réservoirs cryogéniques.

Malgré tous les efforts pour parvenir à une ultra-isolation de ces réservoirs, la pénétration de la chaleur du milieu environnant vers l'intérieur des réservoirs persiste et provoque l'évaporation du GNL : L'évaporation (le boil-off) représente une perte énorme, d'autant plus que ce phénomène affecte la composition chimique et physique du gaz naturel liquéfié. C'est pour cela qu'il est indispensable de maîtriser les causes qui sont à l'origine de cette perte afin de l'évaluer et d'essayer de la minimiser.

Les principales sources de production de Boil-off dans les usines de GNL sont :

- L'échange thermique entre le bac et l'environnement (infiltrations thermiques à travers les parois des bacs).
- Le retour des vapeurs durant le chargement des cuves des méthaniers.
- Les pertes de charge et les entrées de chaleur dans les lignes de transfert.

Notre travail, élaboré à l'issue d'un stage pratique au niveau de GL3/Z, méga train à Arzew, consiste à calculer le taux d'évaporation pour vérifier la couche isolante d'un bac de stockage de GNL. Le travail est subdivisé en trois chapitres :

Quant au premier, consacré à une généralité sur le gaz naturel, l'origine, les caractéristiques, les utilisations, ainsi qu'une présentation du complexe.

Le deuxième représente la procédure de liquéfaction du GN, les techniques de stockage, types de bac et une généralité sur l'isolation des bacs.

Le troisième chapitre renferme une détermination du taux d'évaporation du GNL d'un réservoir cryogénique de stockage dans le complexe de GL3/Z par des calculs thermiques, avec interprétation des résultats.

Enfin, une conclusion globale résumant les résultats obtenus dans cette étude.

Chapitre I :
Généralité sur le gaz
naturel et description du
GL3/Z

I.1 Introduction

Le XIX^e siècle (19^e siècle) est considéré comme le début de l'industrie du gaz naturel. Tout d'abord, le gaz « de fabrication » est obtenu à partir du charbon et le gaz est principalement utilisé pour l'éclairage. Ce gaz est formé d'un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène et est produit par la gazéification du charbon en présence de vapeur d'eau. Après la Seconde Guerre mondiale, la France utilisait encore le « gaz de ville » ou le « gaz d'eau » [1].

Le rôle du gaz naturel s'est développé rapidement au cours des deux dernières décennies, porté par ses avantages en termes de protection de l'environnement et de flexibilité d'utilisation. Les réductions spectaculaires des coûts obtenues grâce aux progrès technologiques ont permis d'allonger les distances de transport. Les progrès de l'industrie du GNL ont également contribué à cette tendance. L'utilisation du gaz naturel dans les centrales électriques à cycle combiné, qui surpassent largement les sources d'énergie concurrentes en termes d'efficacité et produisent la moitié des émissions de CO₂ des centrales électriques au charbon, a permis à la demande de gaz naturel de véritablement exploser. En conséquence, la part du gaz naturel dans la consommation mondiale d'énergie primaire est passée à 23 % en 2022[1].

I.2 Généralités sur le gaz naturel

I.2.1 L'origine du gaz naturel

Le gaz naturel est formé par la dégradation de la matière organique accumulée pendant des millions d'années. Deux mécanismes principaux sont responsables de cette dégradation.

- Le « gaz bactérien » ou gaz biochimique est formé par l'action de bactéries sur les débris organiques qui s'accumulent dans les sédiments. Ces gaz sont généralement produits à des profondeurs ne dépassant pas quelques centaines de mètres et contiennent du méthane relativement pur. Le méthane bactérien représente environ 20 % des réserves actuellement connues [1].
- Le « gaz thermique » est formé par la dégradation de la matière organique (appelée kérogènes) qui s'accumule dans les sédiments fins, notamment les argiles. Cette dégradation se produit sous les effets combinés de la température et de la pression [1].

I.2.2 Les différents types de gaz naturel

On distingue deux types de gaz :

a) Gaz conventionnel

La proportion d'hydrocarbures plus lourds que le méthane détermine les différents types de gaz naturel conventionnel :

- **Le gaz sec** (non associé) ne forme pas de phase liquide et contient une forte proportion de méthane.
- **Le gaz humide** forme une phase liquide dans les conditions de production.
- Pendant la production, **le gaz condensé** forme une phase liquide dans le réservoir.
- **Le gaz associé** coexiste dans le réservoir avec une phase huileuse [1].

b) Gaz non conventionnel

Les gaz non conventionnels comprennent le gaz provenant de réservoirs de faible perméabilité (tight gas en anglais), le gaz de schiste, le gaz de houille et le gaz contenu dans des gisements d'hydrates. Ces gaz non conventionnels ont pris une grande importance sur le plan économique, en raison des développements importants intervenus aux États-Unis, grâce à la mise en œuvre de nouvelles technologies de production, faisant appel au forage horizontal et à la fracturation hydraulique. Les gisements de gaz de faible perméabilité sont à présent considérés le plus souvent comme des gisements de gaz conventionnel. En effet, ils ne se distinguent que par la faible perméabilité de la roche-réservoir. La fracturation hydraulique permet d'augmenter la productivité, rendant de tels gisements exploitables dans de bonnes conditions économiques [1].

Le « gaz de houille », contenu dans des veines de charbon inexploitées, est communément appelé « grisou ». Il est produit depuis de nombreuses années déjà, notamment aux États Unis [1].

Le « gaz de schiste » (shale gas en anglais) est formé par du gaz, contenu dans une roche-mère, qui n'a pas migré jusqu'à une roche-réservoir. La production de ce gaz aux États-Unis, qui a démarré beaucoup plus récemment, a bouleversé la situation énergétique et a constitué ce que l'on a parfois appelé « la révolution du gaz de schiste » [1].

Les hydrates sont des composés solides formés par des molécules de méthane enfermées à l'intérieur de cages constituées par des molécules d'eau. Les quantités de gaz concernées

sont potentiellement très élevées, mais les difficultés d'exploitation sont telles, qu'il n'existe pas pour le moment d'exploitation de gaz naturel à partir d'hydrates[1].

I.2.3 Composition du gaz naturel

Le composant principal du gaz naturel (GN) est le méthane CH_4 (souvent plus de 80 %) viennent ensuite les hydrocarbures saturés, plus lourds que le méthane (C_2 à C_8) dont les proportions décroissent avec l'augmentation du nombre d'atomes de carbone (tableau I.1).

On peut aussi y trouver en quantité extrêmement variable, d'un gisement à un autre, de l'azote N_2 , de l'hélium He, du mercure Hg, du dioxyde de carbone CO_2 , parfois du sulfure de dihydrogène H_2S qu'il faut éliminer, et de la vapeur d'eau [2].

Tableau I.1: Quelques compositions types de gaz naturel ne contenant pas de H_2S [1].

| Composants (% molaire) | Type de gaz | | | |
|---|-------------|---|-------|-----------------------|
| | Gaz brut | Gaz épuré à l'entrée du liquéfacteur | | |
| | | Algérie | Libye | Libye « Gaz associé » |
| He | 0,19 | 0,19 | – | – |
| N_2 | 5,6 | 5,61 | 1,1 | 1,4 |
| CO_2 | 0,21 | 0,01 | – | – |
| CH_4 | 83,4 | 83,57 | 84,9 | 63 |
| C_2H_6 | 7,6 | 7,62 | 7,3 | 19,1 |
| C_3H_8 | 1,9 | 1,9 | 3,5 | 10 |
| i- C_4H_{10} | 0,3 | 0,3 | 0,9 | 2,1 |
| n- C_4H_{10} | 0,4 | 0,4 | 0,9 | 2,2 |
| i- C_5H_{12} | 0,12 | 0,12 | 0,4 | 0,8 |
| n- C_5H_{12} | 0,13 | 0,13 | 0,4 | 0,8 |
| C_6H_{14} et C_6^+ | 0,15 | 0,15 | 0,6 | 0,6 |
| totale % | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H_2O ppm | 15 | < 1 | < 1 | < 1 |

I.2.4 Caractéristiques du gaz naturel

Le gaz naturel, essentiellement composé de méthane, est :

- ❖ Incolore ;
- ❖ Inodore (il est odorisé par THT pour le rendre détectable) ;
- ❖ Insipide ;
- ❖ Plus léger que l'air ;
- ❖ Peu soluble dans l'eau ;
- ❖ Sa masse volumique est de $0,72\text{g/cm}^3$;
- ❖ Sa masse moléculaire est de $16,7\text{g/mol}$;

Les points de liquéfaction et de solidification sont respectivement de -162 °C et -185 °C (dans des conditions ordinaires de pression et de température).

Le comportement du gaz naturel est influencé par le nombre de molécules, la pression, la température et le volume qu'il occupe [3].

I.2.5 Utilisations du gaz naturel

Le gaz naturel joue un rôle majeur dans l'approvisionnement énergétique.

▪ Le Marché résidentiel

Il est connu surtout pour son usage domestique, le chauffage et la cuisson, et 30% de la consommation du gaz naturel au niveau mondial est destinée à ce secteur [4].

▪ Le secteur industriel

Le gaz naturel est utilisé comme matière première dans l'industrie chimique, notamment pour la pétrochimie et le raffinage. A titre d'exemple, on peut citer la synthèse de l'ammoniac et de l'urée, et la synthèse du méthanol utilisé comme base d'additif des essences. Au niveau mondial, la part du gaz utilisée comme matière première est très faible (4%) par rapport à son utilisation industrielle [4].

▪ La production d'électricité

Depuis une dizaine d'année, le secteur électrique est devenu le moteur principal de l'augmentation de l'utilisation du gaz naturel dans le monde, une tendance qui devrait se poursuivre [4].



Figure I.1:Évolution attendue de la croissance de la consommation de gaz naturel dans le monde, pour la période 2004-2030 et par secteur d'activités [5].

I.3 Description du GNL3/Z

I.3.1Présentation du complexeGL3/Z

Le complexe GL3/Z est un site industriel de production de gaz naturel liquéfié (GNL) Situé dans la zone industrielle d'Arzew au nord-ouest de l'Algérie [8].

L'unité est constituée d'un seul train de liquéfaction de gaz naturel (train géant) et Toutes les infrastructures nécessaires, y compris les services publics, le stockage et les installations de chargement des navires [8].

Le GNL produit des composants plus lourds tels que le GPL et L'essence est exporté vers les marchés internationaux [8].

L'éthane est un sous-produit extrait du gaz naturel et devrait être exporté, à ce jour, aucun vapocraqueur n'a été construit. Cependant, un peu d'éthane Continuer à répondre à la consommation interne du train, notamment en le réinjectant dans Divers réfrigérants et leurs utilisations comme gaz. Le courant d'hélium brut sera disponible a une interconnexion qui alimentera une usine d'extraction d'hélium [8].

I.3.2 Emplacement et disposition de l'usine

Le site est situé à Bathioua sur la côte méditerranéenne, à l'est d'Arzew, dans la région Partie du port industriel d'Arzew (El Djedid), d'une superficie de 54,6 hectares. L'usine GPL (GP1Z) est située en bordure Est du site, tandis que l'usine de dessalement (KAHRAMA) et L'usine GL/2Z existante est située à la frontière ouest. Au nord du site se trouvent les routes méditerranéennes et portuaires, et au Sud les routes principales menant à la zone industrielle. Le site est accessible via les chemins de terre existants ; l'installation offshore existante s'applique à l'usine GL3/Z [6].

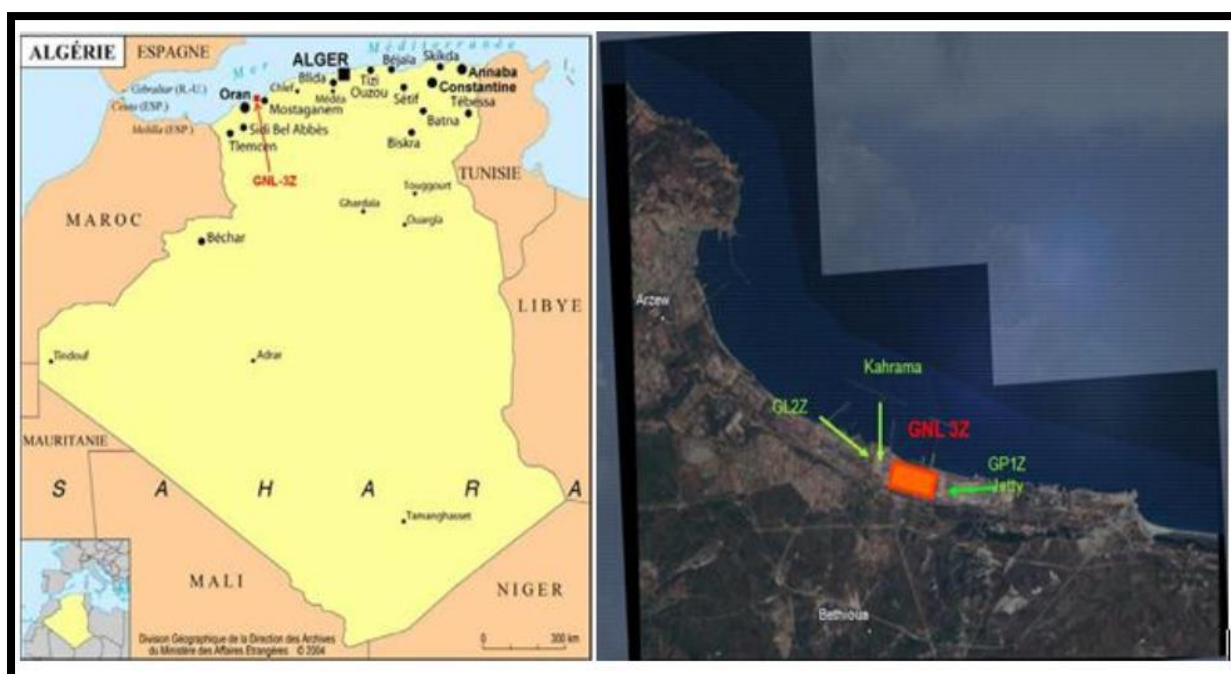


Figure I.2: Situation géographique du complexe GL3/Z [9].

I.3.3 Principales caractéristiques du complexe GNL3/Z

Tableau I.2: les principales caractéristiques du complexe GNL3/Z [6].

| | |
|------------------------------------|---|
| Société de construction | Joint-venture ,SAIPEM-CHYODA |
| Date de construction | Octobre2009 |
| Début de production de GNL | En démarrage (2014) |
| Provence du GN | Plusieurs puits du sud-centre et sud-est |
| Nombre de train | 01 méga-train |
| Capacité de production | 4.7 millions de tonnes/an |
| Capacité de stockage | GNL (2*160.000m ³) Propane (56.000m ³) Butane (12.000m ³) Gazoline (1800m ³) Propane réfrigérant (3000m ³) Ethane réfrigérant (600m ³) |
| Fonctionnement de l'usine | 330 j/an (90.4%) |
| Autonomie des utilités | Puissance électrique générée (4GTG 33.9 MW chacune) |
| Technologie de liquéfaction | APCI (Air Product Chemical Inc's) |
| Système de refroidissement | réfrigérant à air |

I.3.4 Zone d'usine de base du complexe GL3/Z

GL3/Z est divisé en trois domaines fondamentaux, à savoir :

1. La zone de traitement comprend le système de processus de liquéfaction du gaz naturel.
2. Zones terminales des installations off-sites, y compris les unités de stockage et de chargement et les systèmes d'exportation de GNL (terminaux, stockage et torchères).
3. Zones utilitaires associées pour les besoins propres du train GNL ainsi que les raccordements pour l'azote, l'eau potable et éventuellement l'eau distillée [8].

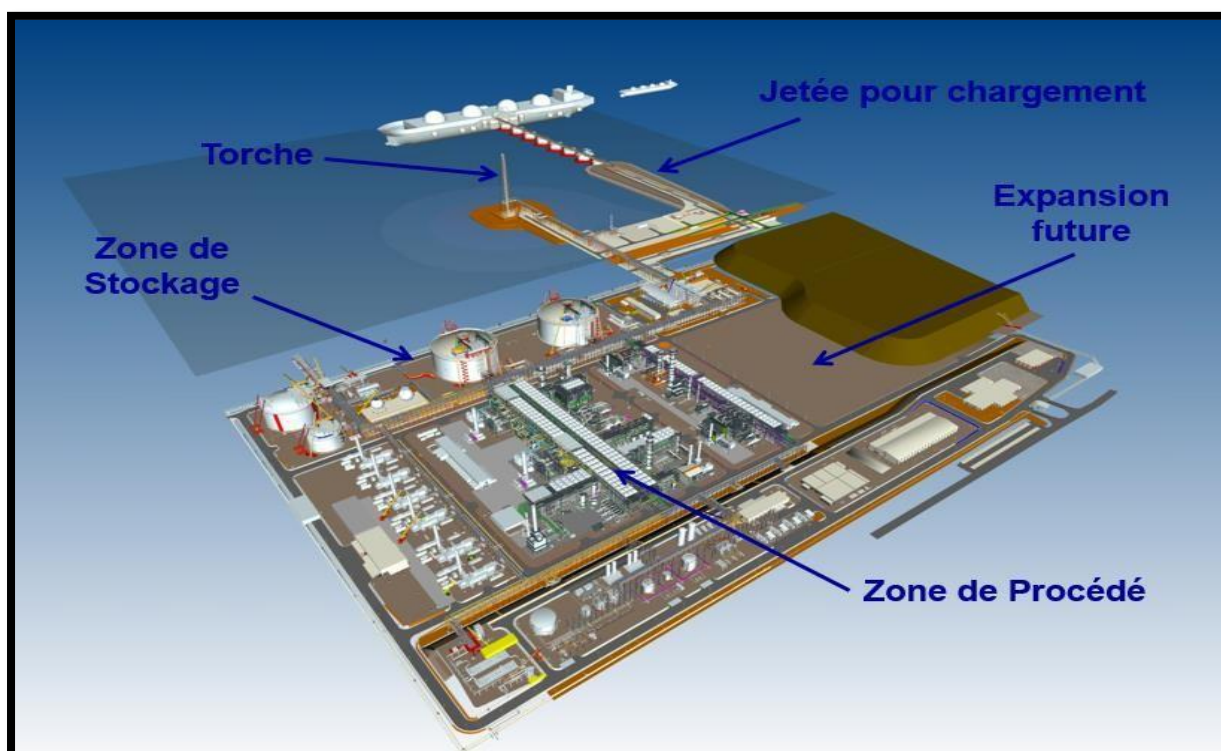


Figure I.3:Maquette 3D montre les différentes sections de l'usine [10].

I.3.5 Les Unités du complexe

Les différentes unités du procédé principal de l'usine GNL3/Z :

A. Zone de procédé

L'ensemble du processus se déroule dans les unités opérationnelles suivantes :

- Unité 11 : traitement du Gaz d'Alimentation.
- Unité 12 : Élimination du CO₂.
- Unité 13 : Déshydratation de Gaz.
- Unité 14 : Système du Gaz Combustible.
- Unité 15 : Liquéfaction.
- Unité 16 : Réfrigération.
- Unité 17 : Récupération et Fractionnement du GNL.
- Unité 18 : Système de l'Huile Chaude.
- Unité 19 : Système d'Eau de refroidissement [6,7].

B. Zone d'utilités

La zone d'utilités implique les unités suivantes :

- Unité 01 : Installation d'entrée.
- Unité 02 : Stockage de solvant (L'Amine).
- Unité 08 : Stockage de l'Huile Chaude.
- Utilité 53 : Système du Générateur Diesel d'Urgence.
- Unité 55 : Système commun de gaz combustible.
- Unité 56 : Système d'Air Instrument et d'Air Service.
- Unité 57 : Système d'Azote.
- Unité 58 : Système d'Eau Potable.
- Unité 59 : Système d'Eau Déminéralisée et de Service.
- Unité 64 : Traitement des Eaux Usées et des Effluents [6,7].

C. Zone terminale

- Unité 71 : Chargement et Stockage du Produit GNL.
- Unité 72 : Chargement et Stockage du Produit GPL.
- Unité 73 : Stockage du Réfrigérant.
- Unité 75 : Système de Torches.
- Unité 76 : Système de Stockage de la Gazoline [6,7].

I.4 Conclusion

Comme le pétrole, le gaz naturel est un hydrocarbure naturel. C'est une source d'énergie fiable et efficace. La plupart des sous-produits et tous les composants non énergétiques du gaz naturel sont éliminés dans les usines de traitement et de liquéfaction avant d'être mis sur le marché. Parmi ces usines, le complexe GL3/Z.

**Chapitre II : liquéfaction du
GN et types de bacs de
stockage.**

II.1 Introduction

Les fabricants utilisent des réservoirs de formes et de conceptions différentes visant à s'adapter de manière rationnelle et économique aux caractéristiques des produits stockés [11].

Le stockage du gaz naturel liquéfié (GNL) constitue une étape importante dans la chaîne d'approvisionnement du gaz naturel, car il contribue à répondre à la demande saisonnière et à transporter efficacement le gaz naturel sur de longues distances. L'efficacité du stockage du GNL dépend en grande partie de la qualité de l'isolation des réservoirs, qui garantit le maintien des basses températures nécessaires au maintien du gaz à l'état liquide [11].

L'isolation des réservoirs de GNL implique l'utilisation de matériaux d'isolation avancés et de techniques de conception spéciales pour minimiser les pertes de chaleur et réduire la pression d'évaporation du gaz. Ces matériaux isolants ont été choisis pour leur faible conductivité thermique, leur résistance à l'humidité et à la corrosion et leur durabilité dans des conditions de froid extrême [12].

II.2 Procédé de liquéfaction

Dans l'unité de liquéfaction, le gaz naturel passe par plusieurs sections avant sa liquéfaction et qui sont :

- Section traitement.
- Section séparation (fractionnement).
- Section liquéfaction [13].

II.2.1 Unités de traitement

Avant la liquéfaction, le GN doit subir trois traitements pour être débarrassé de trois éléments :

- Le gaz carbonique : CO_2
- L'eau : H_2O
- Mercure : Hg

Les unités de traitement sont :

II.2.1.1 Unité de décarbonatation

Pour éliminer le CO₂ contenu dans le GN qui arrive à 0.19% et doit être réduit à 50 ppm par adsorption chimique par une solution de Méthyle Di éthanol Amine activé (MDEA_a) Concentré à 60% eau et 40% Amine. L'élimination du CO₂ est nécessaire, pour éviter la solidification et le bouchage de l'échangeur principal [13].

II.2.1.2 Unité de déshydratation

Lors de la liquéfaction, le GN est refroidi par étape depuis +35°C à -164°C. Si l'eau, contenue dans le gaz, n'est pas extraite elle se solidifierait et pourrait provoquer le bouchage de l'échangeur principal. Le séchage est réalisé par circulation du gaz carbonaté de haut en bas sur des tamis moléculaires ayant un haut pouvoir d'adsorption. Le taux d'humidité à la sortie doit être inférieur à 1ppm [14].

II.2.1.3 Unité de démercurisation

La dernière unité de traitement, elle est conçue pour éliminer le mercure du gaz à travers l'adsorbeur qui contient un lit de charbon actif pour protéger la section cryogénique de l'usine, cette unité est conçue pour réduire le niveau de mercure dans le gaz à moins de 0.01mg/Sm³ [14].

II.2.2 L'unité de liquéfaction

La liquéfaction est l'étape la plus importante, elle consiste à combiner entre l'abaissement de la température du gaz et l'augmentation de sa pression. C'est-à-dire, on comprime suffisamment le gaz puis on enlève sa chaleur par un fluide réfrigérant (MR) dans l'échangeur principal. Ce fluide à son tour, sera auto-refroidi à contre-courant dans le même échangeur cryogénique, ensuite par échange de chaleur dans des condenseurs dont le fluide réfrigérant est le propane. La chaleur du GN est ainsi enlevée, le GNL est liquéfié à une température de -162°C sous la pression atmosphérique et stocké dans un bac de 160 000 m³ [14].

II.2.3 L'unité de fractionnement

Le rôle de cette section est de séparer les constituants lourds (éthane, propane, butane, gazoline, C₅+) du gaz traité pour avoir un GNL qui répond aux spécifications commerciales [14].

II.2.4 L'unité de stockage

Le but de cette unité est de stoker le GNL produit du nouveau train de GNL, elle comprend deux bacs de stockage de GNL d'une capacité de 160 000 m³, de type confinement intégral, structure en béton à toit suspendu et une cuve interne en acier à 9% de nickel, et d'autres bacs pour les autres composants [14].

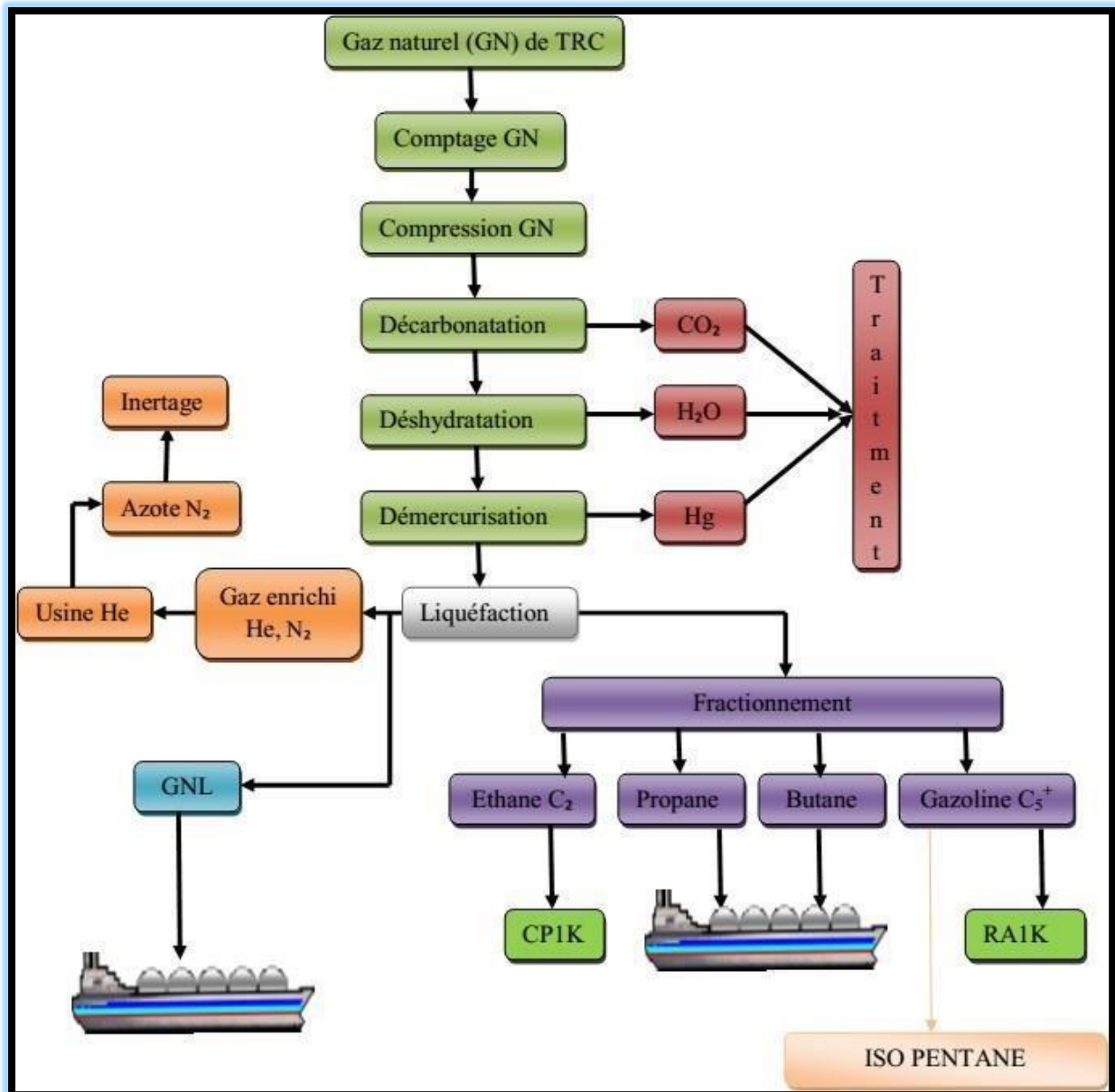


Figure II.1: Schéma synoptique du processus du MEGA-TRAIN [15].

II.3 Différents types de stockage

Différents types de réservoirs ont été érigés à travers le globe ; ils se distinguent en fonction de leur position par rapport au sol et de leur entourage ou non d'une cuvette de rétention [16].

La fonction d'une cuvette de rétention est de collecter d'éventuelles fuites importantes de GNL causées par une altération du réservoir de stockage. Son existence et sa conception sont directement liées à la conception du bac lui-même [16].

Actuellement les réservoirs existants peuvent être classés selon quatre catégories :

- Réservoir aérien à double enveloppe métallique.

- Réservoir aérien en béton précontraint.
- Réservoir en béton moulé et enterré.
- Réservoir en sol gelé [16].

II. 3.1 Réservoir aérien à double enveloppe métallique

Les réservoirs aériens en métal à double paroi sont les plus couramment utilisés pour le stockage du GNL [16].

Parmi les bénéfices, l'emplacement de ces réservoirs ne dépend pas des conditions météorologiques [16].

Les caractéristiques géologiques du site et leur système d'isolation thermique peuvent être prévus pour tout taux d'évaporation pratique. Le premier réservoir de GNL à double parois métalliques a été érigé à Charles Lake en Louisiane (USA) en 1957, en utilisant les techniques et les matériaux déjà utilisés dans l'industrie cryogénique [16].

La composition du réservoir est composée de deux cuves qui se renferment l'une dans l'autre, et l'espace entre les deux est rempli de calorifuges (isolation) [16].

- La cuve interne (qui peut être différente en fonction des méthodes de fabrication) est une membrane en métal mince qui possède les caractéristiques nécessaires pour recevoir le GNL. On retrouve fréquemment l'utilisation d'alliages d'aluminium et d'acier nickelé. La cuve en question fonctionne grâce à un matériau isolant solide qui transfère les charges hydrostatiques à une dalle en béton qui supporte l'ensemble. Le toit de cette cuve peut être soit autoportant, soit construit à partir d'un voile métallique suspendu à la structure interne [16].
- Un réservoir extérieur en acier au carbone qui préserve les matériaux isolants des conditions météorologiques et peut supporter les variations climatiques [16].
- L'espace entre les cuves est rempli par des matériaux isolants tels que la perlite, la laine de verre et les matières plastiques expansées. L'atmosphère de gaz inerte est maintenue dans cet espace afin d'éviter toute altération des propriétés des isolants par l'humidité [16].

Les équipements de contrôle et de sécurité du réservoir comprennent des soupapes, des jauges de niveau et des sondes de mesure de pression et de température. En général, on procède à l'isolation du fond en utilisant des éléments en verre cellulaire (foamglass), qui sont ininflammables, étanches à l'eau et résistants à la compression [16].

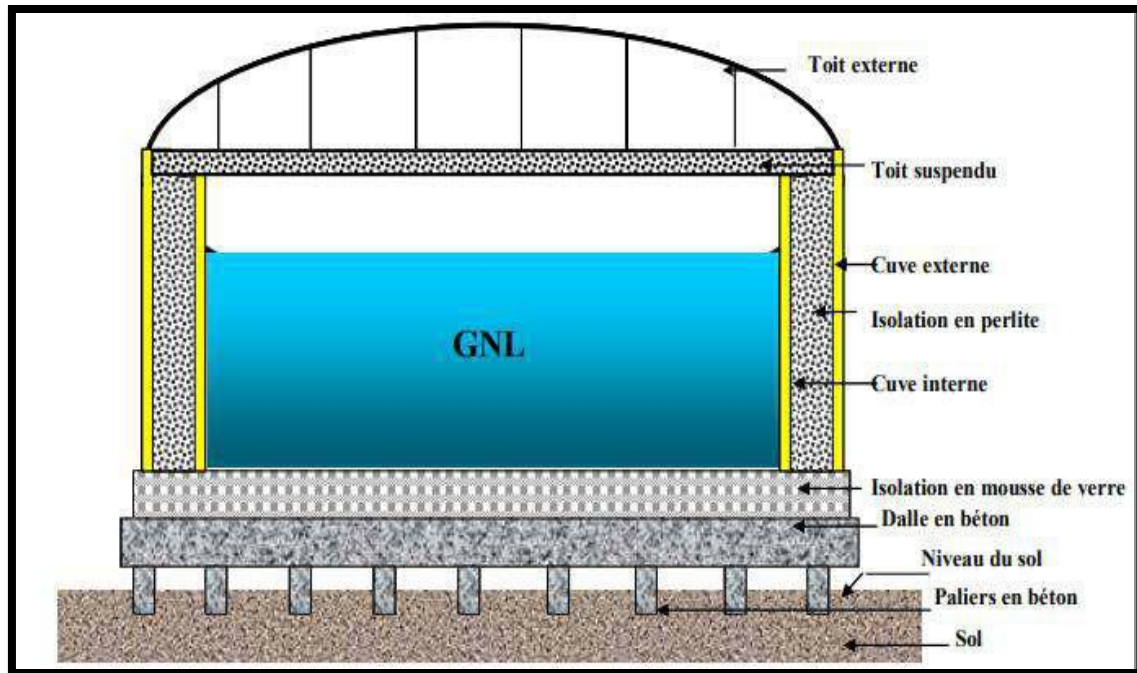


Figure II.2: Réservoir aérien à double enveloppe métallique [16].

II.3.2 Réservoir aérien en béton précontraint

Les réservoirs en béton précontraint ont été étudiés et testés aux États-Unis dans les années soixante, avec le premier réservoir contenant de l'oxygène liquide [16].

Les réservoirs fabriqués selon la méthode Preload composent la cuve intérieure de panneaux préfabriqués en béton précontraint. Ces panneaux sont entourés d'une barrière d'étanchéité en acier au carbone à l'extérieur [16].

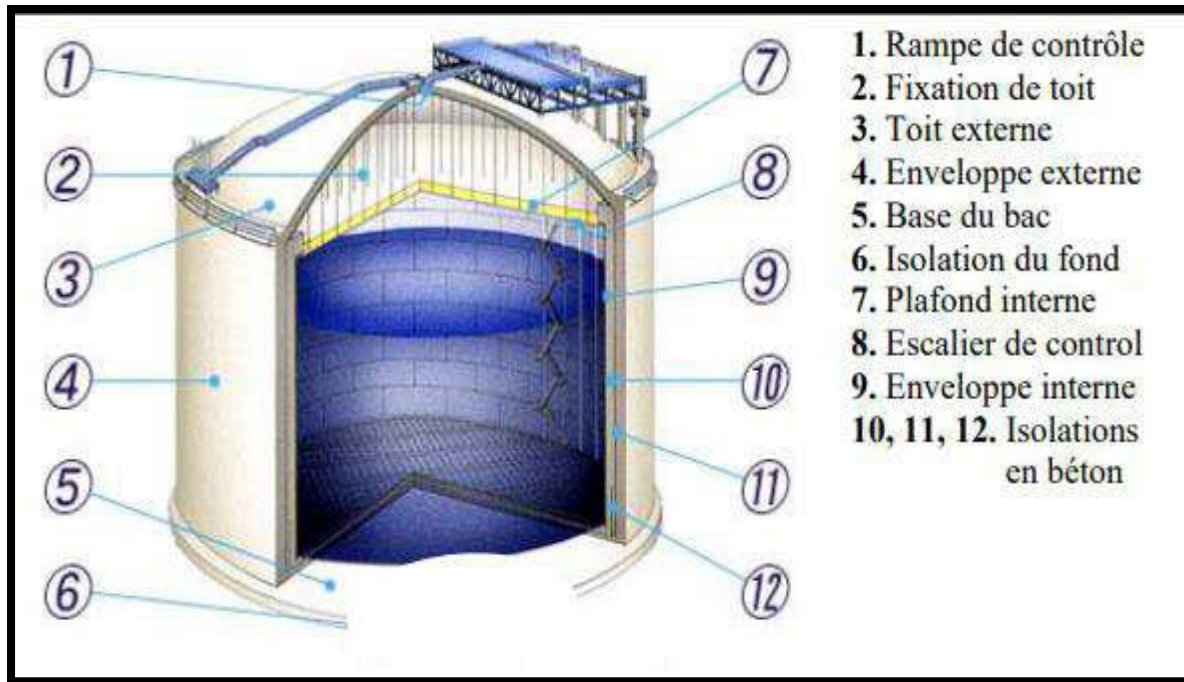


Figure II.3:Réservoir aérien en béton précontraint [16].

II.3.3 Réservoir en béton moulé dans le sol

IHI au Japon a développé et construit le premier réservoir en béton moulé dans le sol à l'échelle mondiale, avec une capacité de 10000 m³ [16].

Les parois sont en béton moulé, recouvertes d'une isolation en polyuréthane, tandis que la membrane en contact avec le GNL est en acier inoxydable gaufré [16].

La partie inférieure du bac de stockage est composée d'une couche de béton précontraint, tandis que le toit est en métal [16].

II.3.4 Réservoir en terre gelée

La CAMEL à Arzew est le seul réservoir en terre gelée qui est toujours en service. Il a été érigé vers 1964 et offre une capacité de stockage d'environ 38 000 m³[16].

La création de ce type de réservoir repose principalement sur la composition du sol, qui doit présenter un taux d'humidité supérieur à 30%. Effectivement, le fait que le GNL entre en contact avec la terre contenant cette eau favorise sa solidification (à une température de 0°C), ce qui entraînera ensuite une isolation efficace [16].

Actuellement, cette méthode a été abandonnée en raison du taux élevé d'évaporation dans ces bacs de stockage, qui dépasse les normes établies par les fabricants [16].

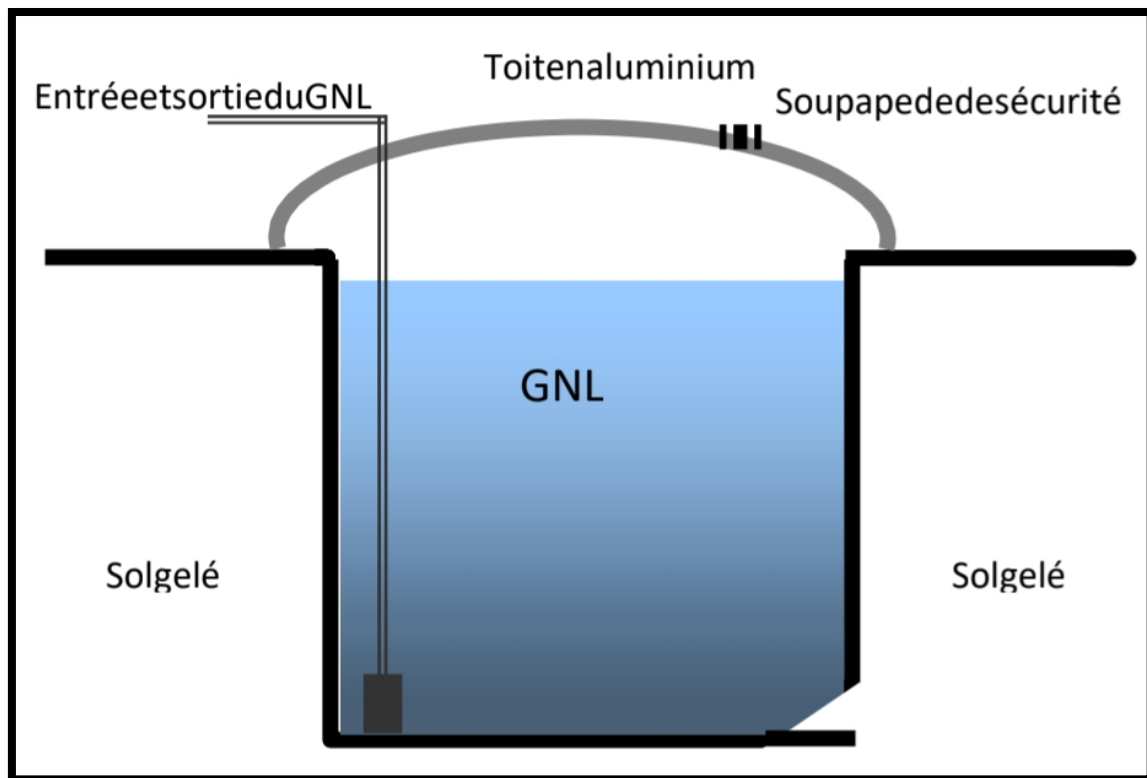


Figure II.4: Réservoir en terre gelée [16].

II.4 Les différents types d'isolations

Dans ce paragraphe nous nous limiterons aux isolants les plus couramment utilisés dans les installations cryogéniques, notamment dans le domaine du GNL.

II.4.1. Poudre

Les poudres sont souvent utilisées pour l'isolation thermique des fluides cryogéniques, notamment des réservoirs de stockage basse pression de taille moyenne, des évaporateurs et de certaines conduites de transfert. L'isolation en poudre consiste à placer de fines particules de matériau entre des murs à températures variables. Ces particules peuvent être des microsphères de plastique, de carbone, de silicate de calcium, d'oxyde de fer, etc. (la taille des particules varie de 100 à 200 microns). La conduction à travers ces types d'isolants est généralement inférieure à celle à travers la mousse et le contact entre les particules est minime. Cependant, les matériaux isolants, notamment la perlite, absorbent très facilement la vapeur d'eau, ce qui constitue un sérieux inconvénient ; il est donc nécessaire de stocker ces matériaux à l'abri de l'humidité et de les dégazer thermiquement avant utilisation [17].

Les composés les plus utilisés et aussi les plus étudiés sont la perlite et le silica-aérogel.

II.4.1.1 Perlite

Ce sont de minuscules sphères provenant d'une roche volcanique de type silicate d'aluminium. Il est finement broyé et expansé, ce qui le rend totalement ininflammable. La perlite est bon marché et facile à installer. Il présente néanmoins deux inconvénients : Il est très perméable à la vapeur d'eau, ce qui nécessite l'utilisation d'adsorbants et d'une coque double couche. Le grand nombre de pores qui séparent les particules nécessitent un remplissage fréquent [17].

II.4.1.2 Aérogel de Silice

C'est un produit à base de silice de haute densité, ce qui limite son utilisation dans les équipements fixes, notamment les lignes de transfert d'oxygène liquide et d'azote liquide. Aucun adsorbant n'est requis, ce qui simplifie la conception [17].

II.4.2 Les mousses

Malgré sa conductivité thermique relativement élevée, la mousse est souvent utilisée pour les grands stockages cryogéniques (azote, méthane...). Les principales mousses utilisées sont à base de résine polystyrène, de résine polyéthylène (thermoplastique), de polyuréthane et de mousse de verre [17].

II.4.2.1 Mousses de polyuréthane

Ces mousses sont largement utilisées dans les entrepôts et les transports réfrigérés ainsi que dans le transport de gaz naturel et d'éthylène liquide via des camions-citernes. Ces mousses possèdent des propriétés des plus intéressantes qui surpassent tous les corps rigides de la même famille. Le polyuréthane peut être appliqué sur place (coulé sur place) ou en usine (préfabriqué). Il peut être injecté directement dans des canalisations ou transformé en blocs en forme de coquille [17].

II.4.2.2 Mousse de verre

Les propriétés thermiques de ces mousses sont très moyennes. Elles sont utilisées dans les vannes des grandes unités de séparation d'air et des conduites d'oxygène liquide. Fibre de verre : C'est un matériau fibreux très léger, inodore et neutre par rapport aux autres matériaux. Son inconvénient est que sa résistance à l'écrasement est trop faible [17].

II.4.2.3 Mousse de polyéthylène

- Klégécell (Kléber) : Le produit moussé obtenu est à cellules fermées et donc moins sensible à la diffusion de la vapeur d'eau. Le Klégécell sous ses différentes formes, avec la mousse polyuréthane, est l'une des mousses les plus utilisées en cryogénie ; elle entre en effet dans l'isolation des réservoirs de certains méthaniers ainsi que des réservoirs cryogéniques de la fusée Ariane.
- Chlorure de polyvinyle : C'est un excellent isolant ayant une très bonne imperméabilité et une très bonne résistance mécanique. Son prix reste élevé, inconvénient compensé en partie par sa faible conductivité thermique permettant des réductions d'épaisseur intéressantes [17].

II.4.2.4 Mousses de polystyrène

Ces mousses sont disponibles sous forme d'éléments préfabriqués, obtenus à partir d'éthylène et de benzène. Bien qu'ils soient faciles à utiliser, ils sont rarement utilisés en cryogénie car leurs propriétés thermiques ne sont pas excellentes et ils sont très perméables à la vapeur d'eau. Cependant, comme la mousse est formée par moulage par compression, il est possible de produire de petits réservoirs de transport d'azote liquide économiques d'une capacité ne dépassant pas dix litres [17].

II.4.3 Les fibres

Les corps fibreux les plus couramment utilisés par les industries du bâtiment et du froid sont les laines de verre et les laines de roche. Ces deux types d'isolants ont comme principal défaut d'absorber facilement l'humidité. L'espace d'isolation est donc soit pressurisé à l'aide d'un gaz sec soit rendu étanche et maintenu sous faible pression absolue [17].

II.4.4 Isolation sous vide

Le vide est couramment utilisé dans les petits cryostats de laboratoire ainsi que dans les formes complexes. L'effet du vide est d'éliminer les deux modes de transfert de chaleur (conduction et convection dans les solides). Pour réduire le transfert de chaleur radiante, le vide est souvent utilisé en conjonction avec du papier d'aluminium. L'application la plus répandue de ce type d'isolation concerne les pompes cryogéniques. Ce procédé inclut des applications où des vides très poussés (de l'ordre de 10 à 12 Torr) peuvent être obtenus. Le

pompage cryogénique fonctionne en pompant des molécules de gaz pour la condensation (cryocondensation) et l'adsorption (cryoadsorption) sur plusieurs surfaces cryogéniques [17].

II.4.5 Super Isolation

Il s'agit de matériaux relativement nouveaux puisque les premiers tests remontent aux années 1960. Le nom de ce type d'isolation vient du fait qu'elle peut atteindre des valeurs d'échange de flux thermique très faibles entre deux coques, qui ont des valeurs d'échange thermique entre elles très faibles. Fort gradient de température. Ainsi, il en résulte une réduction des échanges thermiques radiatifs sans augmenter la conduction solide et les échanges gazeux. La super isolation peut être constituée de feuilles réfléchissantes (aluminium, cuivre) séparées par des feuilles isolantes (de type Lind, comme le nylon), ou de feuilles ayant des propriétés isolantes d'un côté et des propriétés réfléchissantes de l'autre (film polyester aluminisé). Les espaces séparant les couches étant très réduits, cette disposition réduit également les échanges de conduction moléculaires dans les vides résiduels. Au début ce genre d'isolation était conçu principalement pour des applications de laboratoires ou en métrologie, mais avec le temps, son utilisation s'est généralisée surtout dans l'isolation des bacs de stockage des cryogènes à très basses températures tel que l'Hélium et l'Hydrogène [17].

II.5 Comparaison de l'efficacité des différents types d'isolation

Les principaux critères pour le choix d'un mode d'isolation déterminé parmi les nombreux types existants, sont l'efficacité recherchée et le prix de revient. Malgré les grandes différences dans les valeurs du flux de chaleur transmis, il est certain qu'un réservoir de grandes dimensions sera plus facilement isolé avec des poudres, que par tout autre moyen. Par contre, les cryostats de laboratoire ainsi que les conteneurs de transport de faibles capacités seront, soit super-isolés, soient isolés par l'utilisation d'une garde d'azote [17].

Tableau II.1: Comparaison de différents isolants [17].

| Isolants | Avantages | Inconvénients |
|----------------------|--|---|
| Les mousses | <ul style="list-style-type: none"> • Faible masse volumique • Coût relativement bas • Fabrication aisée • Bonne résistance mécanique • Mise en œuvre facile • Bonne perméabilité à l'eau | <ul style="list-style-type: none"> • Conductivité thermique élevée • Contraction thermique élevée • Vieillessement important • Inflammable • Pertes des caractéristiques isolantes au cours du temps • Limite supérieure de température 80 °C |
| Les poudres | <ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteuse • Incombustible • Non toxique • Récupérable • Utilisation aisée | <ul style="list-style-type: none"> • Se tasse facilement sous contrainte • Hydrophile • Nécessite des filtres de vide • Non élastique |
| Super-isolant | <ul style="list-style-type: none"> • Très stable • Bonnes performances • Faible poids • Conductivité thermique faible | <ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un travail sous vide • Prix élevé par unité de volume • Continuité de l'isolant • Dégradation des performances sous l'effet d'une contrainte de compression |
| Le vide | <ul style="list-style-type: none"> • Conductivité thermique faible • Il s'adapte aux formes les plus complexes | <ul style="list-style-type: none"> • Maintien de la faible pression • Exige des surfaces de faibles émissivités |

II.6 Conclusion

En résumé, une isolation efficace des réservoirs de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL) est un élément essentiel de l'infrastructure de stockage et joue un rôle important dans le maintien de la qualité du gaz naturel et la sécurité des installations. Les progrès en matière de matériaux et de technologies d'isolation ont considérablement amélioré les performances

des installations de stockage de GNL, réduisant les pertes d'énergie et garantissant des conditions de stockage optimales.

Chapitre III :
détermination du taux
d'évaporation du GNL dans
un bac de stockage

III.1 Introduction

Les vapeurs de vaporisation de GNL (Boil Off) produites au sein des complexes de liquéfaction du gaz naturel sont dues à différentes causes et sont générées dans différents points du processus de liquéfaction et de transport. La plus importante quantité de ces vapeurs est produite au niveau des réservoirs de stockage du GNL (au sein du GL3/Z) [18].

Le processus d'évaporation du gaz naturel liquéfié (GNL) dans les bacs de stockage aériens est étroitement lié aux infiltrations thermiques à travers les parois. Celles-ci varient au cours du temps sous l'effet de divers facteurs : la température atmosphérique, la pression de stockage, le niveau de liquide (le bac n'est jamais totalement rempli). La maîtrise de ce phénomène revêt une importance particulière car il cause une perte sensible de quantité et de qualité du produit et peut avoir une incidence sur la sécurité du stockage [19].

III.2 Le problème thermique du stockage

Les entrées de chaleur dans un réservoir de GNL se font par l'un ou plusieurs des 3 modes de transmission de la chaleur : rayonnement, convection, et conduction. En pratique :

- Le rayonnement ne joue qu'un rôle négligeable dans les réservoirs moyens et grands. 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 (surpression des cheminements préférentiels, emploi de joints contrariés si le calorifuge est formé de blocs solides, etc.).
- La conduction est le mode essentiel de transmission de la chaleur, d'où l'importance du choix du calorifuge [9].

III.3 Le problème d'évaporation

L'évaporation des gaz, ou "boil-off", est un phénomène majeur dans l'industrie des hydrocarbures, notamment dans les bacs de stockage de GNL. Pour minimiser cette évaporation et limiter les pertes de GNL stocké, des précautions particulières doivent être prises. En effet, cette perte peut modifier la qualité de méthane et avoir un impact sur la sécurité du bac. Les infiltrations thermiques à travers les parois du bac de stockage sont la

principale cause de ce phénomène, ce qui rend nécessaire la détermination du taux d'évaporation résultant par des calculs appropriés. La maîtrise de ce phénomène est donc d'une importance capitale pour assurer la rentabilité, la qualité et la sécurité du stockage de GNL [20].

III.4 Description des bacs de GNL

Le complexe GL3/Z comporte 2 bacs de stockage à intégrité totale de GNL (71-MF01 et 71-MF02). La structure du bac de GNL se compose de différentes couches avec différents isolants comme la figure ci-dessous le montre :

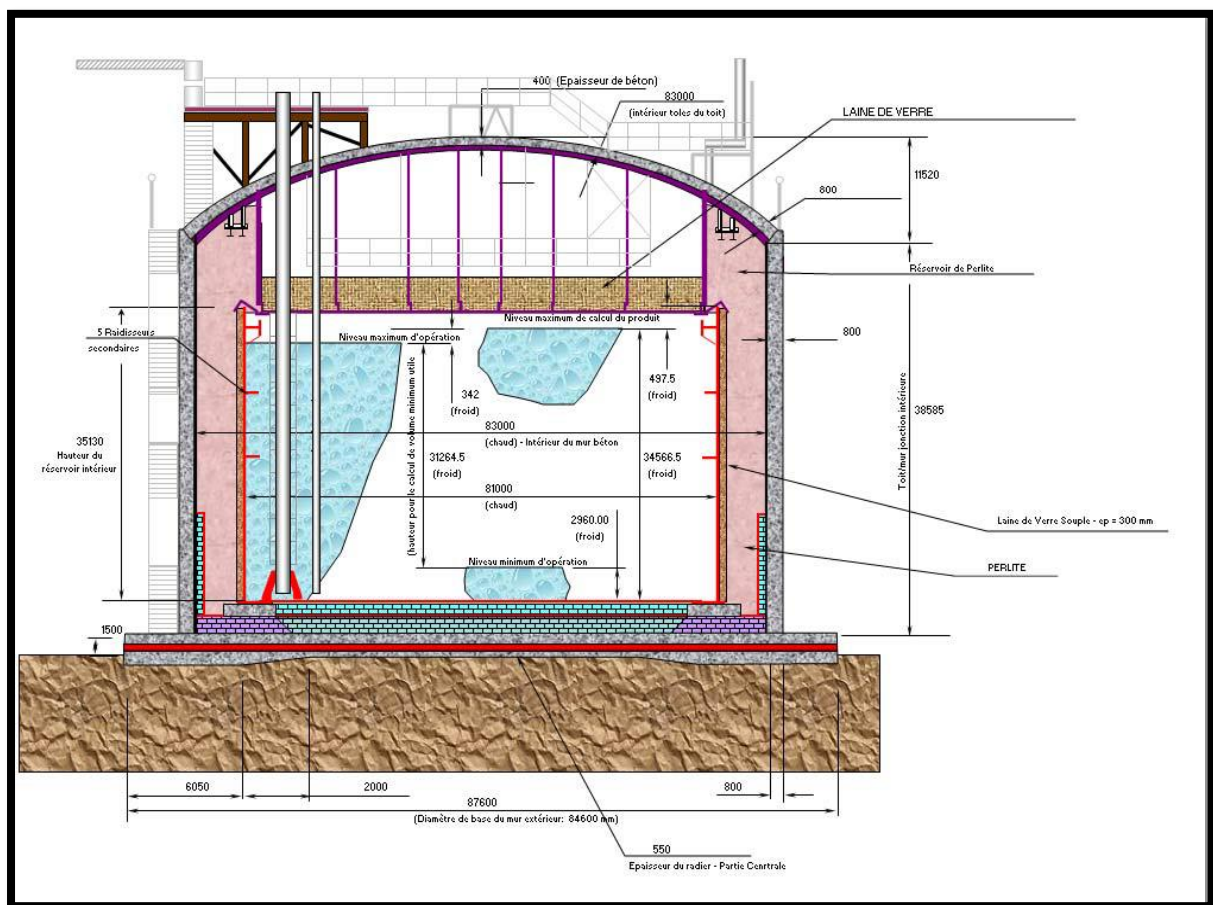


Figure III.1: Structure du bac de GNL [21].

La conception des composants internes des deux réservoirs de GNL est identique.

Les 2 réservoirs de GNL ont une capacité utile de 160 000 m³, et sont du type à intégrité totale [21].

Le réservoir intérieur est une cuve autoportante en acier à 9% de nickel. Cette cuve est couverte par un toit suspendu en aluminium, supportant l'isolation supérieure [21].

Le réservoir extérieur comprend un radier général en béton armé, un voile cylindrique vertical en béton précontraint et un toit sphérique en béton armé. Une protection d'angle protège thermiquement le bas du voile et le fond en cas de fuite accidentelle du réservoir intérieur [21].

Tableau III.1:Caractéristiques des réservoirs du complexe GL3/Z [21].

| Désignation | | Réservoir 71-MF01 et MF02 |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Capacité (m ³) | | 160 000 |
| Cuve intérieure | Diamètre (m) | 81 |
| | Hauteur (m) | 35,13 |
| Cuve extérieure | Diamètre (m) | 83 |
| | Hauteur (m) | 38,585 |
| Pression (mbar) | | 1050 |
| Température (°C) | | -162 |
| GNL | Masse volumique (kg/m ³) | 472 |
| matériaux | cuve intérieure | acier à 9% Ni |
| | cuve extérieure | béton armé |

III.4.1. Matériaux de construction du bac 71-MF01 et 71-MF-02

Pour assurer une meilleure isolation pour le bac et afin de réduire le flux de chaleur pénétré au sein du liquide, le bac a été construit avec plusieurs matériaux et différentes couches et épaisseur [21].

Tableau III.2:Caractéristiques et construction du toit de bac de GNL.

| Le toit | | |
|---|---------------|-------------------|
| Matériaux de construction | Épaisseur (m) | λ (W/m.K) |
| Toit suspendu géodésique d'Aluminium | 0,005 | 185 |
| Laine de verre | 0,7 | 0,0374 |
| Aluminium | 0,3 | 185 |
| Béton | 0,4 | 1,28 |

Tableau III.3:Caractéristiques et construction de paroi latérale de bac de GNL.

| Paroi latérales | | |
|----------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Matériaux de construction | Épaisseur (m) | λ(W/m.K) |
| Réservoir intérieure | 0,005 | 27 |
| Laine de verre souple | 0,3 | 0,224 |
| Perlite | 0,7 | 0,0459 |
| Liner acier carbon | 0,005 | 52 |
| Béton armé | 0,8 | 1,28 |

Tableau III.4:Caractéristiques et construction du fond de bac de GNL.

| Le fond | | |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Matériaux de construction | Épaisseur (m) | λ (W/m.K) |
| Dalle de base annulaire en béton | 1,5 | 1,8596 |
| Béton maigre de nivellement | 0,1 | 1,989 |
| Bloc de verre cellulaire HLB800 | 0,3 | 0,0356 |
| Bloc de verre cellulaire HLB801 | 0,15 | 0,0275 |
| Couche de sable | 0,1 | 2,636 |
| Tôle de fond 9% Ni | 0,01 | 27 |

III.5 Caractéristiques du GNL du GL3/Z

Le gaz naturel liquéfié à une chaleur latente de vaporisation $L_v=510$ (KJ/Kg).

Tableau III.5:Caractéristiques du GNL du complexe GL3/Z [22].

| Constituants | Fraction molaire (%) | masse molaire (g/mol) | T _{eb} (K) | T _{cr} (K) | P _{cr} (bar) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| N ₂ | 0,4 | 28 | 77,352 | 126,21 | 34 |
| CH ₄ | 92 | 16 | 111,64 | 190,56 | 45,96 |
| C ₂ H ₆ | 7,7 | 30 | 184,561 | 305,44 | 48,839 |
| C ₃ H ₈ | 0,03 | 44 | 231,077 | 369,77 | 42,5 |

III.6 Calcul du taux d'évaporation du GNL dans un bac de stockage GL3/Z

III.6.1 Les hypothèses

Dans ce cas, pour calculer le taux d'évaporation dans le bac on suppose que :

- Ces calculs ont été effectués dans des conditions environnementales critiques.
- Les pompes de chargement, circulation et réception ainsi toutes les conduites n'ont pas été retenues dans les calculs.
- Le méthane stocké qui n'est pas en mouvement dans toutes les lignes raccordées au bac , doivent être fermées (il n'y a ni chargement, ni réception).
- Le bac est rempli (le bac n'est jamais totalement rempli).
- La pression doit être la plus constante et la plus stable possible.

Le taux d'évaporation du méthane dans le bac dû aux échanges thermiques avec le milieu extérieur s'établit avec la formule suivante :

$$\tau(\%) = Q \times 100 / (V \times \rho \times L_V) \quad (1)$$

Sachant que la surface d'échange est partagée en trois surfaces :

- Le toit du bac.
- La paroi latérale du bac.
- Le fond du bac.

III.6.2 Calcul de la quantité de chaleur diffusée par unité de temps

La quantité de chaleur échangée par unité de temps à travers les parois externes est donnée par la relation (2) :

$$Q = \sum Q_i = \sum (S_i \times \lambda_i \times \Delta T_i / e_i) = \sum (S_i \times \Delta T_i / R_i) \quad (2)$$

Avec R_i la résistance au transfert de chaleur est définie comme étant le rapport d'épaisseur sur la conductivité thermique des couches de surface

$$R_i = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

S : La surface (**m**).

λ : Conductivité thermique (**W m⁻¹ K⁻¹**).

e : Epaisseur (**m**).

R : Résistance thermique (**m².K⁻¹.W⁻¹**).

D : Diamètre (**m**).

H : Hauteur (**m**).

a) A travers le toit

Le toit du bac est composé de plusieurs couches de différentes natures, et le calcul du flux de chaleur se fait selon la formule (4) suivante : $Q_1 = S_1 \times \frac{\Delta T_1}{R_i}$ (4)

Tel que S_1 est la surface d'un disque, donnée par la relation suivante (5) :

$$S_1 = \pi \times (D_1/2)^2 \quad (5)$$

$$\Delta T_1 = T_0 - T_1$$

T_0 : Température ambiante = 25 °C.

T_1 : Température maximale de liquide = -162 °C.

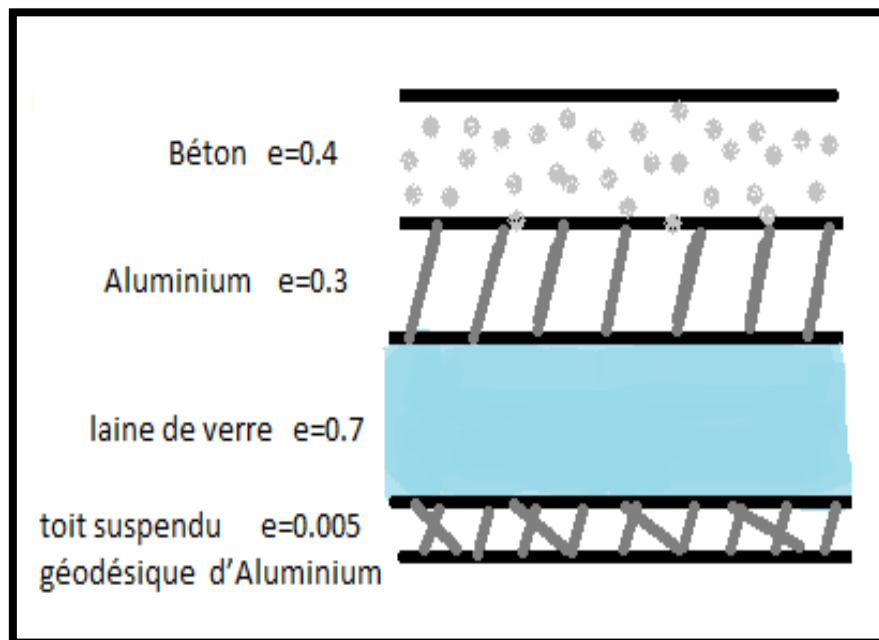


Figure III.2: Schématisation des transferts de chaleur à travers le toit de bac 71-MF01.

$$R_1 = \frac{0.005}{185} + \frac{0.7}{0.0374} + \frac{0.3}{185} + \frac{0.4}{1.28}$$

$$R_1 = 19.0307262 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$S_1 = \pi \times (81/2)^2 = 5152,99735 \text{ m}^2$$

$$Q_1 = 5152,99735 \times (25 - (-162)) / 19.0307262$$

$$Q_1 = 50634,45792 \text{ W}$$

b) A travers les parois

La surface latérale du bac est de forme cylindrique et elle est composée de multiples couches et des sections distinctes. Par conséquent, le flux de chaleur s'effectue par conduction et se transmet au liquide en prenant en considération la conductivité thermique de chaque matériau.

$$S_2 = \pi \times D_2 \times H \quad (6)$$

$$\Delta T_1 = T_0 - T_1$$

T_0 : Température ambiante = 25 °C.

T_1 : Température maximale de liquide = -162 °C.

$$R_2 = \frac{0.005}{27} + \frac{0.3}{0.224} + \frac{0.7}{0.0459} + \frac{0.005}{52} + \frac{0.8}{1.28}$$

$$R_2 = 17.2151117 \text{ m}^2 \text{K}^{-1} \text{W}^{-1}$$

$$S_2 = \pi \times 83 \times 38.585$$

$$S_2 = 10061.12326 \text{ m}^2$$

$$Q_2 = 10061.1236 \times (25 + 162) / 17.2151117$$

$$Q_2 = 109289.4476 \text{ W}$$

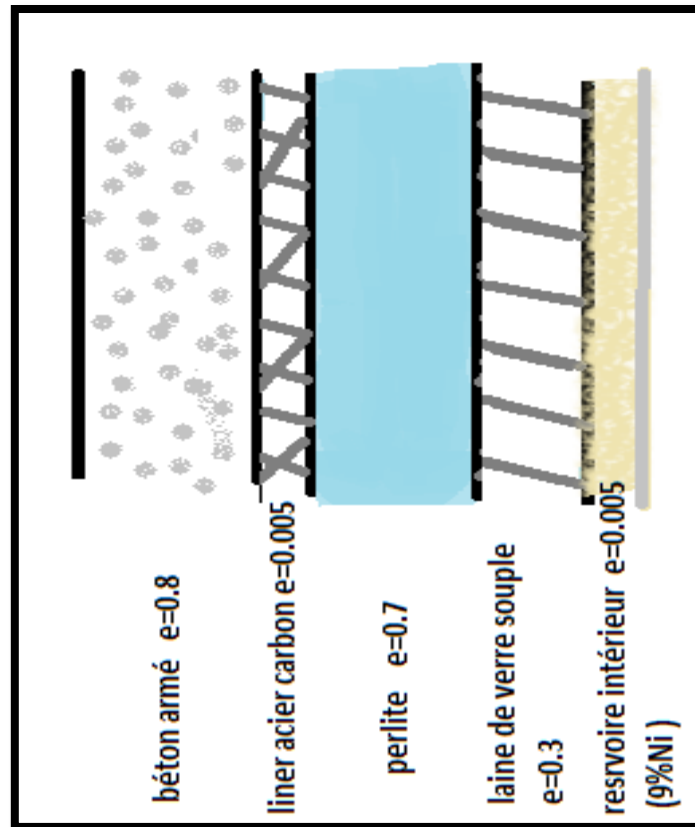


Figure III.3:Schéma de la surface latéral du bac 71-MF01.

c) A travers le fond

La surface du fond se divise en plusieurs parties à cause des structures différentes dans chaque partie.

$$S_1 = \pi \times \left(\frac{D_2}{2}\right)^2$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_1$$

T_2 : Température du fond = 10°C .

T_1 : Température maximale de liquide = -162°C .

$$R_3 = \frac{1.5}{1.8596} + \frac{0.1}{1.989} + \frac{0.3}{0.356} + \frac{0.15}{0.0275} + \frac{0.1}{2.636} + \frac{0.01}{27}$$

$$R_3 = 14.77672 \text{ m}^2\text{K}^{-1}\text{W}^{-1}$$

$$S_3 = \pi \times (83/2)^2$$

$$S_3 = 5410.607948 \text{ m}^2$$

$$Q_3 = 5410.607948 \times (10 + 162) / 14.77672$$

$$Q_3 = 62979.1028 \text{ W}$$

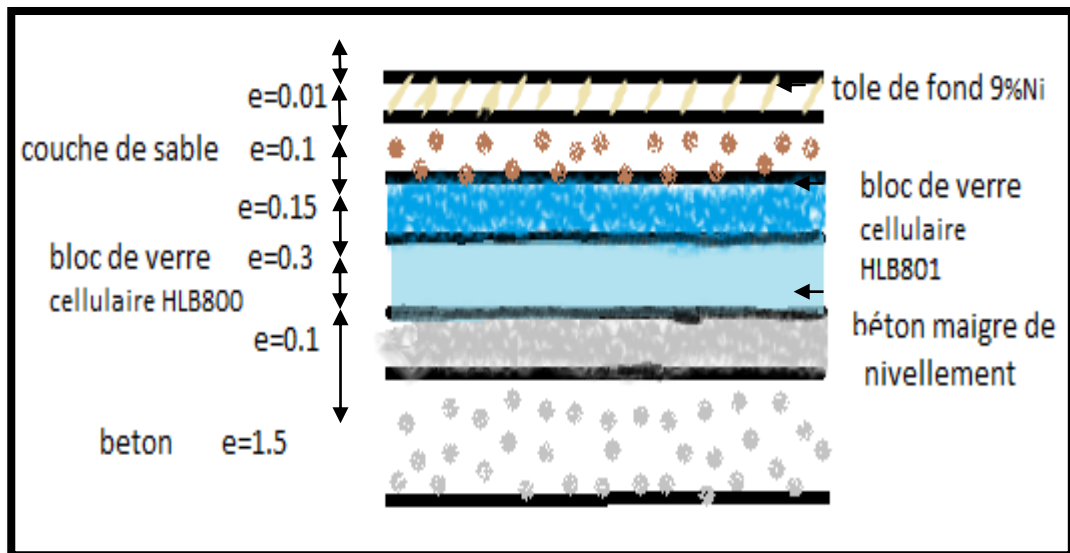


Figure III.4:Schéma de la surface du fond du bac.

Ainsi, la quantité de chaleur totale transmise au liquide à travers toute la surface du bac est :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

$$Q = 222903.0083 \text{ W} = 222.9030083 \text{ KW}$$

Tableau III.6:Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers le réservoir de GNL.

| Position | Surface (m ²) | ΔT (K) | Quantité de chaleur Q(W) | Résistance (m ² K/W) |
|----------------|---------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------------|
| Toit | 5152,99735 | 187 | 50634,45792 | 19,03072619 |
| paroi latérale | 10061,12326 | 187 | 109289,4476 | 17,21511172 |
| Fond | 5410,607948 | 172 | 62979,1028 | 14,77671999 |

III.6.3 Calculs du taux d'évaporation

Le taux d'évaporation est défini comme étant le rapport du volume évaporé par jour par la capacité totale du bac de stockage V.

$$\tau \% = Q \times 100 / (V * \rho * L_v) \quad (1)$$

ρ : La masse volumique de GNL; $\rho = 472 \text{ Kg/m}$.

L_v : La chaleur latente de GNL ; $L_v = 510 \text{ KJ/Kg}$.

V : Le volume interne ; $V = 160000 \text{ m}^3$.

a) Calcul de la masse de GNL évaporée par jour

La masse de GNL évaporée par seconde est Q/L_v ou L_v est la chaleur latente de vaporisation moyenne du GNL, elle correspond à un volume liquide $Q/\rho L_v$ évaporé par seconde.

$$Q / (\rho L_v) = 222.9030083 \times 3600 \times 24 / (472 \times 510) = 80,0050678 \text{ m}^3/\text{jour}$$

D'où le taux d'évaporation :

$$\tau(\%) = 0,05000317 \% \text{ par jour} \approx 0.05\% \text{ par jour}$$

III.7 Calcul de la quantité de GNL évaporée

La production du train de liquéfaction au niveau du complexe GL3/Z en 2023 est égale 8933675,322 m³.

III.7.1 Calcul de la quantité du boil-off annuel

La quantité du boil-off annuel est le produit du taux d'évaporation multiplié par la production annuelle : $Q_{\text{boil off annuel}} = \tau_{\text{calculé}} \times Q_{\text{produite}}$ (8)

$$Q_{\text{boil off annuel}} = 0.05 \times 8933675,322 = 446,6837661 \text{ m}^3$$

III.7.2 Détermination de la quantité du boil-off design

$Q_{\text{boil off annuel}} = \tau_{\text{design}} \times Q_{\text{produite}}$ (9)

$$Q_{\text{boil off annuel}} = 0.047 \times 8933675,322 = 419,827401 \text{ m}^3$$

III.7.3 Détermination de la quantité du boil-off réel

La quantité du boil-off réel est donnée par le barémage des bacs

On a un niveau L_1 de GNL égal à 4.9m après 9h de repos, le niveau de GNL L_2 égal à 4.85m. Le barémage des bacs fait par Saipem, nous donne le volume V correspondant à chaque niveau (tableau III.7).

Tableau III.7: Quantité de boil-off réel par barémage.

| Niveau (m) | V après 9h (m ³) | V après 24h (m ³) |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 4,9 | 25252,831 | 67340,88267 |
| 4,85 | 24955,068 | 66546,858 |
| V évapore (m ³) | 279,763 | 794,0346667 |

Par la règle de trois on calcule le taux réel :

$$67340,88267\text{m}^3 \longrightarrow 100 \%$$

$$794,0346667\text{m}^3 \longrightarrow \tau_{\text{réel}} \%$$

$$\tau_{\text{réel}} = 1,179127204 \% \text{ (vol/jour)}$$

Tableau III.8: Quantités du boil-off et taux d'évaporation par rapport à la production.

| Boil-off | Taux (%) | Quantité (m ³) |
|----------|-------------|----------------------------|
| Calculé | 0,050003167 | 4467,120624 |
| Design | 0,047 | 4198,827401 |
| Réel | 1,179127204 | 105339,396 |

D'après le tableau III.8, on remarque qu'il y a une légère différence entre la quantité du boil-off calculée et celle du design. Par contre la quantité du boil-off est très grande par rapport au design. Cette différence très conséquente est le résultat de l'influence de plusieurs paramètres (vétusté des équipements, problème d'exploitation,). Pour minimiser ces pertes, il est nécessaire d'intervenir par des solutions à court terme car de nos jours cela se chiffre en devises fortes et se répercute sur l'économie nationale du pays qui est actuellement en situation de crise.

II.8. Conclusion

Le boil-off représente une perte importante car elle affecte la composition chimique et physique du GNL en raison de l'évaporation du méthane.

Donc le stockage du GNL dans des réservoirs cryogéniques est une nécessité économique car il compense les éventuelles fluctuations d'approvisionnement dues aux divers risques de production ou aux changements de consommation.

Sur la base de calculs thermiques qui ne prennent en compte que le transfert conducteur, nous concluons qu'il existe une légère différence entre la quantité de boil-off calculée et celle de design. Cependant, le calcul réel de l'évaporation n'a pas répondu aux exigences, nous avons obtenu un taux d'évaporation de 1.179%.

Il est nécessaire de prendre en compte l'impact du rayonnement solaire et d'actualiser les quantités de production, de vente et de stockage de GNL. Néanmoins, une intervention immédiate dans les réservoirs de stockage de GNL est nécessaire pour atténuer ces pertes d'énergie, économiser des devises, réduire la pollution atmosphérique due aux émissions de gaz toxiques et, surtout, éviter d'éventuels incidents à risques majeurs.

Conclusion générale

Nous tenons avant tout de confirmer que notre stage dans le complexe GL3/Z nous a beaucoup apporté sur le plan pratique, où nous avons pu nous pencher de très près sur la section de stockage au niveau de l'unité 71, Nous avons aussi compris toute l'importance de la récupération du BOG dans les plans économiques et environnementaux.

Le présent travail, nous a permis de nous rapprocher de plus près des causes essentielles de l'évaporation du produit hydrocarboné GNL au niveau du bac de stockage cryogénique.

Le suivi du procès du stockage nous a permis de déduire que les problèmes majeurs de qualité et de sécurité des bacs de stockage du méthane dans le complexe GL3/Z sont liés principalement aux pertes de charges qui sont dues au phénomène d'évaporation causé essentiellement par le transfert de chaleur dû au gradient de température entre le milieu extérieur et le sein du bac.

A cet effet, nous avons procédé aux calculs analytiques des transferts de chaleur à travers le mur, le toit et la base du bac de stockage. Ces flux de chaleur permettent de trouver le flux total qui pénètre à l'intérieur du liquide et provoque son évaporation. Le taux d'évaporation calculé à la base de ces flux de chaleur globaux par le constructeur est inférieur à celui calculé dans notre cas vu la différence de température et la vétusté des équipements de stockage.

Références bibliographiques

[1] ALEXANDRE ROJEY, Le gaz naturel : De la production aux marchés, Éditions Technip, 2013, p 1-6.

[2] PETIT, Pierre , Liquéfaction du gaz naturel, Techniques de l'ingénieur, Génie des procédés, 1996, vol. 4, no J3601, p. J3601. 1-J3601. 21.

[3] TABET Roumaïssa (2017), étude de la section de réfrigération au propane pour une meilleure exploitation durant les périodes chaudes (T d'air ambiant $> 42^{\circ}\text{C}$).modélisation mathématique, mémoire de master, université Badji Mokhtar ,Annaba .

[4] ABABSA Mohammed et BELKHAMSA Salah Eddine (2019), étude du processus de liquéfaction du gaz naturel, mémoire de fin d'étude, université Kasdi Merbah, Ourgla.

[5] SEDDAK Mohamed Fayçal et HAMMOU Kenza (2022), simulation d'une section de décarbonatation du gaz naturel par Hysys, mémoire de fin d'études de master académique, université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem .

[6] Manuel opératoire partie générale sur le projet GL3/Z.

[7] Manuel opératoire du complexe GNL3/Z – zone de stockage

[8] BOUDAHMANI Kamel et GOUAICH Mohamed Abderrezak (2019), l'influence de la pression sur les produits de deméthaniseur au niveau de l'unité 17 (GNL- 3Z) , mémoire de fin de cycle, université Abdel Hamid Ben Badis, Mostaganem.

[9] HIBA Kheira et GOUMIDI Hayette (2019), dysfonctionnement de la Section de Réfrigération Au Niveau de l'unité 72, mémoire en master 2, université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem .

[10] ZENTICI Salima et BENNAMA Souad (2020), méthodes proposées expérimentales et théoriques de la récupération et la réduction de BOG du bac de butane au niveau du complexe

GNL3/Z, mémoire de fin d'études de master académique, facultés de génie chimique, université de Mostaganem .

[11] Yari. M (2017) , Review on insulation materials and methods for LNG pipelines and storage tanks, energy procedia, 142, 3201-3206.

[12] Al-Mallahi (2019), Recent developments in the thermal insulation materials for LNG applications: A review, International Journal of Refrigeration, 101, 208-225.

[13] Centrifugal compressor mixed refrigerant lp and mp an200 - mcl1002 operation & maintenance training manual manual.

[14] SEDRA Amina (2017), contribution à l'étude des compresseurs du process MR (mixed réfrigérant) du complexe GL1-K Skikda , mémoire de fin d'études de master académique , faculté des sciences de l'ingéniorat, université Badji Mokhtar, Annaba.

[15] DJAMAI Fatima Zahra et DAIFALLAH Naoual (2022), étude de la variation de la teneur en CO2 sur la performance de l'unité de décarbonatation au niveau de GL1/K, mémoire du Projet de fin d'étude 2ème Année master, université 08 mai 45, Guelma.

[16] LAKHAL MOHAMED ELAMINE et GADRA AYMEN , étude sur les technique de stockage de GNL, mémoire fin d'étude, université KADI MERBAH; OUARGL, 2022.

[17] TGNL 2. Chapitre deux : production et stockage du GNL. , 2015, Vol. 25, no 1, p. 20-44.

[18] M.Rachid MAIRI (2008), calcul des pertes par Boil Off dans les lignes de transfert gaz GNL :application aux conduites du complexe de liquéfaction du gaz naturel GL1/Z d'Arzew, mémoire du projet de fin d'études d'ingénieur, école national polytechnique, Oran.

[19] S. Battes et D. Morrison (1997), Modelling the behaviour of stratified LNG in storage tanks, Study of the rollover phenomenon, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Volume 40, N° 8, p18751884.

[20] MECERLI Bilal et GUEZZOUN Yacine (2023), amélioration de l'isolation thermique dans un bac de stockage de GPL, mémoire de fin d'études, université M'Hamed Bougara, Boumerdes.

[21] Base de conception structure; composants internes des réservoirs de GNL et GPL, Arzew GNL 3Z.

[22] Manuel opératoire- unité 71.