

République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

*UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE
BOUIRA*



Faculté des sciences et des sciences appliquées

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Ayant pour thème :

**Modélisation et simulation bidimensionnelle
du comportement thermique d'un réservoir
de stockage de GNL**

Option : Mécanique-Energétique

Réalisé par :

- KADI TAKFARINES
- DJAROUN NORDINE

Encadré par :

M : LEKHAL R

Soutenu le: **04/06/2016**

Devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------|-------------------|-----|
| M. DAHMANE Merzak | Président du jury | MAA |
| M. LEKHAL Rachid | Encadreur | MAA |
| M. LAOUARI Azzedine | Examineur | MAA |
| M. MERZOUK Meziane | Examineur | MAB |

Remerciements



*Nous remercions dieu tout puissant pour nous avoir accordé
la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Un grand merci à monsieur Rachid LEKHAL, notre promoteur
sans qui ce travail n'existerait pas. Nous le remercions pour ses conseils et pour son
encadrement et son suivi et pour tout le temps qu'il nous a consacré durant toute la durée
de notre collaboration. Ainsi que à M. DAHMANE Merzak et M. LAOUARI
Azzedine qui nous ont apporté leurs conseils et leur soutien moral.*

*Merci à tout les membres du jury en particulier le Président du jury
pour le temps qu'ils nous ont consacré.*

*Et nous tenant à remercier tous les enseignants du département qui ont sut nous donné le
meilleure d'eux-mêmes et qu'ils nous ont servis de modèle et de source d'inspiration*



Dédicace

On tient a remerciés dieu pour nous avoir donné la force de réalisé ce modeste travail, que nous dédions particulièrement a nos parents et à nos frères et sœurs qui ont été toujours là pour nous montré le chemin, et nous les remercions pour tout leurs soutiens et leurs encouragement et pour tous leurs sacrifices durant ces longues années de notre formation, et nous le dédions a toutes les personnes qui occupent une place dans nos cœurs qu'on respecte et qu'on n'aime.

Et dans cette journée très particulière nous aurons une pensée a toutes les victimes de l'explosion de Tlemcen est que leurs nom restera à jamais graver dans nos mémoires.

Résumé :

Le but de ce travail est de modéliser un réservoir de stockage de GNL (gaz naturel liquéfié) qui est un fluide cryogénique qui se liquéfie à une très basse température (-162°C), pour évaluer le débit de boil-off (débit d'évaporation de GNL) causé par les infiltrations thermiques à travers les parois du réservoir. Le modèle thermique bidimensionnel adopté a fait ressortir un système d'équations différentielles dont la solution analytique a été obtenue. L'influence du taux de remplissage du bac et de la dégradation de l'isolation thermique sur le débit d'évaporation du produit en été mis en exergue.

Mots clés : Cryogénie, GNL, Boil-off, Bac de stockage.

ملخص:

ان الهدف من هذا العمل هو وضع نموذج لخزان الغاز الطبيعي المميع, وهو سائل يتكثف عند درجة حرارة منخفضة جدا وهي (-162°). ولتقييم معدل التبخر الغاز الطبيعي المميع داخل الخزان الناتج عن دخول الحرارة من المحيط الخارجي عبر جدران و سطح الخزان حتى واذا كانت الجدران مصنوعة من مادة عازلة مثل البيرليت او الياف الزجاج. وسوف نلقي اهمية لتاثير مختلف العوامل البعدية والحرارية للخزان على معدل التبخر الغاز الطبيعي المميع

الكلمات المفتاحية : فيزياء درجات الحرارة المتدنية, الغاز الطبيعي المميع, تبخر و خزان التخزين

Abstract:

The aim of this work is to model an LNG storage tank (liquefied natural gas), which is a cryogenic fluid which liquefies at a very low temperature (-162°C), estimate the rate of boil-off (flow evaporation of LNG) caused by thermal perte through the walls of the tank. The two-dimensional thermal model adopted has resulted of differential equations system whose analytical solution was obtained. The influence of the tray fill rate and degradation of thermal insulation on the product flow evaporation were highlighted.

Keywords: Cryogenics, LNG, Boil-off, storage tank.

Nomenclature

Tableau de symboles :

| Symbole | Définition | Unité |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $T_g(r, z)$ | Température des vapeurs du GNL varie suivant r et z | K |
| $T_l(z)$ | Température du liner varie suivant z | K |
| T_{GNL} | Température du bain cryogénique | K |
| T_a | Température ambiante autour du réservoir de stockage | K |
| T_{sol} | La température du sole en contact avec l'enveloppe externe de fond du back | K |
| r_e | Rayon externe du liner | m |
| r_i | Rayon interne du réservoir de stockage | m |
| R_e | Rayons extérieure de l'enveloppe externe | m |
| R_i | Rayons intérieur de l'enveloppe externe | m |
| e | Epaisseur des deux enveloppes | m |
| e_l | Epaisseur de l'isolation latérale | m |
| e_t | Epaisseur de l'isolation du toit | m |
| e_f | Epaisseur de l'isolation du bas | m |
| L | Hauteur du bain liquide de GNL | m |
| z_0 | Hauteur au niveau de la base de l'enveloppe interne à partir du bas du réservoir | m |
| z_L | Hauteur au niveau de l'interface liquide-vapeur à partir du bas du réservoir | m |
| Z | Hauteur au niveau du toit interne à partir du bas du réservoir | m |
| \dot{m}_g | C'est le débit des vapeurs qui traverse l'anneau | kg/s |
| M | C'est le débit des vapeurs le long des surfaces horizontales | kg/s |
| λ_l | La conductivité thermique de l'ailette | W/m.K |
| λ_g | La conductivité thermique des vapeurs du GNL | W/m.K |
| $k_{g,e}$ | Coefficient thermique globale du flux de chaleur externe sur liner | W/m ² .K |
| $h_{i,L}$ | Coefficient de radiation de la surface interne du réservoir en direction du liquide | W/m ² .K |
| K_{et} | Coefficient d'échange global entre le milieu extérieur et la surface interne du toit | W/m ² .K |
| h_g | Coefficient de convection des vapeurs du GNL | W/m ² .K |
| h_{ext} | Coefficient moyen de convection équivalente entre l'environnement et l'enveloppe externe | W/m ² .K |
| $h_{r,t}$ | Coefficient de radiation de la surface interne du réservoir en direction du liquide | W/m ² .K |
| h_{fg} | Chaleur latente d'évaporation à pression atmosphérique de GNL | KJ/Kg |
| c_{pg} | Capacités calorifique a pression constante des vapeur du GNL | J/kg.K |
| ρ_g | Masse volumique | Kg/m ³ |
| ε_t | Emissivité thermique moyenne du toit intérieur du réservoir de GNL | |
| ε_l | Emissivité thermique moyenne du liner du réservoir de GNL | |
| ppmv | Partie par million du volume | |

Nomenclature

Les Facteurs de formes :

F_{t-L} : Facteur de forme gris entre la surface interne du toit et la surface libre de GNL se comportant comme un corps noire ($\epsilon_{gnl} = 1$)

F_{l-L} : Le facteur de forme gris entre la surface interne du liner et la surface libre du GNL se comportant comme un corps noire ($\epsilon_{gnl} = 1$)

Les Fonctions :

$f(r)$: La fonction f ne varie que selon r

$g(z)$: La fonction g ne varie que selon z

I_0 : Fonction de Bessel de 1ère espèce non modifiée d'ordre 0

K_0 : Fonction de Bessel de 2ème espèce non modifiée d'ordre 0

Les constants de substitutions et d'intégrations :

α_g : Les constant de substitution

α_1 : Les constant de substitution

β_1 : Les constant de substitution

γ_1 : Les constant de substitution

m : constante d'intégration

K : constante d'intégration

$K1$: constante d'intégration

$K2$: constante d'intégration

C : constante d'intégration

$C1$: constante d'intégration

$C2$: constante d'intégration

$C3$: constante d'intégration

$C4$: constante d'intégration

Liste des figures

Figures du chapitre I :

Figure (I-1) : Illustration de la différence du volume occupé par le gaz après liquéfaction.

Figure (I.2) : la chaîne de GNL.

Figure (I-3) : purification typique pour liquéfaction de GN.

Figure (I.4) : Schéma simplifié du procédé APCI.

Figure (I-5-a) : réservoir aérien à simple intégrité.

Figure (I-5-b) : réservoir aérien à simple intégrité.

Figure (I-6-a) : réservoir aérien à double intégrité.

Figure (I-6-b) : réservoir aérien à double intégrité.

Figure (I-7-a) : réservoir aérien de type membrane.

Figure (I-7-b) : réservoir aérien de type membrane.

Figure (I-8-a) : réservoir semi-enterré et enterré.

Figure (I-8-b) : réservoir semi-enterré et enterré.

Figure (I-9-a) : réservoir aériens à intégrité totale.

Figure (I-9-b) : réservoir aériens à intégrité totale.

Figure (I-10) : comparaison entre le coût de transport par gazoduc et par les méthaniers.

Figures du chapitre II :

Figure (II-1) : Bac de stockage du complexe GL/1Z.

Figure (II.2) : l'élément de volume de la couche des vapeurs de GNL.

Figure (II-3) : agrandissement de l'élément de volume de la couche des vapeurs de GNL.

Figure (II-4) : l'ailette latérale A_l (liner).

Figure (II-5) : agrandissement de l'ailette latérale A_l (liner).

Figure (II-6) : l'ailette du toit interne.

Figures du chapitre III :

Figure (III-1) : bilan thermique appliqué sur le bain du GNL.

Liste des figures

Figures du chapitre IV :

Figure (IV-1-a) : Le profile de température dans la phase vapeur de GNL pour un niveau du liquide **L = 3,85 m.**

Figure (IV-1-b) : Le profile de température dans la phase vapeur de GNL pour un niveau du liquide **L = 14,05 m.**

Figure (IV-1-c) : Le profile de température dans la phase vapeur de GNL pour un niveau du liquide **L = 28,85 m.**

Figure (IV-2-a) : Le profile de température du liner pour un niveau du liquide **L = 3,85 m.**

Figure (IV-2-b) : Le profile de température du liner pour un niveau du liquide **L = 14,05 m.**

Figure (IV-2-c) : Le profile de température du liner pour un niveau du liquide **L = 28,85 m.**

Figure (IV-3) : Le profile de température moyenne du toit pour différents niveau du liquide.

Figure (IV-4) : variation du débit de **Boil-off** en fonction du taux de remplissage du réservoir de GNL.

Figure (IV-5) : variation du débit de **Boil-off** en fonction la dégradation de la perlite.

Liste des tableaux

Tableau (I-1) : Spécifications du gaz naturel pour liquéfaction.

Tableau (II-1) : Epaisseur des éléments des parois.

Tableau (II-2) : Epaisseur des éléments ZONE A.

Tableau (II-3) : Epaisseur des éléments ZONE B.

Table (IV-1) : Caractéristiques géométriques du bac de GNL.

Table (IV-2) : Caractéristiques thermiques du bac de GNL.

Table des matières

Table des matières :

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Résumé :..... | 1 |
| Nomenclature :..... | 2 |
| Liste des figures :..... | 4 |
| Liste des tableaux :..... | 6 |
| Introduction générale :..... | 7 |
| Chapitre I : généralité sur le GNL : | |
| Introduction :..... | 8 |
| But du travail :..... | 8 |
| | |
| 2. Définition du gaz naturel :..... | 9 |
| 3. Propriétés de la liquéfaction du gaz naturel :..... | 9 |
| 4. La chaîne de GNL :..... | 10 |
| 5. Liquéfaction du gaz naturel:..... | 11 |
| 5.1. Procédé de la Liquéfaction : | 13 |
| 5.1.1. Cycle de pré- refroidissement au propane : | 14 |
| 5.1.2. Cycle de réfrigération MR :..... | 14 |
| 5.1.3. Cycle de réfrigération propane :..... | 15 |
| 6. le bac du stockage du GNL :..... | 16 |
| 6.1. Types de réservoirs de stockages du GNL :..... | 16 |
| 7. Comparaison des coûts de transport par canalisation et par chaîne GNL :..... | 21 |

Table des matières

Chapitre II : Etude théorique :

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction : | 22 |
| 2. Présentation du modèle physique : | 22 |
| 2-1. Ossature Métallique : | 22 |
| 2-2. Ossature en Béton Armé : | 23 |
| 2-2-1. Superstructure : | 23 |
| 2-2-2. Infrastructure : | 23 |
| 3. L'isolation du réservoir de stockage : | 23 |
| 3-1. L'isolation des parois et du toit suspendu : | 23 |
| 3-2. L'isolation du fond : | 24 |
| 4. bilan d'énergie : | 27 |
| 4-1. bilan thermique appliqué sur les vapeurs du GNL : | 27 |
| 4-2. Bilan thermique appliqué sur l'ailette latérale interne A_l (liner) : | 29 |
| 4-3. bilan thermique appliqué sur l'ailette du toit interne du réservoir (ailette A_t) : | 32 |

Chapitre III : Résolution analytique :

| | |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction : | 34 |
| 2. Solution analytique : | 34 |
| 2-1. La résolution de l'équation des vapeurs du GNL (a) : | 35 |
| 2-2. La résolution de l'équation de liner (b) : | 37 |
| 2-3. L'équation de toit (c) : | 37 |
| 3. Condition aux limites : | 38 |
| 3-1. Les conditions aux limites sur les vapeurs du GNL : | 38 |
| 3-2. Les conditions aux limites sur liner : | 39 |
| 4. Détermination du débit de boil-off \dot{m}_g : | 40 |
| 5. Organigramme de calcul du Modèle mathématique : | 43 |

Table des matières

Chapitre IV : Interprétation des résultats :

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction : | 44 |
| 2. Distributions des températures de la phase vapeur (boil-off) pour différents taux de remplissage du réservoir..... | 45 |
| 3. Distributions de la température du liner pour différents taux de remplissage du bac :..... | 47 |
| 4. Distributions de la température du toit pour différents taux de remplissage du bac :..... | 50 |
| 5. Débit de Boil-off en fonction du taux de remplissage du réservoir de GNL :..... | 51 |
| 6. Influence de la dégradation de l'isolation du réservoir sur le débit de boil-off :..... | 52 |
| Conclusion : | 53 |
| Bibliographie : | 55 |

Introduction générale

Introduction Générale

L'économie nationale se base essentiellement sur l'industrie des hydrocarbures et vu la richesse de l'Algérie en gaz. Cette industrie nécessite l'implantation de diverses unités de traitement du gaz pour pouvoir le transporté et le commercialisé, ce qui exige des conditions bien strictes pour satisfaire les exigences du marché.

L'industrie du GNL (gaz naturel liquéfié) est une technologie approuvée depuis près de 50 ans. Cette technologie a été lancée en 1963 en Algérie, elle est utilisée depuis de nombreuses années par plusieurs pays, notamment la France, la Belgique, l'Espagne, la Corée du sud et les États-Unis. Il en va de même au Japon qui dépend à 100 % du GNL importé pour répondre à ses besoins en gaz naturel. Le GNL connaît un développement progressif dans le domaine économique durant ces dernières années. Le principal facteur de cette croissance réside dans sa qualité de combustible propre et efficace.

Notre présent travail traite le comportement thermique d'un réservoir de stockage de GNL. L'objectif étant l'estimation du taux d'évaporation du produit ainsi que la distribution de températures au niveau du liner et de la phase vapeur. Pour mener à bien cette étude, nous avons procédé de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur l'industrie du GNL.
- Le second a pour but la présentation du modèle physique et thermique adopté dont ressort un système d'équations différentielles issues de bilans thermiques sur les sous-systèmes judicieusement choisis.
- Le modèle mathématique obtenu précédemment est résolu analytiquement dans le chapitre trois avec les conditions aux limites requises. Un programme de calcul sous le logiciel Matlab a été élaboré pour simuler le comportement thermique des réservoir de stockage de GNL.
- Le dernier chapitre est réservé à l'application de cette démarche pour un réservoir de stockage en grandeur réelle. Les profils de température ainsi que les débits de boil-off seront obtenus et interprétés en fonction des données géométriques et thermiques du réservoir.

En fin on termine notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur le GNL

Introduction :

L'Algérie est le 1^{er} producteur africain de gaz (plus de 50 % de la production de gaz en Afrique) et le 8^e producteur de gaz à l'échelle mondiale. Elle est le 2^e fournisseur de gaz naturel de l'Europe, après la Russie. Et pour pouvoir assurer ces commandes l'Algérie a dû perfectionner et développer son industrie d'hydrocarbure en misant sur les moyens humains et techniques, attiré les investisseurs comme des sociétés multinationales possédant un très grand savoir faire et une maîtrise à la pointe de la technologie.

Et pour pouvoir exporter ses produits l'Algérie a fait le choix de réaliser des chaînes de production et des moyens de stockages et de transports du GNL (usine de liquéfaction, transport par méthaniers, terminal méthanier), est ce quand la réalisation des gazoducs est devenue trop coûteuse en raison de la distance ou des conditions techniques trop difficiles.

La liquéfaction du gaz permet de concentrer un maximum de matière dans un volume donné (600 m³ de gaz sont concentrés dans 1 m³ de liquide). Après liquéfaction, le GNL est chargé sur des méthaniers pour être acheminé vers les terminaux de réception où il sera regazifié pour être distribué aux consommateurs.

1. But de notre travail :

Dans notre étude nous allons étudier le comportement thermique d'un réservoir de stockage de GNL, car l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur du réservoir est tellement importante qu'une quantité de chaleur parvient à s'infiltrer même si le bac est très bien isolé grâce à la perlite qui possède un très faible coefficient de conductivité thermique entre (0,018 à 0,060 W/m. K) [11]. Mais même avec ce très bon isolant il subsiste des infiltrations de chaleur car le réservoir n'est pas isolé à 100%. Ces infiltrations de chaleur vont causer une augmentation de la température au niveau des parois internes du réservoir ce qui génère un débit d'évaporation de GNL appelé débit de boil-off.

Nous allons développer un modèle analytique du bac de stockage de GNL, en se basant sur des bilans thermiques des parois internes ainsi que de la phase vapeur du bac, pour quand puisse calculer le débit de boil-off et de tracer les courbes des différents profils de températures.

Et ce qui rend ce type d'étude très importantes sur les installations de stockage et de transport du GNL, et que les premières molécules qui s'évaporent sont les molécules possédant la plus grande valeur énergétique donc plus il y a d'évaporation plus le produit perd de sa valeur énergétique donc il va perdre de sa valeur économique.

2. Définition du gaz naturel :

Le gaz naturel est un combustible fossile présent naturellement sous forme gazeuse dans les roches poreuses du sous-sol. Utilisé comme source d'énergie, le gaz est composé d'hydrocarbures : principalement du méthane (CH_4) mais aussi du propane (C_3H_8), du butane (C_4H_{10}), de l'éthane (C_2H_6) et du pentane (C_5H_{12}). [16]

Il est généré à partir de la sédimentation de matière organique vieille de plusieurs millions d'années. Le plus souvent, enfouie dans le sous-sol et sous l'effet de la pression et de la température, la matière organique se transforme d'abord en kérogène. Lorsque la température augmente (entre 50 et 120°C), le kérogène se décompose. Appelée pyrolyse, cette décomposition thermique expulse deux hydrocarbures, le gaz naturel et le pétrole qui vont être piégé au-dessous d'une roche imperméable pour former un gisement. Entre 1,5 et 3 km de profondeur, le gaz et le pétrole sont présents dans les mêmes gisements.

Le gaz naturel peut être de diverses natures : il est dit thermogénique lorsqu'il provient de la transformation de matière organique sous l'effet de la pression et de la chaleur, et il est dit biogénique lorsqu'il est généré à partir de la fermentation de bactéries présentes dans les sédiments organiques.

Selon la profondeur et les types de gisements, le gaz peut être conventionnel ou non conventionnel. Cela dépend de sa difficulté d'extraction et de sa mise en exploitation. A l'inverse des gaz conventionnels piégés dans un gisement facile d'accès, les gaz non conventionnels sont difficiles à extraire. Les producteurs de gaz privilégient l'exploitation du gaz conventionnel qui garantit un taux de récupération des ressources de 80% contre 20% en moyenne pour le gaz non conventionnel.

3. Propriétés de la liquéfaction du gaz naturel :

Le gaz naturel est liquide à -160°C, à la pression atmosphérique, et la liquéfaction va permettre de réduire le volume du gaz par 600. Le GNL est de couleur claire, transparent et inodore. Il est non corrosif et non toxique. [1]

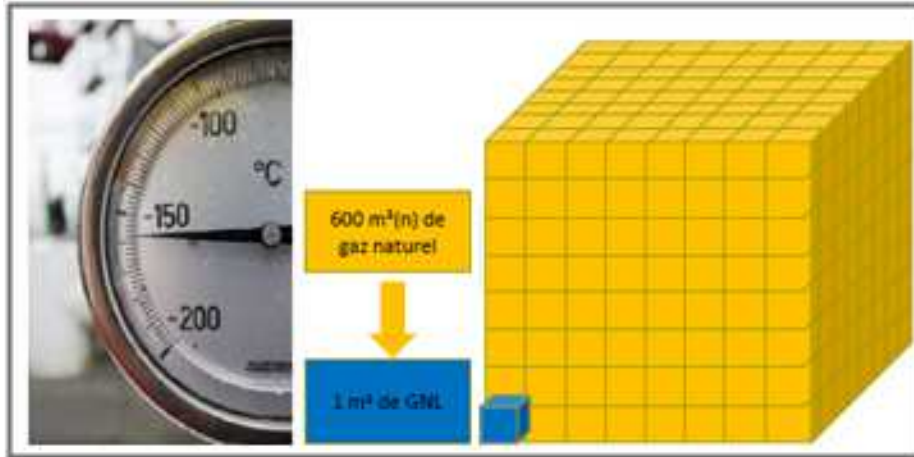


Figure (I-1) : Illustration de la différence du volume occupé par le gaz après liquéfaction [1]

Les dangers potentiels du GNL sont attribuables à ses propriétés de base, notamment sa nature cryogénique et ses caractéristiques de dispersion et d'inflammabilité. En raison de sa nature cryogénique, le GNL gèle tout ce qui entre en contact avec lui. Lorsqu'il est liquéfié, le gaz naturel ne brûle pas et ne peut exploser. Ce n'est que lorsque le GNL se réchauffe et retrouve son état gazeux, il se mélange à l'air et si il entre en contact avec une source de chaleur qu'il peut s'enflammer ou exploser (en milieu confiné). Mais pour cela, il faut d'abord qu'une fuite se produise.

4. La chaîne de GNL :

Une fois que le gaz naturel stabilisé sur le champ de production (séparation des condensats et ajustement des points de rosée eau et hydrocarbures pour éviter les condensations et la corrosion dans la canalisation), il est transporté par gazoduc jusqu'aux unités de traitements en suite de liquéfaction, où il est de nouveau traité purifié, cette fois pour pouvoir respecter les spécifications de vente, et également les répondre aux conditions de liquéfaction : tous les composés pouvant se solidifier doivent être éliminés pour éviter le bouchage des conduites et des différents échangeurs cryogéniques.

Le gaz purifié est ensuite liquéfié et stocké dans des grands réservoirs de stockage cryogéniques avant d'être chargé dans un méthanier. À l'arrivée dans le pays consommateur, le méthanier est déchargé par un bras cryogénique vers un autre réservoir de stockage cryogénique. [4]

Le GNL est regazéifié et injecté, au fur et à mesure des besoins, dans le circuit de distribution. La chaîne de transport GNL est illustrée par la figure (I-2)

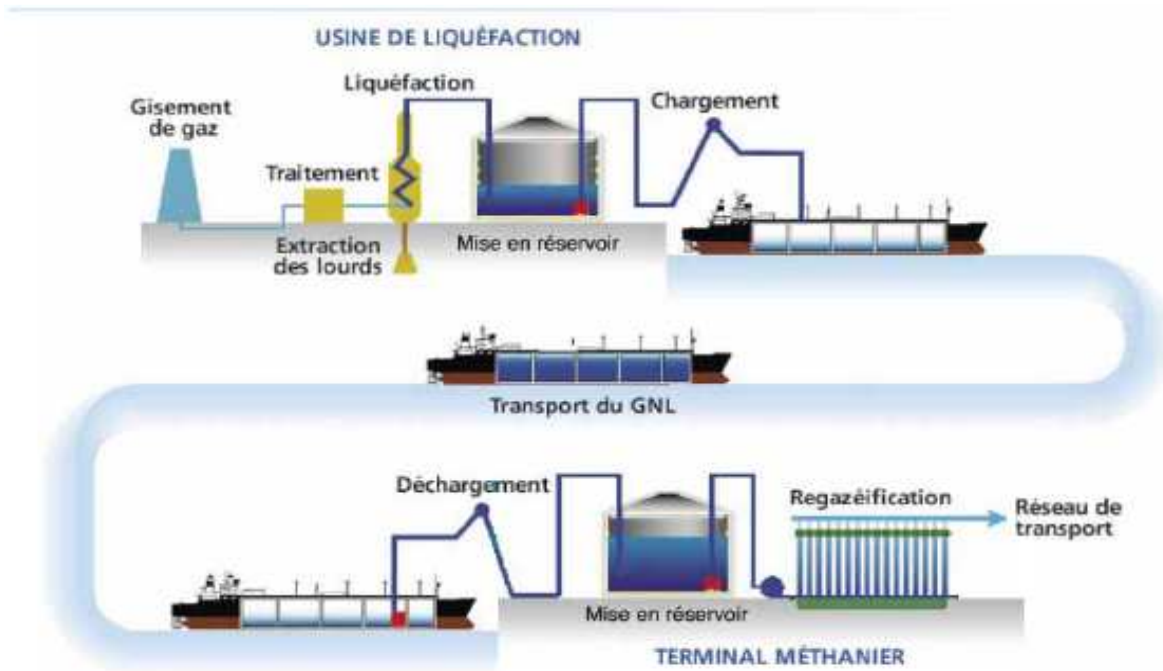


Figure (I-2) : la chaîne de GNL [3]

5. Liquéfaction du gaz naturel:

Le processus de liquéfaction permettant d'obtenir le GNL s'effectue en plusieurs étapes et consomme une quantité importante d'énergie. Il nécessite l'utilisation d'électricité et de chaleur, produites à l'intérieur même des sites chargés de la liquéfaction, à partir d'une partie du gaz naturel reçu (l'autoconsommation).

Les spécifications commerciales du gaz naturel sont variables d'un pays à l'autre, et cela peut poser des problèmes si l'unité de liquéfaction doit alimenter des clients dans des régions très différentes.

La première spécification est la valeur calorifique du gaz. Cette spécification sera traitée en laissant plus ou moins d'azote dans le gaz. La réalisation de cet ajustement est une fonctionnalité à prendre en compte dans le schéma du procédé.

Ensuite, le soufre et l'H₂S sont limités à quelques ppm massique.

Les points de rosée d'eau et hydrocarbures sont fixés par les spécifications du transport, mais la liquéfaction a des spécifications encore plus sévères.

Les principales spécifications de la liquéfaction sont résumées dans le tableau I-1.

Chapitre I : Généralité sur GNL

| Constituants | Limites | Spécification |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| H ₂ S | < 3.5 ppmv | Produit toxique |
| Soufre total | < 30 mg/Sm ³ | Produit toxique |
| CO ₂ | < 50 ppmv | Risque de cristallisation |
| Hg < 0.01 | mg/Sm ³ | Corrosion de l'aluminium |
| H ₂ O | 0.1 à 1 ppmv | Risque de cristallisation |
| C ₆ H ₆ | < 1 ppmv | Risque de cristallisation |
| C ₅ + | < 0.1% en volume | Produit |

Tableau (I-1) : Spécifications du gaz naturel pour liquéfaction [3].

Pour respecter ces spécifications, le gaz naturel doit être prétraité (Figure I.3). Suivant sa composition, le traitement sera plus ou moins coûteux. Généralement, le prétraitement représente environ 15% du prix de la liquéfaction.

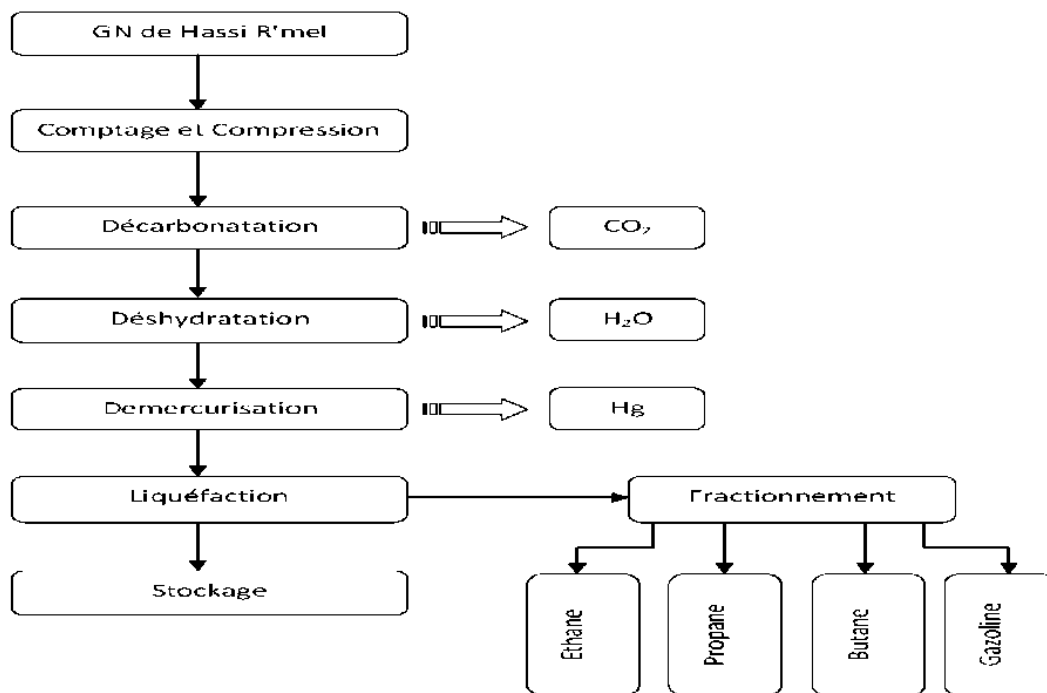


Figure (I-3) : purification typique pour liquéfaction de GN [3].

Chapitre I : Généralité sur GNL

À la sortie de la liquéfaction, il est souvent nécessaire d'enlever l'azote en excès pour ajuster la chaleur de combustion du gaz naturel (limiter à 0,5 à 1 % d'azote). L'azote est enlevé en revaporisation une partie du GNL :

- soit dans un ballon séparateur ;
- soit dans deux ballons en série à des pressions légèrement différentes ;
- soit dans une colonne de rebouillie par le GNL à forte pression avant détente dans une vanne.

La revaporisation se fait avec un refroidissement du gaz. La partie revaporisée est réchauffée, en récupérant les frigories pour refroidir une partie du gaz naturel, avant d'être envoyée à un compresseur pour alimenter les turbines à gaz de l'unité. [2]

5.1. Procédé de la Liquéfaction :

Il existe plusieurs procédés de la Liquéfaction de gaz naturel, mais nous on s'intéresse au procédé APCI : Ce procédé est utilisé dans le complexe "MEGA TRAIN " réalisé par la compagnie Kellogg Brown Root Int Inc "KBR", la première mise en service a été le 24/02/2013. [8]

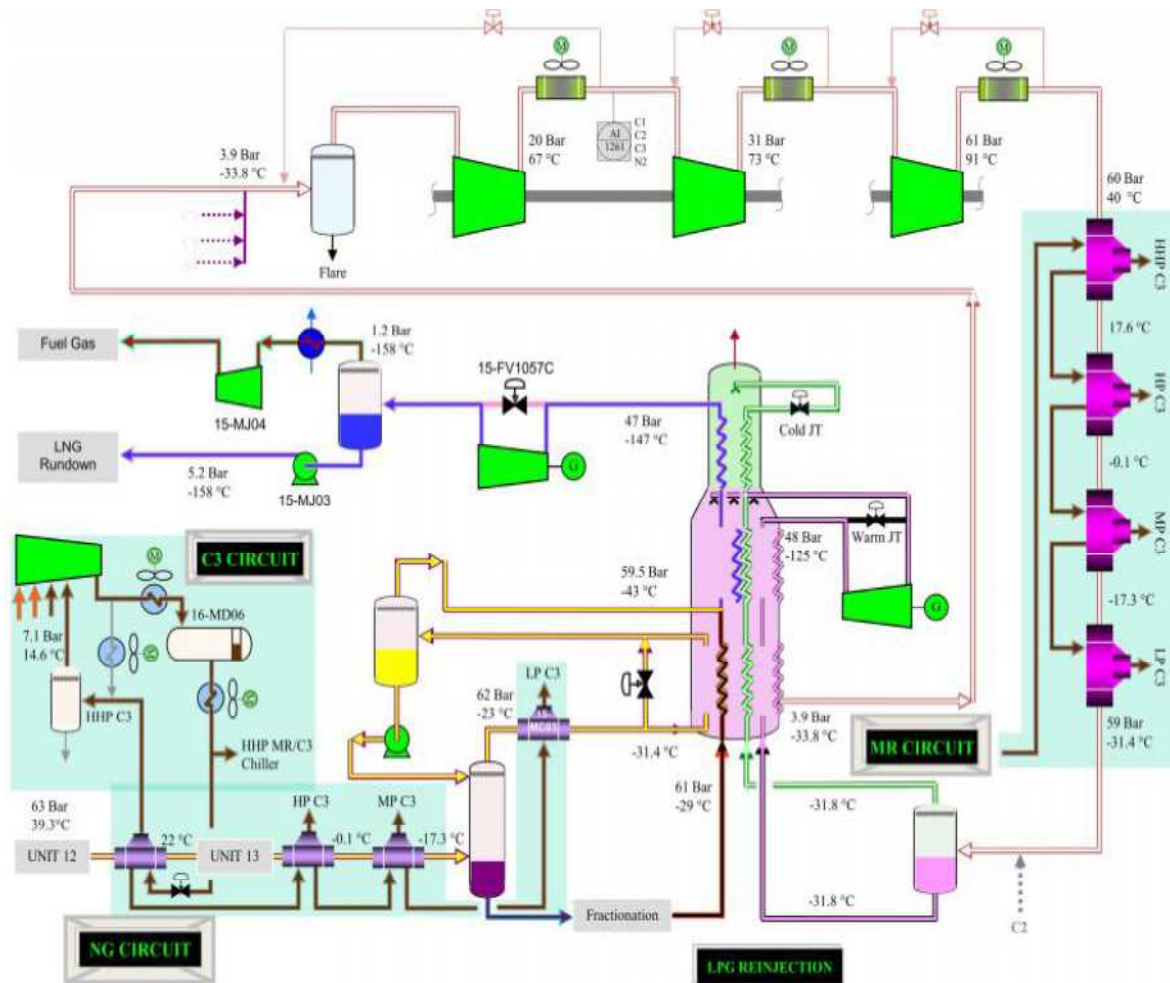


Figure (I-4) : Schéma simplifié du procédé APCI [2]

5.1.1. Cycle de pré-refroidissement au propane :

Sortant des sécheurs, le gaz naturel subit son premier stade de refroidissement, c'est un cycle de pré-refroidissement au propane où le gaz passe de la température ambiante à une température de (-35°C). Cette opération s'effectue à trois (03) niveaux de réfrigération distincts; haut, moyen et bas. La fonction de compresseur est assurée par le compresseur propane à trois étages. [2]

5.1.2. Cycle de réfrigération MR :

Le MR refoulé par le corps basse pression du compresseur a une pression 20.16 bars et a une température de 62.43°C est refroidi dans des aéra-réfrigérants à 34°C, puis refoulé par le corps moyenne pression à une pression 31.35 bars et une température de 65.48°C et refroidi dans des aéra-réfrigérants intermédiaires a 35°C, avant d'être envoyé à l'aspiration du corps haute pression. [2]

Il est à noter que :

- ✓ Les compresseurs MR- (BP et MP) sont entraînés par la même turbine à gaz,
- ✓ Le compresseur MR-HP est entraîné par la turbine du compresseur propane.

Après le refoulement du corps HP à une pression 62.09 bars et une température de 85.88°C, le MR est refroidi dans les aéra-réfrigérants à 41°C. Il est divisé par la suite en deux parties :

- ✓ 2/3 de la quantité de MR traverse en série 4 échangeurs refroidis par la boucle principale Propane.
- ✓ 1/3 de la quantité de MR traverse en série 4 échangeurs refroidis par la boucle externe Propane.

Le MR sort de ces deux séries d'échangeurs à -35°C sous forme de mélange de liquide et vapeur, il est récupéré dans le ballon où ils sont séparés.

Le liquide et la vapeur sont ensuite envoyés séparément vers l'échangeur principal pour s'auto refroidir et liquéfier le gaz naturel. [5]

- **Rôle de la boucle de réfrigération MR:**

- Refroidir et liquéfier le gaz naturel de -35°C à -149°C dans l'échangeur principal.
- Le fluide réfrigérant utilisé est du MR (**M**ixed **R**éfrigérant) fabriqué à partir des constituants du gaz naturel produits dans l'unité de fractionnement. [5]

5.1.3. Cycle de réfrigération propane :

Le propane refoulé à une pression de 16.76 bars et une température de 70°C par le quatrième étage du compresseur est refroidi à 49°C, puis complètement condensé dans les aéra-réfrigérants. Le propane liquide est ensuite stocké dans un ballon à partir du quelle, il est refroidit à 30.6°C dans les aéra-réfrigérants. Suite à cela :

- Il alimente les réfrigérants de MR qu'il va le refroidir par détente et vaporisation cote calandre. Le propane vaporisé revient respectivement vers le 4ème, 3ème, 2ème et premier étage du compresseur de propane.
- Il alimente les réfrigérants de gaz naturel qu'il va le refroidir par détente et revaporisation coté calandre. Le propane vaporisé revient respectivement vers le 4ème, 3ème, 2ème et 1er étage du compresseur de propane. [5]

En cas de nécessité, un appoint de propane peut être fait à partir de l'unité de fractionnement.

• Le rôle de boucle de réfrigération propane :

- Refroidir 2/3 du réfrigérant MR de 40°C à -36° C avant son entrée dans l'échangeur Principal.
- Refroidir le gaz naturel à - 35°C dans les pré-refroidisseurs de gaz avant son entrée à la tour de lavage. [2]

6. le back du stockage du GNL :

Les réservoirs de stockage du GNL sont conçus pour contenir un produit dans la température avoisine les 113 K, donc l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur est immonde et pour cela le réservoir doit être bien isolé thermiquement pour empêcher les infiltrations de chaleurs.

6.1. Types de réservoirs de stockages du GNL :

Il existe plusieurs types de réservoirs qui sont couramment utilisés dans l'industrie mondiale. Les principaux sont présentés ci-après :

- les réservoirs aériens à simple intégrité : sont présentés sur les figures (I-5-a/b).

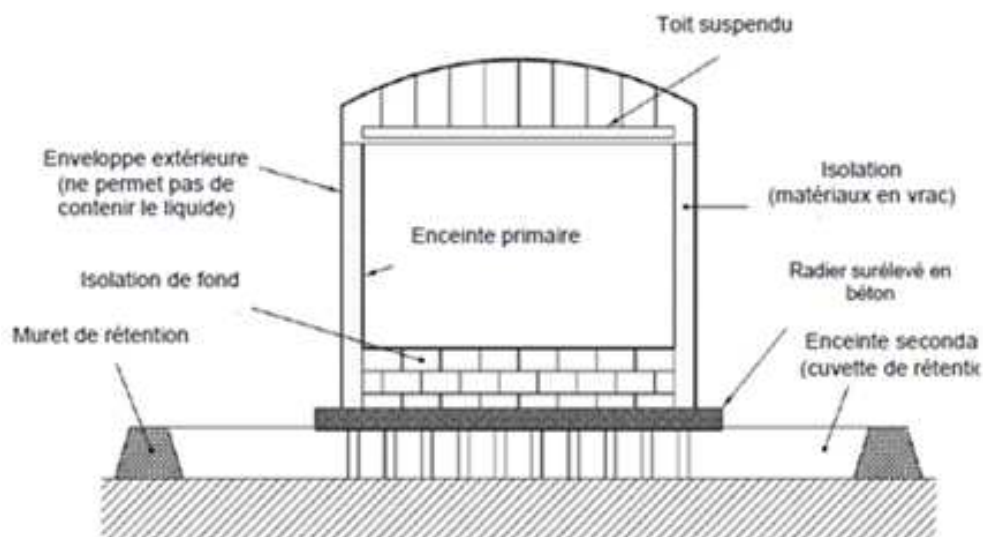


Figure (I-5-a) : réservoir aérien à simple intégrité. [12]



Figure (I-5-b) : réservoir aérien à simple intégrité. [12]

b) les réservoirs aériens à double intégrité : sont présentés sur les figures (I-6-a/b).

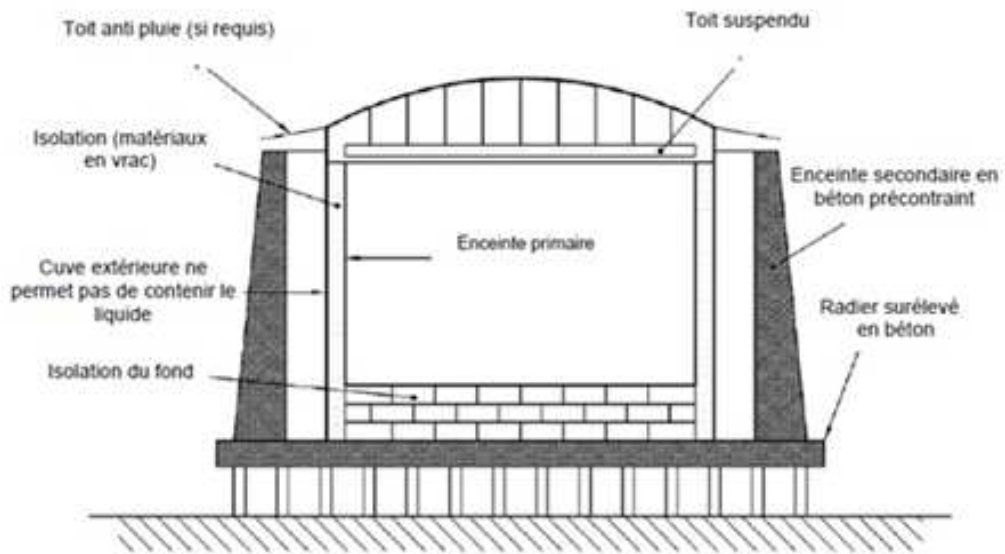


Figure (I-6-a) : réservoir aérien à double intégrité. [12]



Figure (I-6-b) : réservoir aérien à double intégrité. [12]

c) les réservoirs aériens de type membrane : sont présentés sur la figure (I-7-a/b).

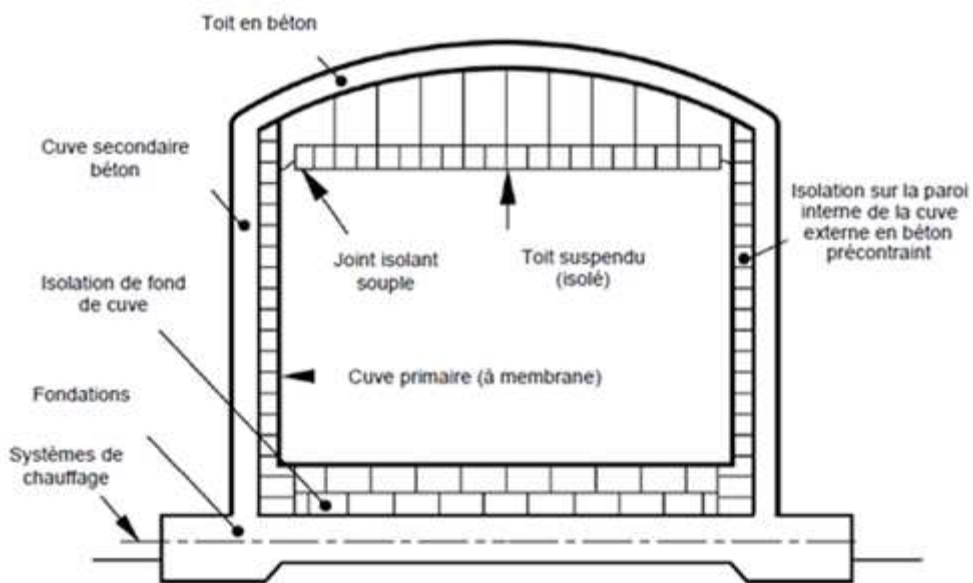


Figure (I-7-a) : réservoir aérien de type membrane. [12]



Figure (I-7-b): réservoir aérien de type membrane. [12]

d) les réservoirs semi-enterrés et enterrés. Sont représentés sur la figure (I-8-a/b).

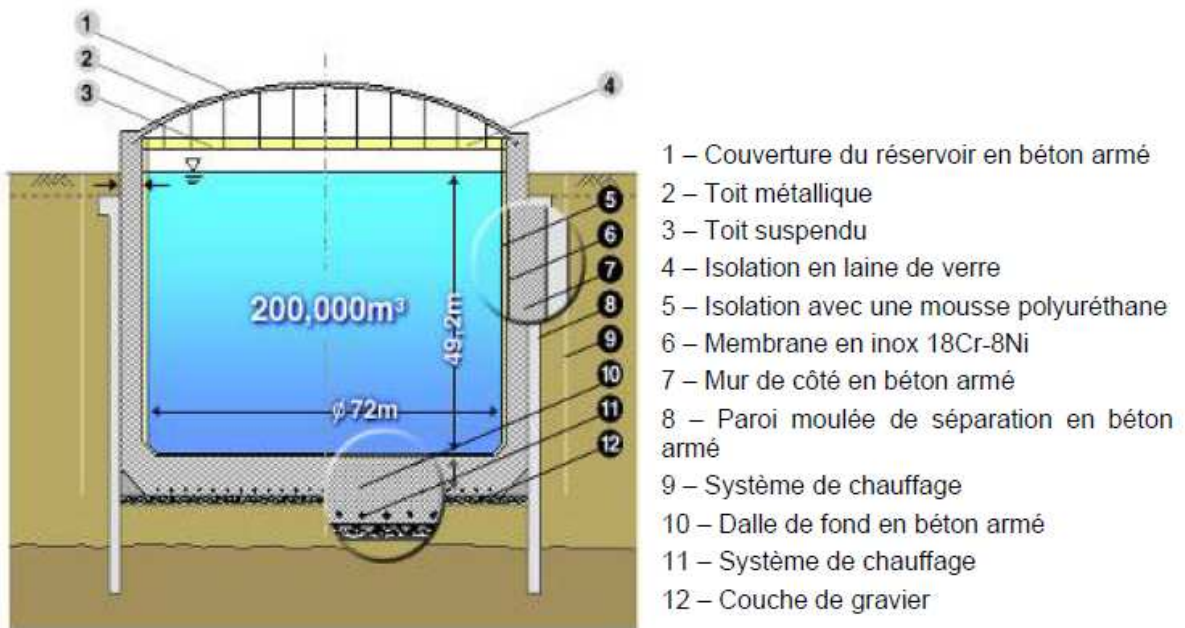


Figure (I-8-a): réservoir semi-enterré et enterré. [12]



Figure (I-8-b): réservoir semi-enterré et enterré. [12]

e) les réservoirs aériens à intégrité totale : sont présentés sur la figure (I-9-a/b).

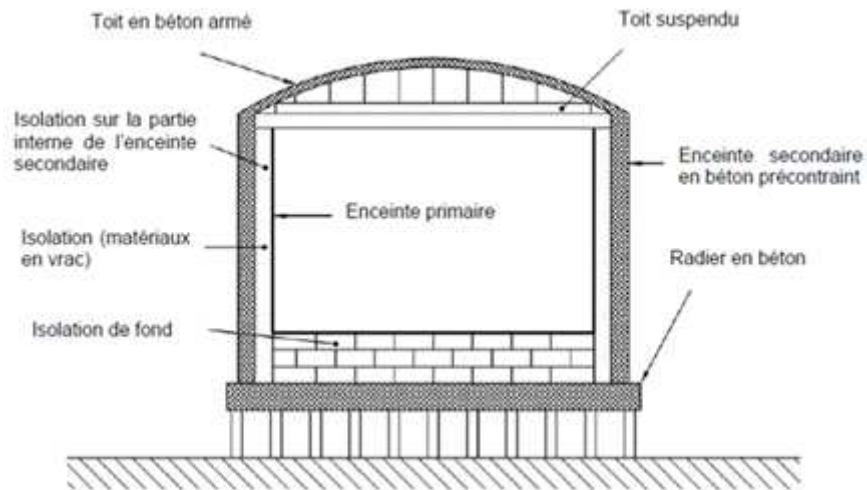


Figure (I-9-a) : réservoir aériens à intégrité totale. [12]



Figure (I-9-b) : réservoir aériens à intégrité totale. [12]

7. Comparaison des coûts de transport par canalisation et par chaîne GNL

En effet, il ne sera question pour le coût de la chaîne GNL que de l'investissement, qui est l'élément essentiel du coût total, et le GNL devient plus économique pour le transport sur de longues distances Figure (I-10)

Comparé au coût de transport par canalisation qui varie pratiquement linéairement avec la distance, le coût de la chaîne GNL en dépend peu ; il ya égalité des coûts pour une distance de transport qui dépend des quantités transportées (Tableau I.2).

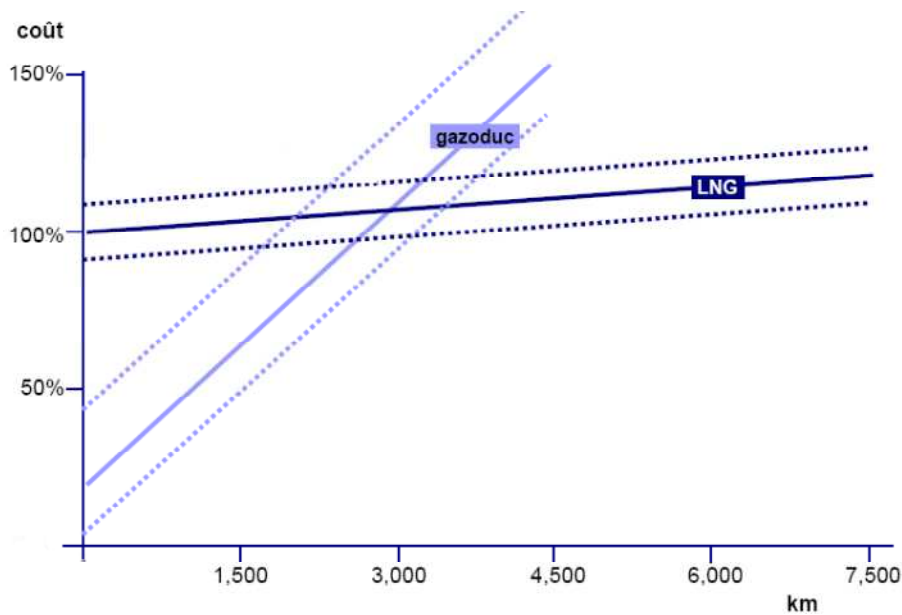


Figure (I.10) : comparaison entre le cout de transport par gazoduc et par les méthaniers. [2]

Chapitre II : Etude théorique

1. Introduction :

Dans les unités de liquéfaction du gaz naturel, le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) est stocké dans des bacs cylindriques (Figure II-1) de grande capacité allant jusqu'à 180000 m³. Le liquide est stocké à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique et à une température qui reste en fonction de la composition du GNL mais qui avoisine tout de même les (-162°C). Malgré une isolation thermique poussée, un transfert de chaleur entre le milieu atmosphérique et l'intérieure du bac existe. Pour maintenir la pression de stockage, ce transfert de chaleur est évacué par l'évaporation d'une partie du GNL appelée aussi **boil-off**.

En fonction de l'exploitation des unités de liquéfaction et des programmes d'exportation, le niveau de GNL dans les bacs varie entre un minimum et un maximum. La variation du transfert de chaleur et donc du débit de boil-off varie, pour un bac donnée, en fonction de la température atmosphérique et surtout au niveau du liquide.

Ce modèle de calcul a été appliqué à un des bacs de l'unité de liquéfaction de SKIKDA

2. Présentation du modèle physique :

Le modèle élaboré considère le receveur de stockage du GNL représenté sur la figure (II-1), comme étant un système d'ailette couplé thermiquement, ce réservoir schématisé en figure (II-1) c'est un réservoir aérien, de forme cylindrique et de capacité de stockage 100.000 m³ de GNL, conçu essentiellement par deux (02) ossatures distinctes : Ossature Métallique et Ossature en Béton Armé. [10]

2-1. Ossature Métallique :

L'ossature métallique du réservoir cryogénique conçu en double paroi ; se compose de :

- Une paroi interne construite en acier inox à 9% de Nickel.
- Une paroi externe construite en acier au Carbone.
- Un toit bombé nommé Dôme construit en acier au Carbone à 10,99 m de hauteur, ce qui donne au centre du bac une hauteur totale de 44,80 m et d'une épaisseur de 5,5 mm
- Un toit intérieur en aluminium d'une épaisseur de 5 mm est suspendu depuis le dôme. Il couvre la paroi interne et protège le dôme contre les vapeurs cryogéniques. [10]

2-2. Ossature en Béton Armé :

En forme de caisson en béton armé, construit à être rigide et résistant. Cette ossature comprend :

2-2-1. Superstructure :

La résultante de la descente des charges due au poids du fluide cryogénique GNL et au poids de l'ossature métallique du réservoir de stockage est transmise aux fondations par l'intermédiaire de la dalle supérieure en béton armé de forme circulaire. La dalle est posée sur un nombre considérable de 716 Poteaux/Supports en béton armé ; d'une section carré (60X60) cm² et d'une hauteur h=1,24m.

2-2-2. Infrastructure :

Une fondation circulaire en béton armé enterrée et non profonde appelée Radier.

Ce Radier est réalisé de manière à résister à l'effet de surcharge d'un poids d'au moins 1,25 fois la capacité d'un bac de stockage. [10]

3. L'isolation du réservoir de stockage :

Les processus cryogéniques exigent une parfaite isolation thermique.

Plusieurs paramètres sont à considérer pour leur application tels que : l'efficacité, l'économie, la commodité, le poids, la rugosité.

3-1. L'isolation des parois et du toit suspendu :

- La paroi interne du réservoir est recouverte de son extérieure par une couche (matelas) d'isolant thermique constituée de laine de verre (glass wool) d'une épaisseur 24 cm.
- La paroi externe du réservoir est aussi recouverte de son intérieure par une couche (matelas) de l'aine de verre d'une épaisseur 2.5cm.
- L'espace annulaire compris entre les deux parois externe et interne est rempli par un isolant en poudre appelé perlite expansée.
- la flexibilité de la couche du glass wool permet la dilatation du réservoir interne sans perturber la perlite et empêche sa compression et par conséquent son entassement.
- Le toit en aluminium suspendu au-dessus de la paroi interne du réservoir est isolé par des sacs de perlite (en vrac) d'une épaisseur e=70 cm recouverte d'un tissu de verre. [10]

Chapitre II : Etude théorique

| Matériaux | Epaisseur (m) |
|------------------------------------|---------------|
| Paroi externe : Acier au Carbone | 0,0138 |
| Isolant : laine de verre | 0,2650 |
| Isolant : perlite expansée | 0,6281 |
| Paroi interne : Acier inox à 9% Ni | 0,0131 |

Tableau (II-1) : Epaisseur des éléments des parois. [10]

3-2. L'isolation du fond :

La tôle de fond du réservoir intérieur de stockage repose sur une série de couches d'épaisseurs variable de matériaux isolants dont on peut les classer en deux zones A et B puisque leur composition diffère.

La zone A : se compose :

- une première couche de sable sec.
- 05 couches de mousse de verre (foam glass), dont des feuilles de feutres sont insérées dans ses différents étages.
- enfin, d'une deuxième couche de sable sec.

Remarque : Les feuilles de feutre limitent les déviations de la paroi interne lors du chargement initial du réservoir de stockage GNL.

La zone B :

- un contre plaque en bois
- un bloc de béton de perlite.
- une chape en béton.

Remarque :

Un joint de dilatation, en laine de verre sépare la zone A de la zone B. [10]

Chapitre II : Etude théorique

ZONE A

| Matériaux | Epaisseur (m) |
|-----------------|---------------|
| Sable sec | 0,075 |
| Mousse de verre | 0,500 |
| Sable sec | 0,045 |

Tableau (II-2) : Epaisseur des éléments ZONE A. [10]

ZONE B

| Matériaux | Epaisseur (m) |
|--------------------------|---------------|
| Contre plaqué en bois | 0,021 |
| Bloc de béton de perlite | 0,479 |
| Chape en béton | 0,075 |

Tableau (II-3) : Epaisseur des éléments ZONE B. [10]

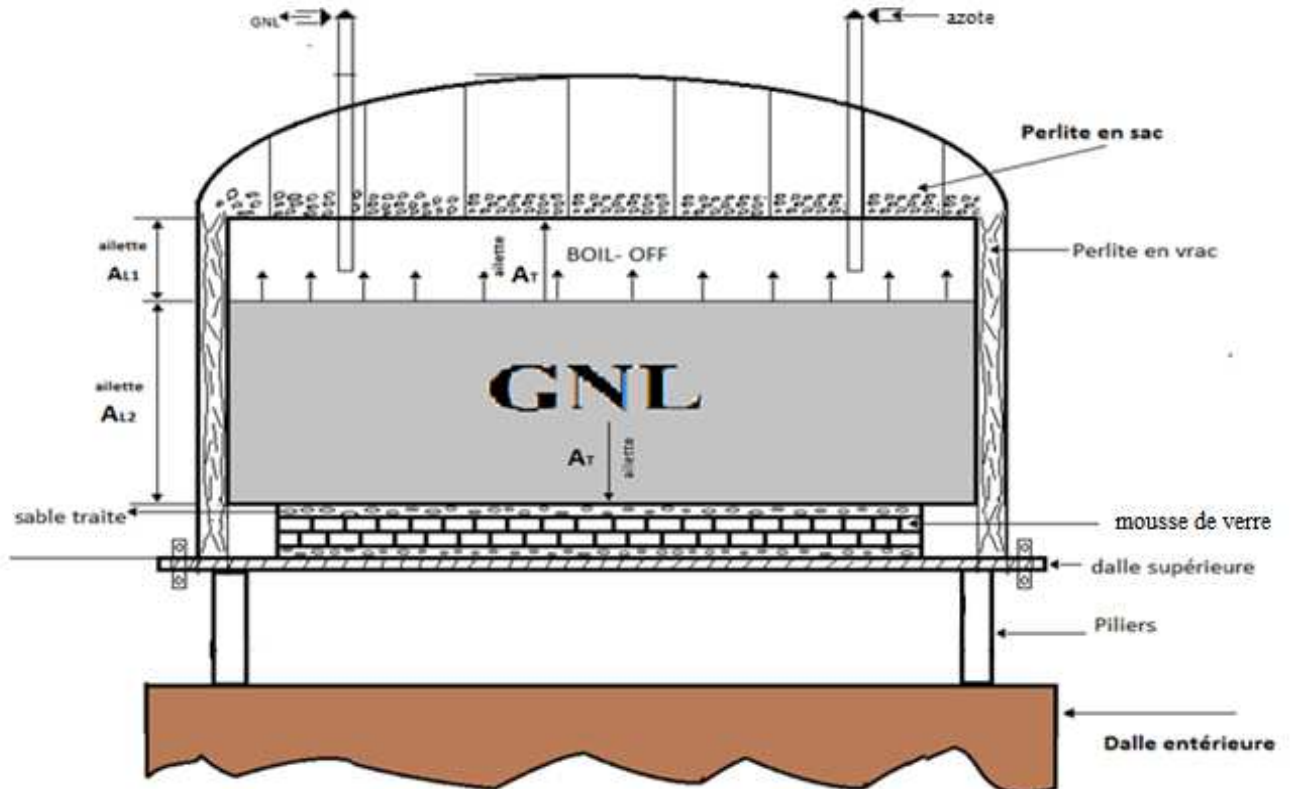


Figure (II-1) : Bac de stockage du complexe GL/1Z. [3]

Notre travail consiste à faire une étude thermique sur la partie du réservoir contenant les vapeurs du GNL ainsi que sur les parois internes de ce dernier (liner + toit). Une coupe verticale du réservoir fait apparaître les parties qu'on veut étudier ; la partie vapeur et les parois internes, modélisées ici sous forme d'ailettes annulaires :

- Élément de volume en forme de disque annulaire pour la phase vapeur.
- Ailette du liner : A_L
- Ailette du toit A_t

4. Bilans d'énergie:

On applique les bilans thermiques sur des éléments du volume Infinitésimaux relatifs à des vapeurs du GNL et chacune des ailettes (liner et le toit) qui constituent le modèle adopté pour les équations différentielles de température.

4-1. bilan thermique appliqué sur les vapeurs du GNL :

On choisit un élément de volume en forme de disque annulaire concentrique qui présente une symétrie suivant l'axe vertical du réservoir. Cet élément varie en fonction des deux axes radial et vertical pour balayer le volume global de la phase vapeur que l'on veut étudier comme représenté sur la figure (II-2).

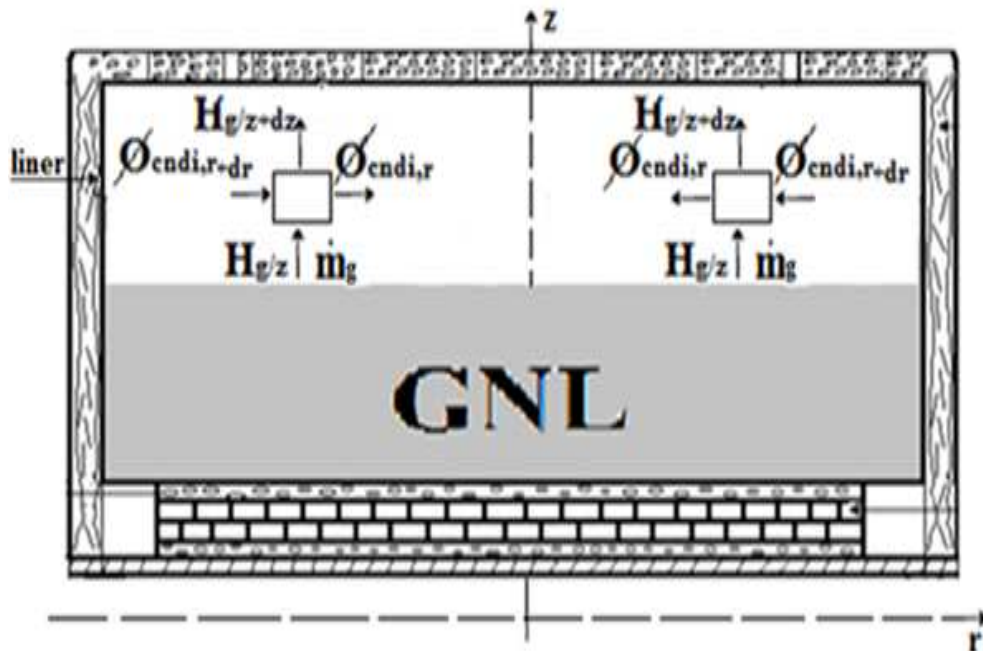


Figure (II-2) : l'élément de volume de la couche des vapeurs de GNL

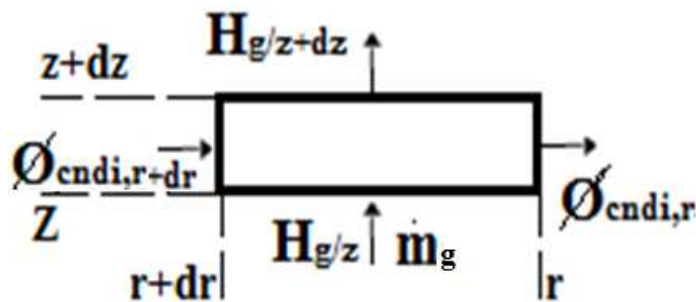


Figure (II-3) : agrandissement de l'élément de volume de la couche des vapeurs de GNL

Chapitre II : Etude théorique

On appliquant la première loi de la thermodynamique sur l'anneau on obtient :

$$\dot{W} + \dot{Q} = \dot{m}_g \Delta h_t \dots \dots \dots (a)$$

- On sait que la paroi du réservoir est indéformable donc $\dot{W} = 0 \dots \dots \dots (b)$

- $h_t = H + \frac{1}{2} w^2 + \rho_g g z \Rightarrow \Delta h_t = [H_{g,z+dz} - H_{g,z}] + \frac{1}{2} [(w_{g,z+dz})^2 - \frac{1}{2} (w_{g,z})^2] + \rho_g g dz$

On constate que dz et $(w_{g,z+dz})^2 - \frac{1}{2} (w_{g,z})^2$ sont des valeurs très petites devant $[H_{g,z+dz} - H_{g,z}]$ donc on néglige les deux termes pour simplifier notre équation :

$$\Delta h_t = \Delta H_g = c_{pg} \Delta T$$

Pour $\Delta T \rightarrow 0$ on aura :

$$dh_t = dH_g = c_{pg} \partial T_g(r, z) \dots \dots \dots (c)$$

- On suppose que la quantité de vapeur est constante suivant les lignes de la surface horizontale donc \dot{m}_g on peut l'écrire sous une autre forme :

$$\dot{m}_g = \frac{2\pi r dr}{\pi r_1^2} \dot{M} \dots \dots \dots (d)$$

Avec \dot{m}_g : c'est le débit des vapeurs qui traverse l'anneau

\dot{M} : C'est le débit des vapeurs le long des surfaces horizontales

- $\dot{Q} = \phi_{cndi,r+dr} - \phi_{cndi,r}$

On applique le développement limite du première ordre pour $\phi_{cndi,r+dr}$ on obtient :

$$\phi_{cndi,r+dr} = \phi_{cndi,r} + dr \frac{\partial}{\partial r} (\phi_{cndi,r})$$

Avec :

$$\phi_{cndi,r} = \lambda_g 2\pi r dz \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r}$$

$$\Rightarrow \phi_{cndi,r+dr} = \phi_{cndi,r} + dr \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_g 2\pi r dz \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r})$$

$$\Rightarrow \phi_{cndi,r+\partial r} = \phi_{cndi,r} + \lambda_g 2\pi \partial z \partial r \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} + \lambda_g 2\pi r \partial z \partial r \frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2}$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \lambda_g 2\pi r dz dr \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2} \right) \dots \dots \dots (e)$$

On remplace (b), (c), (d) et (e) dans (a) on obtient :

$$2\pi r \lambda_g \partial z dr \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2} \right) = \frac{2\pi r dr}{\pi r_i^2} \dot{M} c_{pg} \partial T_g(r,z)$$

On divise par $2\pi r \lambda_g \partial z \partial r$. On aura:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2} = \frac{\dot{M} c_{pg}}{\pi \lambda_g r_i^2} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial z}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} - \frac{\dot{M} c_{pg}}{\pi \lambda_g r_i^2} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (II-1)$$

Avec;

- ✓ $T_g(r, z)$: température des vapeurs de GNL qui varie suivant r et z,
- ✓ c_{pg} : capacités calorifique à pression constante des vapeurs de GNL,
- ✓ r_i : rayon interne du réservoir de stockage,
- ✓ λ_g : la conductivité thermique des vapeurs de GNL,
- ✓ \dot{M} : le débit des vapeurs le long des surfaces horizontales.

La relation (II-1) c'est une équation différentielle du deuxième ordre à deux variables $T_g(r, z)$. Qui représente la variation de température de la phase vapeur en fonction de la hauteur z et la radiale r.

4-2. Bilan thermique appliqué sur l'ailette latérale interne A₁(liner) :

Pour déterminer le profil de température de la paroi verticale interne du réservoir en contact direct avec les vapeurs de GNL. On fait la modélisation de cette paroi interne comme étant une ailette cylindrique de forme annulaire. On choisit un anneau sur cette ailette d'une hauteur dz et d'épaisseur comme il est représenté sur la Figure N°(II-3) .

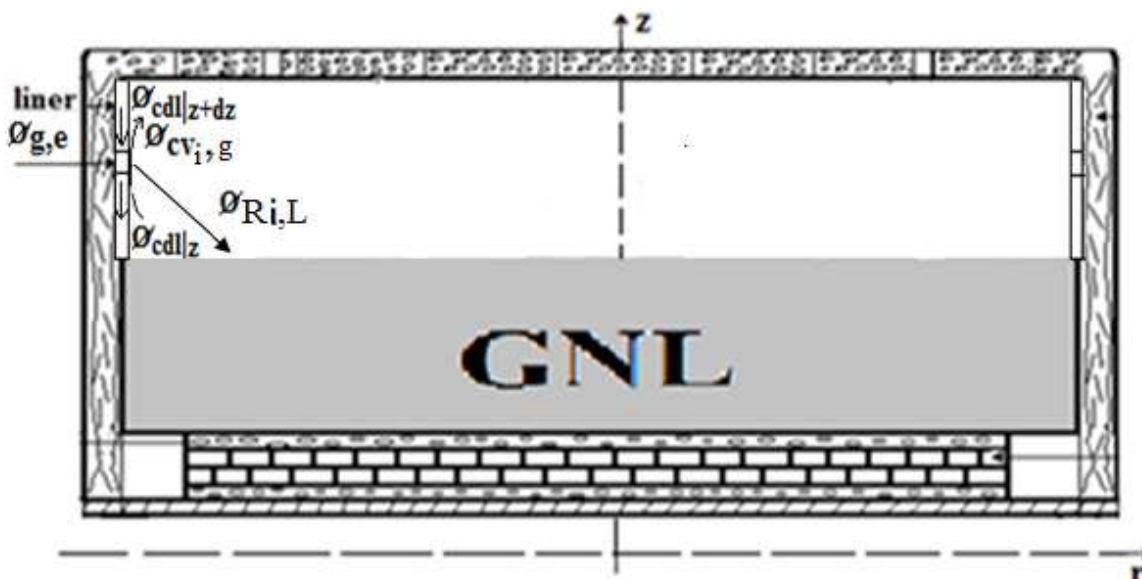


Figure (II-3) : l'ailette latérale A₁(liner)

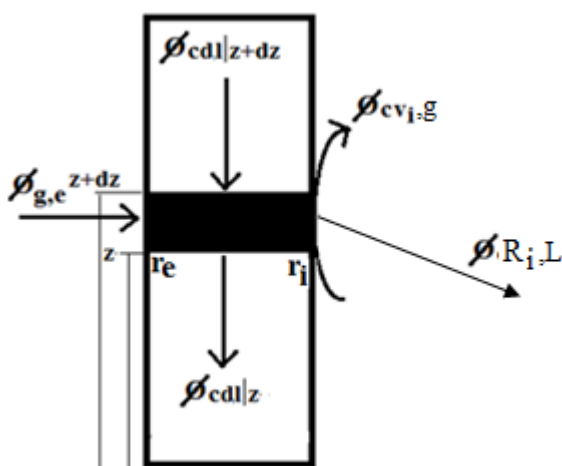


Figure (II-3) : agrandissement de l'ailette latérale A₁(liner)

On applique un bilan thermique sur cet anneau on obtient l'équation suivante :

$$\phi_{g,e} + \phi_{cdl,z+dz} = \phi_{cdl,z} + \phi_{cv_i,g} + \phi_{R_i,L} \dots \dots \dots (f)$$

- On applique le développement limité du première ordre pour $\phi_{cdl,z+\partial z}$ on obtient :

$$\phi_{cdl,z+\partial z} = \phi_{cdl,z} + dz \frac{\partial}{\partial z} (\phi_{cdl,z}) \dots \dots (g)$$

Avec ; $\phi_{cdl,z} = \pi \lambda_l (r_e^2 - r_i^2) \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} \dots \dots \dots (h)$

Chapitre II : Etude théorique

- $\phi_{g,e} = 2\pi k_{g,e} r_e (T_a - T_1(z)) \partial z \dots \dots \dots (i)$
- $\phi_{cv,i,g} = 2\pi h_g r_i (T_1(z) - T_{mg}) \partial z \dots \dots \dots (j)$
- $\phi_{R,i,L} = h_{i,L} (T_1, T_{GNL}) \cdot S_{i,l}(z) \cdot [T_1(z) - T_{GNL}] \dots \dots \dots (k)$

Avec :

$$h_{i,L}(T_1, T_{GNL}) = \sigma \cdot F_{i-L} \cdot [T_1^2(z) + T_{GNL}^2] \cdot [T_1(z) + T_{GNL}]$$

On remplace (II-3) dans (II-2), puis les équations (II-4-5) dans (II-1), ce qui donne :

$$2\pi k_{g,e} r_e (T_a - T_1(z)) \partial z + \pi \lambda_1 (r_e^2 - r_i^2) \partial z \frac{\partial^2 T_1(z)}{\partial z^2} = 2\pi h_g r_i (T_1(z) - T_{mg}) \partial z + h_{i,L}(T_1, T_{GNL}) \cdot 2\pi r_i \partial z \cdot [T_1(z) - T_{GNL}]$$

On divise le tout par $\pi \lambda_1 (r_e^2 - r_i^2) \partial z$ et après quelques arrangements, on obtient :

$$\frac{\partial^2 T_1(z)}{\partial z^2} - \frac{2(k_{g,e} r_e + h_{i,L} r_i + h_g r_i)}{\lambda_1 (r_e^2 - r_i^2)} \cdot T_1(z) + \frac{2h_{i,L} r_i \cdot \frac{T_{GNL}}{T_{mg}} + 2k_{g,e} r_e \frac{T_a}{T_{mg}} + 2h_g r_i}{\lambda_1 (r_e^2 - r_i^2)} \cdot T_{mg} = 0 \dots (II-2)$$

Avec ;

- ✓ $T_1(z)$: température du liner qui varie suivant z.
- ✓ $T_g(z)$: température des vapeurs de GNL qui varie suivant z.
- ✓ T_a : température ambiante autour du réservoir de stockage.
- ✓ $k_{g,e}$: coefficient thermique globale du flux de chaleur externe sur liner.
- ✓ $h_{i,L}$: coefficient de radiation de la surface interne du réservoir en direction du liquide.
- ✓ r_i : rayon interne du réservoir de stockage (rayon interne du liner).
- ✓ r_e : rayon externe du liner.
- ✓ h_g : coefficient de convection thermique des vapeurs de GNL.
- ✓ λ_1 : la conductivité thermique de l'ailette.

L'équation (II-2) c'est une équation différentielle non homogène du deuxième ordre avec seconde membre constant.

4-3. bilan thermique appliqué sur l'ailette du toit interne du réservoir (ailette A_t) :

Pour simplifier notre problème on prend une température moyenne du toit, car l'écart de température le long de cette paroi est modéré. Pour estimer la variation de la température moyenne du toit, on modélise cette ailette comme étant une ailette sous forme de disque concentrique d'épaisseur e_t , comme représenté sur la Figure (II-4).

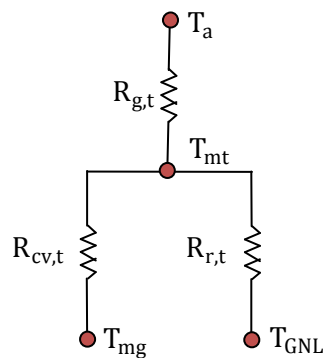
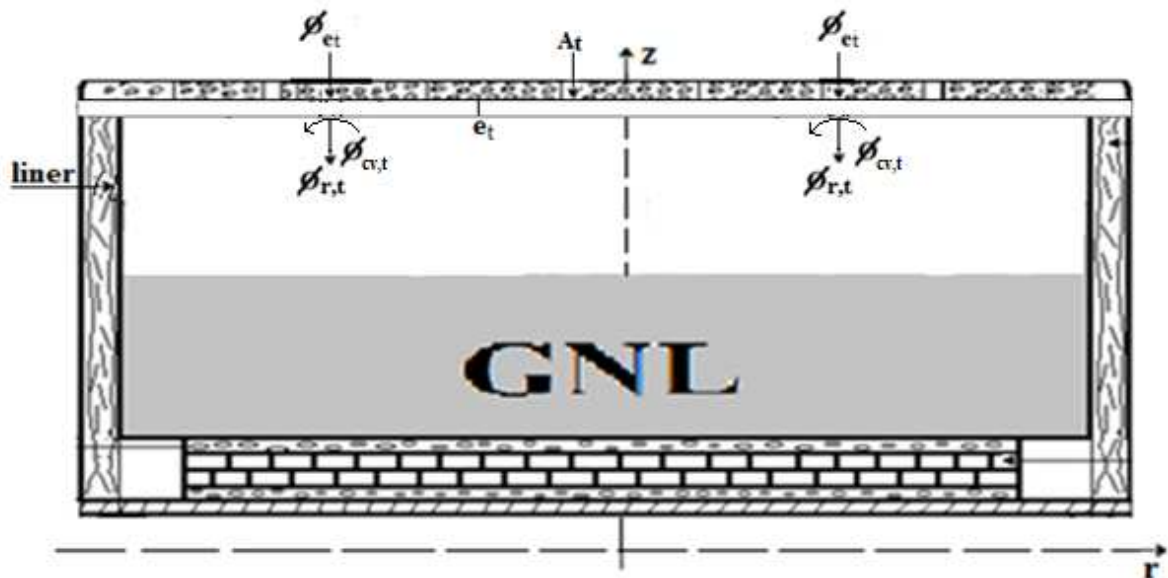


Figure (II-4) : Ailette du toit interne et schéma des résistances équivalentes

Chapitre II : Etude théorique

L'application du bilan thermique sur le toit représenté sur la figure (II-4), s'écrit :

$$\phi_{et} = \phi_{cv,t} + \phi_{r,t} \dots \dots \dots (1)$$

Avec ;

- ✓ ϕ_{et} : flux globale extérieure entre le milieu extérieur et le toit interne :

$$\phi_{et} = K_{et} \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot (T_a - T_{mt}) \dots \dots \dots (m)$$

Telleque : K_{et} : Coefficient d'échange global entre le milieu extérieur et la surface interne de toit : $K_{et} = \frac{1}{\frac{r_i^2}{R_i^2 h_{ext}} + \frac{e_t}{\lambda_p}}$

- ✓ $\phi_{r,t}$: flux de rayonnement entre la surface interne de toit avec la surface libre du GNL

$$\phi_{r,t} = h_{r,t} \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot [T_{mt} - T_{GNL}] \dots \dots \dots (n)$$

Telleque : $h_{r,t}$: Coefficient de radiation de la surface interne du réservoir en direction du liquide :

$$h_{r,t}(T_{mt}, T_{GNL}) = \sigma \cdot F_{t-L} \cdot [T_{mt}^2 + T_{GNL}^2] \cdot [T_1(z) + T_{GNL}]$$

- ✓ $\phi_{cv,t} = h_{g,t} \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot [T_{mt} - T_{mg}] \dots \dots \dots (o)$

Telleque : $h_{g,t}$: Coefficient convective thermique des vapeurs de GNL au contacte avec le toit.

T_{mg} : C'est la température moyenne des vapeurs

En remplace (m), (n) et (o) dans (1) on obtient :

$$K_{et} \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot (T_a - T_{mt}) = h_{r,t} \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot [T_{mt} - T_{GNL}] + h_{g,t} \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot [T_{mt} - T_{mg}]$$

$$\Rightarrow T_{mt} = \frac{K_{et} \cdot T_a + h_{r,t} \cdot T_{GNL} + h_{g,t} \cdot T_{mg}}{K_{et} + h_{r,t} + h_{g,t}} \dots \dots \dots (II-3)$$

La relation (II-3) représente la variation de la température moyenne du toit en fonction des différents coefficients d'échange thermiques et des températures de l'environnement extérieur, du GNL ainsi que de la température moyenne des vapeurs.

Chapitre III : résolution analytique

1. Introduction :

Lors du chapitre précédent on a effectué la modélisation de notre problème et on a obtenu des équations différentielles à partir des bilans thermiques appliqués sur la partie vapeurs de GNL et les parois internes du bac. Dans ce chapitre III on va s'intéresser à la résolution analytique de ces équations pour l'obtention des champs des températures en tenant compte des conditions aux limites. Le débit d'évaporation boil-off, sera obtenu en faisant l'inventaire des flux de chaleur reçus par le bain liquide à travers les différentes parois du réservoir.

2. Solution analytique :

On considère les coefficients d'échanges équivalents, les propriétés physiques du fluide et des matériaux ont des valeurs moyennées pour solutionner notre problème analytiquement. Les formules (II-1), (II-2) et (II-3) qui définissent respectivement les champs de température de la phase vapeur, de l'ailette interne verticale A_1 et du toit intérieur du réservoir (ailette A_t) sont réécrites comme suit :

$$\frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} - \frac{\dot{M}c_{pg}}{\pi\lambda_g r_i^2} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots \text{(II-1)}$$

$$\frac{\partial^2 T_l(z)}{\partial z^2} - \frac{2(k_{g,e}r_e + h_{i,L}r_i + h_g r_i)}{\lambda_l(r_e^2 - r_i^2)} \cdot T_l(z) + \frac{2h_{i,L}r_i \cdot \frac{T_{GNL}}{T_{mg}} + 2k_{g,e}r_e \frac{Ta}{T_{mg}} + 2h_g r_i}{\lambda_l(r_e^2 - r_i^2)} \cdot T_{mg} = 0 \dots \text{(II-2)}$$

$$T_{mt} = \frac{K_{et} \cdot Ta + h_{r,t} \cdot T_{GNL} + h_{g,t} \cdot T_{mg}}{K_{et} + h_{r,t} + h_{g,t}} \dots \dots \dots \text{(II-3)}$$

On réécrit ces équations sous une forme simplifiée pour faciliter leurs manipulations :

$$\frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} - \alpha_g \cdot \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots \text{(III-a)}$$

$$\frac{\partial^2 T_l(z)}{\partial z^2} - \alpha_l \cdot T_l(z) + \beta_l \cdot T_{mg} = 0 \dots \dots \dots \text{(III-b)}$$

$$T_{mt} = \frac{K_{et} \cdot Ta + h_{r,t} \cdot T_{GNL} + h_{g,t} \cdot T_{mg}}{K_{et} + h_{r,t} + h_{g,t}} \dots \dots \dots \text{(III-c)}$$

Les constants de substitution sont définies comme suit :

$$\alpha_g = \frac{\dot{M}c_{pg}}{\pi\lambda_g r_i^2}, \quad \alpha_l = \frac{2(k_{g,e}r_e + h_{i,L}r_i + h_g r_i)}{\lambda_l(r_e^2 - r_i^2)}, \quad \beta_l = \frac{2h_{i,L}r_i \cdot \frac{T_{GNL}}{T_{mg}} + 2k_{g,e}r_e \frac{Ta}{T_{mg}} + 2h_g r_i}{\lambda_l(r_e^2 - r_i^2)}$$

Chapitre III : Résolution analytique

Les coefficients d'échange de chaleur, les propriétés physiques des matériaux et du fluide ont des valeurs moyennées explicités par les coefficients ($h_{mi,L}, c_{pg}, h_{mg}, k_{mg,e}$ et λ_{ml}).

2-1. La résolution de l'équation des vapeurs de GNL (a) :

$$\frac{\partial^2 T_g(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} - \alpha_g \cdot \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (a)$$

On utilise la méthode de séparation de variables pour résoudre notre équation :

On suppose deux fonctions indépendantes entre elles. Soit : $f(r)$ et $g(z)$.

On pose :

$$T_g(r, z) = f(r) \cdot g(z) \dots\dots\dots (III.1)$$

Avec :

- $f(r)$: la fonction f ne varie que suivant r .
- $g(z)$: la fonction g ne varie que suivant z .

On dérive (III.1) pour retrouver l'équation (a) :

- on dérive $T_g(r, z)$ par rapport à r une première fois :

$$\frac{\partial T_g(r, z)}{\partial r} = \frac{\partial [f(r) \cdot g(z)]}{\partial r} = g(z) \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} + f(r) \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial r}$$

On a $\frac{\partial g(z)}{\partial r} = 0$ car $g(z)$ ne varie pas suivant r :

$$\Rightarrow \frac{\partial T_g(r, z)}{\partial r} = g(z) \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} \dots\dots\dots (III.2)$$

- on dérive $T_g(r, z)$ par rapport à r une seconde fois :

$$\frac{\partial^2 T_g(r, z)}{\partial r^2} = \frac{\partial g(z)}{\partial r} \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} + g(z) \cdot \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 T_g(r, z)}{\partial r^2} = g(z) \cdot \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} \dots\dots\dots (III.3)$$

- on dérive $T_g(r, z)$ par rapport à z :

Chapitre III : Résolution analytique

$$\frac{\partial T_g(r, z)}{\partial z} = \frac{\partial [f(r) \cdot g(z)]}{\partial z} = g(z) \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial z} + f(r) \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial z}$$

On a $\frac{\partial f(r)}{\partial z} = 0$ car $f(r)$ ne varie pas suivant z :

$$\Rightarrow \frac{\partial T_g(r, z)}{\partial z} = f(r) \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial z} \dots \dots \dots \text{(III-4)}$$

On remplace les relations (III. 2), (III. 3) et (III. 4) dans (III-a):

$$g(z) \cdot \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot g(z) \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} - \alpha_g \cdot f(r) \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial z} = 0$$

$$\Rightarrow g(z) \cdot \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + g(z) \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} = \alpha_g \cdot f(r) \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial z}$$

On divise par $f(r) \cdot g(z)$ on obtient :

$$\frac{1}{f(r)} \cdot \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{rf(r)} \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} = \alpha_g \cdot \frac{1}{g(z)} \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial z} \dots \dots \dots \text{(III-6)}$$

On a obtenu une équation différentielle homogène, et avec les deux membres de l'équation qui sont indépendants et égaux au même temps, cela n'est possible que dans un seul cas ; les deux membres sont égaux à une même constante qu'on notera m^2 .

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{f(r)} \cdot \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{rf(r)} \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} = m^2 \\ \alpha_g \cdot \frac{1}{g(z)} \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial z} = m^2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} = m^2 f(r) \\ \alpha_g \cdot \frac{\partial g(z)}{\partial z} = m^2 g(z) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial f(r)}{\partial r} - m^2 f(r) = 0 \dots \dots \dots \text{(III. 7)} \\ \frac{\partial g(z)}{\partial z} - \frac{m^2}{\alpha_g} g(z) = 0 \dots \dots \dots \text{(III. 8)} \end{cases}$$

L'équation (III.7) est une équation particulière de Bessel qui admet une solution de forme :

$$f(r) = K_1 I_0(mr) + K_2 k_0(mr) \dots \dots \dots \text{(III-9) [15]}$$

Chapitre III : Résolution analytique

I_0 Fonction de Bessel de la 1^{ère} espèce non modifiée d'ordre 0.

K_0 Fonction de Bessel de la 2^{ème} espèce non modifiée d'ordre 0.

L'équation (III.8) admet une solution de la forme :

$$g(z) = C_1 e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z} \dots \dots \dots (III-10)$$

C_1 : Une constante d'intégration qu'on déterminera plus loin. Ce qui implique que la solution de l'équation (a) et le produit des deux solutions (III.9) et (III.10):

$$T_g(r, z) = f(r) \cdot g(z) \dots \dots \dots (III-11)$$

$$T_g(r, z) = [K_1 I_0(mr) + K_2 K_0(mr)] \cdot C_1 e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z}$$

2-2. La résolution de l'équation du liner (b) :

$$\frac{\partial^2 T_1(z)}{\partial z^2} - \alpha_1 \cdot T_1(z) + \beta_1 \cdot T_{mg} = 0 \dots \dots \dots (III-b)$$

Cette équation accepte une solution $T_1(z)$ de forme :

$$T_1(z) = T_{1\text{homogène}}(z) + T_{1\text{particulière}}$$

$$\begin{cases} T_{1\text{homogène}}(z) = C_3 e^{\sqrt{\alpha_1} z} + C_4 e^{-\sqrt{\alpha_1} z} \\ T_{1\text{particulière}}(z) = \frac{\beta_1 \cdot T_a}{\alpha_1} \end{cases}$$

$$\Rightarrow T_1(z) = C_3 e^{\sqrt{\alpha_1} z} + C_4 e^{-\sqrt{\alpha_1} z} + \frac{\beta_1 \cdot T_a}{\alpha_1}$$

2-3. l'équation du toit (c) :

$$T_{mt} = \frac{K_{et} \cdot T_a + h_{r,t} \cdot T_{GNL} + h_{g,t} \cdot T_{mg}}{K_{et} + h_{r,t} + h_{g,t}}$$

En résumé le système d'équation qui nous donne les champs de températures dans le réservoir de stockage de GNL s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} T_g(r, z) = [K_1 I_0(mr) + K_2 K_0(mr)] C_1 e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z} \dots\dots\dots (s. a) \\ T_1(z) = C_3 e^{\sqrt{\alpha_1} z} + C_4 e^{-\sqrt{\alpha_1} z} + \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1} \dots\dots\dots (s. b) \\ T_{mt} = \frac{K_{et} \cdot T_a + h_{r,t} \cdot T_{GNL} + h_{g,t} \cdot T_{mg}}{K_{et} + h_{r,t} + h_{g,t}} \dots\dots\dots (s. c) \end{cases}$$

3. conditions aux limites :

Les constantes d'intégration sont déterminées par l'application des conditions aux limites du modèle thermique proposé.

3-1. Les conditions aux limites sur les vapeurs de GNL :

➤ à $r = 0$; c'est un axe adiabatique, ce qui implique que : $\left. \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$

On a :

$$\frac{\partial T_g(r, z)}{\partial r} = [K_1 I_1(mr) - K_2 m K_1(mr)] C_1 e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z}$$

$$\left. \frac{\partial T_g(r,z)}{\partial r} \right|_{r=0} = [K_1 m I_1(mr) - K_2 m K_1(mr)] C_1 e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z} \Big|_{r=0} = 0 \Rightarrow K_2 = 0$$

Car lorsque $r \rightarrow 0$ $I_1(mr) = 0$ et $K_1(mr) = +\infty$

Pour que la condition soit vérifiée :

$$K_2 = 0$$

$$\Rightarrow T_g(r, z) = k I_0(mr) e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z}$$

➤ On a les autres conditions aux limites suivantes :

$$\begin{cases} T_g(r = 0, z = z_L) = T_{Gnl} \\ T_g(r = 0, z = Z) = T_{mt} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} T_{Gnl} = k e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z_L} \dots\dots\dots (III. 12) \\ T_{mt} = k e^{\frac{m^2}{\alpha_g} Z} \dots\dots\dots (III. 13) \end{cases}$$

$$\Rightarrow T_g(0, z_L) = k I_0(mr) e^{\frac{m^2}{\alpha_g} z_L} = T_{Gnl} ;$$

$$\text{Avec } I_0(0) = 1 \Rightarrow k = T_{Gnl} e^{-\frac{m^2}{\alpha_g} z_L}$$

$$\Rightarrow T_g(r, z) = T_{Gnl} \cdot I_0(mr) e^{\frac{m^2}{\alpha_g} (z_L - z)}$$

on divise (III. 13) sur (III. 12), on obtient :

$$\frac{T_{mt}}{T_{Gnl}} = e^{\frac{m^2}{\alpha_g}(Z-z_L)} \Rightarrow \ln\left(\frac{T_{mt}}{T_{Gnl}}\right) = \frac{m^2}{\alpha_g}(Z-z_L)$$

$$\Rightarrow m = \sqrt{\frac{\alpha_g}{Z-z_L} \cdot \ln\left(\frac{T_{mt}}{T_{Gnl}}\right)}$$

3-2. Les conditions aux limites sur le liner :

- On

$$a : \begin{cases} z = z_L \Rightarrow T_1(z) = T_{Gnl} \\ z = Z \Rightarrow T_1(z) = T_{mt} \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} T_1(z_L) = C_3 \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}z_L} + C_4 \cdot e^{-\sqrt{\alpha_1}z_L} + \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1} = T_{Gnl} \dots \dots (III. 14) \\ T_1(Z) = C_3 \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}Z} + C_4 \cdot e^{-\sqrt{\alpha_1}Z} + \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1} = T_{mt} \dots \dots \dots (III. 15) \end{cases}$$

- Pour chercher la valeur de C_4 , on effectuera :

(III. 14) $\cdot e^{\sqrt{\alpha_1}Z}$ - (III. 15) $\cdot e^{\sqrt{\alpha_1}z_L}$, on obtient :

$$[C_3 \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}(z_L+Z)} + C_4 \cdot e^{-\sqrt{\alpha_1}(z_L-Z)} + \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1} \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}Z}] - [C_3 \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}(z_L+Z)} + C_4 \cdot e^{-\sqrt{\alpha_1}(-z_L+Z)} + \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1} \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}z_L}] = T_{Gnl} \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}Z} - T_{mt} \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}z_L}$$

$$\Rightarrow C_4 \cdot (e^{-\sqrt{\alpha_1}(z_L-Z)} - e^{-\sqrt{\alpha_1}(-z_L+Z)}) = (T_{Gnl} - \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1}) \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}Z} - (T_{mt} - \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1}) \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}z_L}$$

$$\Rightarrow C_4 = \frac{(T_{Gnl} - \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1}) \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}Z} - (T_{mt} - \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1}) \cdot e^{\sqrt{\alpha_1}z_L}}{(e^{-\sqrt{\alpha_1}(z_L-Z)} - e^{-\sqrt{\alpha_1}(-z_L+Z)})}$$

- A partir de (III. 13), on détermine la valeur de C_3 :

$$C_3 = (T_{Gnl} - \frac{\beta_1 \cdot T_{mg}}{\alpha_1}) \cdot e^{-\sqrt{\alpha_1}z_L} - C_4 \cdot e^{-2\sqrt{\alpha_1}z_L}$$

4. Détermination du débit de boil-off \dot{m}_g :

Pour l'obtention du débit de boil-off en fonction du taux de remplissage on a appliqué un bilan thermique sur le bain liquide du GNL.

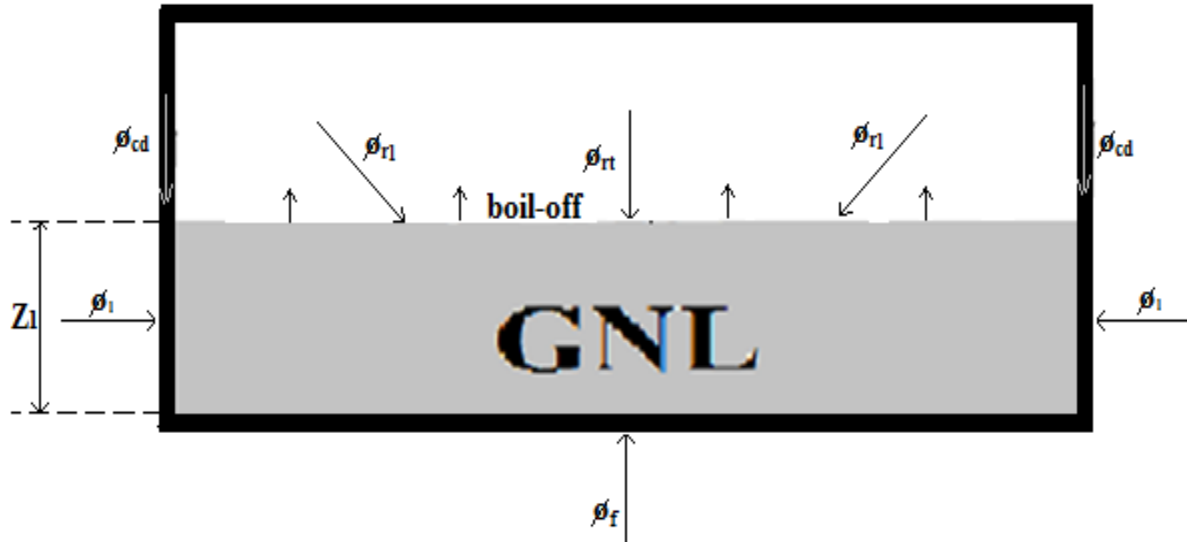


Figure (III-1) : Bilan thermique appliqué sur le bain liquide de GNL.

Ce bilan thermique, traduit l'inventaire des flux de chaleur issus de l'environnement extérieur, on écrit :

$$\begin{aligned} \phi_{rl} + \phi_l + \phi_{cd} + \phi_{rt} + \phi_f &= \dot{M} \cdot h_{fg} \\ \Rightarrow \dot{M} &= \frac{\phi_{rl} + \phi_l + \phi_{cd} + \phi_{rt} + \phi_f}{h_{fg}} \end{aligned}$$

Avec ;

- ϕ_l : flux de chaleur global transitant de l'environnement extérieur vers l'enveloppe interne dans la partie liquide du réservoir de stockage ; elle s'exprime par :

$$\phi_l = k_{g,l} \cdot 2 \cdot \pi \cdot z_l \cdot (T_a - T_{Gnl})$$

Où $k_{g,l}$: est le coefficient d'échange thermique global latéral. Il s'exprime par :

$$k_{g,l} = \frac{1}{\frac{r_e}{h_{ex,l} \cdot R_e} + \frac{r_e \cdot \ln(R_e/R_i)}{\lambda_l} + \frac{r_e \cdot \ln(R_e/R_i)}{\lambda_p}}$$

Tels que :

Chapitre III : Résolution analytique

- $h_{ex,l}$: le coefficient moyen de convection et de rayonnement exprimé en convection équivalente de l'environnement avec la surface latérale externe du réservoir.
- λ_p : la conductivité thermique de la perlite (isolant).
- λ_l : la conductivité thermique de l'enveloppe interne.
- Φ_f : Flux de chaleur global transitant de la surface du sol vers le fond de l'enveloppe interne du bac de stockage en forme de disque concentrique ; il s'exprime par :

$$\Phi_f = k_{g,f} \cdot \pi \cdot r_e^2 \cdot (T_{sol} - T_{Gnl})$$

- $k_{g,f}$: Coefficient d'échange thermique global du fond, il s'exprime par :

$$k_{g,f} = \frac{1}{\frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{e_f}{\lambda_{ml}}}$$

Avec ;

- T_{sol} : la température du sol en contact avec l'enveloppe externe du fond du bac.
- e_f : épaisseur du fond extérieure du réservoir.
- e_p : épaisseur de l'isolation du bac.
- Φ_{rt} : Flux de chaleur échangé par rayonnement net entre le toit intérieure du réservoir et la surface libre de GNL ; elle s'exprime par :

$$\Phi_{rt} = \sigma F_{t-L} \pi \cdot r_i^2 \cdot (T_{m,t}^4 - T_{Gnl}^4)$$

- F_{t-L} : Facteur de forme gris entre la surface interne du toit et la surface libre de GNL se comportant comme un corps noir ($\epsilon_{gnl} = 1$).

$$F_{t-L} = \frac{1}{\frac{1-\epsilon_t}{\epsilon_t} + \frac{1}{f_t}}$$

Avec :

- $T_{m,t}$: température moyenne du toit

Avec r_m le rayon moyen du toit qui s'exprime par :

$$r_m = \frac{r_e + r_i}{2}$$

- Φ_{cd} : Flux de conduction thermique véhiculé par le liner entrant vers le liquide, il s'exprime par :

Chapitre III : Résolution analytique

$$\Phi_{cd} = \lambda_{m1} \cdot \pi \cdot (r_e^2 - r_i^2) \cdot \left. \frac{dT_1(z)}{dz} \right|_{z = z_L}$$

- Φ_{r1} : Flux de chaleur échangé par rayonnement net entre l'ailette interne du liner de réservoirs et la surface libre du GNL ; elle s'exprime par :

$$\Phi_{r1} = \sigma F_{1-L} \pi \cdot r_i^2 \cdot (T_{m,l}^4 - T_{GNL}^4)$$

- F_{1-L} : Facteur de forme gris entre la surface interne du liner et la surface libre du GNL se comportant comme un corps noire ($\epsilon_{gnl} = 1$).
- $T_{m,t}$: température moyenne du liner s'exprime par :

$$T_{m,l} = \frac{1}{Z - z_1} \int_{z_1}^Z T_1(z) dz$$

$$T_{m,l} = \frac{1}{Z - z_1} \left[\frac{C_3}{\sqrt{\alpha_l}} (e^{\sqrt{\alpha_l} Z} - e^{\sqrt{\alpha_l} z_L}) + \frac{C_4}{-\sqrt{\alpha_l}} (e^{-\sqrt{\alpha_l} Z} - e^{-\sqrt{\alpha_l} z_L}) + \frac{\beta_l \cdot T_{mg}}{\alpha_l} (Z - z_L) \right]$$

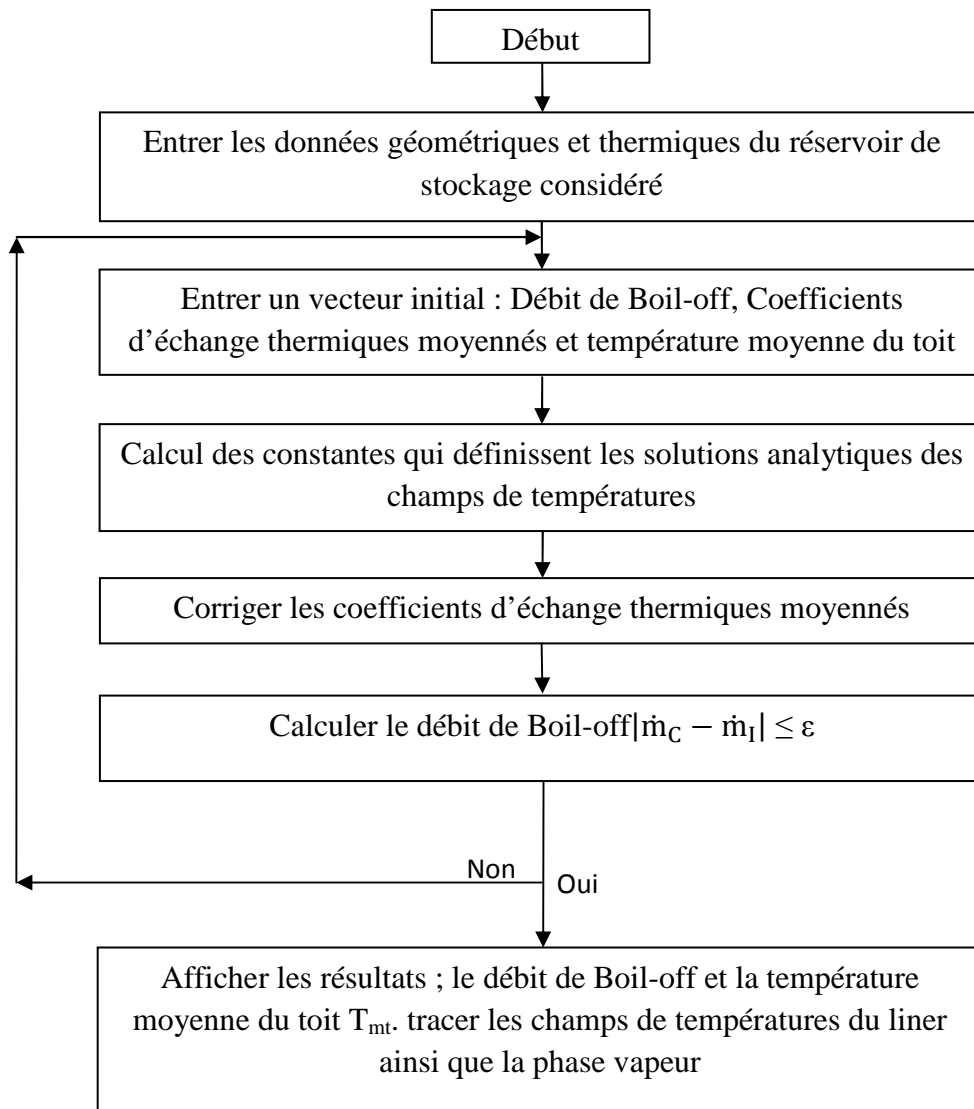
Telle que r_m : rayon moyen du toit s'exprime par :

$$r_m = \frac{r_e + r_i}{2}$$

- λ_{m1} : Conductivité thermique moyenne de l'enveloppe interne du liner.
- h_{fg} : Chaleur latente d'évaporation du GNL à pression atmosphérique.

5. Organigramme de calcul du Modèle mathématique.

L'organigramme ci-dessous résume le code de calcul itérative élaboré sur MATLAB relatif à la résolution analytique du comportement thermique du réservoir de stockage de GNL.



Chapitre IV : Résultats et interprétations

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus par le biais de la simulation sous MATLAB de la résolution analytique des équations des bilans thermiques appliqués sur la partie vapeur de GNL et le liner du bac de stockage.

La résolution analytique des systèmes d'équations différentielles a permis de tracer des courbes qui régissent les profils de températures, les débits **Boil-off** ainsi que l'influence des paramètres géométriques et thermiques sur ce dernier.

NB : lors de notre étude on a comparé les résultats théoriques du liner avec des résultats expérimentaux pour des hauteurs du GNL de 3,85 m, 14,05m et 28,85 m et pour pouvoir comparer les résultats on a tracés les profils de températures pour les même hauteurs et pour les même paramètres géométriques du réservoir

Table IV-1 : Caractéristiques géométriques du bac de GNL

| symbole | Signification | Valeur numérique | Unité |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|
| r_e | Rayon extérieur de l'enveloppe interne | 22,045 | m |
| r_i | Rayon intérieur de l'enveloppe interne | 22,02 | m |
| R_e | Rayon extérieur de l'enveloppe externe | 23,00 | m |
| R_i | Rayon intérieur de l'enveloppe externe | 22,99 | m |
| e | Epaisseur des deux enveloppes | 0,010 | m |
| e_l | Epaisseur de l'isolation latérale (perlite) | 0,950 | m |
| e_t | Epaisseur de l'isolation du toit (perlite) | 0,950 | m |
| e_f | Epaisseur de l'isolation du bas (perlite) | 0,950 | m |
| L | Hauteur du bain liquide du GNL | variable | m |
| z_0 | Hauteur au niveau de la base de l'enveloppe interne à partir du bas du réservoir | 0,960 | m |
| z_L | Hauteur au niveau de l'interface liquide-vapeur à partir du bas du réservoir | $z_0 + L$ | m |
| Z | Hauteur au niveau du toit interne à partir du bas du réservoir | 35,99 | m |

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Table IV-2 : Caractéristiques thermiques du bac de GNL

| symbole | Signification | Valeur numérique | Unité |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|
| T_a | Température de l'environnement extérieur | 300 | K |
| T_{GNL} | Température du GNL | 111,5 | K |
| λ_p | Conductivité thermique de l'isolant (perlite) | 0,022 | W/m.K |
| λ_l | la conductivité thermique de l'enveloppe interne | 30 | W/m.K |
| $h_{ex.l}$ | Coefficient moyen de convection équivalente entre l'environnement et l'enveloppe externe | 8 | W/m ² .K |
| h_{fg} | Chaleur latente d'évaporation à pression atmosphérique du GNL | 510 | kJ/kg |
| ε_t | Emissivité thermique moyenne du toit intérieur du réservoir de GNL | 0,3 | |
| ε_l | Emissivité thermique moyenne du liner du réservoir de GNL | 0,3 | |

1. Distributions des températures de la phase vapeur (boil-off) pour différents taux de remplissage du réservoir

Les figures (IV-1-a/b/c) représentent la répartition des températures de la phase vapeur pour des niveaux de liquides de 3,85m, 14,05m et 28,85m.

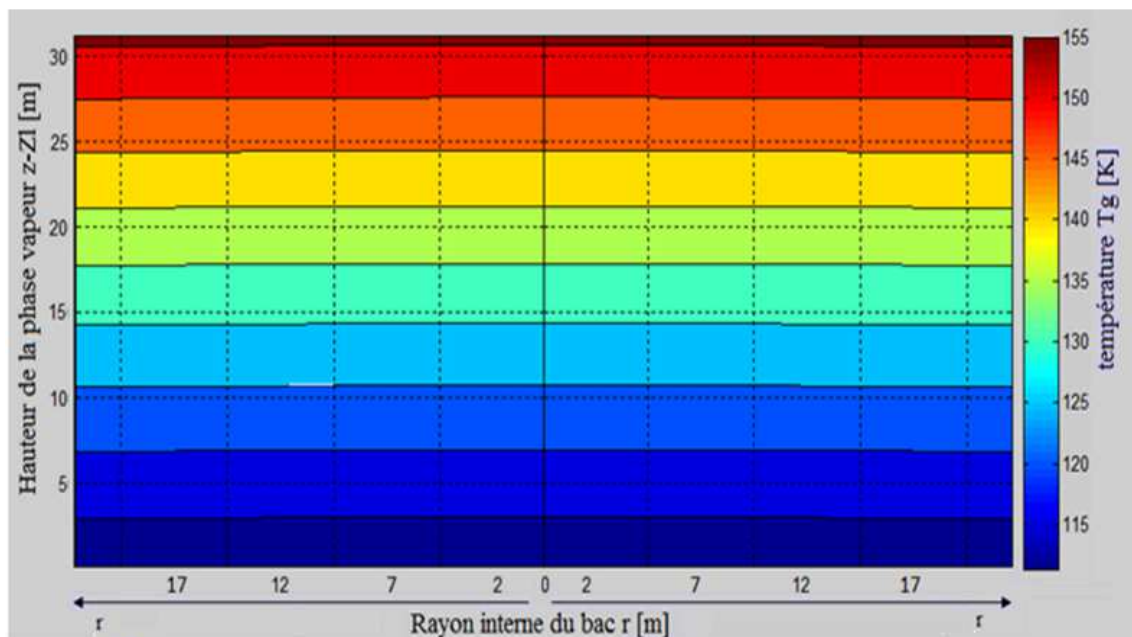


Fig. (IV-1-a) : Profils de températures dans la phase vapeur de GNL pour un niveau du liquide **L = 3,85 m**

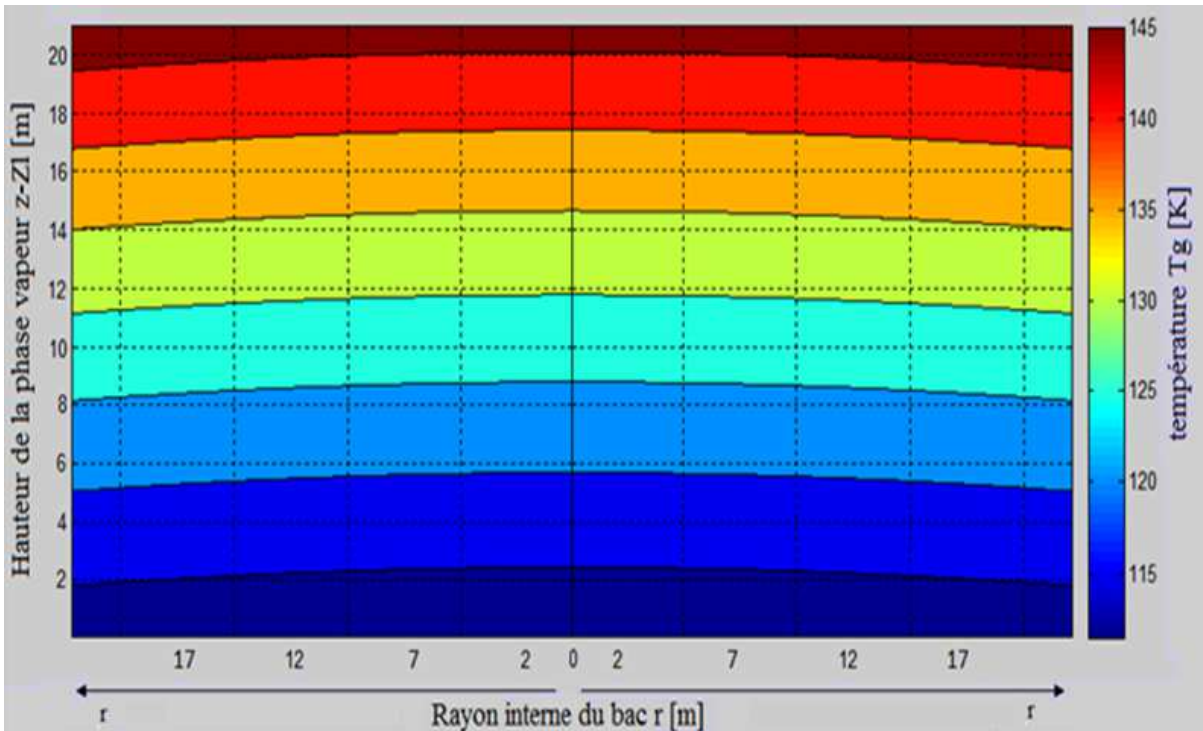


Fig (IV-1-b) : Profils de températures dans la phase vapeur de GNL pour un niveau du liquide $L = 14,05$ m

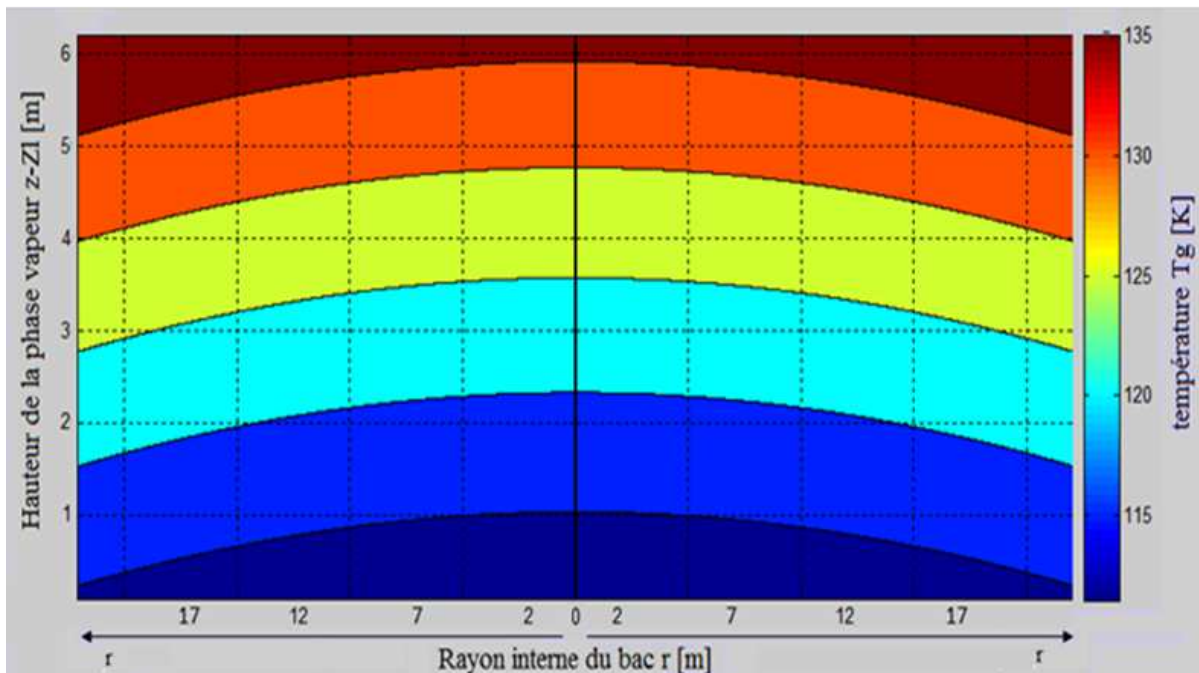


Fig (IV-1-c) : Profils de températures dans la phase vapeur de GNL pour un niveau du liquide $L = 28,85$ m

sur les figures (IV-1-a,b,c) la variation de couleur représente la variation de la température qui varie du bleu qui représente les températures les plus faibles au rouge qui représente les températures les plus élevées, les lignes convexes représentent les isothermes. Donc pour une hauteur donnée le centre du réservoir est plus froid que les parois internes.

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Comme on peut le remarquer sur les figures (IV-1-a/b/c), plus le niveau du liquide est élevé plus l'allure des courbes est plus développées. Ce qui se traduit par l'augmentation de l'écart de température entre les parois du bac (le liner) et l'axe vertical du bac qui garde des températures relativement basses par rapport au liner, ce qui est logique car c'est le liner qui reçoit en premier lieu, le flux thermique issu de l'environnement extérieur et du coup, subit plus de réchauffement. Par suite, une partie de ce flux arrive par conduction au centre du réservoir; le reste étant dirigé vers la surface du liquide sous forme de rayonnement thermique ; les minima de température des vapeurs se situent au niveau de l'axe du bac.

On peut également constater que la température des vapeurs à l'approche du toit tend la température du toit. On remarque alors, que plus le niveau du liquide est élevé plus la température du toit est plus froide ; ce qui peut s'expliquer par le fait que le liquide cryogénique (le GNL) étant à des températures extrêmement basses, absorbe la chaleur du toit de plus en plus que la distance qui les séparent se réduit. Ce qui engendre une température du toit plus froide pour un bac plein et des températures relativement chaudes pour un bac presque vide.

2. Distributions de la température du liner pour différents taux de remplissages du bac :

Les températures de l'enveloppe interne du réservoir (le liner) sont représentées dans les figures (IV-2-a/b/c). Pour cette partie nous avons pu obtenir des valeurs expérimentales qui représentent les températures du liner pour différentes hauteurs du liquide (3,85m, 14,05m et 28,85m [10]) que nous avons exploité afin de les comparer aux résultats de notre modèle adopté en vue d'évaluer la validité de notre approche analytique.

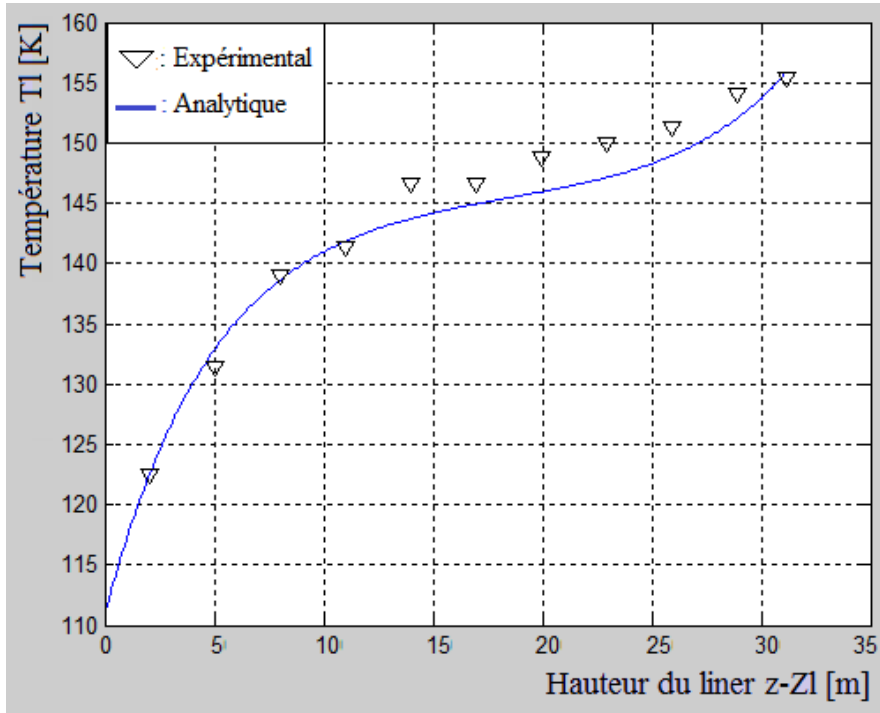


Fig (IV-2-a) : Profils de températures du liner pour un niveau du liquide **L = 3,85 m**

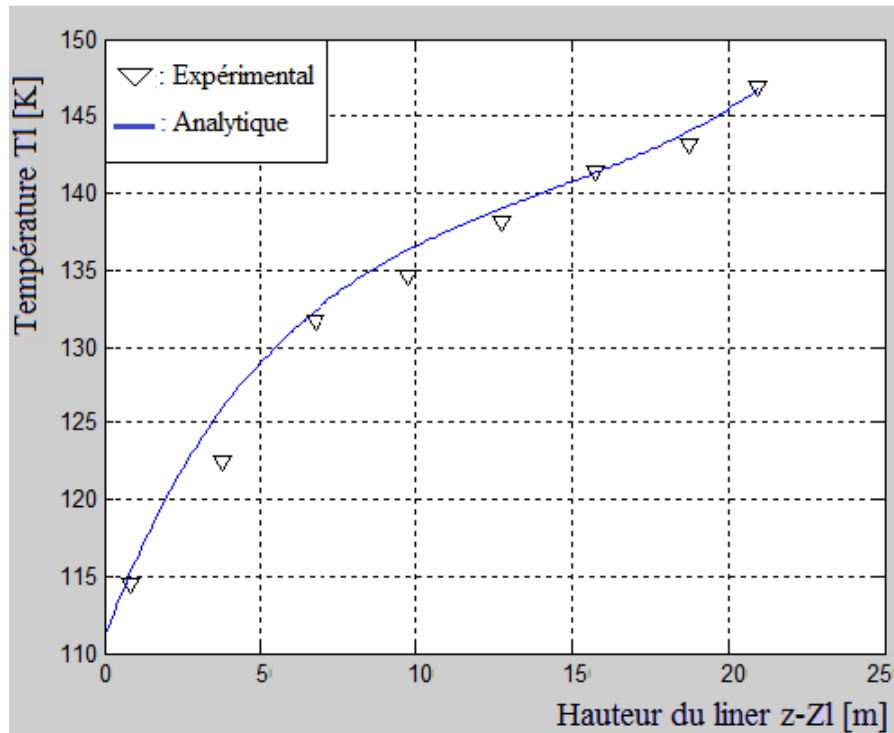


Fig (IV-2-b) : Profils de températures du liner pour un niveau du liquide **L = 14,05 m**

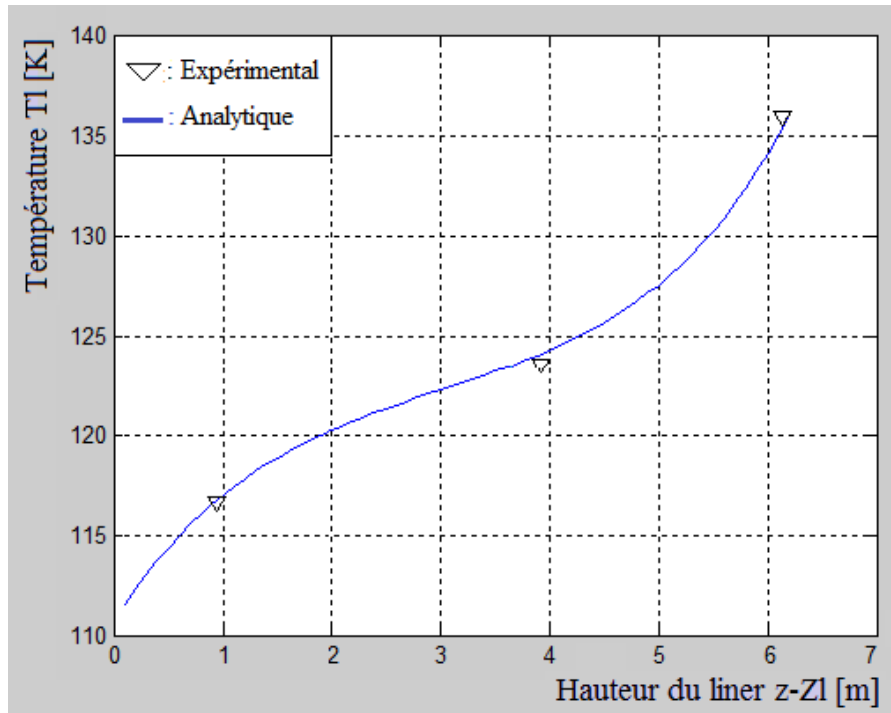


Fig (IV-2-c) : Profils de températures du liner pour un niveau du liquide $L = 28,85$ m

Sur les figures (IV-2-a/b/c) qui représentent les profils de températures du liner, on peut remarquer un taux d'augmentation plus rapide dans les premiers mètres au-dessus du liquide, ce qui peut s'expliquer par le brusque changement de la densité du fluide. En effet, un liquide a une résistance thermique bien inférieure qu'un gaz, en contact avec le liner et avec l'absence du liquide qui refroidi rapidement le liner, la température de la phase vapeur augmente sensiblement et rapidement au niveau de l'interface liquide/vapeur.

Cette augmentation de température a commencé à ralentir à partir du premier tiers de la hauteur du liner car le phénomène de transfert de chaleur ralentis au fur et à mesure que la température du liner augmente, et donc engendre une diminution de l'augmentation de température des vapeurs.

On remarque aussi que plus on s'approche du toit plus le phénomène d'augmentation de la température reprenne de la vitesse. Ce qui peut être expliqué par le fait que le liner ne reçoit pas seulement la chaleur qui traverse les parois latérales du bac mais aussi une partie de la chaleur du toit qui se transmet à travers la jonction de ce dernier au liner qui est cédée par suite par convection au vapeurs de GNL.

En final, sur ces figures on a pu ajouter les valeurs expérimentales, on peut constaté la concordance de l'allure les résultats théoriques avec la majorité des points relatifs aux valeurs expérimentales, ce qui conforte la validité du modèle analytique adopté.

3. Distributions de la température du toit pour différents taux de remplissage du bac :

La figure (IV-3) représente la variation de la température moyenne du toit en fonction de la variation du niveau de remplissage du bac de GNL.

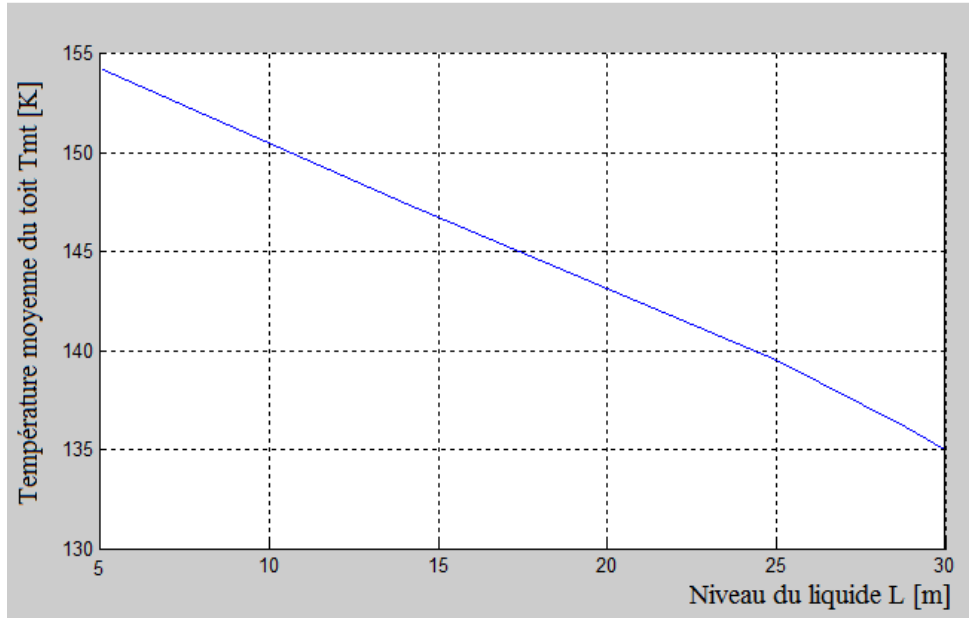


Fig (IV-3) : Variation de température moyenne du toit pour différents niveau de liquide.

Comme on peut le constater sur la figure (IV-3), la température moyenne du toit diminue presque linéairement en fonction de l'augmentation du taux de remplissage du bac de GNL, ce qui est logique car ce sont les vapeurs de GNL qui refroidissent le toit, donc plus le liquide s'approche du toit plus les vapeurs en grandes quantités (boil-off plus important) se réchauffent de moins en moins à cause de leurs inertie thermique plus énergivore. Par conséquent, les vapeurs atteignant le toit sont plus froides et tirent la température du toit vers le bas.

Quand le niveau du liquide est élevé dans le bac on remarque une diminution plus accentuée de la température du toit car en plus des vapeurs de GNL qui sont froides le liquide est assez haut pour absorber la chaleur du toit qui passe par le liner par conduction.

4. Débit de Boil-off en fonction du taux de remplissage du réservoir de GNL :

La figure (IV-4) représente la variation du débit de **boil-off** ou bien le débit d'évaporation du GNL en fonction du taux de remplissage du bac de GNL.

Ce point est très important à étudier car il nous indique la quantité de GNL évaporée et donc perdue, car les vapeurs sont évacuées au fur et à mesure par des soupapes de dépressurisation dont le rôle est de maintenir une pression constante et stable à l'intérieur du bac, une pression qui est légèrement supérieure à la pression atmosphérique. Ces vapeurs dégagées par les soupapes sont soit dirigées vers un système de reliquéfaction qui nécessite des installations supplémentaires et consomme de l'énergie, soit ils sont envoyées vers la torche pour être brûlées ou bien envoyées vers le système fioul-gaz qui alimente les fours et les chaudières en combustible ce qui est le cas dans la plus part des installations d'aujourd'hui.

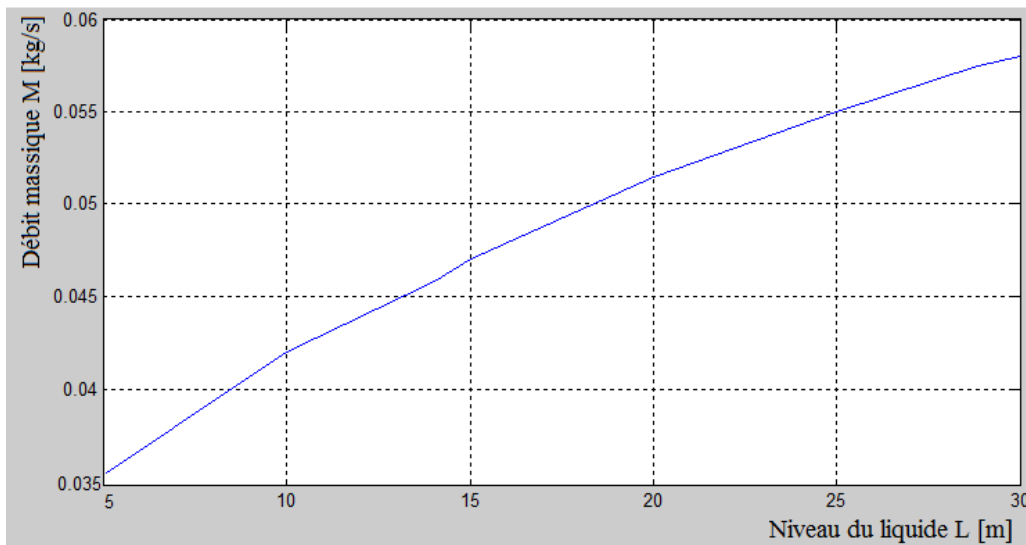


Fig (IV-4) : Variation du débit de **Boil-off** en fonction du taux De remplissage du réservoir de GNL

On peut voir clairement que le débit de **Boil-off** augmente en fonction de l'augmentation du niveau du liquide. Ceci s'explique par le fait que le liquide s'évapore principalement en absorbant la chaleur du liner par conduction- convection, donc plus la hauteur du liquide augmente plus la surface de contact de la phase liquide est plus grande (surface mouillée) et donc, reçoit plus d'entrées de chaleur et engendre en effet, plus évaporation.

5. Influence de la dégradation de l'isolation du réservoir sur le débit de boil-off :

Les réservoirs de stockage de GNL sont implantés dans les ports d'exportations et de d'importations des hydrocarbures pour être facilement chargés et déchargés a bord des navires méthaniers. Mais les zones à proximités de la mer se caractérisent par un taux d'humidité très élevé, avec le temps, l'humidité présente dans l'air s'infiltré dans les parois du réservoir ce qui influe négativement sur la perlite et pour cause, l'eau de cette humidité s'accumule dans les pores de la perlite, rapidement gelée par les basses températures de la paroi. Ces petits fragments de glaces font augmenter la conductivité thermique de la perlite ce qui cause sa dégradation, car elle a perdue sa principale caractéristique qui est sa faible conductivité thermique. Quand l'isolation se dégrade, la chaleur s'infiltré de plus en plus, ce qui augmente le taux d'évaporation. Comme on peut le constater sur la figure (IV-5), plus la conductivité thermique de la perlite augmente, plus le débit de **Boil-off** augmente, le phénomène s'accroît au fur et à mesure que le bac se remplit.

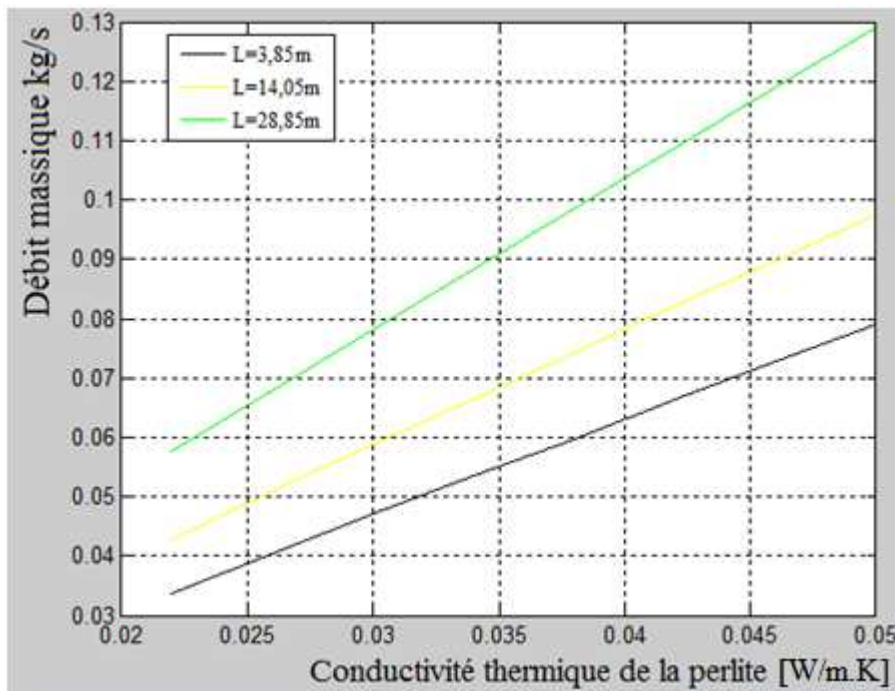


Fig (IV-5) : Variation du débit de **Boil-off** en fonction la dégradation de la perlite

Conclusion

Conclusion Générale

Notre travail consistait à développer un modèle analytique d'un bac de stockage de gaz naturel liquéfié, qui a pour but de nous permettre de calculer les taux de boil-off et de déterminer les champs de températures dans la phase vapeur et de l'enveloppe interne du réservoir et connaître ainsi l'influence des principaux paramètres du problème que ce soit géométriques ou bien thermique.

Le modèle mathématique est obtenu à partir des différents bilans énergétiques appliqués à un système d'ailettes sous formes d'anneaux, d'un côté les ailettes aux niveaux des parois internes ; latérale (le liner) et du toit, ainsi qu'une ailette de forme annulaire pour modéliser la phase vapeur. Ces bilans ont fait ressortir un système de trois équations différentielles couplées dont la solution analytique a été obtenue. Un code de calcul a été élaboré sous Matlab en vue de simuler le comportement thermique des bacs de stockage de GNL.

Notre modèle thermique et mathématique adopté a été validé pour un bac de stockage de GNL dont les profils de températures obtenus pour le liner ont été comparés à des valeurs expérimentales [10] pour différents niveaux de remplissage du bac ; la concordance des résultats analytiques et expérimentaux s'avère très satisfaisante.

Plusieurs paramètres influent sur le débit d'évaporation de GNL dans le bac, notamment le niveau du liquide qui est sans doute le facteur le plus important car un bac en service se vide et se remplit plusieurs fois par semaine ; c'est un stockage tampon. Comme on a pu le constater sur les résultats de notre modèle, plus la hauteur du GNL dans le bac augmente plus le taux d'évaporation augmente car la surface de contact du GNL avec les parois augmente et donc absorbe plus de chaleur, aussi plus il s'approche du toit plus il absorbe plus facilement la chaleur de ce dernier qui passe par la jonction du liner et du toit.

La dégradation de l'isolation par les facteurs extérieurs, notamment l'humidité est un autre facteur majeur de l'excès du taux d'évaporation de GNL comme le montre la figure (IV-5) qui a fait apparaître une augmentation linéaire du débit de boil-off en fonction de l'augmentation de la conductivité thermique de la perlite ; la dégradation de l'isolation est un élément à surveiller de plus près avec l'emploi des thermocouples au niveau du liner.

Conclusion Générale

Ce qu'on peut retenir dans ce travail, plus le niveau du liquide augmente, plus le taux de boil-off augmente et donc, plus de quantité de GNL qui s'évapore. De plus, cette perte de matière concerne en premier lieu, les molécules de GNL les plus légères qui possèdent un pouvoir calorifique élevé (CH_4). En effet, plus le taux de boil-off est important, plus la valeur énergétique du produit stocké diminue, ce qui réduit systématiquement valeur commerciale du GNL.

1 **Bibliographie :**

2 [1] : Alain GOY : Responsable du Service Technique d'Elengy : Club des actionnaires GDF
3 SUEZ Paris, le 9 septembre 2011.

4 [2] : cours 2^{ème} année mastère procédé de production du Gaz.

5 [3] : *M. Gouaoura*. A Projet professionnel de fin de formation pour l'obtention du diplôme
6 d'ingénieur spécialisé en GNL IAP de Boumerdes Novembre 2013 : Evaluation et estimation
7 du boil-off gaz au niveau du méga train de Skikda.

8 [4] : M. BELKADI : Formation d'ingénieurs spécialisés en GNL_2013 chapitre 3 module
9 TECHNOLOGIE DU GNL Intervenant.

10 [5] : Manuel opération du complexe GL1K Skikda.

11 [6] :Cristian-Florian Dinla thèse de doctorat école doctorale de chimie de lyon n°d'ordre
12 2006 ISAL 0102, évaluation environnementale et technico-économique du cycle de vie de la
13 combustion du gaz naturel et proportions d'améliorations techniques .

14 [7] :R Hriti ,A Benbrik ,D limonier , K Khaldi , Etude de phénomène d'évaporation de GNL
15 dans le Bac de stockage aérien , Faculté des hydrocarbures d'étude thermique France .

16 [8] : (LAÏFA AHMED ESSEDIK BOUTADJINE SOUFYANE projet fin d'étude master
17 académique).

18 [10] : Mr RACHID LEKHEL mémoire de Magister, ENP, ALGER 2009 : Etude et
19 simulation des pertes de boil off dans un réservoir de GNL.

20 [11] : Fiche technique sur les matériaux isolants. Pôle ECO construction Limousin.

21 [12] : DRA-71 – Opération A1 Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour le
22 stockage de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) - Installations fixes.

23 [13] : Jacques Ménoc, Atelier stockage GAZ : journées GEP-AFTP. 23 et 24 oct. 2013.

24 [14] : YEVS JANNOT, Transferts thermiques, Ecole des Mines Nancy.

25 [15] : R-F.Clooen , calculs des fonctions des Bessel, I_n , J_n , K_n et Y_n moyennant les fractions
26 continues ,centre commun de recherche nucléaire établissement d'Ispra-Italia ;1968 .

27 [16] : Cristian Dinla, thèse de doctorat. Ecole doctorale de chimie de Lyon 2006 : Evaluation
28 environnementale et technico-économique du cycle de vie de la combustion du gaz naturel et
29 proportions d'améliorations techniques.

Bibliographie

- 1 [17] : R hriti, A Ben brik, D lemonier et N khaldi : Etude du phénomène d'évaporation de
- 2 GNL dans le bac de stockage aérien ; Faculté des hydrocarbures d'étude thermique. France
- 3