

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara-Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie mécanique-Transport et distribution des hydrocarbures

Présenté par :

BAITER Hadjar Soumia
YAHY Inas

THEME

***Etude et simulation du phénomène de Boil- off dans un réservoir de
GNL (Cas de bac I903-GL1/Z)***

Soutenu publiquement le 29 / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Université/Affiliation
Président de jury	YOUNSI Karim	UMBB
Examinateur	BOUHAFS Smail	UMBB
Examinateur	MENAA Abdennour	UMBB
Encadreur	TIKOBAINI Mourad	UMBB

Boumerdes 2024

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH, notre créateur qui nous à aider à accomplir ce travail.

Deuxièmement, nous tenons à exprimer notre gratitude la plus sincère envers les individus, qui nous ont soutenus et qui ont participé à la réalisation de ce mémoire et à la réussite de cette année universitaire extraordinaire.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers Monsieur TIKOBAINI Mourad, pour son dévouement et son soutien, ainsi que pour la pertinence de ses commentaires et de ses retours.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à l'équipe du complexe GL1/Z du Sonatrach pour leur accueil chaleureux et leur soutien tout au long de notre stage pratique. Leur expertise et leur engagement ont grandement contribué à notre apprentissage et à notre développement professionnel.

DEDICACE

J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :

Ma très chère mère

Mon très cher père

Mes très chers frères

Ma chère Sœur

Tous les membres de ma famille,

Ainsi qu'à tous mes amis

YAH I Inas

DEDICACE

Je dédie ce travail :

A ma mère et mon père, que j'aime beaucoup et que dieu les garde

A mes très chers frères

A mes très chères sœurs

Tous les membres de ma famille

A tous mes amis

BAITER Hadjar Soumia

ملخص

يرتبط فهم التبادل الحراري بين الخزان والبيئة ارتباطاً وثيقاً بالتحكم في تبخر الغاز الطبيعي المسال في صهاريج التخزين. في هذه الدراسة، نقدم محاكاة باستخدام برنامج Comsol لقياس التغيرات في درجة الحرارة والسرعة في جميع أنحاء نظام صهريج التخزين، وتقييم معدلات التبخر.

Résumé :

La compréhension des échanges thermiques entre le bac et l'environnement est étroitement liée à la maîtrise du phénomène d'évaporation du GNL dans les réservoirs de stockage. Dans cette étude, nous exposons une simulation utilisant le logiciel Comsol afin d'étudier le transfert de chaleur et de masse au sein du bac de stockage. Par ailleurs, la quantification des différents flux de chaleur à travers les parois en tenant en compte la conduction, la convection et le rayonnement a permis de déterminer le taux d'évaporation ainsi le Boil-off.

ABSTRACT:

Understanding the heat exchanges between the tank and the environment is closely linked to controlling the phenomenon of LNG evaporation in the storage tanks. In this study, we present a simulation using Comsol software to study heat and mass transfer within the storage tank. Furthermore, the quantification of the different heat fluxes through the walls by taking into account conduction, convection and radiation made it possible to determine the evaporation rate and the Boil-off.

Table des matières :

REMERCIEMENTS	2
DEDICACE	3
Résumé :.....	5
Table des matières :.....	6
Introduction générale.....	12
État de l'Art : Revue bibliographique	1
Objective de l'étude :	6

Chapitre 01 : La chaine de GNL

1. Introduction :.....	
2. Historique du GNL :.....	
3. La chaine de GNL :	
3.1. Spécifications du gaz naturel à l'entrée de la liquéfaction :	9
3.1.1. Spécifications typiques du gaz commercial :.....	10
3.1.2. Spécifications dues à la liquéfaction :.....	10
3.2 Prétraitement du gaz avant liquéfaction :.....	11
3.3. La liquéfaction :	13
3.4. Le transport :	14
3.5. Les terminaux de regazéification :	15
3.5.1.1. La regazéification :.....	15
4. Procédés de liquéfaction :	
4.1 Cycle à cascade :.....	17
4.2. Procédé C3-MR d'Air Products	18

4.3. Procédé DMR Shell	19
4.4. Procédé DMR Liquefin (Axens)	20
4.6. Procédé APX (Produits aériens).....	21

Chapitre 02 : Techniques de stockage

1. Introduction :	
2. La cryogénie :	
3. Le stockage de GNL :	
4. Différents types de stockage :	
4.1. Stockage aérien à « simple intégrité » :	23
4.2. Stockage aérien à « double intégrité ».....	25
4.3. Stockage aérien à « Intégrité Totale »	27
4.4. Stockage aérien à « membrane »	29
4.5. Stockage semi-enterrés et enterrés à membrane.....	31
4.6. Autres technologies : réservoirs en fosse " in pit tank " Les technologies aériennes sont similaires aux réservoirs semi-enterrés ou enterrés, mais dans une fosse.....	33
5. Différent type de réservoirs de stockage	
5.1. Réservoir aérien à double enveloppe métallique :	34
5.2. Réservoir en béton précontraint aérien.....	35
5.3. Réservoir en béton moulé dans le sol	36
5.4. Réservoir en terre gelée	36
6. Pompes de GNL Équipant les réservoirs	
7. Systèmes de recompression de gaz et réseau torches/événets	
8. Les problèmes physiques du stockage du GNL	
8.1. Les problèmes mécaniques du stockage.....	39

8.2. Le problème thermique du stockage.....	40
9. Critères de choix des matériaux isolants.....	
9.1. Critères physiques.....	40
9.2. Critères mécaniques.....	41
9.3. Critères de sécurité	42
9.4. Critères de mise en œuvre	42
9.5. Critères économiques	42
10. Les différents types des isolants	
10.1. Les mousses	44
10.2. Les poudres	45
10.3. Les fibres	46
10.4. La Super isolation.....	47
10.5. L'isolation par le vide	48

Chapitre 03 : Présentation du complexe

1. Présentation du complexe GL1/Z :	
1.1. Localisation et configuration :.....	49
1.2. HISTORIQUE :.....	
2. Carte d'identité de complexe	
3. Organisation :	
4. La zone de production.....	
5. La zone de stockage	
5.1. La salle de contrôle LCR :.....	53
5.2. Les équipements de la zone :.....	54
5.2.1. Équipements annexes :.....	54

6. Identification générale d'équipements annexes de la zone stockage :.....	55
6.1. Les lignes reliées au bac de stockage GNL :	55
• Ligne de réception GNL :.....	55
• La Ligne de test de performance 8'' :	55
• Ligne de soutirage :	56
• Ligne de vapeur GNL :.....	56
• La ligne de vapeur GNL GL1Z/GL2Z :	56
• Ligne transmission GNL GL1Z/GL2Z :	56
• Réchauffeur de dégivrage 822-E-901.....	57
7. Paramètres de contrôle de bac de stockage GNL :	57
7.1. Paramètres principaux :.....	57
7.1.1. Niveau :	57
7.1.2. Pression :	58
7.1.3. Température :	58
7.2. Paramètre anneaux :	59
7.2.1. Sécurité par haute pression :	59
7.2.2. Sécurité par basse pression :	59
7.2.3. Système spéciale :	59
7.2.4. Fonctionnement du GN de secoure :.....	60
8. La zone de pompage :.....	60
9. Zone des utilités :	61
10. Description du procédé de liquéfaction dans le complexe GL1/Z :	

Chapitre 04 : calcul et simulation

La problématique du Boil-Off dans les complexes de liquéfaction du Gaz Naturel	63
1. Introduction :	
2. Production de vapeurs dans les réservoirs de gaz naturel liquide.....	
2.1.1. Les entrées thermiques vers un réservoir de stockage de GNL :.....	64
i. Évaporation de conception :	65
ii. Évaporation réelle :	65
3. Calcul du Boil-off dans le bac de stockage I-903 :	69
3.1. Données.....	69
3.2. Calcul du coefficient de transfert de chaleur du GNL liquide stocké : ...	71
3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur du GNL vapeur stocké :....	71
3.4. Calcul du coefficient de transfert du l'air ambiant :	72
3.5. Calculs des pertes de chaleur :	72
3.5.1. Calcul de la quantité de chaleur :	72
3.5.1.1. Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers de toit (Q_1) :.....	73
3.5.1.2. Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers la paroi latérale (Q_2) :	75
3.5.1.3. Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers le fond (Q_3) :	76
3.5.1.4. Calcul de la quantité de chaleur total diffusée à travers les parois du réservoir (Q) :	78
2.5.2. Calcul le taux d'évaporation :	78
2.5.2.1. La masse évaporée par jour :	78
• Le volume évaporé par jour :	78
2.5.2.2. Le taux d'évaporation :	78
3.5.3. Calcul de la quantité de BOIL-OFF annuelle :	79

• Détermination de la quantité du BOIL-OFF annuelle par design :.....	79
3.5.4. Conclusion :.....	79
Partie simulation :.....	
a. Présentation de COMSOL Multiphysics :.....	80
b. Les différentes étapes de réalisation de la simulation :.....	80
c. Résultats et discussion :.....	84
• Étude du champ de température dans l'ensemble du bac :	84
• Étude du champ des vitesses dans l'ensemble du bac :.....	86
• Étude du champ de fraction de volume dans l'ensemble du bac :	87
• Étude de la pression dans l'ensemble du bac :	88
e. Étude complémentaire :.....	88
1) Résultats de simulation du toit :	89
2) Résultats de simulation du fond :	91
3) Résultats de simulation de la paroi :.....	93
Conclusion generale :.....	96
Référence bibliographique :	98

Introduction générale

Le gaz naturel liquéfié (GNL) joue un rôle essentiel dans l'économie mondiale de l'énergie. Il est obtenu en réduisant la température du gaz naturel à des températures extrêmement basses, ce qui le convertit en un liquide à grande densité énergétique. Cette modification permet d'obtenir une diminution de son volume significative, ce qui facilite son stockage et son transport sur de longues distances.

L'évaporation naturelle du gaz naturel liquéfié (GNL) stocké dans des réservoirs cryogéniques est causée par l'entrée de chaleur à travers les parois, connue sous le nom de boil-off.

Il est crucial de gérer efficacement le BOIL-OFF dans l'industrie du GNL. On utilise des technologies de pointe afin de réduire les pertes en récupérant et en recyclant le gaz vaporisé. L'objectif de cette étude est de réaliser une simulation sur les pertes qui surviennent. Et connaître l'évolution de la chaleur dirigée vers l'intérieur des réservoirs de stockage et la réduction du taux d'évaporation.

Après cette introduction générale, nous avons jugé très pertinent et même instructif de présenter dans un premier chapitre la chaîne de GNL et les procédés de liquéfaction.

Au chapitre II, nous fournissons une description approfondie pour les techniques de stockage de GNL et l'isolation.

Le troisième chapitre est tout entier dédié à la description du complexe GL1/Z de SONATRACH à Arzew, où notre stage pratique s'est déroulé avec succès.

Le chapitre final traite de la mesure des pertes, la simulation de Boil-Off par le logiciel COMSOL et des résultats réalisés dans le cadre de l'étude.

Finalement, notre mémoire se termine par une conclusion générale comprenant des recommandations considérées comme très pertinentes, en particulier pour la poursuite et l'enrichissement de ce travail.

État de l'Art : Revue bibliographique

Durant le stockage, le GNL est dans un état d'équilibre dynamique et thermodynamique. La chaleur absorbée par le réservoir depuis l'environnement extérieur est dissipée sous forme d'évaporation du liquide à la surface. Lorsque le système est perturbé par des changements de pression en phase gazeuse. Selon ces auteurs, le taux d'évaporation (BOIL-OFF) est directement lié à l'efficacité de l'isolation du réservoir de stockage de GNL.

Afin de comprendre le phénomène BOIL-OFF des réservoirs de stockage de GNL, de nombreux travaux de recherche et de simulations ont été réalisés pour améliorer la conception, minimiser les pertes par évaporation et fournir une base technique pour la construction et l'utilisation sûre des réservoirs de stockage de GNL.

Parmi ce groupe de chercheurs nous citons :

-HARITI Rafika a réalisé une simulation par le logiciel FLUENT et une modélisation numérique pour déterminer les profils de température dans l'ensemble du système de bac de stockage et elle a évalué les taux d'évaporation en fonction de certains paramètres influents (niveau de liquide, température ambiante et ensoleillement).

D'après ce travail réalisé, nous estimons qu'une analyse en 3D de l'ensemble du système de bac de stockage prendrait en considération l'influence de l'orientation du soleil autour du réservoir, ainsi que la réalité de l'existence d'un trou d'évaporation sur le toit du bac de stockage.

-KHELIFI TOUHAMI Mohamed Salah a étudié numériquement la convection naturelle à l'intérieur de la phase liquide stockée dans un écoulement bidimensionnel. La densité de flux de chaleur d'évaporation est évaluée par la loi de Hashemi-Wesson. L'utilisation des modèles de turbulence est extrêmement importante vu les valeurs élevées des nombres de Rayleigh correspondants aux hauteurs réelles des réservoirs dans les unités de liquéfaction du gaz.

On a obtenu des résultats de simulation de la convection naturelle dans une cavité cylindrique contenant du GNL, avec des nombres de Rayleigh variant de 10^3 à 10^5 et des rapports d'allongement variables ($Al=1/3$, $1/2$ et 1). Nous avons exposé des résultats pour des nombres de Rayleigh élevés allant de 10^{12} à 10^{17} dans le cadre de l'écoulement turbulent, afin de prendre en compte les hauteurs réelles du bac de stockage de GNL

- Abdullah Saleem et al [1] ont réalisé une simulation CFD dynamique complète d'un réservoir de GNL terrestre à grande échelle dans un terminal de regazéification avec le GNL est approximé comme du méthane pur, le modèle VOF (Volume de fluide) axisymétrique est utilisé pour suivre l'interface vapeur-liquide, et le modèle Lee est utilisé pour tenir compte du changement de phase, y compris l'effet de la pression statique. Cette étude approfondie de l'ampleur de l'entrée de chaleur, de la dynamique de l'écoulement interne et du transfert de chaleur par convection donne des informations utiles sur les phénomènes d'ébullition et une quantification fiable de la BOG. Et ont abouti aux conclusions suivantes :

- Le taux de génération des BOG présente un comportement transitoire et atteint un état stable en même temps que la phase liquide devient bien mélangée
- La pression hydrostatique due à la hauteur du liquide influence les caractéristiques des BOG vivantes, mais elle n'a pas d'impact sur le taux de génération des BOG à l'état stable.
- Le modèle 1D isobare et bien mélangé du réservoir de stockage de GNL d'une étude précédente diffère dans la partie transitoire mais montre un bon accord avec les résultats CFD actuels à l'état d'équilibre

- Sixian Wu et al [2] ont réalisé un modèle numérique prenant en compte le changement de phase et les fuites de chaleur externe est établi pour étudier la thermodynamique et l'hydrodynamique d'un réservoir de GNL de type C avec la méthode du volume de fluide (VOF), couplée au traitement du mouvement des mailles, est adoptée pour prédire le mouvement de l'interface vapeur-liquide et l'excitation par balancement sinusoïdal est réalisée par une fonction définie par l'utilisateur (UDF). Cette étude est importante pour comprendre en profondeur le comportement thermique du ballonnement de GNL et les caractéristiques de la génération de BOG dans des conditions de ballonnement pendant le transport maritime réel des navires GNL. Ils ont abouti aux conclusions suivantes :

- L'excitation par ballottage a une grande influence sur les comportements thermodynamiques et les caractéristiques de génération de BOG du réservoir de GNL de type C
- Cette étude présente des inconvénients. Tout d'abord, cet article est une étude comparative complète, qui étudie les caractéristiques thermodynamiques et hydrodynamiques des fluides cryogéniques dans les réservoirs de stockage dans différentes conditions de ballottage, sans statistiques quantitatives et analyse sur la génération de BOG dans des conditions de ballonnement des transporteurs de GNL pendant le transport maritime. Deuxièmement, en raison des nombreuses conditions de sloshing étudiées dans cet article, compte tenu de l'efficacité et de la précision du calcul, un modèle 2D est utilisé dans cet article pour remplacer le modèle 3D pour le calcul.

- Xingchun Wang et al [3] ont étudié la production de gaz d'évaporation à partir de camions-citernes de GNL sous les impacts simultanés des fuites de chaleur et des vibrations du transport avec l'intégration de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) et des simulations dynamiques de processus. Tout d'abord, un modèle de GNL polyphasé est développé pour caractériser l'incrément d'énergie thermique dû à l'effet de vibration sur route par des simulations CFD, où une fonction définie par l'utilisateur (UDF) est utilisée avec l'algorithme de maillage dynamique. Ensuite, l'énergie thermique induite par les vibrations est introduite dans un modèle dynamique de processus, où une fuite de chaleur considérée comme un méthanier est simulée pour quantifier la production totale de BOG pendant le transport routier de GNL. Et ont abouti aux conclusions suivantes :

- Les générations de BOG dues aux fuites de chaleur soient beaucoup plus nombreuses que celles dues aux vibrations du transport, elles représentent toujours plus de 10 % du total des générations de BOG.
- Le pourcentage des générations totales de BOG dues aux vibrations de transport augmente rapidement par rapport à l'augmentation de la vitesse de transport sur route
- Le facteur de vibration ne doit pas être négligé pour comptabiliser précisément les générations de BOG pendant le transport routier de GNL, en particulier lorsque le méthanier est en mode de vitesse élevée.

- J.L. Ferrín, L.J. Pérez-Pérez [4] ont réalisé une simulation numérique du débit de GNL stocké dans un réservoir cylindrique de petite taille. Le but principal de ce travail est de caractériser l'entrée de chaleur dans le réservoir ainsi que le taux d'évaporation, en fonction du niveau de remplissage et de l'épaisseur de la couche d'isolation. La surface libre séparant le liquide et la vapeur dans le réservoir est suivie à l'aide de la méthode du volume de fluide (VOF) et le modèle est résolu à l'aide du logiciel ANSYS Fluent.

La stratification de la température, l'évaporation et l'auto-pressurisation ont été étudiées pour différents niveaux de remplissage et épaisseurs de couche d'isolation du réservoir, ainsi que le comportement dynamique du liquide et vapeur. Ils ont abouti aux conclusions suivantes :

- L'utilisation d'épaisseurs d'isolation plus faibles pour le réservoir entraîne une fuite de chaleur accrue. Cela entraîne également une augmentation des taux de pressurisation et d'évaporation, ainsi que des vitesses plus élevées à l'intérieur du réservoir.
- La relation entre l'épaisseur de l'isolant et la pénétration de la chaleur a été établie en fonction des valeurs obtenues
- L'effet de la dilatation thermique du liquide, qui peut influencer l'auto pression, en particulier pour les grands niveaux de remplissage.

-Younggy Shin a, Yoon Pyo Lee [5] ont réalisé une simulation dynamique qui facilite la conception de l'installation et du système de contrôle du processus thermique "reliquéfaction basé sur le cycle de Brayton inverse". Cette simulation dynamique a été effectuée pour tous les modes de fonctionnement, y compris le démarrage et le ralenti. Il a été constaté que la température de sortie de turbo-expander est la variable de processus clé pour le contrôle et que la commande de processus fonctionne avec succès lorsque trois actionneurs sont activés dans trois régimes de charge de BOG différents.

L'étude montre également que le contrôle de la pression du séparateur pour maintenir la fraction de vapeur à la sortie du papillon des gaz aussi bas que possible est une méthode efficace pour purger l'azote de la BOG.

- Saif Z.S. Al Ghafri et al [6] ont étudié une série d'expériences qui ont été menées pour des mélanges binaires de méthane et d'éthane de type GNL afin de mesurer la production de BOG et le changement de pression qui en résulte dans diverses conditions pertinentes sur le plan industriel. Ce travail a rapporté des observations qualitatives de trois périodes distinctes : une phase de pressurisation, une phase transitoire et une phase d'équilibre, avec des connaissances approfondies et une compréhension de l'évolution de la stratification en phase liquide. Et ont abouti aux conclusions suivantes :

- L'épaisseur de la couche de stratification thermique à proximité de l'interface liquide-vapeur augmente avec le temps dans la région de présurisation, et une plus grande différence de température stratification thermique entre la surface du liquide et le fond a été observé avec une fraction volumique initiale du liquide plus élevée.
- La stratification, le temps d'auto-pressurisation et le profil de taux de décharge au fil du temps (croissant ou décroissant) dépendent principalement du taux de transfert de chaleur dans la cellule de BOG.
- Un tel modèle peut aider à réduire les marges de conception appliquées à la capacité de pointe requise pour les systèmes de reliquéfaction embarqués, et permettre ainsi des réductions de coûts significatives dans la conception des navires méthaniers.

- Liang Yin et al [7] ont étudié une conception avancée et analysé du processus de traitement du gaz d'évaporation dans un navire alimenté au GNL, combiné à l'utilisation de l'énergie froide issue de la gazéification du GNL. Dans cette étude le système est divisé en trois sections : la regazéification de la BOG et du GNL dans le système d'alimentation en gaz combustible (FGSS), le stockage de l'énergie de l'air liquide et la libération de l'énergie de l'air liquide. Le système proposé est simulé par Aspen HYSYS. En outre, le système est analysé de trois manières : analyse énergétique par la première loi de la thermodynamique, analyse d'échange thermique par le flux thermique, et analyse d'exergie par la seconde loi de la thermodynamique. Dans le processus d'analyse de transfert de chaleur et d'analyse anale d'exergie, les améliorations possibles ultérieures sont discutées.

- AgungWidodo, YuswanMuharam [8] ont réalisé une étude visant à optimiser les processus de liquéfaction, de stockage, de chargement, de récupération du gaz combustible et des BOG pour augmenter la production de GNL sur les navires. Cette étude a été modélisée à l'aide du logiciel UniSim. Et montre que la BOG générée pendant le chargement peut être considérablement réduite d'environ 50% par rapport au taux initial, ce qui augmente la production de GNL d'environ 36 576 tonnes/ an.

- EbenezerAdom et al [9] ont fait une Modélisation du gaz d'évaporation dans les réservoirs de GNL : une étude de cas se concentre sur l'effet des fuites de pression et de chaleur sur le gaz d'évaporation (BOG) dans les réservoirs de gaz naturel liquéfié (GNL). Les modèles empiriques de Lee-Kesler-Plocker (LKP) et de Benedict-Webb-Rubin modifié par Starling (BWRS) ont été utilisés pour simuler le facteur de compressibilité, l'enthalpie et donc la fuite de chaleur à diverses pressions afin de déterminer les facteurs qui affectent la BOG dans des réservoirs de GNL typiques de différentes capacités.

La simulation doit tenir compte du processus dynamique de l'espace vapeur des réservoirs de GNL. Il y a aussi d'autres paramètres, qui peuvent avoir un impact sur la BOG, à ajouter à la simulation ; tels que le changement de température de l'environnement et le temps de stockage du GNL.

L'étude a également révélé que les grands réservoirs de GNL ont moins de BOIL OFF-GAZ car la fuite de chaleur devrait être la principale exigence pour la BOG dans le réservoir de GNL ; et la taille peut avoir un impact sur la conductivité thermique du réservoir de GNL, à l'exception du système d'isolation.

- Q.-S. Chen et al [10] ont réalisé une analyse des changements de température et de pression dans les réservoirs cryogéniques de gaz naturel liquéfié (GNL) analysé les mécanismes pouvant contribuer à l'évaporation du GNL dans les réservoirs de stockage des stations GNL et la fuite de chaleur à travers la coque du réservoir de stockage avec une conception spéciale de l'entretoise qui peut être utilisée pour réduire le taux de fuite de chaleur d'un réservoir de produit. Et ont abouti à la conclusion : dans la plupart des cas, la capacité de débit minimale du liquéfacteur est supérieure au taux d'évaporation.

- K.J. Petersen S et al [11] ont présenté les méthodes actuelles utilisées pour modéliser les processus physiques complexes impliqués dans le stockage, le transport et les déversements de fluides cryogéniques, avec un accent particulier sur la cavitation et l'ébullition en piscine. Et ont constaté que les effets de la rugosité de la surface du substrat solide ont été pris en compte dans les simulations numériques de l'ébullition de la piscine via la modélisation de la sous-grille.

De toute évidence, cette méthodologie est assez puissante pour les simulations de nombreux sites de nucléation, et est actuellement la seule voie réalisable contrairement aux modèles de résolution d'échelle calculables des plus petites crevasses qui agissent comme des sites de nucléation dans l'ébullition de la piscine.

- WANG Jieming et al [12] ont réalisé une simulation du comportement en phase gazeuse et pétrolière de l'UGS dans le processus d'injection-production, et ont révélé les caractéristiques et le mécanisme d'action du comportement en phase gazeuse et pétrolière dans l'UGS et les résultats des calculs sont vérifiés exacts et pratiques. Ils ont abouti aux conclusions suivantes :

Des études expérimentales et théoriques montrent que dans la période allant de la formation de la capacité de stockage par injection de gaz à la fin de la période de production de gaz du premier cycle d'injection-production, le comportement de la phase huileuse et gazeuse est principalement caractérisé par l'évaporation et l'extraction du gaz de capuchon de gaz vers l'huile de jante ainsi que par la dissolution et la diffraction dans une faible mesure.

Pour le gaz de capuchon de gaz, la teneur en composant léger augmente, la teneur en composants intermédiaires et lourds diminue, et la densité et la viscosité augmentent.

L'huile de jante d'huile, la teneur en composant lourd augmente, la teneur en composant intermédiaire diminue, la densité et la viscosité augmentent, et le facteur de volume et le rapport gazeux en solution diminuent.

Objective de l'étude :

Nos recherches comprennent la simulation du phénomène d'évaporation du GNL dans les réservoirs de stockage à l'aide du logiciel COMSOL pour déterminer les distributions et les évolutions en fonction de temps des champs de température, la pression, les vitesses et les lignes de courant dans le volume occupé par la vapeur et le liquide afin de comprendre la relation entre les réservoirs de stockage et l'environnement ambiant. Ainsi, la quantification de transfert de masse et de chaleur de phénomène de BOIL-OFF.

Chapitre 01 : La chaine du GNL

1. Introduction :

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est une forme liquide de gaz naturel (principalement composé de méthane). Il revêtira une importance croissante dans l'industrie mondiale de l'énergie, étant donné que les réserves mondiales de gaz naturel sont élevées et son état condensé est abondant.

Son transport par les voies maritimes permet de le transporter sur de longues distances, créant ainsi de véritables chaînes d'approvisionnement : puits producteurs, usines de traitement, réseaux de gazoducs, usines de liquéfaction, terminaux de chargement des méthaniers.

Si le GNL est manipulé dans les différentes étapes (production, stockage, transport), cela peut entraîner des catastrophes en raison de son caractère explosif et inflammable. Pour élaborer les modèles, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du GNL. Au cours de ce qui suit, nous allons traiter les propriétés physiques et chimiques du composé, et de voir où consiste sa dangerosité.

2. Historique du GNL :

En 1940, aux États-Unis, à Cornwell, l'histoire du GNL commence avec la construction d'une station expérimentale avec une unité de liquéfaction de 17 m^3 par jour et un stockage de 40 m^3 .

La construction d'une installation industrielle à Cleveland (Ohio) est ensuite entreprise. Elle est conçue pour évacuer les niveaux de consommation de gaz élevés et se distingue par une capacité de liquéfaction de 200 m^3 par jour et une regazéification de $115 \text{ m}^3/\text{h}$. Elle comprend trois réservoirs de $2\,400 \text{ m}^3$ et un de $4\,500 \text{ m}^3$.

À partir de la fin des années 50, Gaz de France opte pour l'élaboration de technologies pour la réalisation des réseaux de transport par voie maritime. On construit une station « Méthane Liquide » à La Roche-Maurice (près de Nantes). En 1959, il est construit un réservoir cryogénique de 500 m^3 et en 1964, une unité pilote de liquéfaction de $1\,000 \text{ Nm}^3$ par heure est mise en service pour tester le cycle à cascade incorporée recommandé par l'air liquide. On met en place la première chaîne mondiale de transport de GNL : elle transporte le gaz de HassiR'Mel (Sud-Algérien) jusqu'en Angleterre ($109 \text{ Nm}^3/\text{an}$) et en France à Fos-sur-Mer ($0,5 \times 109 \text{ Nm}^3/\text{an}$).

Quelques années plus tard, une chaîne entièrement américaine porte $2 \times 109 \text{ Nm}^3/\text{an}$ de gaz de l'Alaska vers le Sud des États-Unis. Le gaz libérien est ensuite transporté vers l'Espagne et l'Italie à partir du complexe de liquéfaction de Marsa el Brega.

Plusieurs installations de liquéfaction sont alors mises en place en Algérie (Skikda et Arzew), dans le golfe Persique et en Indonésie. Le volume de gaz transporté à l'état liquide depuis ces pays en 1994 est estimé à $86 \times 10^9 \text{ Nm}^3$, principalement vers l'Europe et le Japon.

Au fil du temps, le marché du gaz naturel liquéfié a connu une croissance continue, caractérisée par une diversification progressive des fournisseurs et des clients.

Le schéma ci-dessous illustre une représentation graphique du volume du commerce mondial du GNL entre 1970 et 2014. Le commerce mondial de GNL s'est élevé à 13 milliards de mètres cubes en 1975. Le commerce de GNL s'est élevé à 325 milliards de mètres cubes en 2013. [15]

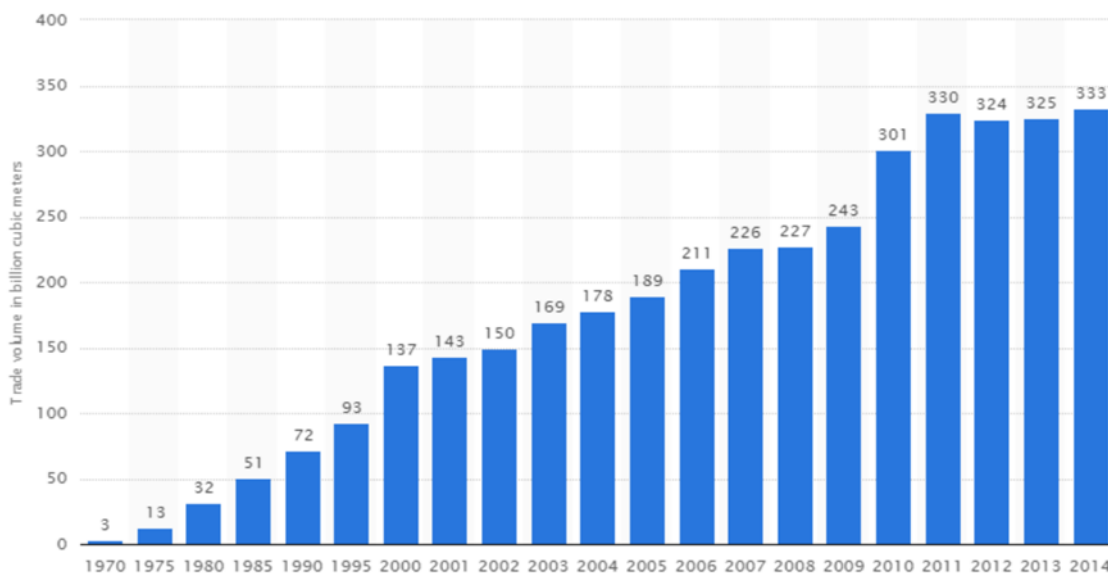


Figure I.1 : Volume du commerce mondial de GNL 1970-2014 (Source : statista.com)

3. La chaîne de GNL :

Afin de mieux décrire cette chaîne, il faudra énumérer les différentes opérations d'approvisionnement depuis la production du GNL jusqu'à sa regazéification (figure I.2).

Les principales étapes sont :

- La liquéfaction,
- Le stockage et le transfert,
- Le transport,
- Le déchargement et le stockage,
- La regazéification.

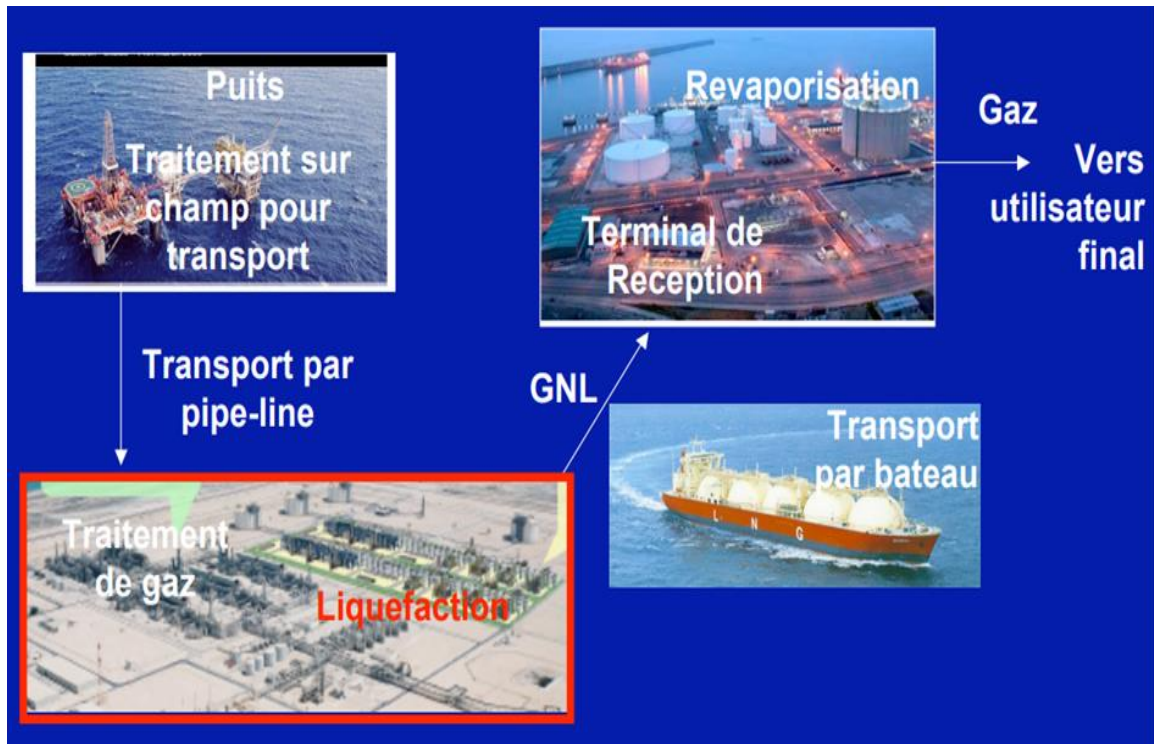


Figure I.2 : la chaîne de GNL

3.1. Spécifications du gaz naturel à l'entrée de la liquéfaction :

Le gaz naturel, suivant les sites de production, a une composition volumique très variable :

- De 60 à 98 % de méthane ;
- De 1 à 20 % d'éthane ;
- De 0 à 6 % d'azote ;
- De 0 à 5 % de CO₂ ;
- De 0 à 5 % d'H₂S, etc.

Les principales impuretés présentes dans le gaz naturel sont : le mercure, les mercaptans, le COS, le benzène, les paraffines... [16]

3.1.1. Spécifications typiques du gaz commercial :

Les spécifications commerciales du gaz naturel sont variables d'un pays à l'autre, et cela peut poser problème 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 et plus ou moins de C2+ dans le gaz. La réalisation de cet ajustement est une fonctionnalité à prendre en compte dans le schéma de procédé. Ensuite, le soufre et l'H₂S sont limités à quelques ppm masse. Les points de rosée eau et hydrocarbures sont fixés par les spécifications du transport, mais la liquéfaction a des spécifications encore plus sévères.

3.1.2. Spécifications dues à la liquéfaction :

Il est nécessaire de retirer toutes les substances lourdes susceptibles de causer des dépôts et des colmatages :

Il convient de limiter la quantité d'eau à 0,1 ppm de masse afin d'éviter que les hydrates ne bloquent les échangeurs cryogéniques ; il est également nécessaire d'éliminer le benzène (1 ppm au maximum) ainsi que le CO₂ (50 ppm).

Il est nécessaire d'éliminer également le mercure qui peut corroder les équipements en alliage d'aluminium à l'arrêt. Les principales spécifications sont résumées (tableau I.1).

Composés	Limites	Spécification
H ₂ S	< 3,5 ppmv	Produit
Soufre total	< 30 mg/Sm ³	Produit
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

ppmv : partie par million volume, soit 10⁻⁶ volume par volume

Sm³ : m³ aux conditions standard (1 bar, 15 °C)

Tableau I.1 : Spécifications du gaz naturel pour liquéfaction (cerist // 193.194.76.5)

3.2 Prétraitement du gaz avant liquéfaction :

Le gaz naturel doit être prétraité (figure I.3) pour respecter les spécifications de la liquéfaction. Suivant sa composition, le traitement sera plus ou moins coûteux. Généralement, le prétraitement représente environ 15 % du prix de la liquéfaction. [17]

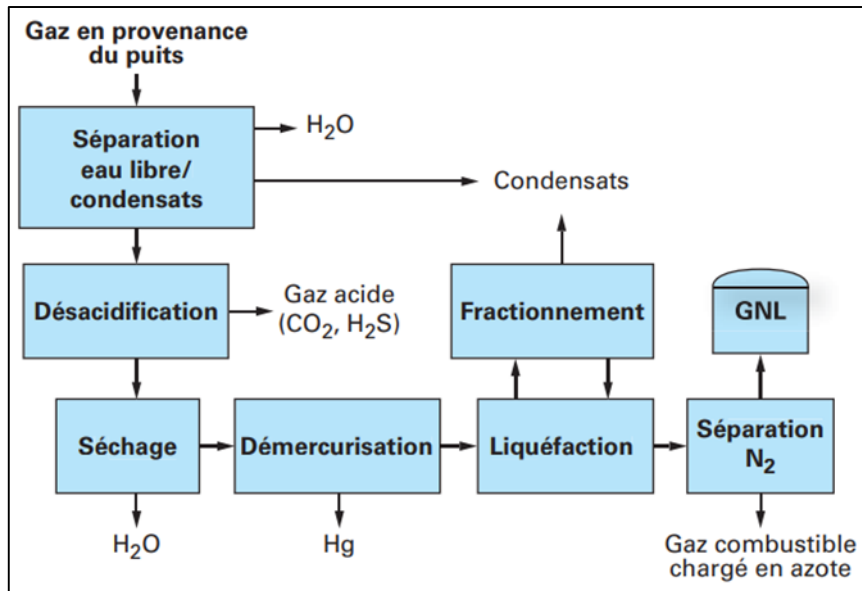


Figure I.3 : Purification typique pour liquéfaction de gaz naturel

Après désacidification, il est nécessaire d'abaisser la teneur en gaz carbonique du gaz naturel à moins de 100 ppm (particule par million), par lavage avec une solution aqueuse de MEA. Le gaz carbonique est éliminé du gaz naturel par absorption- extraction.

Et après la décarbonatation il est nécessaire d'extraire l'eau du gaz entièrement : même une fraction de quelques ppm est suffisante pour la formation d'hydrate à -160 °C , heureusement alors en quantité trop faible pour entraîner des bouchages. La seule méthode de déshydratation possible est l'adsorption sur tamis moléculaires (figure I.4) qui permet de descendre à une teneur en eau inférieure à 1/10 ppm volume, et pour réduire la taille de cette unité, le gaz est refroidi à une température aussi basse que possible en tenant compte des risques de formation d'hydrate (environ 20 °C), afin de condenser une grande partie de l'eau avant le séchage.

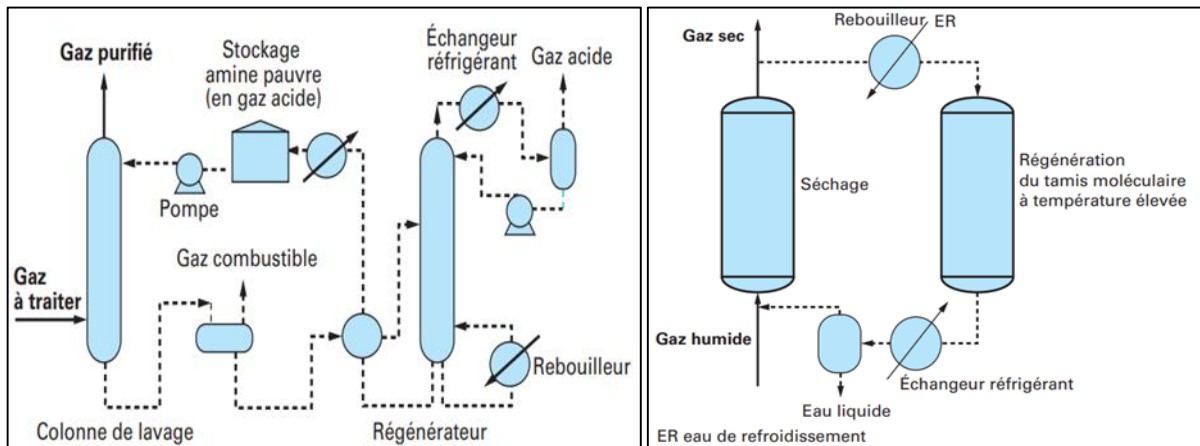


Figure I.4 : Schéma simplifié d'une unité de lavage aux amines et Schéma simplifié de la section de séchage sur tamis moléculaire du gaz naturel

Après avoir sec, il est encore nécessaire de retirer le mercure du gaz naturel (Démercuration), même s'il est très faible : le mercure s'accumule dans les échangeurs cryogéniques en alliage d'aluminium va les corroder à l'arrêt en s'amalgamant avec l'aluminium. À température ambiante, le mercure est prélevé sur des masses de captation constituées de composés de soufre déposés sur de l'alumina. [18]

Ensuite, on refroidit le gaz naturel à environ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ avant de le transmettre à une section de fractionnement (voir figure II.5) qui permettra à la fois :

- De conformer le gaz naturel aux spécifications standard ;
- Supprimer les substances lourdes (benzène, paraffines lourdes, etc.) qui pourraient cristalliser ;
- Extraire les composés requis pour les ajouts aux mélanges réfrigérants (C2, C3, parfois C4 et C5).

En général, une première colonne est utilisée pour ajouter le gaz aux spécifications (scrubber, en anglais), en sortant le gaz à liquéfier en tête et les composés plus lourds avec une petite quantité de méthane en fond. Ensuite, les autres composés sont fractionnés dans un ensemble de colonnes : dééthaniseur, dépropaniseur, débutaniseur. Il est courant d'inclure le condenseur de tête de la première colonne, qui doit refroidir vers $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, dans l'échangeur cryogénique principal. [19]

À la fin de la liquéfaction, l'azote en excès doit souvent être retiré afin de réguler la chaleur de combustion du gaz naturel (0,5 à 1 % d'azote). On élimine l'azote en évaporant une partie du GNL :

- Soit dans un ballon séparateur ;
- Soit dans deux ballons en série à des pressions légèrement différentes ;

- Soit dans une colonne rebouillie par le GNL à forte pression
- Avant détente dans une vanne.

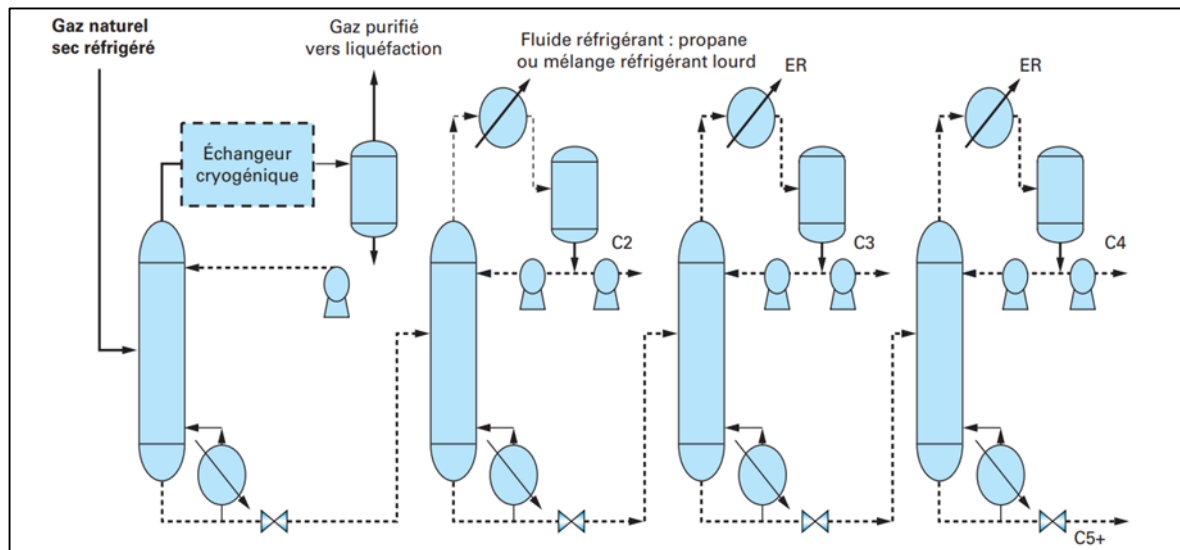


Figure I.5 : Fractionnement typique de gaz naturel

3.3. La liquéfaction :

La liquéfaction du gaz naturel est obtenue par abaissement de la température du gaz naturel traité GNT de 29 °C jusqu'à -162°C. Ce refroidissement est réalisé dans des échangeurs cryogéniques à plaques appelés « noyaux » ; dans ces derniers le GNT cède ces calories au fluide frigorigène.

Dans le cycle de réfrigération du gaz naturel, on retrouve les quatre transformations d'un cycle frigorifique ; compression, condensation, détente puis évaporation, c'est durant cette évaporation que le fluide frigorigère cède les frigories au GNT. [20]

L'unité de liquéfaction du gaz naturel comprend en général :

- Les échangeurs cryogéniques et les colonnes de distillation ;
- Le ou les compresseurs de cycle, avec leurs turbines d'entraînement à gaz ou à vapeur ;
- Le circuit d'eau de mer de réfrigération (compresseur, turbine) ;
- Les réservoirs cryogéniques pour le stockage du GNL et les lignes pour leur chargement ;
- Les appointements et les lignes de chargement des méthaniers, avec leurs bras articulés.

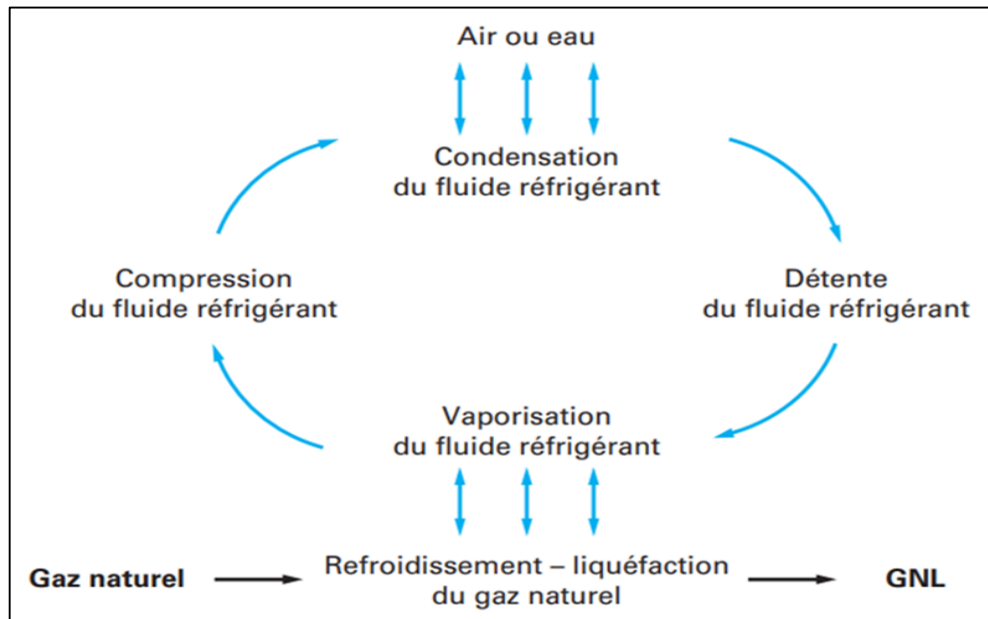


Figure I.6 : Principe de base des cycles de liquéfaction de gaz naturel

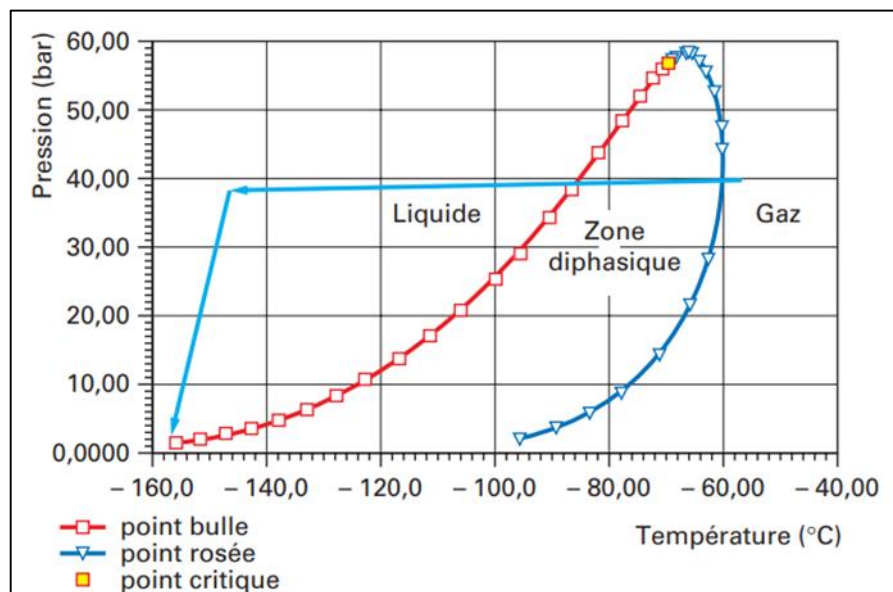


Figure I.7 : Chemin thermodynamique de liquéfaction de gaz naturel

3.4. Le transport :

Le GNL est principalement transporté par des navires frigorifiques spécialement conçus pour le gaz naturel, les méthaniers. Le GNL est stocké dans des réservoirs adiabatiques à faible pression atmosphérique sur ces navires. Étant donné que l'isolation n'est pas optimale, les navires utilisent le gaz évaporé comme carburant.

On peut observer dans la figure I.8 un méthanier avec des compartiments sphériques, tandis qu'un autre a un compartiment cubique de 138 000 m³. La majorité des usines de GNL disposent d'une flotte spécifiquement dédiée au GNL. Ces terminaux incluent des installations de déchargement et de stockage, ainsi que des installations de regazéification de GNL, tout comme les usines [21].



Figure I.8 : Transport du GNL : un méthanier à sphères.

3.5. Les terminaux de regazéification :

Les Terminaux du GNL, appelés aussi installations de regazéification sont des installations de regazéification conçus pour recevoir des navires du GNL, le stocker et l'envoyer dans le réseau de gazoducs locaux. [20]

Les principales composantes d'une installation de regazéification sont les suivants :

- Les postes de déchargement et les installations portuaires,
- Les réservoirs de GNL,
- Des vaporisateurs pour convertir le gaz naturel liquéfié en phase gazeuse,
- Le gazoduc relié au réseau de gaz local

3.5.1.1. La regazéification :

L'eau de mer fournit la chaleur requise pour la regazéification avec réchauffage jusqu'au niveau ambiant (il est essentiel d'être au-dessus de 0°C afin d'éviter la formation de glace sur le collecteur de sortie et sur le départ de la canalisation).

La prolifération de la faune est encore plus problématique dans les usines de liquéfaction, où la température de l'eau dans les circuits de refroidissement est plus élevée. Les pompes sont utilisées pour rétablir la pression liquide du gaz naturel liquéfié des stockages cryogéniques. Les pompes primaires, également appelées pompes de gavage, sont installées en charge, c'est-à-dire au-dessous du niveau inférieur des réservoirs. Les pompes à haute pression, qui sont généralement installées au sol (ou à tout autre endroit car elles sont alimentées en liquide sous-refroidi par les pompes de gavage), évacuent le liquide à une pression finale généralement comprise entre 70 et 80 bar.

Les pertes thermiques provoquent une vaporisation lente du GNL stocké dans des réservoirs cryogéniques. On produit une phase gazeuse (boil-off). Il est fréquemment utilisé pour la liquéfier en la comprimant et en la recontactant avec du GNL sous-refroidi dans un "mélangeur". Les réservoirs sont remplis jusqu'à ce que la pression de refoulement des pompes primaires soit atteinte. Par échange de chaleur, ils sont alors refroidis grâce à une faible quantité de GNL à haute pression. Le mélangeur est positionné entre les deux niveaux de pompage et la pression à ce moment est sélectionnée de manière à ce que le sous-refroidissement reste adéquat pour alimenter correctement la pompe à haute pression. [21]

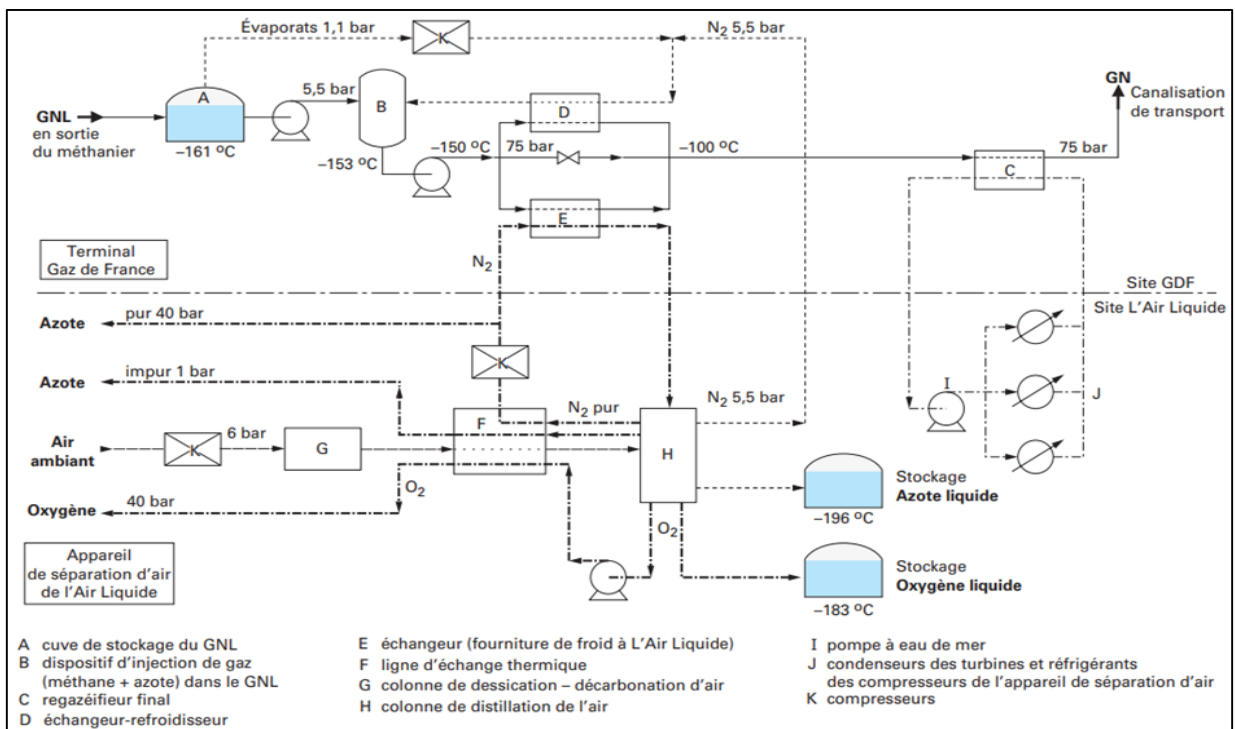


Figure I.9 : Schéma de fonctionnement du terminal méthanier en 1972(source : Doc. J 3 601)

4. Procédés de liquéfaction :

Les différents procédés industriels réalisant ce type de liquéfaction sont tous basés sur des cycles à compression-détente. Les différents procédés peuvent être classés suivant : [22]

- Le nombre de cycles en cascade : 1, 2 ou 3 ;
- La nature des fluides réfrigérants :
 - Les corps purs (propane, éthylène, méthane, azote),
 - Les mélanges réfrigérants : mélange d'hydrocarbures (méthane, éthane, propane...) et éventuellement d'azote ;
- Le type d'échangeurs utilisés :
 - Les échangeurs bobinés ou SWHE (Spool Wound Heat Exchanger)
 - Les échangeurs à plaques ou PFHE (Plate Fin Heat Exchanger)
- Le type d'entraînement des compresseurs :
 - Les turbines à vapeur pour les plus anciennes unités,
 - Les turbines à gaz : généralement des turbines industrielles : GE Frame 5 (25 MW environ), GE Frame 6 (40 MW environ), Frame 7 (80 MW environ), Frame 9 (110 MW environ),
 - Les moteurs électriques très récemment.

4.1 Cycle à cascade :

Ce procédé, le plus ancien historiquement est revenu en faveur récemment.

Trois cycles à corps purs sont imbriqués en cascade :

- Un premier cycle à propane permet de condenser l'éthylène du deuxième cycle et de refroidir autour de -35°C le gaz naturel et le méthane du 3ème cycle ;
- Le cycle éthylène permet de condenser le méthane et de liquéfier le gaz naturel aux alentours de -100°C ;
- Le dernier, cycle méthane sous-refroidit le gaz naturel autour de -150°C avant envoi au stockage après le flash final autour de -160°C .

Dans chaque cycle, la vaporisation est effectuée à plusieurs niveaux de pression (3 ou 4), pour améliorer le rendement thermodynamique par un meilleur contrôle de l'approche thermique, diminuant ainsi la puissance de compression nécessaire à chacun des cycles. Les appoints de réfrigérant doivent être importés (au minimum l'éthylène), ce qui n'est pas aisé dans tous les sites.

La nouvelle cascade (Phillips – Bechtel) est optimisée pour équilibrer la puissance de compression des trois cycles. L'intérêt est de disposer des mêmes turbines pour les trois cycles, et de mettre en œuvre deux turbines en parallèle sur chaque cycle, pour se prémunir contre les arrêts complets dû à la maintenance ou des incidents sur les machines tournantes. [23]

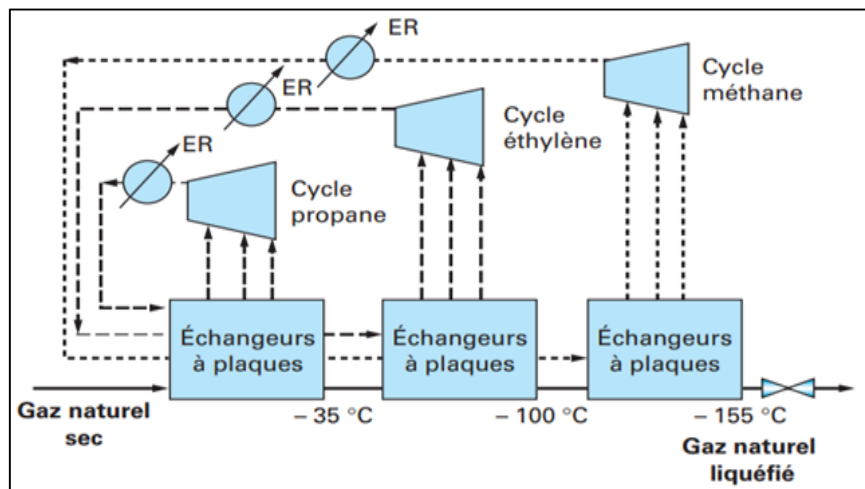


Figure I.10 : Schéma simplifié du procédé à cascade Phillips – Bechtel (source : Doc. J 3 601)

4.2. Procédé C3-MR d'Air Products

Ce procédé (figure I.11) qui est le plus utilisé dans les unités existantes (environ 90 %), faisait office jusqu'à une date récente de référence. Il consiste en un premier cycle au propane et un second cycle avec un mélange réfrigérant.

Le propane est condensé avec de l'eau de refroidissement ou de l'air, et est ensuite détendu à 3 ou 4 niveaux de pression. Le niveau de pression le plus bas est proche de la pression atmosphérique. Ce cycle propane refroidit le mélange réfrigérant du second cycle et le gaz naturel.

Le propane permet d'atteindre une température de -30 °C environ, insuffisante pour condenser totalement le mélange réfrigérant dont les phases sont séparées dans un ballon séparateur. La partie liquide du mélange réfrigérant est sous-refroidie dans l'échangeur cryogénique bobiné, et détendue pour produire le froid dans la partie inférieure de l'échangeur.

La partie gazeuse est condensée dans la partie inférieure, sous-refroidie dans la partie supérieure, et détendue pour produire le froid dans la partie supérieure de l'échangeur bobiné (partie la plus froide). La capacité maximale atteinte par ce procédé est d'environ 4 MTPA, à cause principalement des limitations de construction et de transport des échangeurs bobinés. [24]

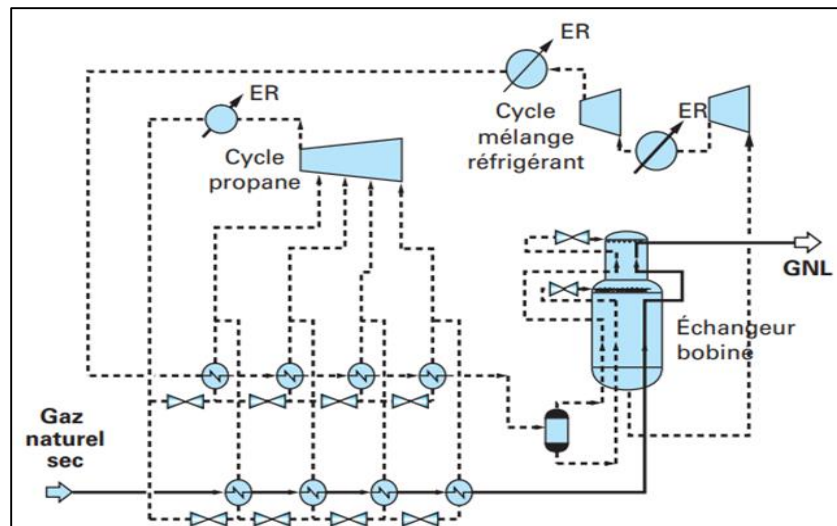


Figure I.11 : Schéma du procédé C3-MCR (Air Products) (source : Doc. J 3 601)

4.3. Procédé DMR Shell

Shell a proposé un procédé à deux cycles de mélange réfrigérant Dual Mixed Refrigerant (DMR) (figure I.12). Ce procédé remplace le premier cycle propane du C3-MR par un cycle à mélange réfrigérant, de manière à augmenter l'efficacité du procédé : une amélioration de l'efficacité de 9 %.

Le désavantage de ce procédé réside dans le nombre d'échangeurs bobinés, ce qui ne favorise pas une diminution des dépenses et des délais de construction. [26]

4.6. Procédé APX (Produits aériens)

Dans cette méthode, trois cycles sont utilisés en cascade : un cycle propane, un cycle mélange réfrigérant et un dernier cycle à l'azote au final. Grâce à cette méthode, il est possible d'atteindre des capacités considérables mais il est possible que le fonctionnement soit déséquilibré à 60 % de sa capacité en cas de panne sur le cycle azote. [28]

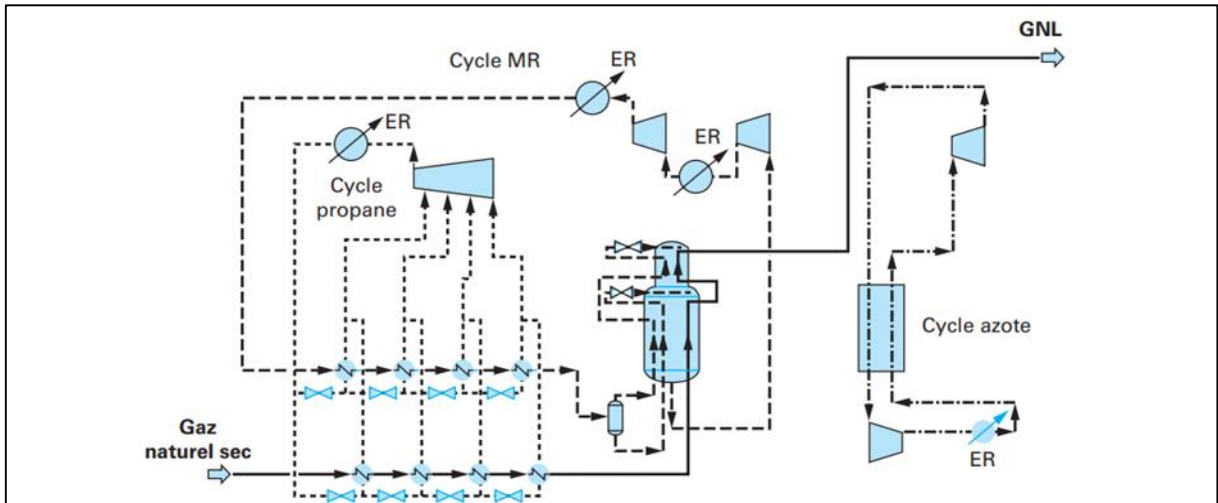


Figure I.15 : Schéma simplifié du procédé APX : propane, mélange réfrigérant MR, azote (Air Products) (source : Doc. J 3 601)

***Chapitre 02 : Techniques de
stockage de GNL***

1. Introduction :

Afin de conserver les gaz liquéfiés sous pression atmosphérique, il est nécessaire d'abaisser la température du gaz jusqu'à ce qu'il bouille grâce à un système de réfrigération adéquat. Les unités de stockage doivent inclure des isolations thermiques efficaces pour prévenir les problèmes de chaleur.

Le gaz réfrigéré se réchauffe selon la loi de vapeur saturante, les réservoirs de stockage se distinguent par leurs formes, leurs dimensions géométriques, ainsi que par la pression et la température du produit stocké. En règle générale, un réservoir de stockage se compose de deux enveloppes séparées par une épaisseur considérable de matériau isolant (calorifuge).

En général, la construction des cuves de stockage de GNL repose sur l'intégration d'une enceinte interne qui contient le liquide stocké et d'une enceinte externe qui renferme l'isolation située autour de cette enceinte.

2. La cryogénie :

Toutes les méthodes employées pour atteindre et maintenir des températures extrêmement basses, pouvant atteindre -235 °C . Actuellement, les méthodes cryogéniques sont couramment employées dans divers secteurs, tels que l'industrie énergétique, pour l'exploitation, la production, le stockage, le transport et l'utilisation de gaz liquéfiés, également connus sous le nom de fluides cryogéniques [29].

3. Le stockage de GNL :

Le stockage en tant que terme désigne le stockage d'une quantité spécifique de fluide (eau, gaz, hydrocarbures) dans une structure adaptée afin de pouvoir être utilisée ultérieurement. Il est indispensable de stocker du gaz naturel liquéfié afin de garantir une adaptation saisonnière des consommations et des ressources en gaz [30].

En ce qui concerne les complexes de liquéfaction, il est essentiel de conserver le GNL. Étant donné l'importance du volume spécifique du gaz naturel dans les conditions de température et de pression, son stockage rencontre des problèmes similaires à ceux rencontrés lors de son transport.

Deux modes principaux de stockages sont :

- Le stockage cryogénique dans des cuves, sous formes de GNL
- Le stockage souterrain en nappe aquifères ou en nappe salines

Dans le stockage cryogénique il existe plusieurs types de réservoirs qui sont couramment utilisés dans l'industrie mondiale. Les principaux sont [31] :

- Les réservoirs aériens à simple intégrité,
- Les réservoirs aériens à double intégrité,
- Les réservoirs aériens à intégrité totale,
- Les réservoirs aériens de type membrane,
- Les réservoirs semi-enterrés et enterrés.

4. Différents types de stockage :

4.1. Stockage aérien à « simple intégrité » :

Les premières installations destinées au stockage de GNL étaient basées sur les méthodes des industries pétrolières, adaptées aux conditions cryogéniques spécifiques.

Un réservoir "intégrité simple" (confinement simple) est constitué de (Figure II.1) :

- Une cuve interne autoportante contenant directement le GNL, fabriquée en matériau ductile à basse température (aluminium, acier inoxydable ou acier à 9% de nickel),
- Une isolation qui permet de contrôler l'évaporation du contenu liquide de la cuve interne.
- Un réservoir externe qui assure trois fonctions :
 - Prévenir la pénétration d'eau de l'extérieur vers le réservoir interne,
 - Protéger l'isolation,
 - Être imperméable aux gaz d'évaporation générés par le liquide stocké.

Il convient de souligner que la structure externe n'est pas spécialement conçue pour retenir le GNL de la cuve primaire (il n'y a pas de matériau ductile à basse température). Selon les choix effectués pour le stockage des vapeurs et l'isolation thermique, il y a différents types de réservoirs à intégrité simple.

Afin de collecter l'intégralité du contenu de l'enveloppe primaire en cas de perte de confinement, une cuvette de rétention est édifée autour du réservoir dans un matériau adapté aux conditions cryogéniques (talus de terre ou excavation de terre lorsque le relief le permet, mur en béton). Aucun accident n'est signalé dans l'historique du GNL sur un réservoir de ce type (conforme à tous les critères de construction).

La bonne exploitation s'explique par :

- En veillant à ce que les matériaux soient correctement adaptés aux conditions cryogéniques,
- En veillant à ce que le GNL utilisé soit exempt de toute impureté, ce qui évite les risques de corrosion interne des équipements.

Le système d'assise doit être conçu pour prévenir la déformation du fond du réservoir (en utilisant le gel et la poussée hydrostatique pour le soulever).

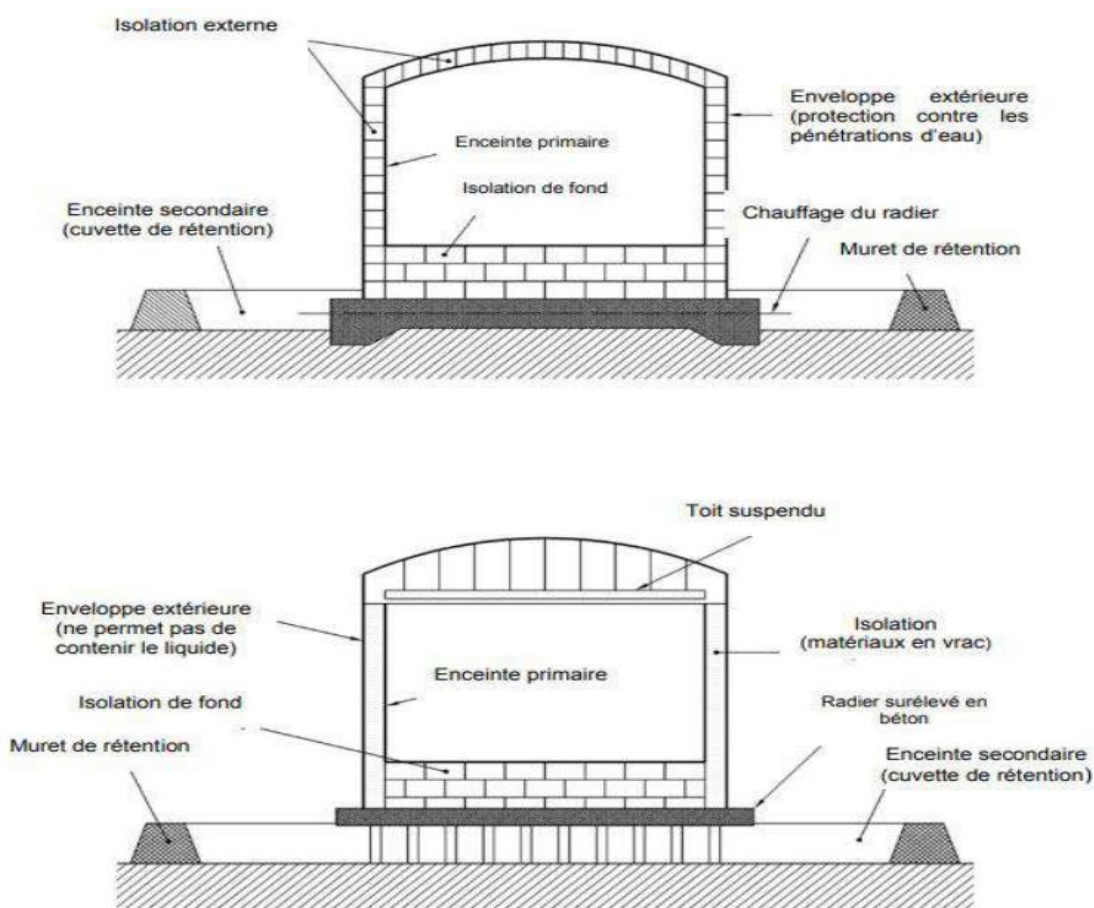


Figure II.1 : Réservoirs à simple intégrité

Le premier réservoir est construit sur une dalle en béton chauffée, tandis que le second réservoir est élevé sur un radier reposant sur des piliers.

Les bénéfices de cette technologie de réservoir pionnière sont les suivants :

- Leur conception simple,
- Leur construction relativement abordable par rapport aux autres types de réservoirs.

Les désavantages sont :

- Si la cuve primaire se fissure, la seconde enveloppe n'est pas spécialement conçue pour faire face aux conditions cryogéniques. Si l'épandage se produit, le GNL sera stocké dans le bassin de rétention et les gaz d'évaporation seront libérés à l'air libre.
- La grande surface des rétentions autour des réservoirs nécessite un dimensionnement afin de recueillir l'intégralité du contenu du réservoir.

4.2. Stockage aérien à « double intégrité »

La deuxième technologie de réservoir avait pour but de réduire les surfaces au sol de ces zones de stockage (directement grâce aux cuvettes de rétention et indirectement grâce aux distances d'effets causées par un accident majeur) tout en améliorant les conditions de sécurité (en limitant les risques d'épandage de GNL suite à des agressions externes, en réduisant les zones d'effets thermiques au niveau des réservoirs) ...

La principale modification effectuée pour garantir cette fonction de stockage du liquide a consisté à rapprocher les cuvettes de stockage au plus près des réservoirs (réduisant ainsi la superficie) tout en assurant la collecte de l'ensemble du contenu de l'enceinte primaire.

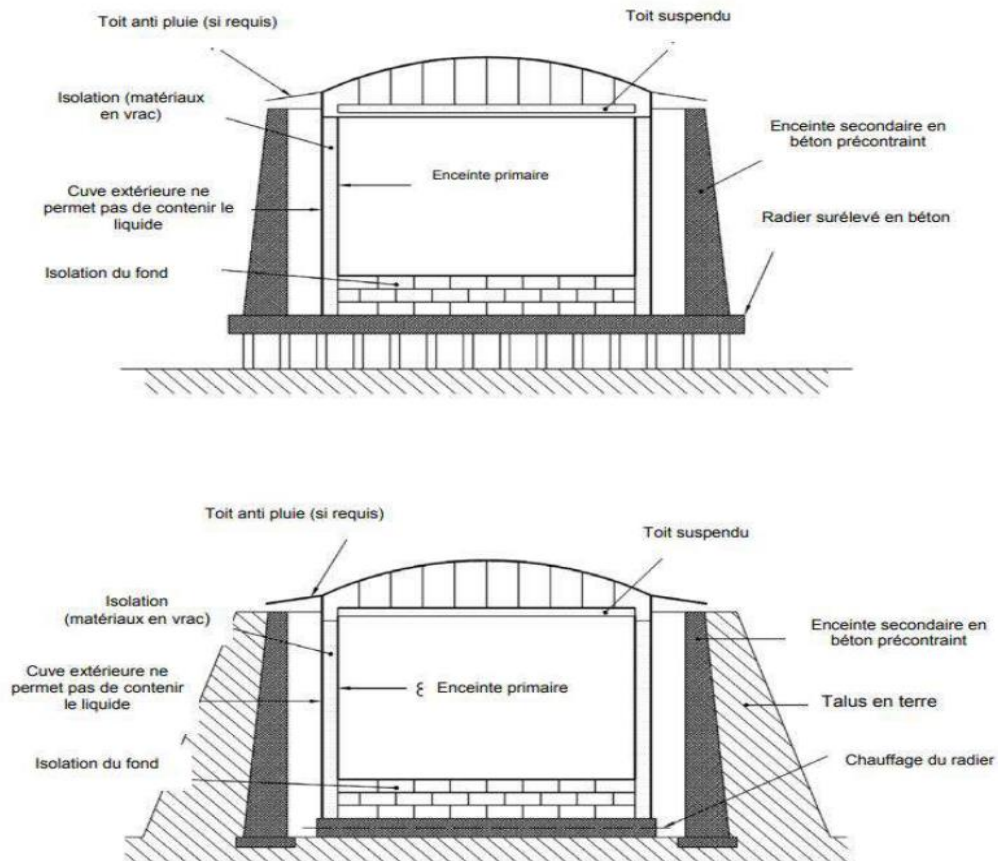
Les réservoirs à double intégrité (avec double confinement) sont constitués de (Figure II.2)

Une enceinte primaire autoporteuse en acier spécial (cryogénique - 9% Nickel) qui peut contenir le liquide réfrigéré dans des conditions normales de fonctionnement (voir le réservoir à simple intégrité décrit dans le paragraphe précédent), et qui comprend une cuve interne, une isolation et une enveloppe externe.

Au tour de ce réservoir, il y a une enceinte secondaire (structure supplémentaire) composée d'un talus ou d'une cuve en matériaux résistants aux conditions cryogéniques (béton, acier cryogénique), conçue pour retenir tout le liquide contenu dans la cuve principale en cas de fuites, et située à proximité de la cuve principale.

La cuve supplémentaire est de type à toit ouvert, ce qui signifie qu'elle ne peut pas retenir les vapeurs émises par le produit. La distance entre les cuves principales et secondaires peut varier.

Il convient de souligner que les récipients à double intégrité ne disposent pas d'une cuvette de rétention supplémentaire autour de la cuve extérieure, car cette fonction est remplie par l'enceinte adjacente. De cette façon, la zone d'effets thermiques est nettement diminuée.



FigureII.2 : Réservoirs à double intégrité

Le réservoir principal et sa double enceinte sont installés sur un radier surélevé et sur des pieux, tandis que le deuxième réservoir est construit sur une dalle en béton chauffée à même le sol.

Les bénéfices de ces réservoirs comprennent :

- La nouvelle structure extérieure est en mesure de retenir le liquide cryogénique issu d'une fuite de la cuve interne,

- La diminution de l'emprise au sol des zones de rétention autour des réservoirs. De cette manière, la surface de l'épandage est considérablement réduite, ce qui limite les conséquences d'un incendie (rayonnements thermiques plus faibles).

Les désavantages sont :

- Le coût du réservoir en lui-même est considérablement plus élevé que la méthode précédente (réservoir à simple intégrité).
- La zone de stockage du liquide autour du réservoir est élaborée à l'air libre, ce qui empêche la présence de vapeurs de GNL.

4.3. Stockage aérien à « Intégrité Totale »

Dans la troisième évolution, une cuve externe a été ajoutée au réservoir lui-même, qui peut être utilisée pour protéger le contenu de la cuve interne contre une agression extérieure, contenir le volume de GNL stocké, assurer une étanchéité pour les liquides et confiner les vapeurs de GNL. Les réservoirs à intégrité totale sont ceux-ci.

Le réservoir à intégrité totale a connu une évolution majeure en intégrant une enceinte en béton armé précontraint, directement liée et construite sur la base du réservoir, entourée d'un dôme d'acier et de béton armé. Ces réservoirs sont constitués de (Figure II.3) :

- Une enceinte primaire autoportante en acier spécial (cryogénique - 9% Nickel) qui peut contenir le liquide réfrigéré dans des conditions normales de fonctionnement.
- Une isolation similaire à celle des technologies précédentes,
- Une enceinte secondaire autoportante en béton armé précontraint équipée d'un dôme hémisphérique qui peut accomplir les fonctions suivantes :

En service habituel :

- Recueillir les vapeurs émises du réservoir et préserver l'isolation de la cuve principale,
- Prévenir la diminution de la capacité de confinement suite à un événement imprévu causé par une agression extérieure (impact, incendie...).

Lorsqu'il y a une détérioration du fonctionnement (comme une fuite de l'enceinte primaire), il est nécessaire de :

- Retenir l'intégralité du liquide réfrigéré,

- Contrôler l'évacuation de la vapeur issue de cette fuite, sans que cela ne perturbe la capacité structurelle contenant la vapeur.

La mise à l'air libre des vapeurs est autorisée mais elle doit être contrôlée (système de décharge).

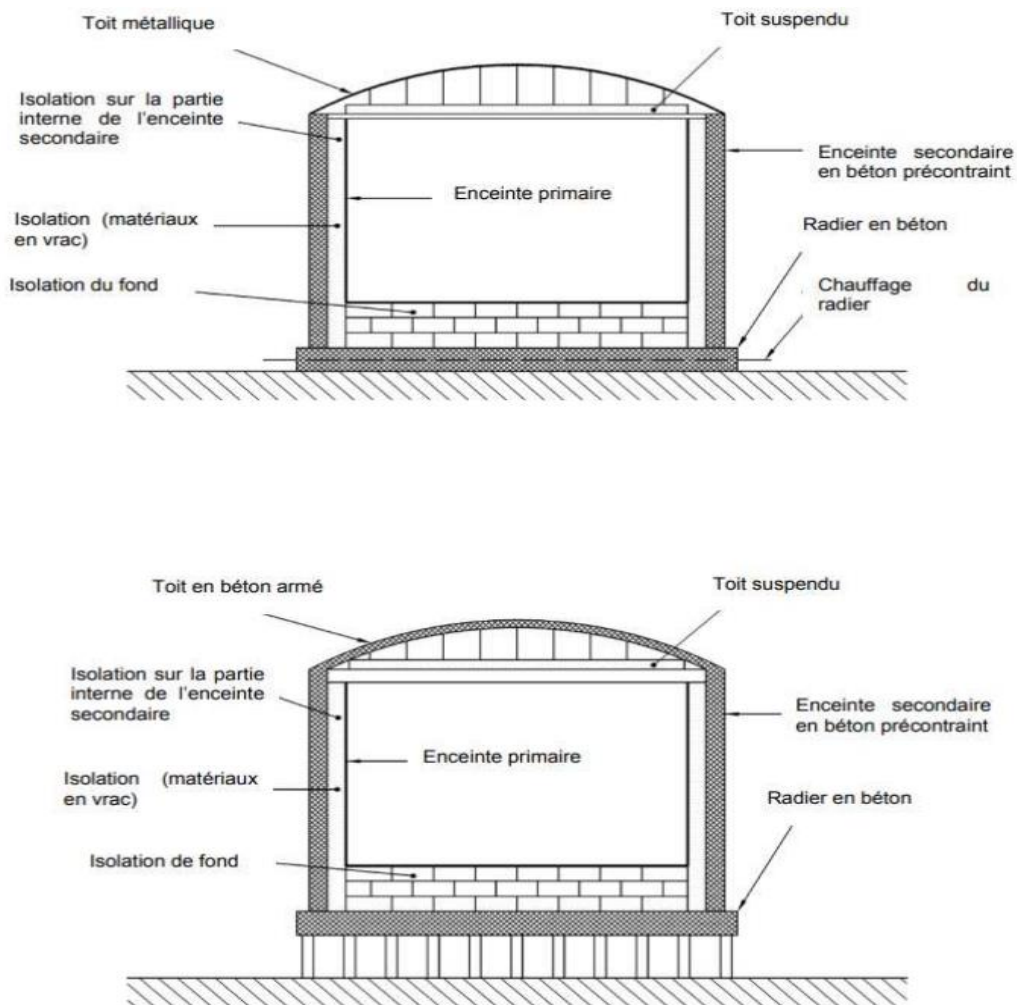


Figure II.3 : Réservoirs à intégrité totale

Ce genre de réservoir présente plusieurs avantages :

L'utilisation d'une enceinte secondaire entièrement en béton précontraint accroît la sécurité en isolant le réservoir des agressions extérieures accidentelles (chute d'objet, effet de souffle, feu adjacent...),

- La présence d'un toit en béton armé permet d'élargir la plage de fonctionnement (pression relative de conception 290 mbarg contre 190 mbarg pour un toit métallique). Cela élimine l'inconvénient des deux technologies de réservoirs précédentes.

Aujourd'hui, ces réservoirs à intégrité totale sont la technique la plus avancée en matière de conception et de fonctionnement. Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux technologies précédentes sont l'amélioration de la protection du contenu du réservoir contre les agressions extérieures (incendie, impact...) et la diminution des effets thermiques dans le cas où cela se produit.

4.4. Stockage aérien à « membrane »

Contrairement à l'intégrité totale du réservoir, le réservoir à membrane (Figure II.4) repose sur la distinction entre les fonctions structurelles et d'étanchéité. Cette version découle des méthodes de construction navale.

Les réservoirs sont principalement constitués de :

- Une structure externe entièrement en béton avec un toit en acier à son sommet (sous le dôme en béton) (conception similaire à celle d'un réservoir à intégrité totale).
- Une protection contre l'humidité qui se manifeste par un revêtement en époxy afin d'éviter que l'eau ne pénètre dans l'isolation (sous azote).
- Une isolation composée de panneaux sandwich : les couches supérieure et inférieure sont en contreplaqué, tandis que l'âme est composée de panneaux rigides en mousse de polyuréthane ou PVC.
- Un revêtement en inox ondulé est accroché aux panneaux d'isolation et au fond du réservoir. On soude la membrane afin de créer un revêtement interne qui est imperméable aux liquides et aux gaz (confinement interne).
- Il est nécessaire de transférer toutes les charges hydrostatiques et les pressions exercées sur la membrane, par le biais de l'isolation support, à la cuve en béton.
- Il est nécessaire de retenir les vapeurs dans le dôme du réservoir, qui peut être utilisé pour créer une structure composite similaire ou pour créer une toiture "traditionnelle" avec un toit bombé étanche aux gaz et une isolation sur un toit suspendu.

La fonction d'étanchéité au liquide et à la vapeur est effectuée de la manière suivante en service normal :

- Étanchéité liquide grâce à la membrane en acier inoxydable,
- Étanchéité vapeur grâce à la membrane en acier inoxydable et au toit hémisphérique en acier.

En cas de fuite de membrane, l'enceinte en béton :

- Englobera l'intégralité du liquide réfrigéré,
- Gèrera l'évacuation de la vapeur issue de cette fuite, sans que cela ne perturbe la capacité structurelle du contenant de la vapeur.

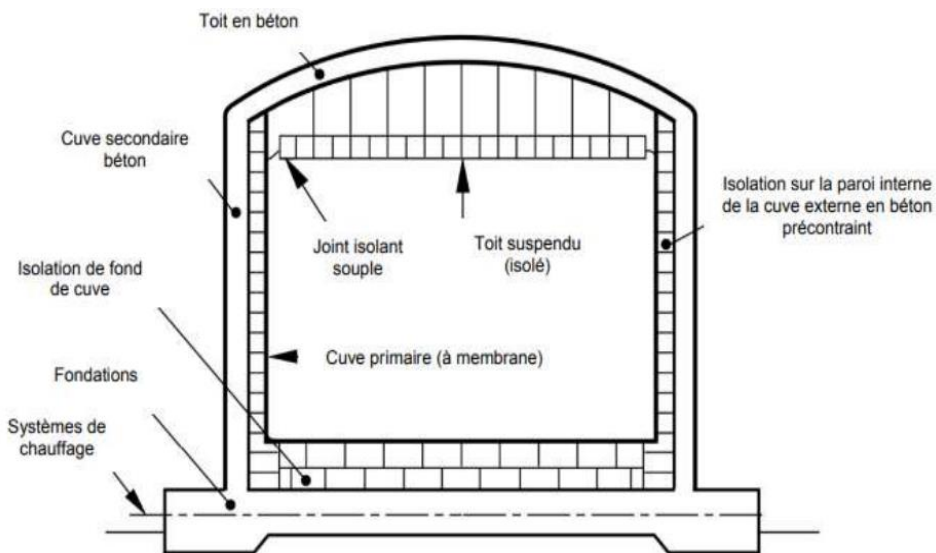


Figure II.4: Réservoir à membrane

Ce type de réservoir présente plusieurs avantages :

- La qualité de protection du contenu du réservoir est équivalente à celle du réservoir à intégrité totale,
- Le concept de membrane est spécialement conçu pour l'utilisation en navire et donc pour des contraintes (en fatigue) extrêmement élevées.

Cette méthode s'est révélée être la plus avantageuse en termes de coût et de temps de construction pour des réservoirs de GNL de grande taille.

4.5. Stockage semi-enterrés et enterrés à membrane

Au début des années 1970, Tokyo Gaz Engineering (TGE) a développé cette conception pour les réservoirs enterrés, puis elle a été reprise par d'autres industries gazières japonaises.

Elle associe deux méthodes : la membrane (développée à partir d'une technologie Technigaz) qui a déjà été exposée dans le paragraphe précédent et la méthode d'une cuve en béton semi-enterrée.

Les trois principales causes de cette prédominance des réservoirs technologiques ont été liées à l'environnement industriel qui règne dans le pays :

- La limitation des espaces disponibles,
- Proximité des villes avec les sites industriels,
- Le risque de séisme.

Étant donné les deux premières circonstances, il a été très difficile de construire des réservoirs à l'intérieur de cuvettes de rétention de grandes dimensions. Par ailleurs grâce à cette technologie de réservoir, peu importe l'intensité du séisme, le liquide ne sera pas déversé sur le sol dès lors que le niveau de liquide est inférieur au niveau du sol.

Le dispositif de confinement est très proche de celui décrit ci-dessus :

- Une membrane composée de tôles ondulées en acier inoxydable soudées entre elles.
- Des panneaux d'isolation en mousse de polyuréthane,
- Un toit suspendu à coupole en acier carbone.
- Un bâtiment en béton (comme déjà évoqué).

Il est important de souligner que ces réservoirs sont édifiés dans des régions où le sol est mauvais et/ou où l'eau souterraine est présente. La présence d'eau va créer une pression hydrostatique importante sur la structure. Ainsi, afin de réaliser la construction du réservoir, il est essentiel d'assécher la zone où il est implanté (par exemple : la paroi moulée de la figure II.5). Par ailleurs, la halle de fond a une épaisseur adéquate.

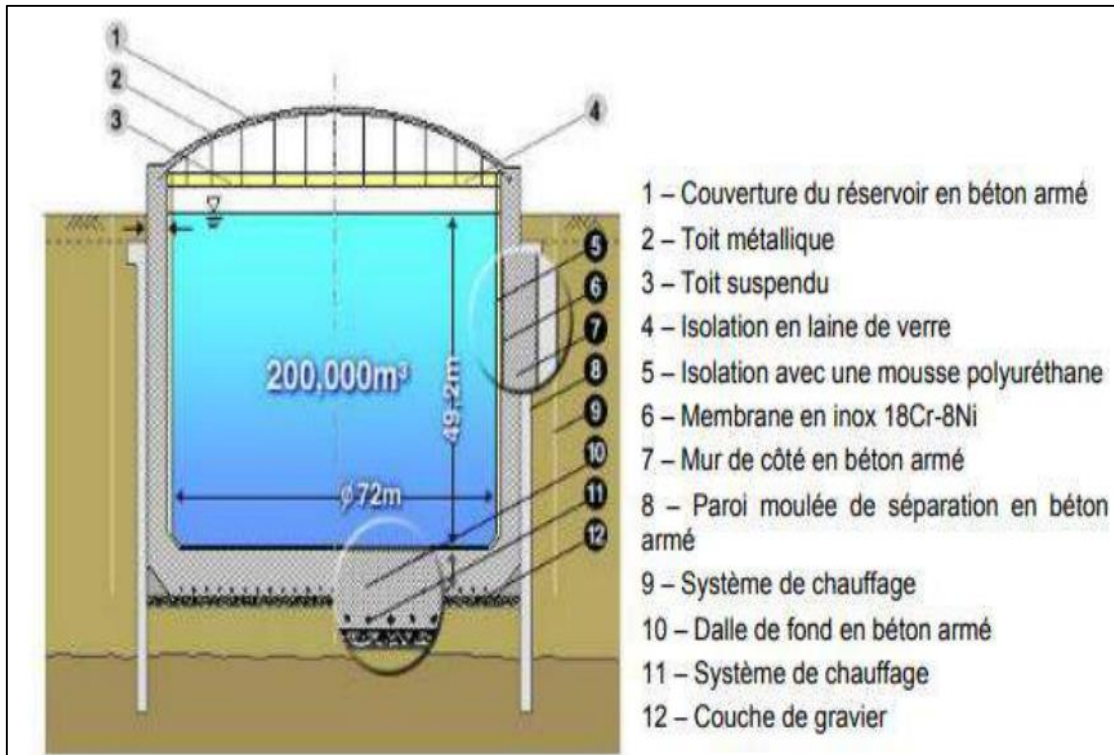


Figure II.5: Réservoir à membrane semi-enterré

Ces réservoirs présentent plusieurs avantages :

- Ils permettent de diminuer les distances de sécurité entre eux,
- Cette technologie ne requiert pas de zone de stockage et le scénario d'incendie à prendre en compte se limite au toit du réservoir.

Les principales faiblesses de cette technologie seraient les suivantes :

- Sur son toit en métal sans dôme en béton. Pour certains projets plus récents, ce point faible a été corrigé.
- La structure de ces réservoirs est mixte, car la structure en béton n'est pas facilement contrôlable visuellement après sa construction. Il est nécessaire d'installer des instruments de contrôle pendant la construction, tels que des détecteurs ultrasoniques.

4.6. Autres technologies : réservoirs en fosse " in pit tank "

Les technologies aériennes sont similaires aux réservoirs semi-enterrés ou enterrés, mais dans une fosse.

Les réservoirs à double intégrité (voire triple) sont des réservoirs où le mur du second confinement est remplacé par le sol. Le réservoir peut être placé dans une fosse en béton (Figure II.6).

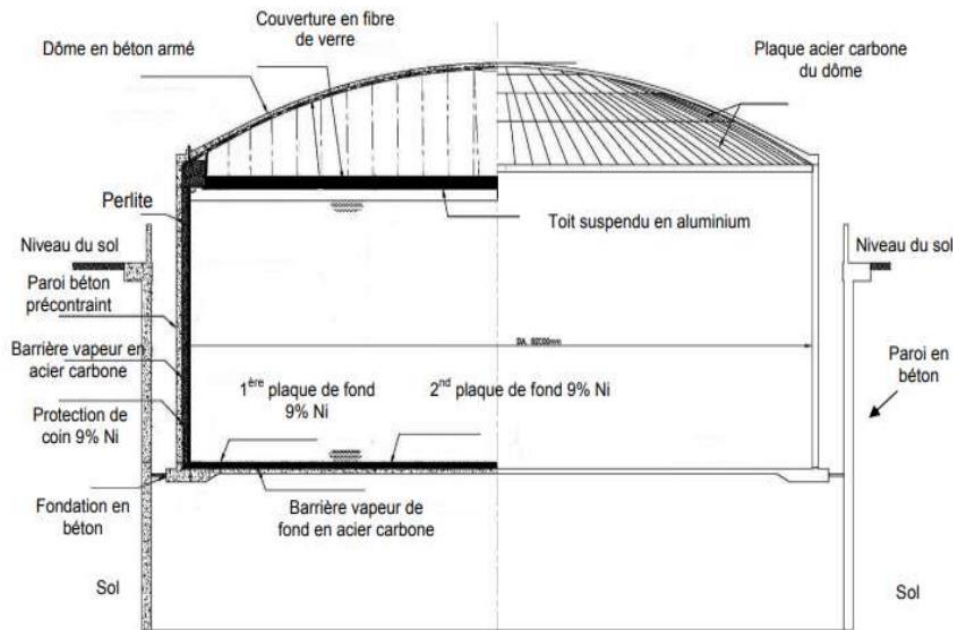


Figure II.6 : Schéma du réservoir en fosse

La Figure II.6 : présente une variante la technologie des réservoirs semi-enterrés en remplacement de la paroi béton, c'est le sol et la peau protectrice qui jouent le rôle d'enceinte secondaire.

Les avantages de ce type de réservoir sont :

- Similaires à ceux des réservoirs à intégrité totale,
- Un impact visuel moindre.

Le principal point faible réside dans la difficulté à contrôler l'espace annulaire pour les infiltrations d'eau.

5. Différent type de réservoirs de stockage

Différents types de réservoirs ont été édifiés à travers le monde ; ils se distinguent en fonction de leur position par rapport au sol et de leur entourage ou non d'une cuvette de stockage.

À l'heure actuelle, on peut classer les réservoirs existants en quatre catégories :

5.1. Réservoir aérien à double enveloppe métallique :

Les réservoirs aériens à parois métalliques doubles sont les plus courants et les plus couramment utilisés pour le stockage du GNL.

L'emplacement de ces réservoirs n'est pas déterminé par les conditions géologiques du site et leur système d'isolation thermique est prévisible pour n'importe quel taux d'évaporation pratique. En utilisant les techniques et les matériaux utilisés dans l'industrie cryogénique pour le pare-avant.

Le réservoir est composé de deux cuves, l'une contenant l'autre, et l'espace entre les deux est couvert de calorifuges (isolation).

La cuve interne (qui peut varier en fonction des méthodes de fabrication) est une membrane mince en métal qui possède les caractéristiques nécessaires pour recevoir le GNL. On utilise fréquemment des alliages d'aluminium et d'acier nickelé. Ce réservoir est construit à partir d'un matériau isolant, solide, qui transfère les charges hydrostatiques à une dalle en béton qui supporte l'ensemble. Cette cuve possède soit un toit autoportant, soit un voile métallique suspendu à la charpente pour le toit.

Une cuve en acier au carbone extérieure qui protège les matériaux isolants des conditions météorologiques et qui peut supporter les surcharges climatiques.

L'espace entre les cuves est rempli par des matériaux isolants tels que la perlite, la laine de verre et les matières plastiques expansées. Ce lieu est conservé dans une atmosphère de gaz inerte afin d'éviter toute altération.

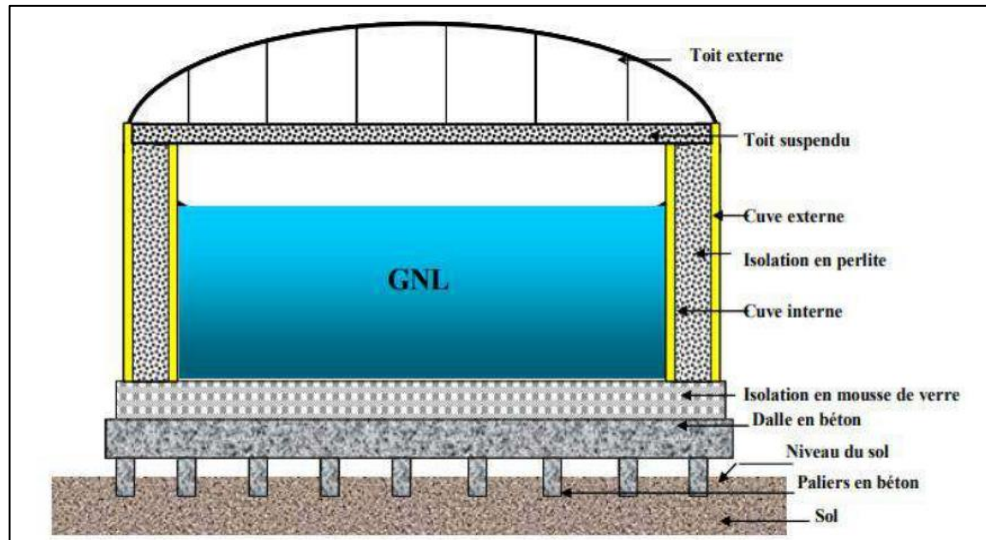


Figure II.7 : Réservoir aérien à double enveloppe métallique

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 (mousse glass), qui sont incombustibles, étanches à l'eau et résistants à l'eau.

5.2. Réservoir en béton précontraint aérien

Dans les années soixante, les États-Unis ont étudié et testé la technique des réservoirs en béton précontraint pour les liquides cryogéniques. Le premier réservoir a été conçu pour contenir de l'oxygène liquide.

Les réservoirs fabriqués selon la méthode Pré charge sont équipés d'une cuve intérieure composée de panneaux préfabriqués en béton précontraint. On recouvre l'extérieur de ces panneaux d'une barrière d'étanchéité en acier au carbone.

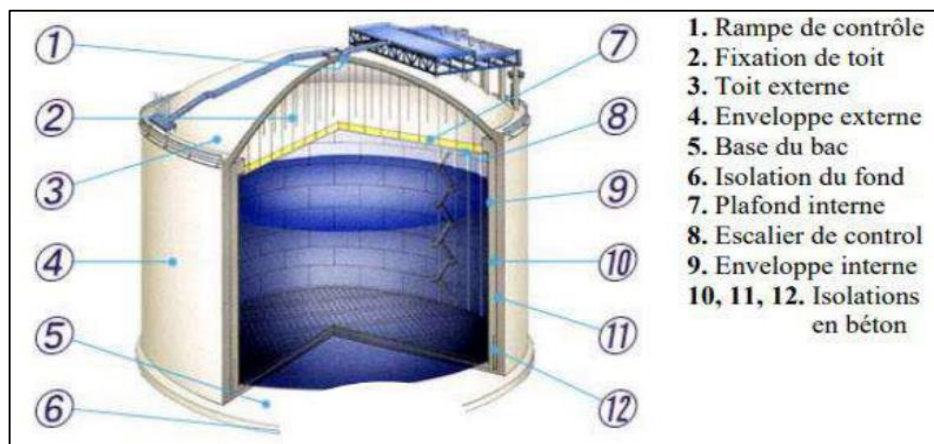


Figure II.8 : Réservoir aérien en béton précontraint

5.3. Réservoir en béton moulé dans le sol

IHI au Japon a conçu et construit le premier réservoir en béton moulé dans le sol à l'échelle mondiale, avec une capacité de 10000 m³. Il se compose de parois en béton moulé, enveloppées d'une isolation en polyuréthane, tandis que la membrane en contact avec le GNL est en acier inoxydable gaufré. Une couche de béton précontraint constitue le fond du bac de stockage, tandis que la toiture est en charpente métallique.

5.4. Réservoir en terre gelée

La Camel à Arzew est le seul réservoir en terre gelée encore en service, construit vers 1964, avec une capacité de stockage d'environ 38000m³.

La construction d'un tel réservoir repose principalement sur la qualité du sol, qui doit être supérieure à 30 % d'humidité. 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 assurera ensuite une isolation efficace et naïve.

Aujourd'hui, cette méthode a été rejetée car le taux d'évaporation dans ces bacs de stockage est très élevé et dépasse les normes établies par les fabricants.

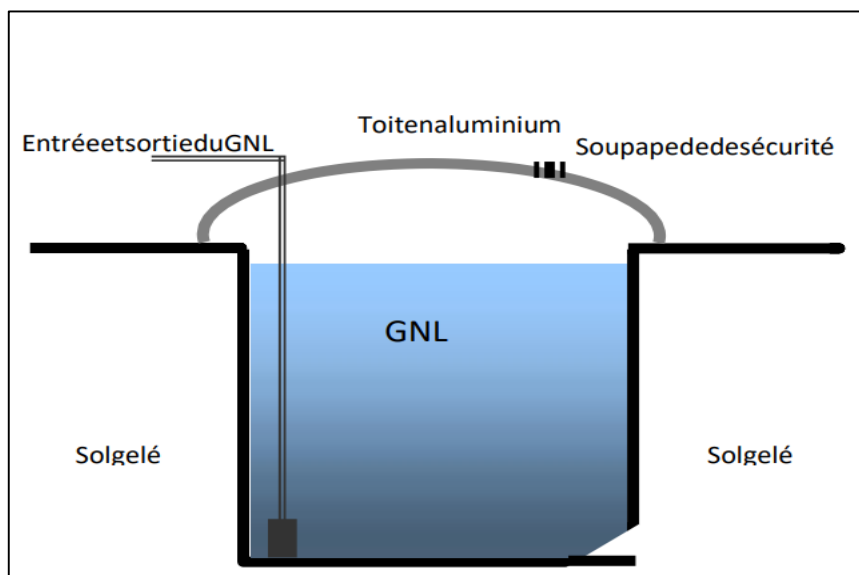


Figure II.9 : réservoir en terre gelée

6. Pompes de GNL équipant les réservoirs

Les réservoirs à double intégrité de dernière génération sont munis de pompes immergées, appelées « in-tank pumps ».

Effectivement, les codes recommandent vivement de ne pas installer de pénétrations au travers de la paroi et/ou en dessous du niveau de liquide, afin de réduire les risques de fuites liés au piquage sur les parois latérales. Les entrées sont principalement effectuées par le toit et les pompes sont alors enfouies au fond du bac.

Les pompes à l'intérieur du réservoir fonctionnent à une pression faible (environ 20 barg) et sont constituées d'une pompe et d'un moteur immergés dans le GNL. On installe les pompes dans une colonne (puit de pompe) qui se déplace jusqu'au dôme du réservoir. Les moteurs sont alimentés électriquement à basse tension grâce à des câbles. [33]

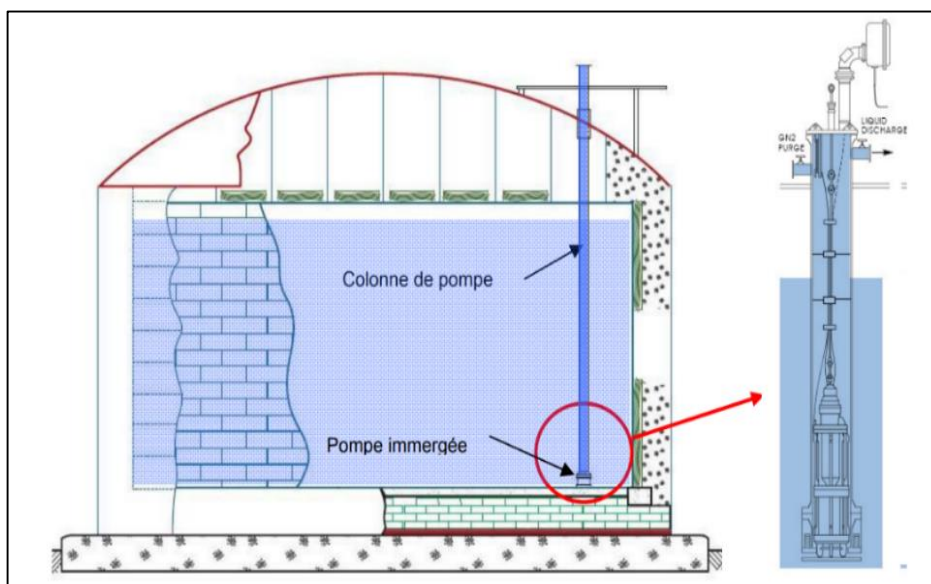


Figure II.10 : Pompes immergées basse pression dans les réservoirs de stockage

Les pompes immergées sont utilisées dans les terminaux d'exportation (usines de liquéfaction) pour décharger rapidement le bac vers un méthanier à des débits élevés, d'environ 2 000 m³/h.

Les pompes immergées du réservoir sont utilisées dans les terminaux d'importation (terminaux de gazéification) pour décharger le bac de manière quasi-continue vers les installations de regazéification. Les pompes fonctionnent à un débit beaucoup plus faible, d'environ 200 à 500 m³/h.

7. Systèmes de recompression de gaz et réseau torches/événements

Comme mentionné précédemment, le GNL est conservé dans les réservoirs sous sa forme liquéfiée, à une température de -162°C . Une petite quantité de GNL s'évapore en permanence dans le réservoir (« Boil Off Gas »). La principale cause de cette évaporation est l'apport de chaleur externe et/ou les variations de niveaux de liquide. De cette façon, l'évaporation peut entraîner une hausse de la pression à l'intérieur de la cuve. [34]

Le schéma ci-dessous illustre les diverses mesures de protection d'un réservoir contre le risque de surpression en utilisant :

❖ **Collecte du « Boil-Off Gas » - État normal (indiqué sur le schéma par les flèches bleues).**

Pour maintenir la pression interne dans les limites de conception, des dispositifs de reprise sont mis en place pour recueillir les évaporations causées par les transferts thermiques et les flashes lors du remplissage des réservoirs ou du chargement des méthaniers.

Les flèches bleues illustrent ce circuit dans la Figure II.11. Un compresseur spécial est utilisé pour transporter le gaz d'évaporation, qui le récupère à une température basse et à une pression proche de la pression atmosphérique, puis le re-comprime dans les conditions nécessaires.

Dans notre exemple, ce système est réalisé en respectant une valeur seuil de pression opératoire de 260 mbarg (voir Figure II.11).

Si un équipement du système BOG est indisponible, la pression peut augmenter et dépasser cette première valeur.

❖ **Évacuation en situation d'urgence (illustrée sur le schéma par les flèches orange)**

Si le système de « Boil-Off Gas » rencontre un souci, le gaz d'évaporation supplémentaire sera évacué par une vanne de régulation de pression (PCV) vers la torche afin d'être brûlé.

Dans certains projets, le réseau de collecte peut être relié directement à la torche à la sortie des soupapes (PRV). Il est possible de le faire en tant que deuxième niveau de protection en cas de dépassement d'un nouveau seuil de pression, celui de 265 mbarg pour notre exemple.

Les flèches rouges représentent le secours ultime sur le schéma.

En cas de pression élevée qui ne peut pas être contrôlée au dernier seuil de protection (290 mbarg), le rejet de gaz d'évaporation se produit directement.

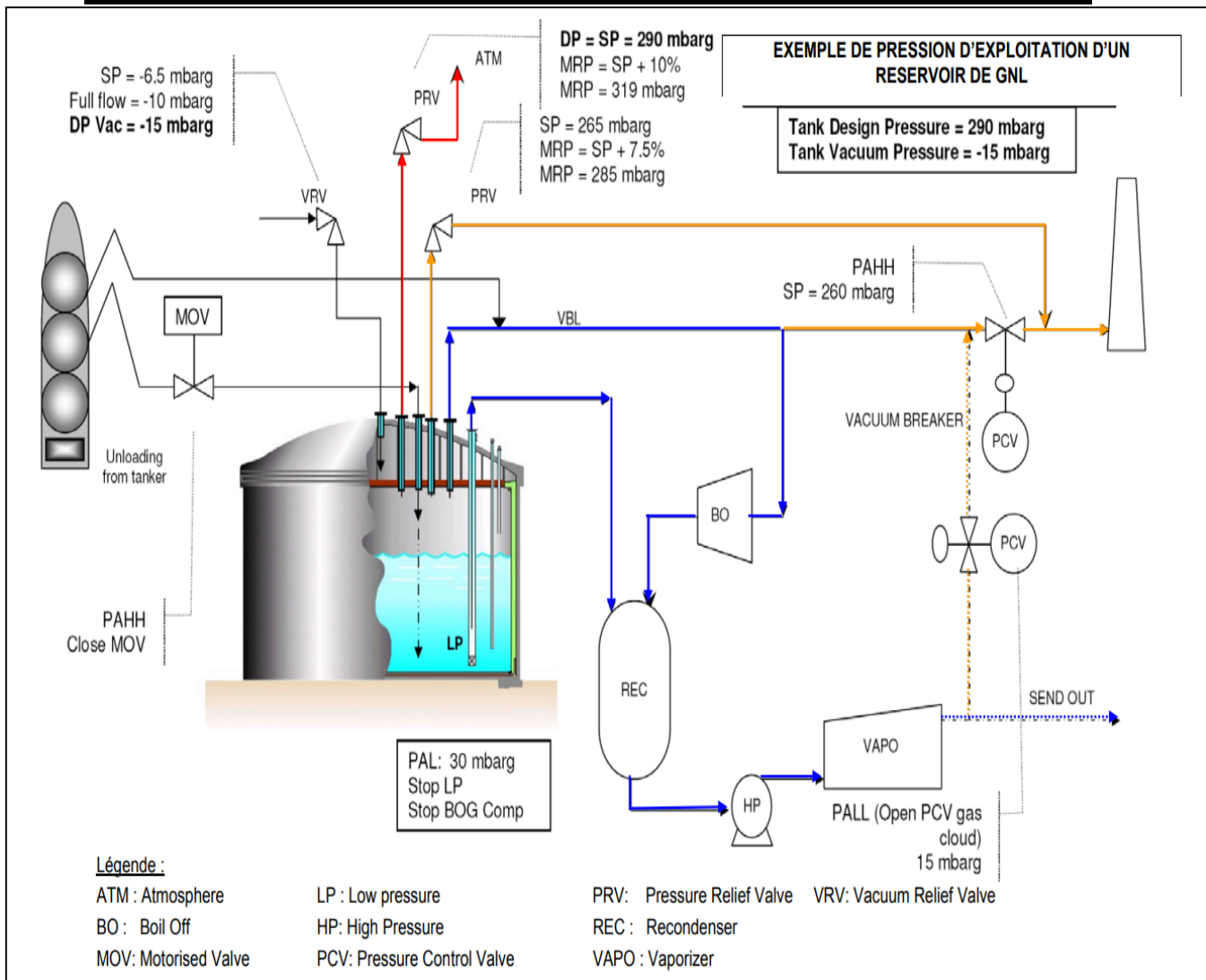


Figure II.11 : Exemple de système de recompression BOG et de torches/événets

8. Les problèmes physiques du stockage du GNL [35]

8.1. Les problèmes mécaniques du stockage

En termes "d'analyse de la vapeur", les diverses fonctions d'ordre mécanique que doit assurer un réservoir, à savoir :

- Contenir le produit (problème d'étanchéité),
- Supporter son poids (problème de fondations),
- Encaisser les efforts hydrostatiques du liquide : c'est là que le problème mécanique rejoint le problème thermique car les matériaux utilisés doivent être compatibles avec la température de fonctionnement ;

- Supporter la pression du gaz surmontant le liquide, cette pression exerce sur le toit une force qui tend à soulever l'enveloppe externe du réservoir (problème d'ancrage, condensation des vapeurs) ;
- Résister aux éléments extérieurs, par exemple la poussée du vent et le poids de la neige pour les réservoirs aériens ou bien la poussée d'Archimède pour les réservoirs enterrés (problème d'ancrage) ;
- Résister aux événements exceptionnels (séismes, chutes d'objets volants, projectiles...).

8.2. Le problème thermique du stockage

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

- Le rayonnement, proportionnel à la puissance quatre de la température absolue, ne joue qu'un rôle négligeable dans les réservoirs moyens et grands. Il ne devient notable que pour des réservoirs spéciaux de très petite taille,
- La convection ne joue qu'un faible rôle si l'on prend la précaution d'éviter les mouvements gazeux d'ensemble au sein de l'espace calorifugé (suppression 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. Critères de choix des matériaux isolants

Les critères de choix des matériaux isolants peuvent être regroupés en 5 catégories : Les critères physiques, mécaniques, de sécurité, de mise en œuvre, et économiques. [34]

9.1. Critères physiques

- **Le coefficient de conductivité thermique**

Le coefficient de conductivité thermique caractérise la propriété d'un matériau à conduire la chaleur satisfaisant la loi énoncée par Fourier.

Les isolants utilisés en cryogénie ont généralement un coefficient de conductivité thermique inférieur à 0,050 W/m.K.

- **La masse volumique**

C'est le critère le plus facile pour reconnaître sans essais longs et coûteux à quelle classe appartient le produit. Un bon isolant doit être si possible léger afin de ne pas alourdir les structures sur lesquelles il est posé.

- **Imperméabilité à la vapeur d'eau**

Contrairement aux canalisations à vapeur, le GNL présente un froid à l'intérieur de la tuyauterie, ce qui entraîne la pénétration de l'humidité atmosphérique dans le calorifuge pour créer du givre ou de la glace. Cela oblige inévitablement à l'emploi d'un isolant imperméable.

- **Vieillessement**

En dehors de la pénétration d'humidité, certains isolants, par suite de modifications chimiques internes (réactions secondaires très lentes, migrations de constituants...) ou externes (modifications de structures ou l'effet des rayons ultraviolets du soleil par exemple) subissent des transformations qui altèrent leurs caractéristiques initiales d'isolation.

- **La chaleur spécifique**

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance donnée (soit à pression constante, soit à volume constant)

9.2. Critères mécaniques

- **La contraction thermique**

Si le matériau isolant et la structure sur laquelle il est appliqué ont des caractéristiques de contraction thermique différentes, le calorifuge doit comporter des joints de dilatation, dont le rôle consiste à compenser cette différence.

- **La résistance mécanique**

La résistance à la compression est la caractéristique essentielle qui doit être prise en considération pour les matériaux destinés à des utilisations isolantes des sols.

- **Les essais de traction**

Un matériau peut être classé selon la courbe brut de traction qui caractérise son comportement. Il est représenté par une droite lorsque le matériau est malléable ; et par une courbe subdivisée en trois zones (une zone de déformation élastique ; une zone de déformation plastique et une zone de restriction et de rupture) lorsque le matériau est ductile

- **La tenue aux chocs**

Ce critère concerne surtout le calorifuge des tuyauteries. Les usines de liquéfaction, sont installées en bord de mer dans des endroits soumis aux intempéries, ce qui ne favorise pas les travaux délicats sur le site. Un bon isolant de tuyauterie ne saurait donc être fragile.

9.3. Critères de sécurité

Pour des raisons évidentes, s'agissant d'installations gazières, il est indispensable que les isolants résistent au feu. Les normes internationales distinguent les matériaux en différentes classes suivant leurs performances ; la littérature indique que les isolants d'origine minérale sont ceux qui résistent le mieux au feu.

9.4. Critères de mise en œuvre

La mise en œuvre d'un isolant doit être facile à réaliser, mais aussi, facile à contrôler. Les points particuliers d'une installation comme par exemple les compensateurs, les vannes et les supports de tuyauterie exigent une attention particulière.

9.5. Critères économiques

Ils sont en quelque sorte la synthèse de tous les autres. Il est clair qu'on ne peut pas trouver un calorifuge qui possède toutes les qualités et en plus être bon marché. Il y a donc un choix économique à faire qui peut varier d'une installation à une autre.

10. Les différents types des isolants [34]

L'isolation thermique des vases ou réservoirs de stockage est d'autant plus importante que l'enthalpie de vaporisation des fluides cryogéniques est faible.

Ce problème de l'isolation est gouverné par la maîtrise des mécanismes de transfert de chaleur. Essentiel en cryogénie, il nécessite une analyse spécifique, on trouvera au tableau (II.1) quelques valeurs de conductivité thermique des gaz à la pression atmosphérique.

Cependant, les contraintes dues au froid, à la sécurité et aux performances nécessaires limitent l'application de certains matériaux.

La conductivité thermique du matériau étant un facteur prépondérant, nous avons classé sur la figure II.12 les différents groupes d'isolants en fonction de ce facteur.

Nature de gaz	Conductivité thermique [mW/ (m. K)]						
	273 K	200 K	150 K	100 K	60 K	20 K	5,4 K
Méthane	30,6	20	14	9 à 11	-	-	-
Argon	16,5	-	-	-	-	-	-
Oxygène	24,5	-	-	-	-	-	-
Azote	24	18	14	9,5	-	-	-
Néon	46	37	27,5	21,5	16	-	-
Hydrogène	168	128	98	66,5	42	15,5	-
Hélium	142,5	116	97	74,5	58	26	11

Tableau II.1 : Conductivité thermique de gaz cryogéniques à 1 bar

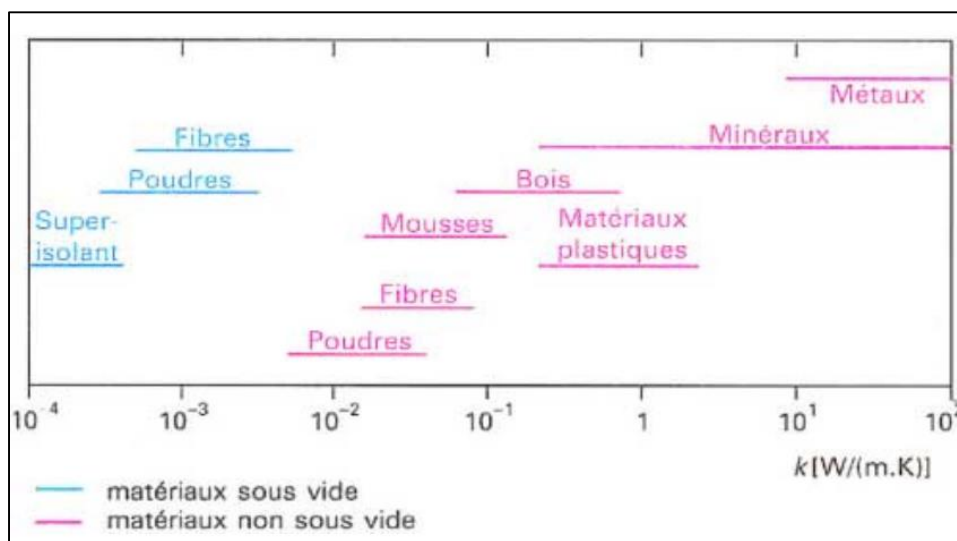


Figure II.12 : Classement des divers types de matériaux isolants en fonction de leur conductivité thermique à la température ambiante

Dans ce paragraphe nous nous limiterons aux isolants les plus utilisés dans les installations cryogéniques et plus particulièrement dans le domaine du gaz naturel liquéfié.

10.1. Les mousses

L'essor des mousses a été considérable depuis 1980. Elles sont régulièrement utilisées pour les gros stockages cryogéniques (azote, méthane, etc.) malgré une conductivité thermique relativement élevée.

Les mousses, en général à base de plastiques, se classent dans la catégorie des matériaux cellulaires ; elles présentent les avantages suivants : faible masse volumique, fabrication aisée, coût relativement bas. Elles peuvent parfois s'utiliser en structure autoportante.

- **Mousses de polystyrène**

Ces mousses existent sous forme d'éléments préfabriqués, et sont obtenues à partir de l'éthylène et du benzène. Bien qu'elles soient faciles à mettre en œuvre, elles sont peu utilisées en cryogénie car leurs propriétés thermiques ne sont pas excellentes et elles sont très perméables à la vapeur d'eau.

- **Mousses de polyuréthane :**

Ce sont des mousses très utilisées pour les entrepôts et transport frigorifique ainsi que pour le transport par citerne du gaz naturel et de l'éthylène liquide.

Ces mousses présentent les caractéristiques les plus intéressantes, dépassant tous les corps rigides de la même famille. Le polyuréthane peut être mis en œuvre sur le chantier (coulée in situ) ou en usine (préfabrication). Il est soit injecté directement sur la tuyauterie, soit usiné dans des blocs sous la forme de coquilles.

- **Mousses polyvinyliques :**

1. Le Klégécell (Kléber) :

Le produit expansé obtenu est à cellules fermées, donc moins sensible à la diffusion de vapeur d'eau. Le Klégécell sous ses différentes formes est avec les mousses de polyuréthanes une des mousses le plus utilisées en cryogénie ; en effet il entre dans l'isolation de la cuve de certains méthaniers, ainsi que le réservoir cryogénique de stockage de la fusée Ariane.

2. 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.

- **Mousses de verre :**

Ces mousses ont des qualités thermiques très moyennes. Elles sont utilisées sur les grosses unités de séparation d'air et sur la canalisation d'oxygène liquide au niveau de vannes.

10.2. Les poudres

Les poudres entrent fréquemment dans l'isolation thermique des fluides cryogéniques, tout particulièrement pour les réservoirs de taille moyenne type basse pression, dans les évaporateurs, ainsi que dans certaines lignes de transfert.

L'isolation par les poudres consiste à placer de fines particules de matériaux entre les parois aux températures différentes. Ces particules peuvent être des microsphères (la taille des particules varie de 100 à 200 microns) de plastiques, de carbone, de silicate de calcium, d'oxyde de fer...

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

- **La perlite :**

Il s'agit de minuscules sphères provenant d'une roche volcanique du type silicate (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). Elle est finement broyée et expansée, donc totalement incombustible. La perlite est peu coûteuse et elle peut être aisément mise en place. Malgré cela, elle présente deux inconvénients :

- Elle est très perméable aux vapeurs d'eau, ce qui nécessite l'utilisation d'adsorbant et une enveloppe à double parois ;
- Le nombre important des pores séparant les particules nécessite des tassements fréquents.

C'est la plus utilisée.

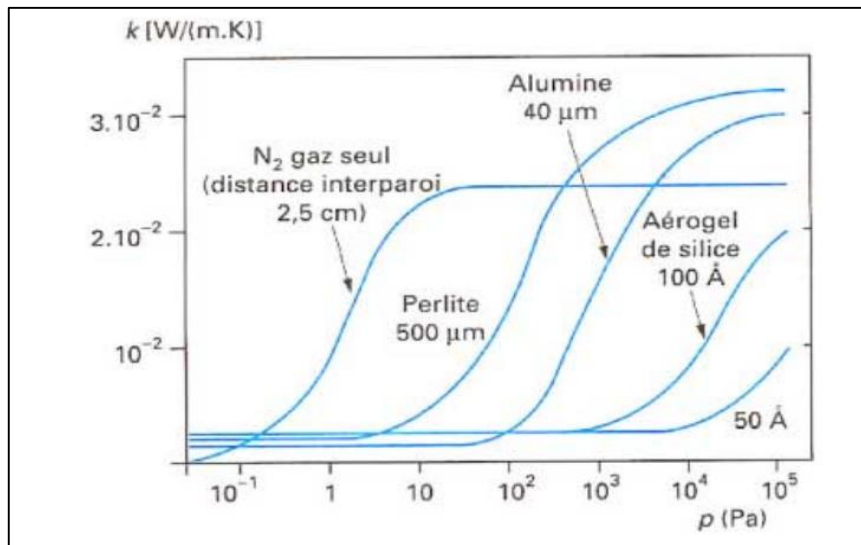


Figure II.13 : Conductivité thermique des poudres (Doc : J 3 601)

- **Le silica-aérogel :**

C'est un produit à base de silica de forte masse volumique, ce qui limite son utilisation au matériel fixe en particulier à la ligne de transfert de l'oxygène liquide et l'azote liquide. Ne demande pas la présence de l'adsorbant ce qui simplifie la conception.

- **Alumine activée :**

C'est une forte masse volumique de l'alumine limite son utilisation au matériel fixe et, en particulier, à quelques lignes de transfert d'oxygène et d'azote liquides. Sa faible aptitude au tassement évite les remplissages complémentaires et, du fait de son pouvoir adsorbant à basse température, l'alumine ne nécessite pas la présence d'adsorbant, ce qui simplifie la conception des lignes de transfert.

10.3. 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.

- **La fibre de verre :**

C'est un matériau fibreux, très léger, inodore, neutre vis-à-vis des autres matériaux. Son inconvénient réside dans sa trop faible résistance à l'écrasement.

10.4. La Super isolation

Ce sont des matériaux relativement récents puisque les premiers essais remontent aux années 60. Le nom de ce type d'isolation provient du fait qu'elle permet d'obtenir de très faibles valeurs de flux thermique échangé entre deux enceintes, entre lesquelles règne un fort gradient de température. Conduisant ainsi, à une réduction des échanges de chaleur par rayonnement sans augmentation des échanges par conduction solide et dans les gaz.

La super isolation peut être constituée de feuilles réfléchissantes (aluminium, cuivre), séparées par des feuilles isolantes (type Linde tel que le nylon), ou bien par des feuilles, présentant les caractéristiques d'être isolantes sur une face et réfléchissantes sur l'autre (mylar aluminisé).

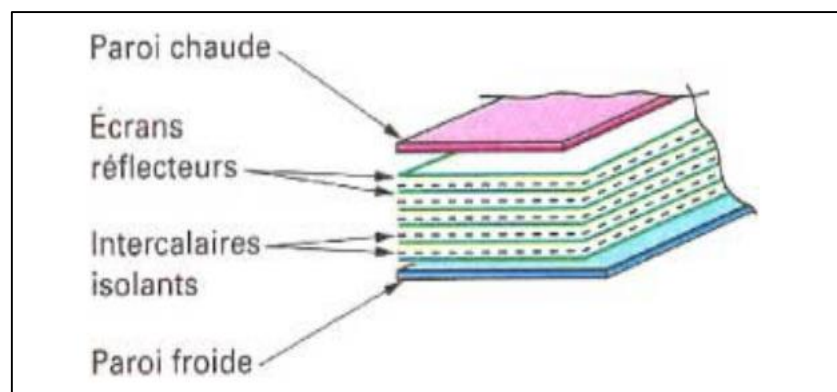


Figure II.14 : détails d'un super isolant

Les valeurs de conductivité thermique dépendent, d'une part, de la géométrie du réservoir et, d'autre part, de la procédure de mise en place de l'isolation sur le réservoir intérieur (bobinage couche par couche, bobinage en continu ou bobinage en bandelettes). Un autre point important à prendre en compte est la façon de traiter tous les « accidents » (piquages, supports, etc.) qui se présentent lors de la mise en place de l'isolation. En pratique, la conductivité thermique moyenne obtenue en fabrication varie de 0,06 à 0,2 mW/ (m · K)

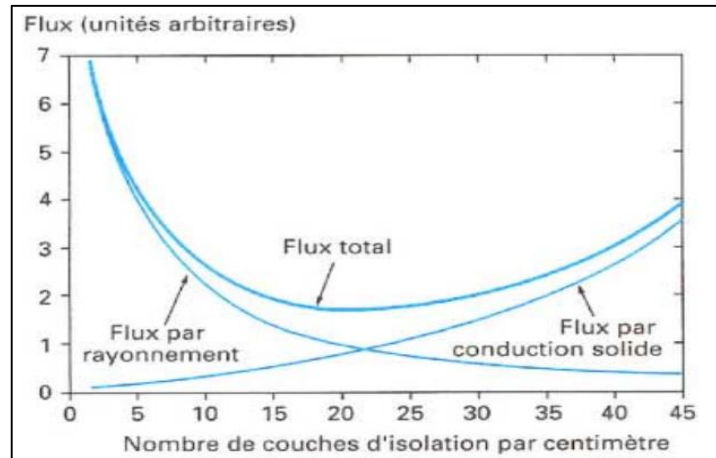


Figure II .15 : Flux thermique transmis dans un super isolant en fonction du nombre de couches par unité d'épaisseur

10.5. L'isolation par le vide

Le vide est généralement utilisé pour des petits cryostats de laboratoire, ainsi que pour les formes complexes. Le vide a pour rôle d'éliminer deux modes de transfert de chaleur (conduction dans les solides et convection). Pour la réduction du transfert de chaleur par rayonnement, le vide est souvent combiné avec des feuilles d'aluminium.

L'application la plus répandue pour ce type d'isolant est le cryopompage. Ce procédé consiste en une application qui permet d'obtenir des vides très poussé (de l'ordre de 10-12torr). Le cryopompage est réalisé par condensation (cryocondensation) et par adsorption (cryosorption) des molécules de gaz à pomper sur plusieurs surfaces portées aux basses températures.

*Chapitre 03 : Présentation du
complexe*

1. Présentation du complexe GL1/Z :

1.1. Localisation et configuration :

Le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL1Z relève de l'activité Aval et de la branche LQS (Liquéfaction) de l'entreprise SONATRACH

Situé à 7 km de la ville d'Arzew, le complexe GL1/Z se trouve au nord de Bethioua et au sud du port d'Arzew El-Djedid. Il s'étend sur une superficie de 72 hectares, le site s'étend sur une largeur (entre la route et la mer) d'environ 800 m et d'une longueur (le long du front de mer) d'environ 900 m. L'altitude moyenne est de 3 m. et se compose principalement de différentes zones, comme illustré dans la figure III.1. [36]

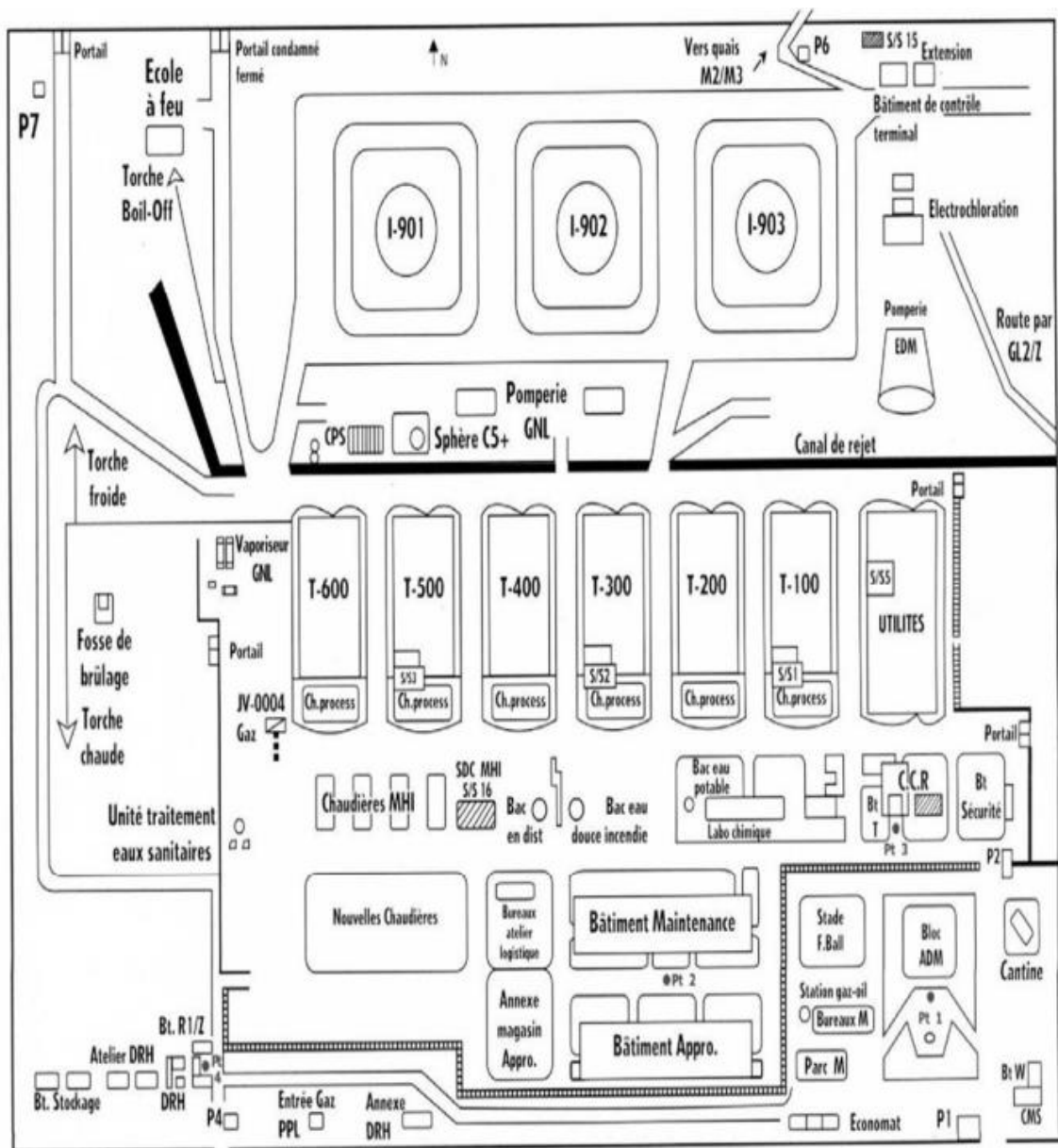


Figure III.1 : Plan de masse du complexe GL1/Z



Figure III.2 : le complexe GL1/Z

1.2. HISTORIQUE :

Aucune activité industrielle n'a été enregistrée sur le site avant la construction de GL1/Z. La date de démarrage des travaux de construction du complexe GL1/Z est 1973. La mise en production a débuté le 20 février 1978.

2. Carte d'identité de complexe

Le complexe de liquéfaction du gaz naturel GL1/Z de Béthioua occupe une place privilégiée dans l'économie nationale, Il est présenté comme suite :

Date du projet	13 juin 1973
Effectif	1000
Procédé	APCI (air production and chemical incorporated)
Superficie	72 Hectares
Nombre de trains	Six trains en parallèle
Capacité de stockage unitaire	55.000 m ³ /jrs
Capacité de chargement	3 bacs d'une capacité de 100000 m ³ de GNL
Production gazoline (C5+)	123000 tonnes /an
Rénovation	1993 - 1996
Début de production	Le 20 février 1978
Capacité de production GNL /An	17,5 Millions de m ³
Source d'approvisionnement	Gaz naturel de Hassi R'Mel
Prise d'eau de mer	6 X 35000 m ³ /heure

Tableau III.1 : Carte d'identité du complexe GL1/Z

3. Organisation :

Le complexe GL1/Z se divise en deux sous-directions, à savoir :

- Sous-direction de l'exploitation englobe :
 - Le département production.
 - Le département maintenance.
 - Le département des approvisionnements.

- Sous-direction du personnel comprend :
 - Le département des ressources humaines.
 - Le département des moyens généraux.
 - Le département du personnel.

Les départements liés directement avec les directions dites de structures de contrôles sont :

- Département technique.
- Département finance.
- Département sécurité.
- Département travaux neuf.

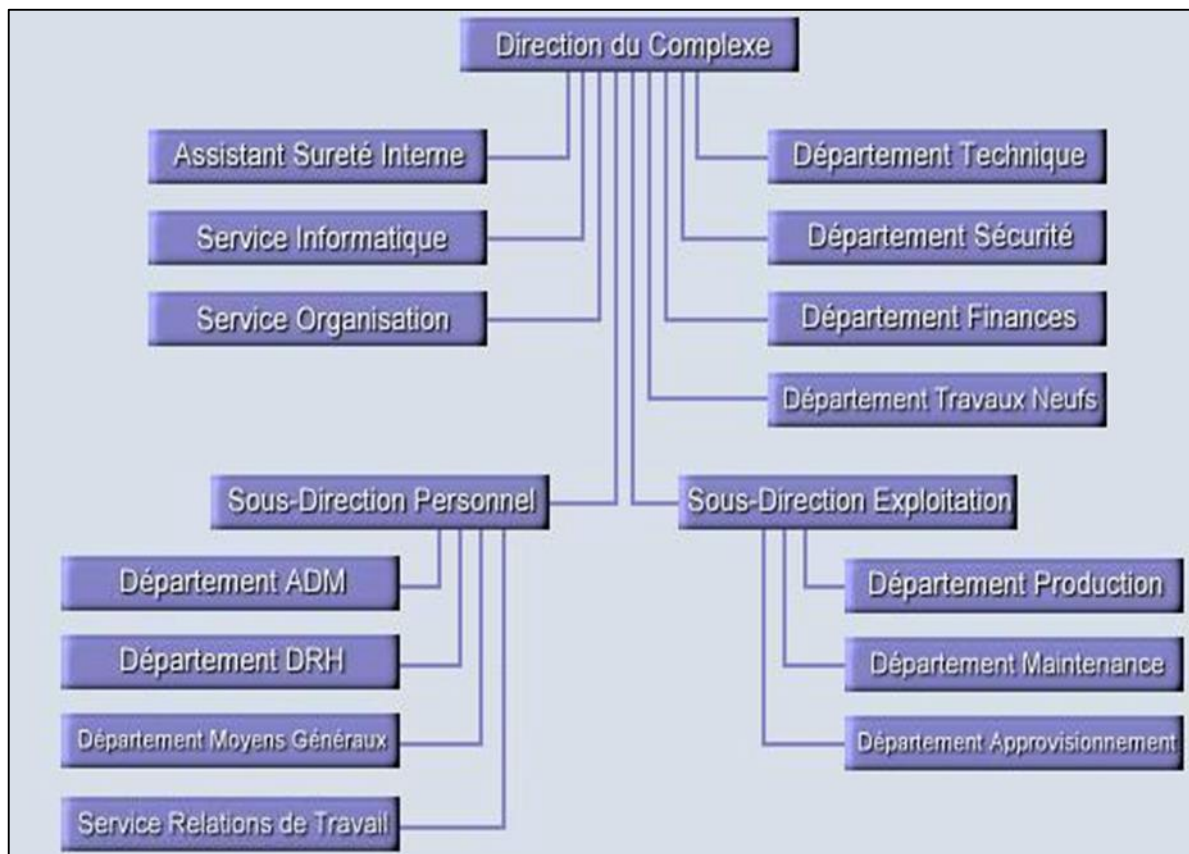


Figure III.3 : Organigramme Générale du Complexe GL1/Z

4. La zone de production

Est composée de six trains de liquéfaction qui sont identiques, à la fois dans leur design et leur fonctionnement. En effet, à première vue, les caractéristiques et les configurations sont identiques. D'une même conception industrielle, ils expliquent comment ils fonctionnent de manière autonome pour la liquéfaction du gaz naturel.

Le complexe traite 10,5.109 m³ de gaz naturel par an avec production de Gaz Naturel Liquéfié et Gazoline.

GNL : 17 563 Millions m³/an (contractuelle) 19 425 Millions m³/an (installée).

Gazoline : 123 000 Tonnes/an (contractuelle) 136 000 Tonnes/an (installée).

5. La zone de stockage

Est située en face des trains, à côté de la mer. Elle comprend trois bacs aériens de GNL d'une capacité de 100 000 m³ chacun et 1 sphère de gazoline de 3280 m³. Le complexe dispose également de deux postes de chargement pour des méthaniers de 50 000 m³ à 125 000 m³.

5.1. La salle de contrôle LCR :

Est conçue pour superviser les opérations de stockage de GNL, de chargement des méthaniers et de transfert de gazoline. Le système de contrôle à distance (DCS) est utilisé pour superviser les paramètres de fonctionnement des installations de la zone de stockage et d'expédition, ce qui en fait le centre principal de régulation des paramètres suivants :

- Indicateur de température, de pression et de niveau pour chaque réservoir
- Indicateur de pression de la canalisation de transfert de GNL
- Enregistreurs de température et de pression pour les systèmes de retour de vapeur de GNL
- Interruption immédiate des opérations de chargement
- Signaux et alarmes
- Signal de fin de course des bras de chargement.
- L'affichage de tous ces paramètres sur le tableau est équipé des :
 - Des commandes et des boutons poussoirs d'arrêt manuels avec des lampes de signalisation pour les pompes de chargement de GNL et les pompes de transfert
 - Des lampes de signalisation pour les pompes de refroidissement
 - Des commandes manuelles et automatiques, avec des lampes de signalisation pour les vannes motorisées à régulation électrique
 - Un téléphone mobile pour communiquer directement avec le méthanier.

- Il y a des tableaux individuels sont prévus sur les équipements suivants :
- Réservoirs de stockage de GNL
- Pompes de chargement, de transfert et de circulation du GNL
- Soufflantes de vapeur.

5.2. Les équipements de la zone :

La zone stockage comporte des équipements principaux et des équipements annexes :

- 03 réservoirs de stockage de GNL de 100,000 m³ chaque un.
- Une sphère de stockage Gazoline de 30,000 m³.
- Une ligne de réception de GNL venant des trains de liquéfaction.
- Une ligne d'alimentation des pompes.
- Une ligne de gaz vapeur GNL relié au compresseur des gaz combustibles des trains et la torche boil-off.
- Une ligne de transfère de Gazoline.
- 05 pompes de chargements GNL.
- Une pompe de transfère de GNL.
- 02 pompes de maintien en froid de la ligne de chargement.
- Une pompe d'évacuation de GNL.
- 02 pompes de Transfer Gazoline.

5.2.1.Équipements annexes :

- Une ligne de gaz naturel GN
- Une ligne de contrôle de production de chaque train (ligne 8'')
- Une ligne de vapeur d'eau venant de la zone utilité
- Un réchauffeur de gaz de dégivrage.
- 02 pompes de puisard qui servent à évacuer les eaux d'infiltration de la fosse des pompes.

- Une sous-station électrique où se trouvent des appareils de contrôle électrique des équipements de la zone.
- 04 systèmes à poudre, 01 pour chaque BAC et 01 pour la fosse des pompes
- L'eau d'incendie
- Une ligne d'air instrument
- Une ligne d'azote
- Une torche spéciale pour la zone stockage chargement.
- Des détecteurs de GAZ et de FEUX installés au niveau de la zone des fausses des pompes GNL et au niveau des lignes de réception et de soutirage de chaque bac de stockage GNL.
- Un système d'arrosage des parois des bacs de stockage GNL.

6. Identification générale d'équipements annexes de la zone stockage :

6.1. Les lignes reliées au bac de stockage GNL :

- **Ligne de réception GNL :**

Les six trains de liquéfaction produisent du GNL qui est ensuite transporté à travers des pompes de produit vers un collecteur commun de 20". Une fois arrivé dans la zone de stockage, cette ligne est reliée à une ligne commune de réception de GNL de 24", qui sépare les trois lignes de 24" de remplissage par le bas de chaque bac de stockage.

Plusieurs lignes sont reliées à la ligne de réception de GNL 24", telles que le recyclage des pompes de mise en froid, connues sous le nom de pompe cool-down J-908 et J-910, le recyclage de la vanne PDV-80029, ainsi que la ligne de retour de GNL 4" de mise en froid du Quai au niveau de la vanne PDV-80117. De plus, la pompe de transfert J-907 est utilisée pour transférer le GNL d'un bac à un autre.

Le bac de 24" est équipé de trois vannes de sectionnement, dont deux manuelles et une motorisée, pour chaque ligne de remplissage.

- **La Ligne de test de performance 8" :**

Le bac 810-I-902 est connecté à la ligne de test de performance 8" provenant des trains de liquéfaction, afin de déterminer la capacité de production de chaque train. Cette ligne est reliée en aval de la JV 80015 à travers une vanne de sectionnement.

- **Ligne de soutirage :**

Chaque bac est équipé de quatre lignes de 24 pouces alimentant un court collecteur de 48 pouces, qui est relié par une ligne de 42 pouces. Cette ligne est équipée de deux vannes manuelles et d'une vanne motorisée, ce qui constitue le collecteur commun d'aspiration de toutes les pompes GNL, telles que les pompes de chargement, de maintien en froid, de transfert et de vidange J-924.

- **Ligne de vapeur GNL :**

Chaque bac de stockage contient une quantité de vapeur GNL qui circule dans les deux sens, à savoir sortie/entrée, à travers la ligne de 24". Le sens de la circulation de la vapeur GNL varie en fonction de la pression à l'intérieur du bac. Chaque ligne de 24 pouces est équipée d'une vanne de séparation pour une utilisation en cas de nécessité.

Les lignes 24'' de chaque bac sont tous reliées à la conduite 36'' de gaz à essence, cette même ligne reçoit également les lignes 24'' provenant des soufflantes (BLOWER 840-K-903 / K-904) et sont reliées à GL2/Z pour être connectées à une vanne de sectionnement 24''. Cette vanne est équipée d'un FT-800310 en amont pour transmettre le débit arrivant du navire, ainsi qu'un FT-800311-A et B.

La ligne 36'' est reliée à une ligne de 24'' qui est dirigée vers les compresseurs du gaz combustible. La ligne 36'' est réduite en 24'' en utilisant une vanne de garde d'isolements manuels, puis une vanne automatique de type PV-80025 qui dirige le surplus des vapeurs GNL vers la TORCHE BOIL OFF. Cette ligne est équipée d'un transmetteur de débit FT-800306. De plus, la ligne 36'' reçoit les vapeurs GNL par une conduite de 8'' qui regroupe tous les dégazages, la décharge des soupapes, les sorties de vapeur des purgeurs et des ballons flaches de 24''.

- **La ligne de vapeur GNL GL1Z/GL2Z :**

Se trouve entre le complexe GL1Z et GL2Z. En cas de besoin, cette ligne est équipée d'une vanne d'isolement et d'un transmetteur de débit FT-80312.

- **Ligne transmission GNL GL1Z/GL2Z :**

Il y a une ligne de transfert de GNL entre le complexe GL1/Z et GL2/Z. Cette ligne est utilisée à la fois pour transférer le GNL des bacs de GL1/Z vers GL2/Z et recevoir le GNL de GL2/Z arrivé au GL1/Z.

Il s'agit d'un tuyau de 30" équipé de deux vannes manuelles de 30", d'un By-pass et d'une soupape de sécurité.

Cette ligne est mise en place afin de garantir les différents modes de transfert GNL entre GL1/Z et GL2/Z :

- Le GNL doit être transféré des installations de GNL1 vers les bacs de GNL2.
 - Acheminer le GNL, issu des bacs de GNL1, vers les méthaniers attachés à la jetée de GNL2.
 - Le GNL doit être transféré des installations de GNL2 vers les bacs de GNL1.
 - Remplir les bacs de GNL2 avec du GNL, en utilisant des méthaniers attachés à la jetée de GNL1.
 - Le GNL doit être transféré des bacs de GNL1 aux bacs de GNL2.
 - Le GNL doit être transféré des bacs de GNL2 vers les bacs de GNL1.
-
- **Réchauffeur de dégivrage 822-E-901**

Le réchauffeur E-901 est un échangeur utilisé pour chauffer le gaz sec provenant de la sortie des sécheurs ou de la tour de lavage afin de procéder aux opérations de dégivrage. Il est également possible de réchauffer le N₂ (l'azote) pour la même définition.

TC-54 A et TC-54 B contrôlent les températures des gaz qui sortent du réchauffeur. Les températures de TC 54 A et TC 54 B sont réglées à 95°C, tandis que la pression dans le circuit à l'aval de l'E-901 est réglée par une vanne autorégulatrice réglée à 2.4bar PCV-051. Les contacteurs à haute et basse température, On règle TSH-054 à 104°C et TSL-54 à 82°C. Une fois que la température du gaz sortant atteint l'une ou l'autre des deux, les alarmes se déclenchent en s/c. TAH-TAL.

7. Paramètres de contrôle de bac de stockage GNL :

7.1. Paramètres principaux :

7.1.1. Niveau :

Deux types de mesures de niveau sont disponibles dans les bacs de stockage GNL :

Le système de jaugeage SI est installé au-dessus de chaque bac connecté au DCS. Il est fabriqué à partir d'une sonde compacte qui détecte les niveaux de liquide, de vapeur et de densité. Cette sonde est reliée à un câble hélicoïdal qui est porté sur un poulet où chaque rotation représente une distance.

La mesure des niveaux liquides repose également sur le principe de la variation de pression ; de la force exercée par la hauteur hydrostatique du GNL dans les bacs. Les transmetteurs sont placés sur les conduites soutirage à haute pression, tandis que les conduites de sortie GAZ sont soumises à une pression basse. L'enregistrement et la lecture de ces informations sont effectués au niveau de la salle de contrôle.

LAL 1m

LAH 28.52m

LAHH 29.52m

7.1.2. Pression :

Chaque bac contient trois transmetteurs de pression fixés sur le dôme, chacun ayant son propre rôle.

- PT-80000 A, B, C : est utilisé pour enregistrer la pression. La pression des 03 bacs de stockage est surveillée par le PT-80025, qui permet l'ouverture de la PV80025 vers la torche boil-off une fois que la pression de stockage dépasse le point de consigne.

- PT- 800166 : est utilisé pour enregistrer la pression vers le compresseur de gaz à combustion. Les compartiments de stockage sont également équipés de switches qui produisent des alarmes.

- PT-8000/1-9-17 : sert pour les alarmes d'haute et basse pression et le déclenchement de système ESD par le PSLL

- ESD par le PSLL

- Le PAH et régler a 0.035 bar effectif (14''cH2O)

- Réguler le PAL à un niveau de 0.010 bars effectifs (04''cH2O).

- Le PSLL doit être réglé à un niveau de 0.005 bars effectifs (02''cH2O)

- PT-80026 A, B, C : l'ouverture de la PV-80026 est ouverte à un niveau de 0.0025 bar effectif (1''cH2O). On peut mesurer localement la pression en utilisant un PI (indicateur de pression) gradué en (mmcH2O).

7.1.3. Température :

Chaque bac porte 100 thermocouple groupé deux à deux déposé en 50 point au niveau de la paroi intérieure, sont lues sur un TI (indicateur de température) affiché sur écran DCS, ils servent à détecter la formation des couches stratifiées.

7.2. Paramètre anneaux :

7.2.1. Sécurité par haute pression :

- À 791 mmH₂O = 0.08 bar ouverture du trou lesté laissant s'échapper le gaz a l'atmosphère
- Deux PSV craché à 0.06 bar vers atmosphère
- La 3éme PSV craché à 0.07 bar vers atmosphère.

7.2.2. Sécurité par basse pression :

- Ouverture de la PV-80027 de secoure par l'ouverture de la PV-80026
- Ouverture des 05 soupapes case-vide a -49 mmH₂O

7.2.3. Système spéciale :

Les vannes de soutirage sont assujetties électriquement à la vanne de recette, il faut au moins une vanne de recette ouvert pour pouvoir ouvrir les vannes de soutirage.

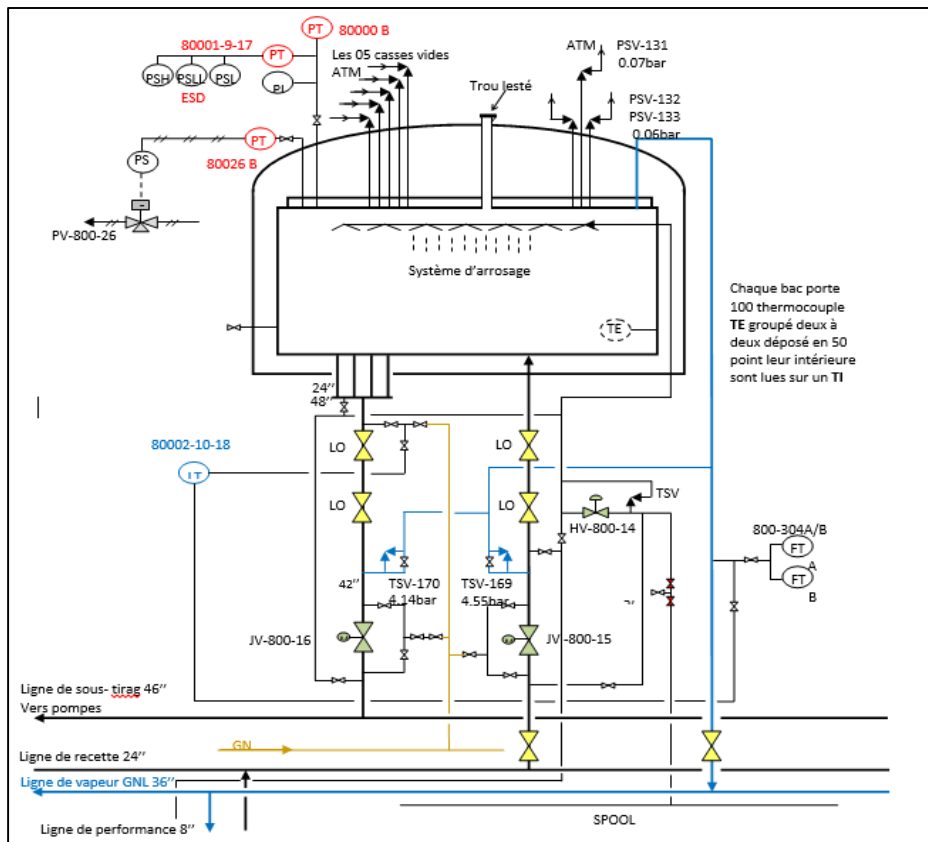


Figure III.4 : Schéma d'Instrumentation et canalisation de bac stockage GNL 810-I-903

7.2.4. Fonctionnement du GN de secoure :

L'ouverture autorégulatrice PCV-80027, qui est normalement fermée, permettra d'introduire le GN de secoure dans le collecteur de vapeur des réservoirs. La section de la canalisation située entre ces deux vannes est maintenue sous pression d'azote pour éviter la contamination du GNL par le GN. Cette pression est réglée par PCV-80179 à 1,8 bar et par PCV-80186 à 1,65 bar, qui décharge à l'atmosphère.

En cas de chute de pression dans un bac à 0.0025 bar eff, la pression dans la conduite entre la PV-80026 et PCV-80027 diminuera, ce qui entraînera une ouverture de la PCV-80027 à 1.52 bar pour fournir le GN. En revanche, la PCV-80179 s'ouvrira en grand, ce qui limitera le débit d'azote par le FO-80178 placé en aval de la PCV-80179.

La PSV garantit la protection des équipements en cas de pression élevée dans la cellule, à une pression de 30 psi = 2.04 bar (PSV-80187).

Haute pression ↑	trou lesté ouvert 0.08 bar effectif (32''cH ₂ O) PSV craché à 0.07 bar effectif (28''cH ₂ O) 2 PSV craché à 0.06 bar effectif (24''cH ₂ O) PV 80025 ouverte 100% à 0.05 bar effectif (20''cH ₂ O) PAH et régler a 0.035 bar effectif (14''cH ₂ O)
0.034 absolue —	Compresseurs FG en service
↓ Basse pression	PAL et régler a 0.010 bar effectif (04''cH ₂ O) PSLL et régler a 0.005 bar effectif (02''cH ₂ O) PT80026 A, B, C ouverture PV 80026 à 0.0025 bar effectif (1''cH ₂ O) Case vide : ouverture à -0.005 effectif (-49 mmH ₂ O)

Tableau III.2 : la pression au niveau de bac stockage

8. La zone de pompage :

Est utilisée pour acheminer le GNL des bacs de stockage vers les pieds de chargement.

9. Zone des utilités :

Situé à l'est des trains, nous présente le bassin d'eau de mer, aménagé près de la pomperie et à proximité des installations de la prise d'eau de mer. Cet aménagement est réalisé à l'aide de 06 équipements. Chacune des pompes, avec une capacité de 35.000 m³ /h, alimente les installations en eau de refroidissement.

Avant d'être utilisée pour les besoins d'exploitation, l'eau de mer est soumise à un traitement au chlore. L'hypochlorite de sodium est produit par l'unité d'electrochloration achetée dans le cadre du projet de rénovation du port.

Six installations de dessalement, avec une capacité de production unitaire de 45 m³ /h, approvisionnent les chaudières en eau distillée nécessaire à la production de vapeur. Le Complexe reçoit l'électricité requise grâce à trois turbogénérateurs de 18 mégawatts chacun, et le réseau électrique du Complexe est connecté au réseau national SONELGAZ. On prévoit la construction de trois chaudières haute pression et d'une chaudière basse pression pour la production de l'électricité et l'eau distillée sont disponibles dans la zone d'usage.

Le Complexe possède un ensemble complet de chaudières, comprenant 17 chaudières de processus, avec une capacité unitaire de 136 t/h, et 04 chaudières de vapeur, avec une capacité unitaire de 400 t/h.

La chaleur excessive est nécessaire pour entraîner les compresseurs et répondre aux exigences des procédés. Les chaudières de 400 tonnes par heure ont été achetées pour le projet de rénovation du Complexe. Les chaudières de 136 t/h achetées lors de la construction du Complexe ont été mises en service en 1978. Ainsi, les services d'appoint assurés pour assurer le bon fonctionnement du Complexe jouent un rôle essentiel dans la production de GNL.

Le Complexe est équipé d'un réseau de rejets de torches constitué d'une torche chaude, d'une torche froide et d'une torche pour les vapeurs des bacs de stockage de GNL.

10. Description du procédé de liquéfaction dans le complexe GL1/Z :

L'usine de liquéfaction comprend six trains de procédé, fonctionnant en parallèle. Le produit de chaque train est envoyé par des pompes cryogéniques dans des bacs de stockage.

On prévoit que chaque train de procédé produira l'équivalent de 53 millions de thermies de GNL par jour, mesurées aux niveaux des bacs de stockages.

Chaque train comprend les sections suivantes :

- 1) Section de décarbonatation.

- 2) Section de déshydratation et démercurisation.
- 3) Section compression propane.
- 4) Section de séparation des hydrocarbures lourds et fractionnement.
- 5) Section compression MCR.
- 6) Section liquéfaction.

***Chapitre 04 : Calcul et
simulation***

La problématique du Boil-Off dans les complexes de liquéfaction du Gaz Naturel

1. Introduction :

Différentes raisons expliquent la production de vapeurs de vaporisation de GNL (Boil Off) dans les complexes de liquéfaction du gaz naturel, et elles sont produites à différents moments du processus de liquéfaction et de transport. La quantité la plus significative de ces vapeurs

La production de Boil-Off se produit dans les réservoirs de stockage du GNL et lors du chargement des méthaniers (dans le GL1/Z, le taux de production de Boil-Off par jour de stockage ou lors du changement des tankers est d'environ 0,07% de la quantité stockée par jour ou de la quantité chargée dans les cuves).

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes raisons qui peuvent entraîner le Boil Off dans les complexes de liquéfaction, ainsi que les méthodes utilisées pour contrôler et traiter ces vapeurs.

Les renseignements présentés dans ce chapitre proviennent principalement de la documentation FORMATION INGENIEUR de l'entreprise SONATRACH à laquelle j'ai eu accès pendant notre stage.

2. Production de vapeurs dans les réservoirs de gaz naturel liquide

On conserve le GNL dans des réservoirs cylindriques à fond plat, à toit bombé et à basse pression (la pression de calcul d'un réservoir de stockage réfrigéré à basse pression est plus élevée que celle d'un réservoir de stockage réfrigéré à basse pression à une pression légèrement inférieure à 1,03 bar manométrique) et à une température cryogénique.

Les flux de chaleur vers le GNL, que ce soit par l'énergie de pompage des pompes de GNL produit ou des pompes de circulation de GNL, ou par les flux de chaleur au réseau de tuyauterie de GNL ou aux réservoirs de stockage en eux-mêmes, forment les flux thermiques.

La production de vapeurs par Boil-Off dans les réservoirs de stockage de GNL fluctue considérablement en fonction de divers facteurs.

Les principales influences sur le taux de production de vapeurs sont les suivantes :

Mode d'exploitation : Les considérations qui influencent le mode d'exploitation peuvent comprendre :

- Nombre de train de GNL en service.

- Chargement ou non du tanker à un moment donné.
- Capacité de production de chaque train

Autre facteurs :

- Pression d'équilibre du transfert de GNL aux réservoirs de stockage.
- Entrées thermiques dans les conduites et réservoirs de GNL.
- Variation de pression dans les réservoirs de GNL.
- Si le contrôle de réservoir se fait par pression différentielle, les variations de pression barométriques affectent le taux de vaporisation.
- Composition du GNL.
- Variation de la température ambiante.
- Niveau du GNL dans le réservoir.
- En cas de chargement du tanker (méthanier), s'il s'agit du début ou de la fin de l'opération de chargement.
- Conditions anormales telles qu'un basculement de couche (Roll-Over).
- Conditions thermiques des cuves du méthanier au début de chargement.

2.1. Évaporation dans le réservoir de stockage :

2.1.1. Les entrées thermiques vers un réservoir de stockage de GNL :

Le réservoir de stockage de GNL à fond plat reçoit des flux thermiques à travers le fond, la paroi verticale et le toit bombé. La construction du réservoir et son isolation thermique influencent les entrées thermiques relatives provenant de ces sources.

Les entrées thermiques équivalentes pour une construction spécifique et un taux de vaporisation spécifié sont définies par :

$$\text{Entrées thermiques} = V BO \Delta H_{vap} \rho$$

Où : V : est le volume du réservoir de stockage (m^3)

BO : est le taux de vaporisation du GNL (% par jour)

ΔH_{vap} : est l'enthalpie de vaporisation du GNL (-5099 kJ/kg pour GNL liquide)

ρ : est la masse volumique du GNL (kg/m³)

i. Évaporation de conception :

Un des paramètres essentiels de conception du réservoir de stockage de GNL est le taux de vaporisation. Habituellement, il est exprimé en pourcentage du contenu du réservoir plein évaporé chaque jour. De plus, la pratique exige que la valeur exprimée soit généralement basée sur des éléments solides sur du méthane pur, peu importe la véritable composition du GNL.

Les réservoirs de GNL de grande taille, à double paroi, ont des taux de vaporisation typiques qui fluctuent entre 0,04 et 0,15 % du volume du réservoir plein par jour. Selon une nouvelle tendance, on a une tendance à privilégier les réservoirs à faible taux de vaporisation, entre 0,04 et 0,07 % par jour. Les réservoirs à faible taux de vaporisation sont particulièrement avantageux en raison des considérations économiques dans les usines de liquéfaction.

Une forte entrée thermique ne fait que favoriser la détérioration du GNL précieux.

Gaz à pression ambiante naturel. Bien qu'utilisé comme combustible, ce gaz nécessite une compression plus ancienne, ce qui entraîne une augmentation des frais d'installation et d'exploitation.

Le coût supplémentaire de calorifugeage du réservoir de stockage est une sanction liée à l'obtention d'un taux de vaporisation faible. En tout cas, étant donné la grande valeur du GNL, les réservoirs à faible taux de vaporisation (0.04 à 0.07 %) sont justifiés entièrement.

ii. Évaporation réelle :

Le taux de vaporisation réelle de GNL dans un réservoir de stockage correspond rarement au taux de calcul. On va mettre en évidence les facteurs importants affectant le taux réel de vaporisation :

- Effet du niveau dans le réservoir de stockage :

Les entrées thermiques vers un réservoir partiellement rempli de GNL sont inférieures à celles d'un réservoir plein. En raison de la circulation vigoureuse qui a lieu dans le liquide, la masse entière de celui-ci demeure essentiellement à température uniforme. Dans l'espace vapeur, cependant, la convection naturelle est beaucoup moins dynamique et il s'établit en général un gradient de température vertical.

Ainsi, un réservoir partiellement remplis, subira généralement une évaporation moins importante qu'un réservoir plein, étant donné qu'une partie de l'entrée thermique réchauffe les vapeurs en plus du GNL. Toutefois, l'expérience veut que le niveau dans le réservoir n'ait qu'une faible incidence sur son taux de vaporisation (même à très bas niveau de liquide, le taux de vaporisation n'est que marginalement inférieur à celui d'un réservoir plein).

- Effet de la pression :

Les variations de la pression absolue de l'espace du réservoir de GNL rempli de vapeurs peuvent avoir une incidence grave sur le taux de vaporisation. Une réduction soudaine de la pression peut produire du GNL sursaturé (la température du liquide est supérieure à celle qui correspond à la température du point de bulle à la pression de réservoir prédominante). Une telle sursaturation provoque une évaporation accrue que l'on peut calculer au moyen de l'équation de Hashemi-Wesson :

$$mv = 0.225 (DPs)^{4/3}$$

Où : mv : est l'évaporation due à la sursaturation, exprimée en $kg / (heure \cdot m^2)$.

DPs : est la différence entre la pression de sursaturation de GNL et la pression dans l'espace vapeur, exprimée en kPa .

Si la pression absolue du réservoir est diminuée et maintenue à un niveau réduit pendant une longue période, la température du GNL stocké diminuera progressivement, ayant pour résultat une diminution de la sursaturation et du taux de vaporisation.

Dans la réalité, il est possible d'exploiter un réservoir de GNL avec une pression absolue à une pression relativement constante. De cette manière, il est possible de réduire les fluctuations des taux de vaporisation causées par les variations de pression dans le réservoir. De plus, la pression absolue d'un réservoir dont le fonctionnement repose sur une pression différentielle sera sujette à des fluctuations en fonction des variations de pression barométrique. Puisqu'une baisse soudaine de la pression absolue entraînera un taux de vaporisation maximum bien supérieur à celui de la même baisse de pression obtenue petit à petit.

- Composition du GNL :

La composition du GNL stocké (et plus particulièrement sa teneur en azote) peut affecter de manière significative le taux de vaporisation. Du point de vue thermodynamique, l'azote est beaucoup plus léger que le méthane. En conséquence, l'évaporation affectera en priorité l'azote, et la teneur en azote du GNL diminuera, ce qui augmente le point de bulle du GNL (augmente la température de saturation du GNL).

Le résultat net d'une telle occurrence est qu'une grande partie de l'entrée thermique vers le réservoir de GNL se manifeste sous forme de chaleur sensible dans le liquide. La quantité de vapeur produite est réduite proportionnellement avec la diminution de la proportion d'azote dans le GNL stocké. Cette évaporation préférentielle prolongée (de l'azote et du méthane) alourdit les couches supérieures qui s'enfonceront dans le bain de GNL plus léger provoquant ainsi un phénomène de Roll-Over.

- Effet de la température ambiante :

Les variations de la température ambiante peuvent entraîner des variations importantes au niveau des entrées thermiques. Lorsque le changement de la température ambiante varie entre 0° et 35°C, la différence de température entre le liquide stocké et l'ambiance augmente d'environ 22%. Le changement réel du taux de vaporisation dépendra naturellement de la fraction de l'entrée thermique provenant de l'ambiance et de celle provenant du sol. Quoi qu'il en soit, on peut s'attendre à une variation d'environ 17% au niveau des taux de vaporisations lorsque l'intervalle des variations de températures saisonnières est d'environ 35° à 40°C.

Le rayonnement solaire affecte également l'entrée thermique vers les réservoirs. La température d'équilibre en surface du réservoir est soumise aux radiations solaires dépendra de facteurs tels que le pouvoir émissif de la peinture, la vitesse du vent, etc ; et le rayonnement solaire peut entraîner une augmentation de la température de surface du réservoir de stockage bien au-dessus de la température ambiante.

- Marge de calcul :

Finalement, il est à noter que les fournisseurs de réservoirs prévoient une certaine marge pour satisfaire aux exigences des entrées thermiques garanties (de calcul). De manière générale, l'entrée thermique réelle est légèrement inférieure à celle de calcul ou garantie. Toutefois, une variation précise des entrées de chaleur dans un réservoir de stockage de grande dimension est relativement difficile à effectuer, car il est particulièrement difficile de maintenir des conditions d'essai uniformes pendant une période de temps suffisante pour l'obtention de résultats valables.

1) Partie calcul :

1. Introduction :

La présence de chaleur infiltrée dans un réservoir du GNL est considérée comme l'une des principales causes de problèmes pendant la période de stockage du GNL. Dans une unité de liquéfaction du GNL, les bacs de stockage sont soumis à un flux de chaleur pariétal qui entraîne une combustion.

Le transfert de chaleur se fait principalement par conduction au niveau de la paroi, tandis que les courants convectifs de couche limite thermique et dynamique sont générés dans le fluide grâce au phénomène de convection naturelle.

2. Caractéristiques du réservoir I-903 :

Ce réservoir, construit par TOYO KANETSU K.K TOKYO (JAPAN) en 1976, est de type Bac aérien à double parois destiné pour le GNL/Vapeur de GNL. Sa capacité est de 100 000 m³.

Le réservoir extérieur à 67,64 m de diamètre pour 44,80 m de hauteur dont 10,998 m de toit bombé (dôme), le tout en acier carbonique A283 Gr.C

Le réservoir intérieur à 65,80 m de diamètre pour 33,798 m de hauteur en acier à 9 % nickel A553 Gr.A, avec un toit en alliage d'aluminium et situé à 32,10 m du fond intérieur. Avec un espace entre 2 parois 920 mm [37]

L'isolation est constituée :

- Virole : 920 mm (double matelas + perlite en vrac)
- Fond : 620 mm (Sable sec + foamglass + couverture en feutre)
- Toit : sacs de perlite + perlite en vrac
- Pression de service : 0,0703 bars
- Température de service : - 163°C (bac interne)



Figure VI.1 : Bac de stockage du GNL au niveau de complexe GL1/Z

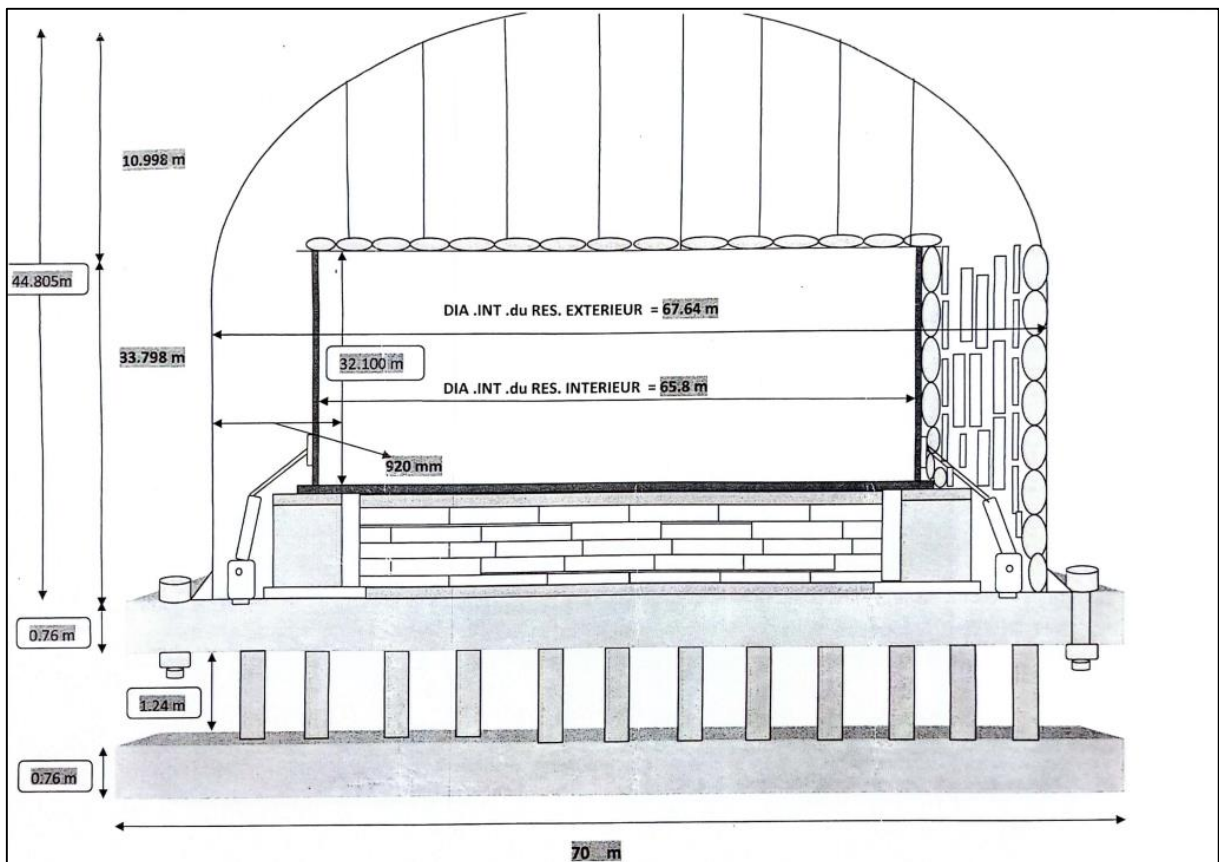


Figure VI.2 : Schéma du bac de stockage du GNL au niveau de complexe GL1/Z

3. Calcul du BOIL OFF du GNL dans un bac de stockage I-903

3.1. Données

Les tableaux suivants fournissent une représentation détaillée des caractéristiques spécifiques liées à des propriétés spécifiques du gaz naturel liquéfié (GNL). Sachant que :

- Température ambiante maximum : 35 °C.
- Température intérieur du bac maximum : - 163 °C.
- Température du sol : 25 °C.

GNL	Vapeur	Liquide
Composition	L'Azote : 0,0269 L'Hélium : 0 C1 : 0,7309 C2 : 0,301	L'Azote : 0,0104 L'Hélium : 0 C1 : 0,8890 C2 : 0,0794 IsoC4 : 0,0024 NC4 : 0,0035 C5 : 0,0153 IsoC5 : 0,001
Masse moléculaire	19,26 g/gmol	17,96 g/gmol
La masse volumique	2,25 kg/m3	465 kg/m3
L'enthalpie massique	-3164 kJ/kg	-5099 kJ/kg
Chaleur spécifique molaire	32,78 kJ/kmol .C	55,6 kJ/kmol.C
Chaleur spécifique massique	1,702 kJ/kg.C	3,095 kJ/kg.C
PCI massique	7281 kcal/kg	11630 kcal/kg
Z	0,9708	-
Cp/Cv	1,382	1,737

Chapitre 04 : calcul et simulation

Cp/ (Cp-Cv)	1,340	1,176
Chaleur de vaporisation	8521 kJ/kmol	11885 kJ/kmol
Viscosité cinétique	2,224 Cst	0,329 Cst
Viscosité dynamique	$5,005 \times 10^{-3}$ Cp	0,1530 Cp
Tension de surface	-	14,43 dyn/cm
Conductivité thermique	$9,632 \times 10^{-3}$ W.mK	0,1985 W/mK
Cv molaire	23,73 kJ/kmol	32 kJ/kmol
Cv massique	1,232 kJ/kg.C	1,681kJ/kg.C
PCS massique	8025 Kcal/kg	12780 Kcal/kg
Pression Point d'ébullition	5,6 bars	1,03 bar
Température d'ébullition		-84,40 C
Température de saturation		-163,9 C
Chaleur latente		7292 kJ/kmol
Le Boil off garantie		0,07% par jour
Température d'entrée		à 3 bars -162 C ⁰
Température intérieur		à 1,03 bar -163,9 C ⁰
Coefficient de dilatation de fluide		0,0015 K ⁻¹

Tableau VI.1 : Caractéristiques du GNL

Calorifuge	W/m.K
Sable sec	0,65
Béton	1,744
Foamglass	0,0407
Béton de perlite	0,292
Perlite en vrac	0,033
Fibre de verre	0,0707

Tableau VI.2 : Caractéristiques de l'isolation thermique du bac de stockage

3.2. Calcul du coefficient de transfert de chaleur du GNL liquide stocké :

Nombre de Rayleigh :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\vartheta \cdot \alpha} = 7,8 \cdot 10^{13}$$

Nombre de Nusselt :

$$Nu = C \cdot Ra^n \cdot Pr^m \text{ Avec : } C = 0,53 \text{ (valeur de tableau), } n = 1/4 \text{ et } m = 1/3$$

$$Nu = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Avec } Pr = \vartheta / \alpha = 2,47$$

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad \text{avec } L = D = 65,8 \text{ m}$$

$$h = 127,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur du GNL vapeur stocké :

Nombre de Rayleigh :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\vartheta \cdot \alpha} = 1,2 \cdot 10^{13}$$

Nombre de Nusselt :

$$Nu = C . Ra^n . Pr^m \text{ Avec : } C = 0,53 \text{ (valeur de tableau), } n = 1/4 \text{ et } m = 1/3$$

$$Nu = 3,4 . 10^5 \text{ Avec } Pr = \vartheta/\alpha = 0,75$$

$$h = \frac{Nu . \lambda}{L} \quad \text{avec } L = D = 65,8 \text{ m et } H = 10 \text{ m}$$

$$h = 49,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$$

3.4. Calcul du coefficient de transfert de l'air ambiant :

Nombre de Rayleigh :

$$\text{Coefficient de dilatation thermique : } \beta = \frac{1}{T_f} = 0,00488997 \text{ K}^{-1}$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_\infty - T_s) D^3}{\vartheta^2} \cdot Pr = 1,17909 \cdot 10^{16}$$

$$Nu = 23820,4$$

$$h = \frac{k}{D} \cdot Nu = 8,32266 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

3.5. Calculs des pertes de chaleur :

3.5.1. Calcul de la quantité de chaleur :

Le schéma simplifié suivant montre la diffusion de la chaleur à travers le toit, la paroi et le fond de réservoir.

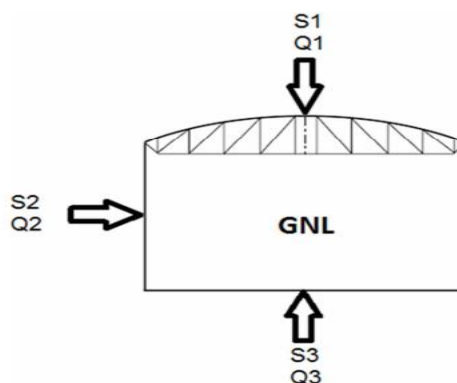


Figure VI.3 : Diffusion de la chaleur à travers les parois d'un bac de stockage

Où :

S_1 : La surface interne du toit.

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

S_2 : La surface interne de la paroi latérale.

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

S_3 : La surface interne du fond.

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

La quantité de chaleur échangée à travers les parois externe est donnée par la relation suivante :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{S \cdot \lambda \cdot \Delta T}{e}$$

Où :

S : Surface d'échange du bac de stockage avec le milieu extérieur (m^2)

λ : Conductivité thermique (W/m.K)

ΔT : Différence de température ($^{\circ}C$)

e : Epaisseur de la paroi (m)

3.5.1.1. Calcul de la quantité de chaleur diffusée à travers de toit (Q_1) :

$$Q_1 = \frac{S_1 \lambda_1 \Delta T_1}{e_1} = \frac{S_1 \Delta T_1}{R_1} \text{ Avec } R_1 = \frac{e_1}{\lambda_1}$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 65,8^2}{4}$$

$$S_1 = 3400,491 \text{ m}^2$$

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

$$R_1 = R_{\text{perlite en vrac}}$$

Calorifuge	Épaisseur (m)
Perlite en vrac	0,700

Tableau III.4 : Matériaux d'isolation du toit

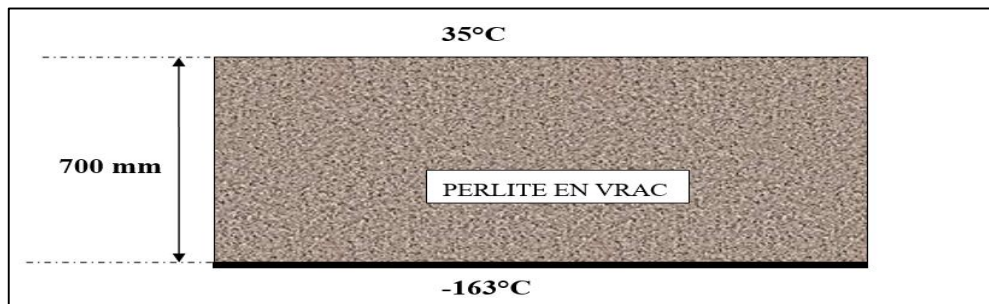


Figure VI.4 : Isolation du toit

$$R_1 = \frac{e_{\text{perlite en vrac}}}{\lambda_{\text{perlite en vrac}}} = \frac{0,700}{0,033}$$

$$R_1 = 21,212 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

- Différence de température à travers le toit :

$$\Delta T_1 = 35 - (-163)$$

$$\Delta T_1 = 198 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = \frac{S_1 \cdot \lambda_1 \cdot \Delta T_1}{e_1} = \frac{S_1 \cdot \Delta T_1}{R_1} = \frac{3400,491 \times 198}{21,212}$$

$$Q_1 = 31741,336 \text{ W}$$

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

$$Q_2 = \frac{S_2 \cdot \lambda_2 \cdot \Delta T_2}{e_2} = \frac{S_2 \cdot \Delta T_2}{R_2} \quad \text{Avec } R_2 = \frac{e_2}{\lambda_2}$$

$$S_2 = \pi \cdot D \cdot H = \pi \times 65,8 \times 32,1$$

$$S_2 = 6635,609 \text{ m}^2$$

- La résistance au transfert de chaleur à travers le toit R₂ :

$$R_2 = R_{\text{perlite en vrac}} + R_{\text{Matelas en fibre de verre 1}} + R_{\text{Matelas en fibre de verre 2}}$$

Calorifuge	Épaisseur (m)
Matelas en fibre de verre 1	0,240
Perlite en vrac	0,641
Matelas en fibre de verre 2	0,025

Tableau VI.3 : Matériaux d'isolation de la paroi latérale

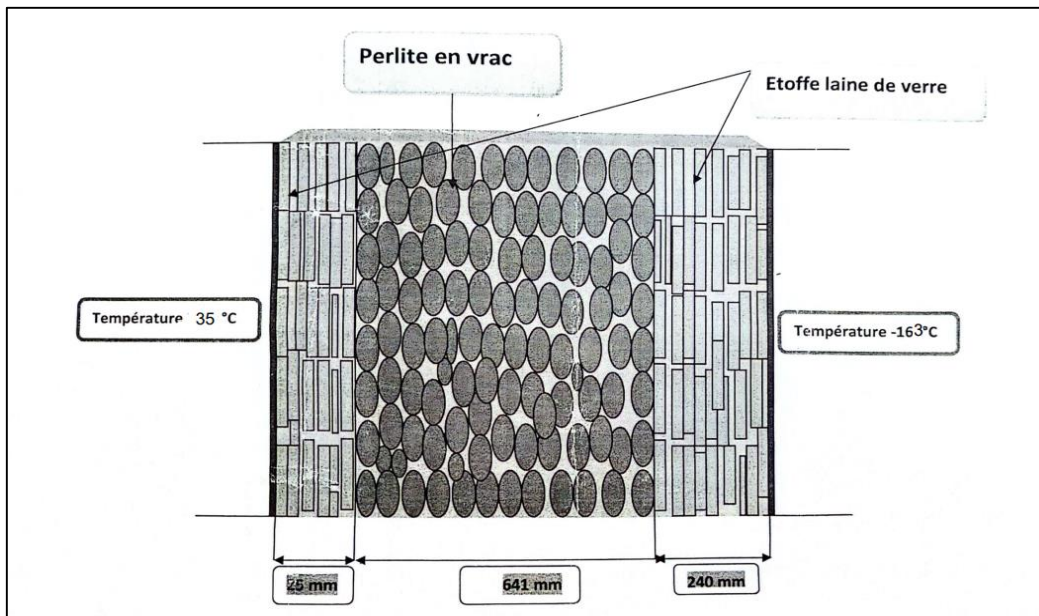


Figure VI.5 : Isolation des parois latérales.

$$R_2 = \frac{e_{perliteenvrac}}{\lambda_{perliteenvrac}} + \frac{e_{Matelasdefibredeverre 1}}{\lambda_{matelasdefibredeverre 1}} + \frac{e_{Matelasdefibredeverre 2}}{\lambda_{Matelasdefibredeverre 2}}$$

$$= \frac{0,641}{0,033} + \frac{0,240}{0,0707} + \frac{0,025}{0,0707} = 19,424 + 3,395 + 0,354$$

$R_2=23,172 \text{ m}^2.\text{K/W}$

- **Différence de température à travers le toit :**

$$\Delta T_1 = 35 - (-163)$$

$\Delta T_2=198 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_2 = \frac{S_2 \cdot \lambda_2 \cdot \Delta T_2}{e_2} = \frac{S_2 \cdot \Delta T_2}{R_2} = \frac{6635,609 \times 198}{23,172}$$

$Q_2= 56699,921 \text{ W}$

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

$$Q_3 = \frac{S_3 \cdot \lambda_3 \cdot \Delta T_3}{e_3} = \frac{S_3 \cdot \Delta T_3}{R_3} \quad \text{Avec } R_3 = R_A + R_B$$

$$S_3 = S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 65,8^2}{4}$$

$S_3= 3400,491 \text{ m}^2$

- **La résistance au transfert de chaleur à travers le fond R1 :**

$$R_1 = R_A + R_B \quad \text{Avec } R_A = R_{\text{Fondation}} + R_{\text{Foamglass}} + R_{\text{sable sec}}$$

$$R_B = R_{\text{Béton en perlite}} + R_{\text{Béton}}$$

Calorifuge	Épaisseur (m)
Sable sec (total)	0,12
Foamglass	0,5
Fondation	0,545
Béton en perlite	0,76

Tableau VI.4 : Matériaux d'isolation du fond

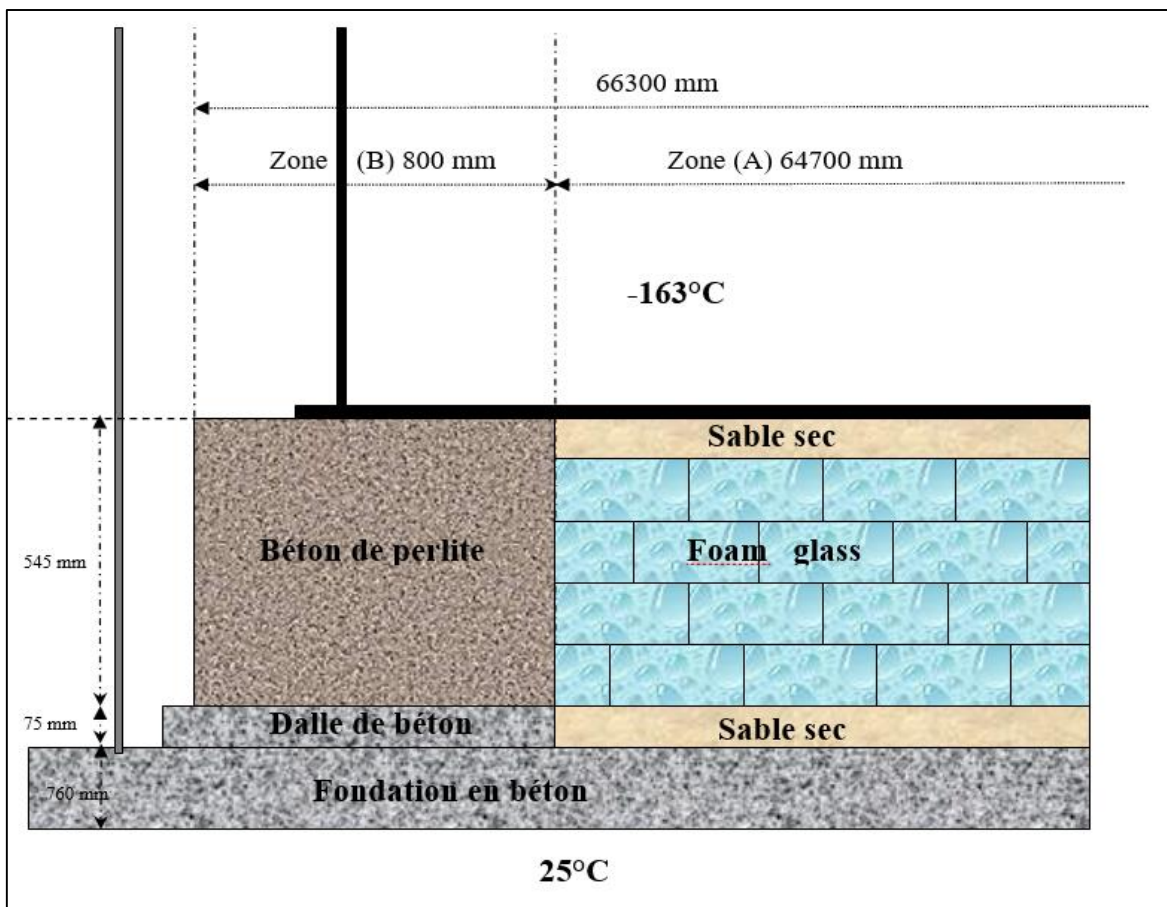


Figure VI.6 : Isolation du fond.

$$R_A = \frac{e_{Fondation}}{\lambda_{Fondation}} + \frac{e_{Foamglass}}{\lambda_{Foamglass}} + \frac{e_{Sablesec}}{\lambda_{Sablesec}} = \frac{0,76}{1,744} + \frac{0,5}{0,0407} + \frac{0,12}{0,65}$$

$$R_B = \frac{e_{Betonenperlite}}{\lambda_{Betonenperlite}} + \frac{e_{Beton}}{\lambda_{Beton}} = \frac{0,545}{0,292} + \frac{0,835}{1,744}$$

$$R_3 = 15,250 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

- Différence de température à travers le fond :

$$\Delta T_3 = 25 - (-163)$$

$$\Delta T_3 = 188 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_3 = \frac{S_3 \cdot \lambda_3 \cdot \Delta T_3}{e_3} = \frac{S_3 \cdot \Delta T_3}{R_3} = \frac{3400,491 \times 188}{15,250}$$

$$Q_3 = 41920,807 \text{ W}$$

3.5.1.4. Calcul de la quantité de chaleur total diffusée à travers les parois du réservoir (Q) :

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 31741,336 + 56699,921 + 41920,807$$

$$Q_{\text{total}} = 130362,064 \text{ W}$$

2.5.2. Calcul le taux d'évaporation :

2.5.2.1. La masse évaporée par jour :

$$m_{\text{evap}} = \frac{Q_{\text{total}}}{L_{\text{vm}}} \text{ Avec } L_{\text{vm}} : \text{ la chaleur de vaporisation}$$

$$m_{\text{evap}} = \frac{130,362}{406,01} = 0,321 \text{ kg/s} = 1155,891 \text{ kg/h} = 27741,378 \text{ kg/jour}$$

- Le volume évaporé par jour :

$$V_{\text{evap}} = \frac{m_{\text{evap}}}{\rho} = \frac{27741,378}{465} = 59,6589 \text{ m}^3/\text{jour}$$

2.5.2.2. Le taux d'évaporation :

$$\tau = \frac{V_{\text{evap}}}{V} \times 100 \text{ Avec } V = \text{ le volume interne de réservoir}$$

$$\tau = \frac{59,6589}{100000} \times 100 = 0,0596\% = 0.06\% \text{ par jour}$$

3.5.3. Calcul de la quantité de BOIL-OFF annuelle :

La quantité de BOIL-OFF annuelle est le produit du taux d'évaporation multiplié par la production annuelle.

$$V_{Boil-off\ annuelle} = \tau_{calculé} \times V_{produit}$$

L'usine de liquéfaction produit annuellement une quantité de GNL qui est de l'ordre de 5374637,708 m³ l'année 2023

$$V_{boil-off\ annuelle} = 0,06 \times 5374637,708$$

$$V_{boil-off\ annuelle} = 322478,262 \text{ m}^3$$

- **Détermination de la quantité du BOIL-OFF annuelle par design :**

$$V_{Boil-off\ annuelle} = \tau_{design} \times V_{produit}$$

$$V_{boil-off\ annuelle} = 0,07 \times 5374637,708$$

$$V_{boil-off\ annuelle} = 376224,639 \text{ m}^3$$

3.5.4. Conclusion :

Il est parfaitement clair que le GNL, lors de son utilisation, aussi bien pour l'opération de chargement, est soumis à un phénomène physique courant, celui de l'évaporation. Les pertes les plus importantes dans le complexe GNL1.Z se situent au niveau des bacs de stockage.

Pendant notre recherche sur ce type de pertes, nous avons pu observer, comme le démontrent les résultats, que le taux annuel de pertes dans un bac de stockage, qui s'élève à environ 107492,754 m³, est approximativement le double des pertes tolérées par le constructeur, qui peuvent atteindre 71661,836 m³. La grande disparité résulte principalement de deux facteurs clés :

- L'état des équipements
- Les problèmes d'exploitation.

2) Partie simulation :

a. Présentation de COMSOL Multiphysics :

Le COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses phénomènes physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats - sont intégrées dans une seule interface.

Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab.

Le COMSOL propose plusieurs modules pour des fonctionnalités spécifiques à chaque domaine que ça soit dans l'électromagnétisme, le semi-conducteur, le transfert de chaleur, l'acoustique ou les ondes et beaucoup d'autre, ... Selon l'étude de la modélisation envisager.

b. Les différentes étapes de réalisation de la simulation :

- **1ère étape Choix du modèle**

- Le « **Model Wizard** » est le mieux conseiller en choix de modèle pour la modélisation ; afin de poursuivre à la 2ème étape de la modélisation de COMSOL.

- **2ème étape choix de la dimension à modéliser**

- Suite au « Model Wizard » on arrive à cette fenêtre ; « Choix de dimension » :

Pour définir sur quel type de dimension veut-on étudier.

La dimension 2D axisymétrique pour faciliter la manipulation et l'ajout de différent module nécessaire à l'étude.

- **3ème étape sélection du physique à traiter**

Arriver à cette fenêtre de « Choix de physique »

- Le « Choix de Physique » nous permet d'insérer les différents modules aux choix tels que :

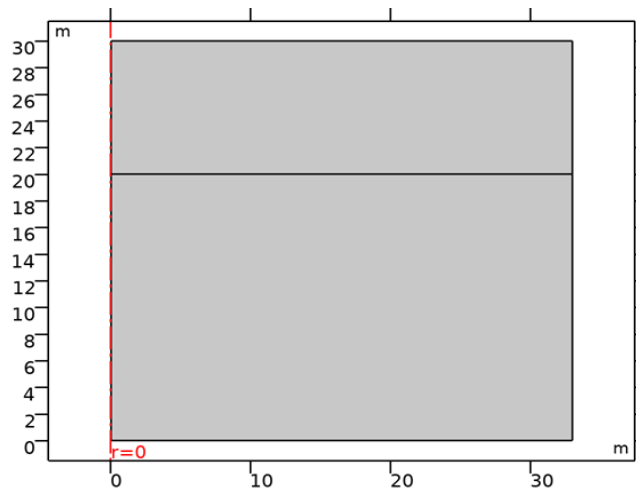
1. fluid flow → Multiphase flow → Two phase flow, phase field → Turbulent flow, low Re k- ϵ couplé avec Nonisothermal flow (Heat transfer in fluids).

- **4 ème étape Choix de l'étude**

Une fois cliqué « Study » on obtient cette fenêtre sur le choix de type d'étude désirer. Sur l'étude on a sélectionné l'étude dépend de temps « Time dependent »

- **5 ème étape « Choix de la géométrie»**

Pour accéder aux options de la mise en forme géométrique avec système d'unité (SI)



Rayon = 33 m

Hauteur = 30 m (20m de liquide + 10m de vapeur)

- **6 ème étape « Choix de Materials»**

Nous arrivons dans une fenêtre où on choisit le GNL vapeur et le GNL liquide voir (Tableau VI.1 : Caractéristiques du GNL)

- **7 ème étape « mise des différents paramètres du l'étude »**

- Les équations utilisées dans le modèle Turbulent flow, low Re k-ε :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho\mathbf{g}$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho\varepsilon$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} f_\epsilon(\rho, \mu, k, \epsilon, l_w), \quad \epsilon = \text{ep}$$

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4, \quad l_w = \frac{1}{G} - \frac{l_{\text{ref}}}{2}$$

$$\rho_{\text{init}} = \rho + \rho_{\text{hydro}}$$

$$\rho_{\text{hydro}} = \rho_{\text{ref}} \mathbf{g} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{ref}})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\gamma \lambda}{\epsilon_{\text{pf}}^2} \nabla \psi, \quad \phi = \text{hipf}$$

$$\psi = -\nabla \cdot \epsilon_{\text{pf}}^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi + \frac{\epsilon_{\text{pf}}^2}{\lambda} \partial f / \partial \phi, \quad \psi = \text{psi}$$

$$\lambda = \frac{3\epsilon_{\text{pf}} \sigma}{\sqrt{8}}, \quad \gamma = \chi \epsilon_{\text{pf}}^2$$

$$\mathbf{F}_{\text{st}} = \left(\frac{\lambda}{\epsilon_{\text{pf}}^2} \psi - \frac{\partial f}{\partial \phi} \right) \nabla \phi$$

$$V_{f,1} = \frac{1-\phi}{2}, \quad V_{f,2} = \frac{1+\phi}{2}, \quad V_{f,1} + V_{f,2} = 1$$

$$\rho = \rho_1 V_{f,1} + \rho_2 V_{f,2}, \quad \mu = \mu_1 V_{f,1} + \mu_2 V_{f,2}$$

$$Q_{\text{vd}} = \tau : \nabla \mathbf{u} + Q_{\text{turb}}$$

- On prend en considération l'approximation de Boussinesq
- Insertion des conditions initiales et aux limites :

$$V=0 \text{ m/s}$$

$$T= 110 \text{ K}$$

$$P=1,03 \text{ bar}$$

$$T \text{ référence} = 293,15 \text{ K}$$

$$P \text{ référence} = 1 \text{ atm avec compensation de la pression hydrostatique}$$

$$\Phi = 1 \text{ liquide ; } \Phi = -1 \text{ vapeur}$$

- Les équations utilisées au cours le transfert de chaleur

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{\text{vd}}$$

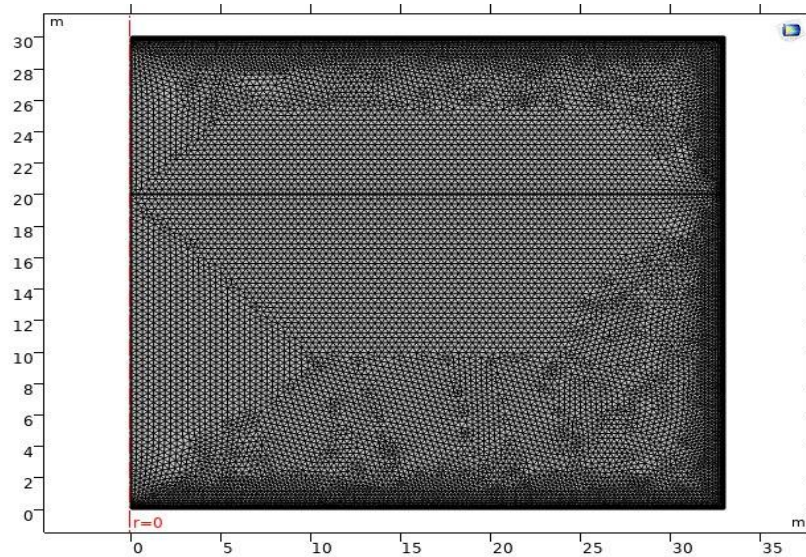
$$\mathbf{q} = -k\nabla T$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T)$$

- 8 ème ètape « MESH »

On dèfinit le maillage (finer) par le type de sequence (Physics controlled mesh)



- Maximum element size 0.39
- Minimum element size 0.0045
- Curvature factor 0.25
- Maximum element growth rate 1.08
- Predefined size Extra fine

- 9 ème etape « Results »

Time dependent → Initial value source: range (0, 1,10) day

c. Résultats et discussion :

- **Étude du champ de température dans l'ensemble du bac :**

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus avec un modèle simplifié, plus compact. Ce modèle suppose que tout le transfert de chaleur à travers les deux phases (vapeur, liquide) se fasse par conduction avec la contribution des mouvements de convection. Ce choix est fondé sur l'hypothèse d'une stratification verticale stable (chaud près du toit, froid près du bas). Dans ce cas, on peut penser que les mouvements du fluide sont confinés au voisinage des parois et que le reste du volume est essentiellement au repos. Cette hypothèse semble peu réaliste au vu des résultats obtenus avec Comsol. Quelle que soit la conception du réservoir de stockage, et la quantité de l'isolation thermique, il se produit inévitablement des infiltrations thermiques entre l'extérieur et l'intérieur du bac.

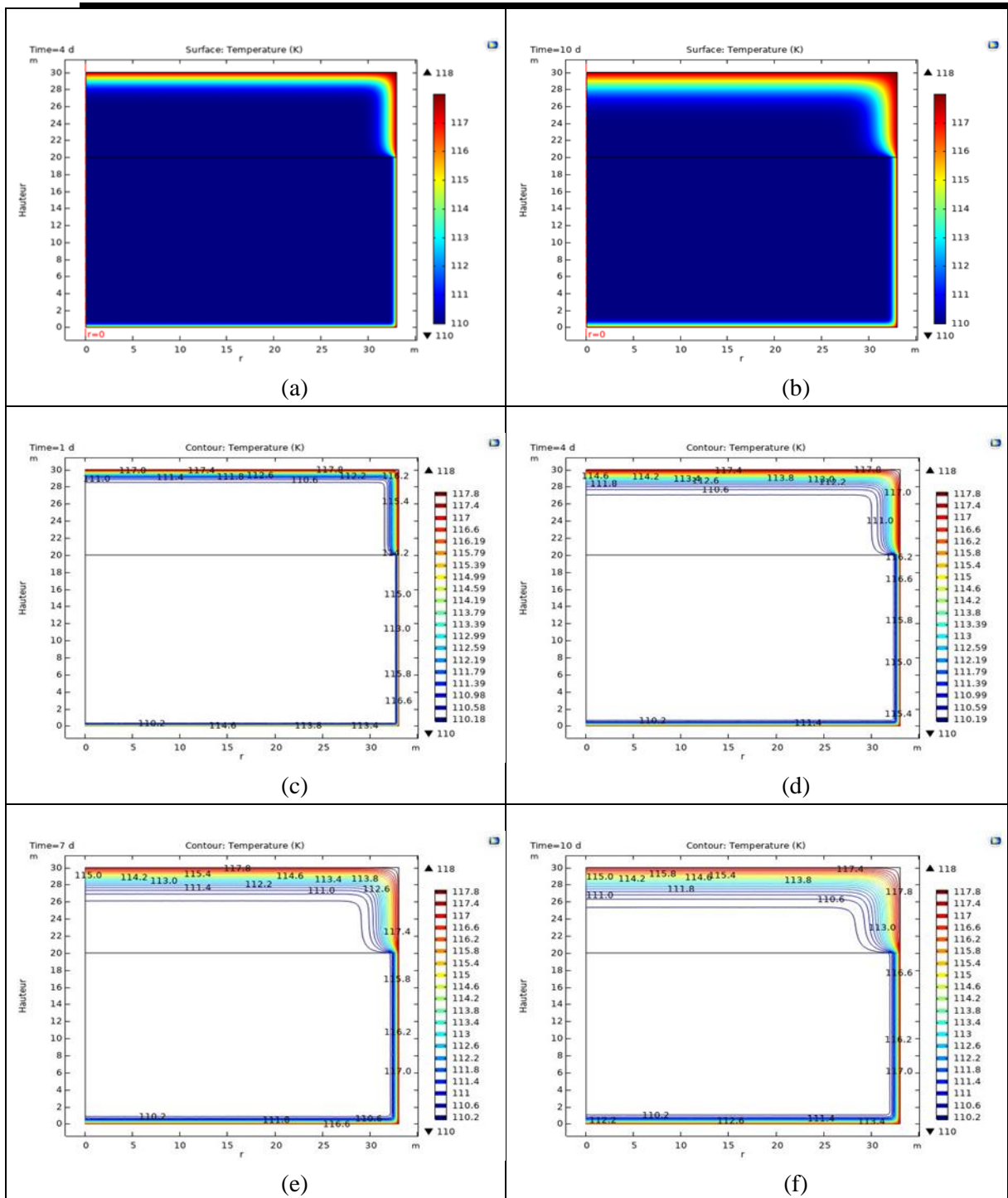


Figure VI.7 : Champs de température dans l'ensemble du bac

La figure (VI.7), montre les courbes iso-températures. On constate au début tout le GNL stocké est à température constante, par contre aux temps (1, 4, 7, 10 jour) une variation de température au voisinage des parois du côté du GNL à cause des infiltrations thermiques venant du milieu ambiant vers le GNL stocké, le GNL est en contact des parois du bac s'échauffe, ce qui entraîne un mouvement de convection naturelle au sein du bac.

Selon les figures (c), (d), (e) et (f) nous remarquons une distribution progressive des températures venant de parois.

- La figure (a), (b) montre le transfert de chaleur est plus élevé dans la phase vapeur que la phase liquide.

• Étude du champ des vitesses dans l'ensemble du bac :

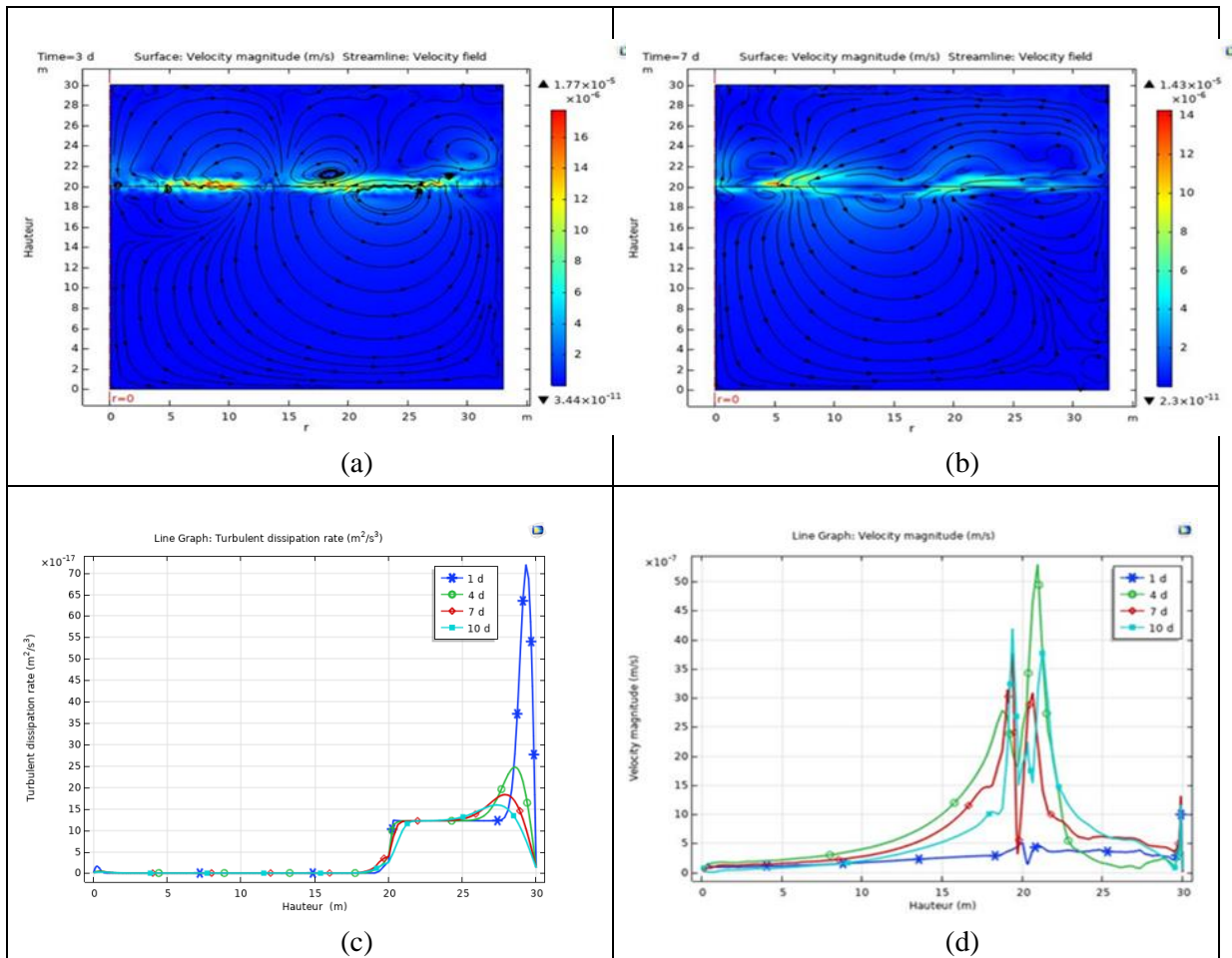


Figure VI.8 : Champs des vitesses dans l'ensemble du bac

D'après la figure (a), (b) on constate une formation des tourbillons au sein de bac, à cause de flux de chaleur externe. Aussi l'intensité de vitesse est plus importante au niveau de l'interface GNL-vapeur.

La figure (c), (d) montre la variation de vitesse en fonction de la hauteur, les courbes n'ont pas une même tendance pour les différents temps. Cela est dû à l'effet dissipatif de la turbulence surtout au niveau de l'interface.

- Étude du champ de fraction de volume dans l'ensemble du bac :

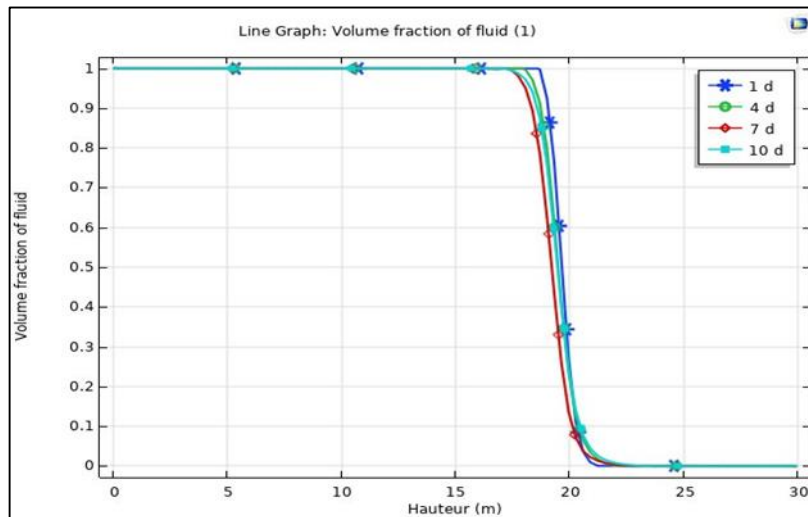
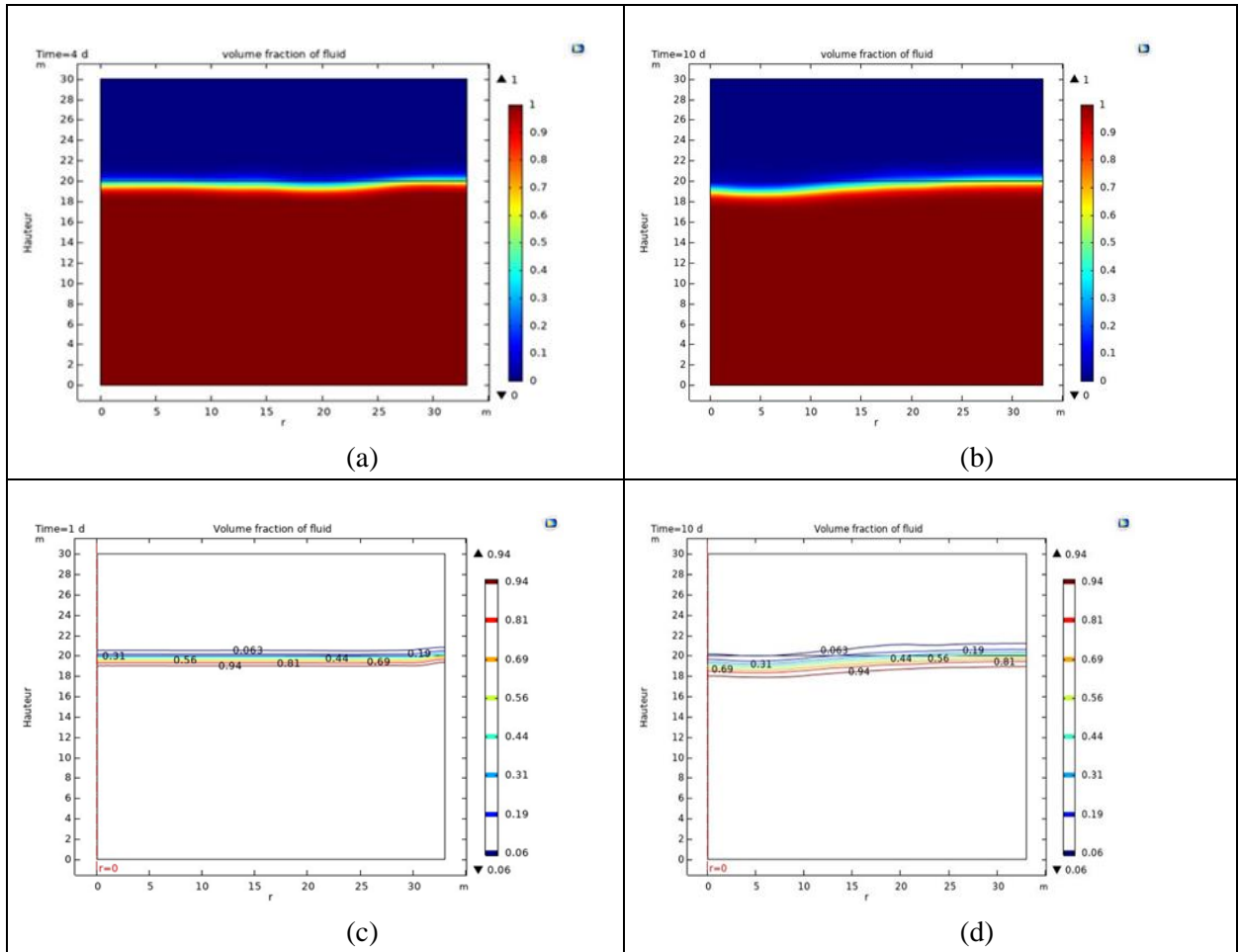


Figure VI.9 : Champs de fraction de volume dans l'ensemble du bac

La figure montre une variation de la fraction de volume uniquement à l'interface qui présente la phase liquide ($\Phi = 1$) et phase vapeur ($\Phi = 0$)

Cette variation de fraction de volume est due au changement de phase (évaporation de GNL) produit à l'interface ($\Phi = [0,1]$)

• Étude de la pression dans l'ensemble du bac :

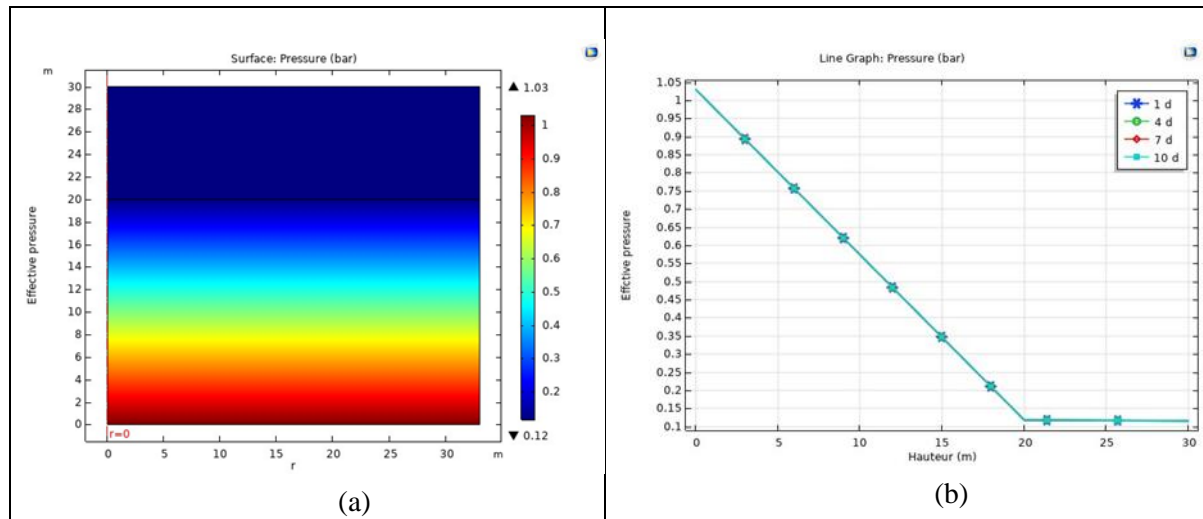


Figure VI.10 : Évolution de la pression dans l'ensemble du bac

Les figures (a), (b) présentent une pression effective à l'intérieur du bac. On constate une évolution linéaire en fonction de la hauteur dans la partie liquide (pression hydrostatique), avec une pression constante dans la phase vapeur pour les temps calculés

e. Étude complémentaire :

Pour tenir compte de l'isolation thermique du bac, nous avons simulé le transfert de chaleur à travers les parois, le fond et le toit. Les résultats obtenus de transfert thermique en régime transitoire sont présentés comme suit :

1) Résultats de simulation du toit :

- Les champs thermiques à travers le toit du bac

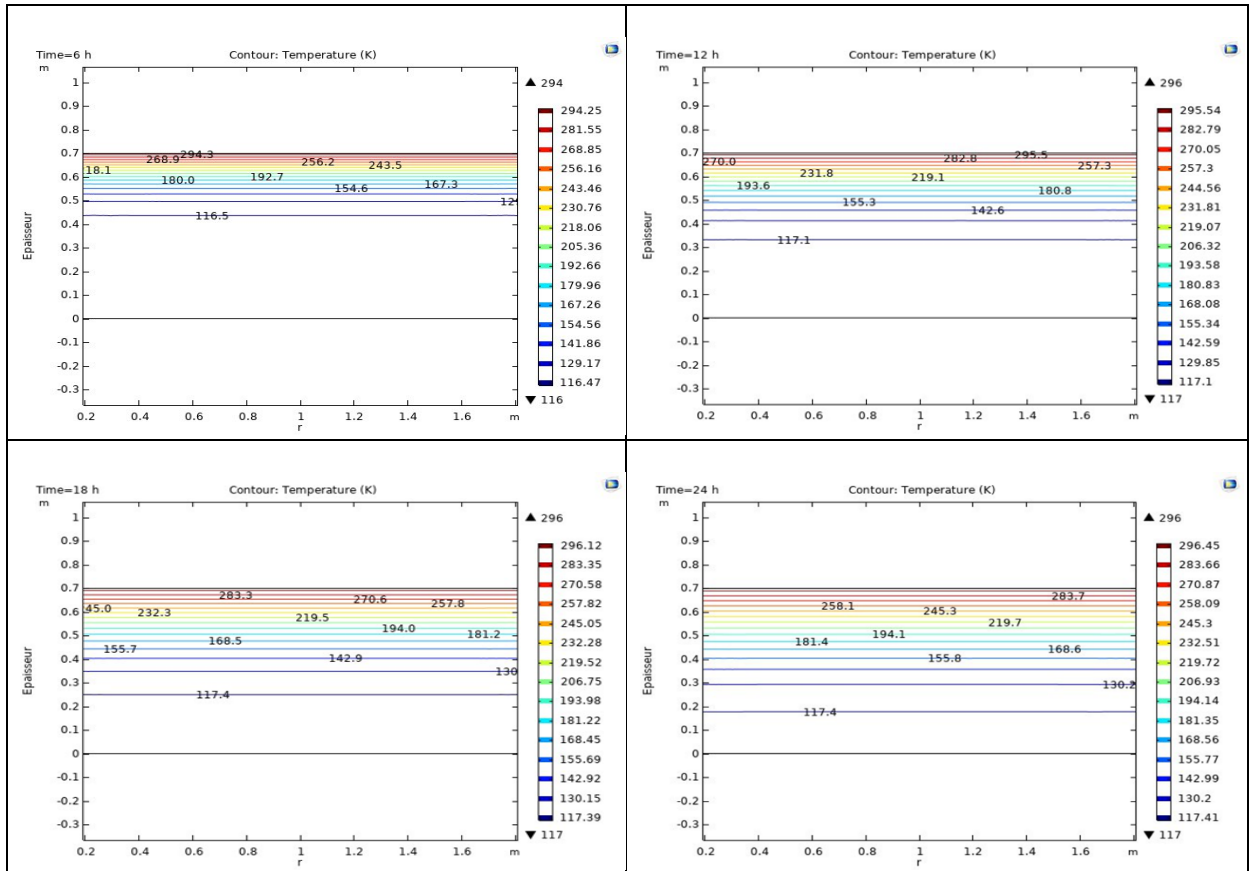


Figure IV.3 : Les Champs thermiques à travers le toit du bac

- L'évolution de flux de chaleur à travers le toit du bac

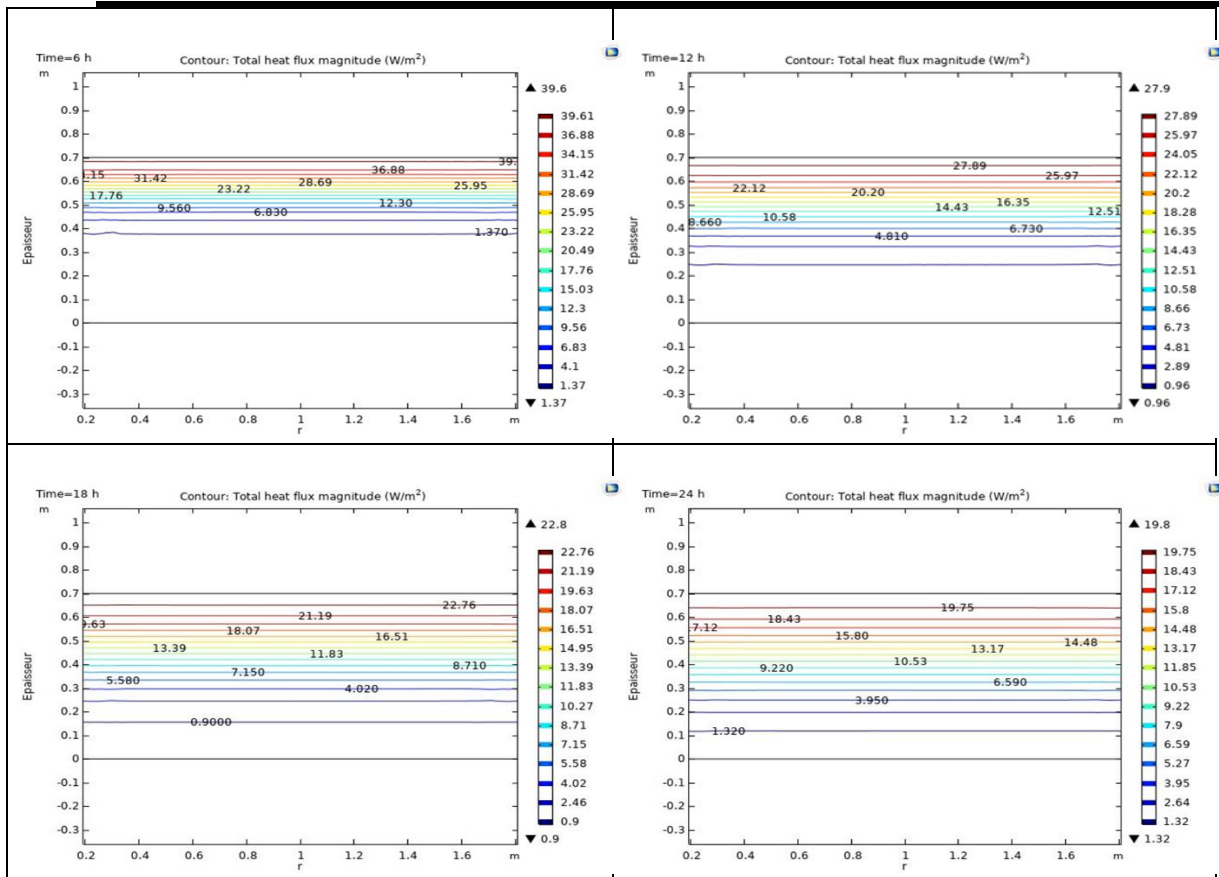


Figure IV.4 : L'évolution de flux de chaleur à travers le toit du bac

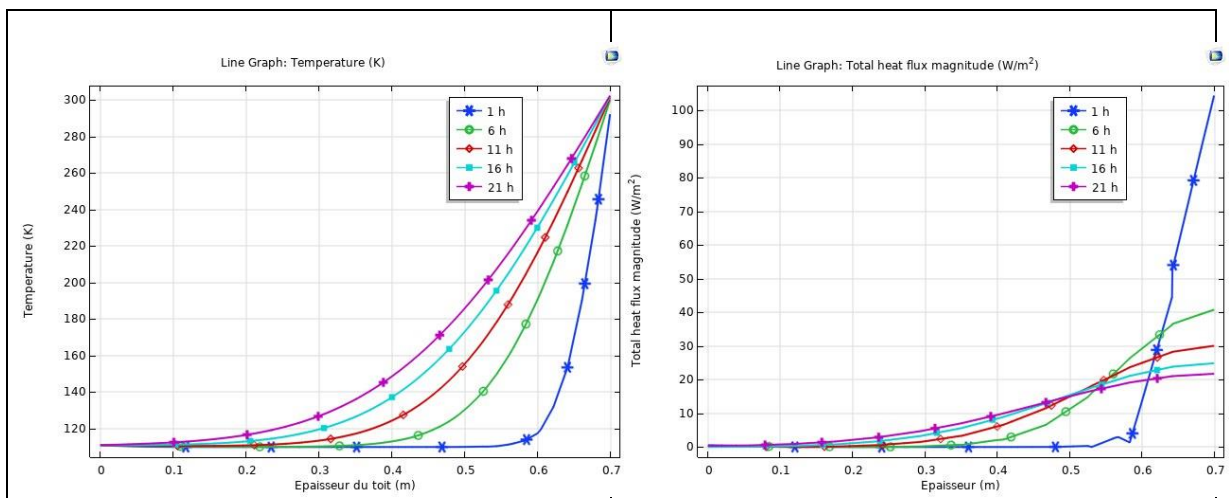


Figure IV.5 : l'évolution des flux et température du toit à différents moments

Les figures ci-dessus montrent l'évolution de la température et le flux de chaleur aux différents moments de la journée (24 h) en fonction de l'épaisseur du toit.

On observe une augmentation progressive de la température par contre le flux thermique total augmente de manière non linéaire à mesure que l'épaisseur du toit diminue, et ce pour tous les moments de la journée représentés.

L'écart de température et le flux thermique entre les différents moments de la journée indiquant une plus grande variation thermique journalière.

Dans l'ensemble, ces graphiques illustrent l'impact de l'épaisseur avec l'isolation du toit sur la régulation thermique du toit, avec une température plus stable pour un toit plus épais.

En résumé, ces figures illustrent l'importance de l'isolation du toit sur les performances thermiques du réservoir, avec des implications significatives sur les besoins en refroidissement ou en chauffage selon les moments de la journée.

2) Résultats de simulation du fond :

- Répartition des champs de températures à travers le fond du bac

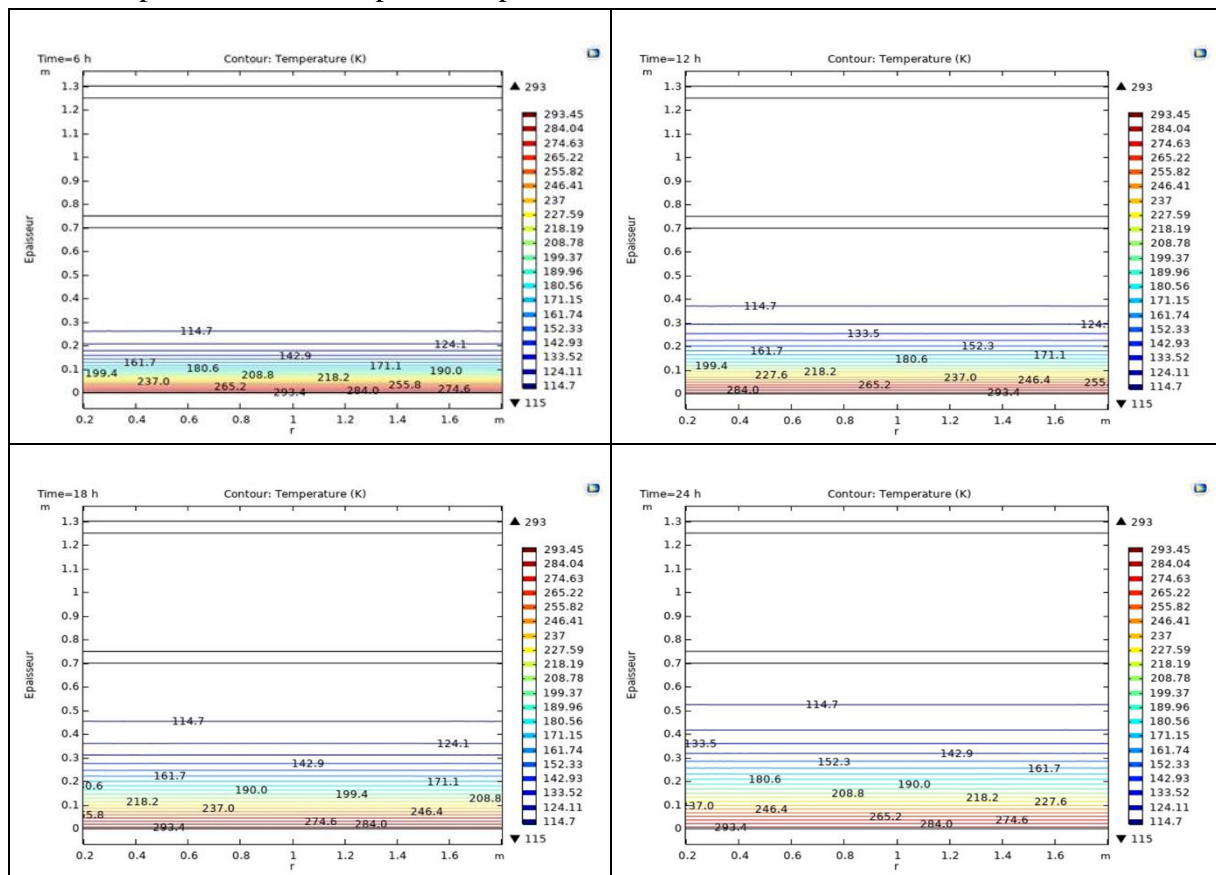


Figure IV.6 : Répartition des champs de températures à travers le fond du bac

- Variations de flux de chaleur à travers le fond

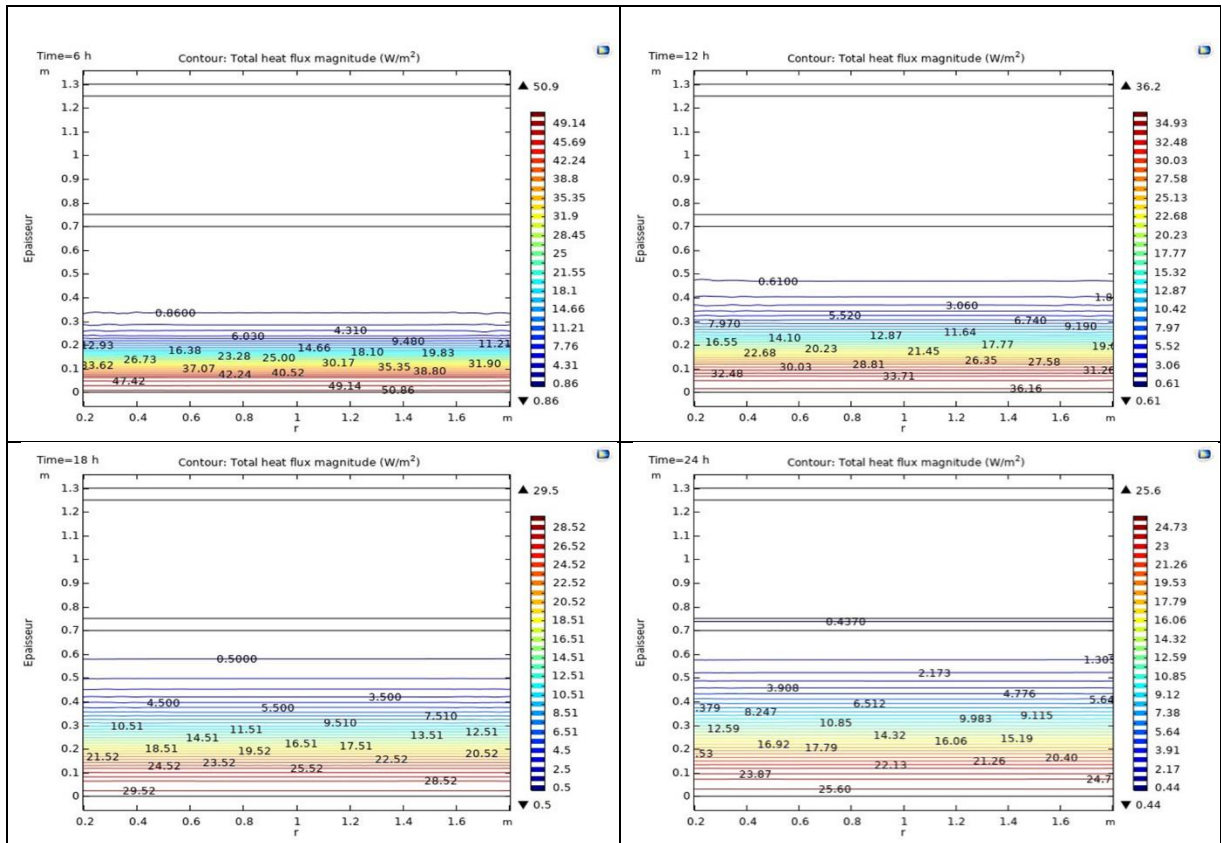


Figure IV.7 :Variations de flux de chaleur à travers le fond

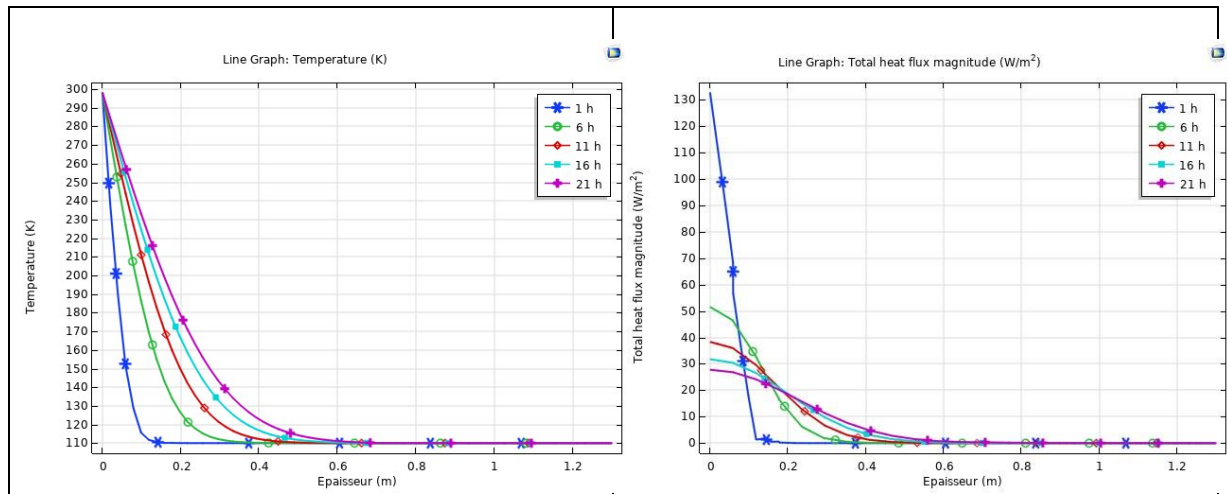


Figure IV.8 : l'évolution des flux et température du fond à différents moments

Les figures IV.8 montrent que la température et le flux thermique augmentent progressivement à travers le fond de réservoir de manière au fil de temps mais on constate que la température interne du fond reste inchangé car le flux de chaleur est nulle en ce point ainsi que une grande résistance thermique de l'isolation.

L'écart de température et de flux thermique entre les différents moments de la journée s'accroît dans les couches externes, indiquant une plus grande variation thermique dans ces couches, par contre ils restent relativement faibles dans les couches internes, indiquant une isolation thermique du réservoir.

3) Résultats de simulation de la paroi :

- Les champs de température à travers la paroi latérale.

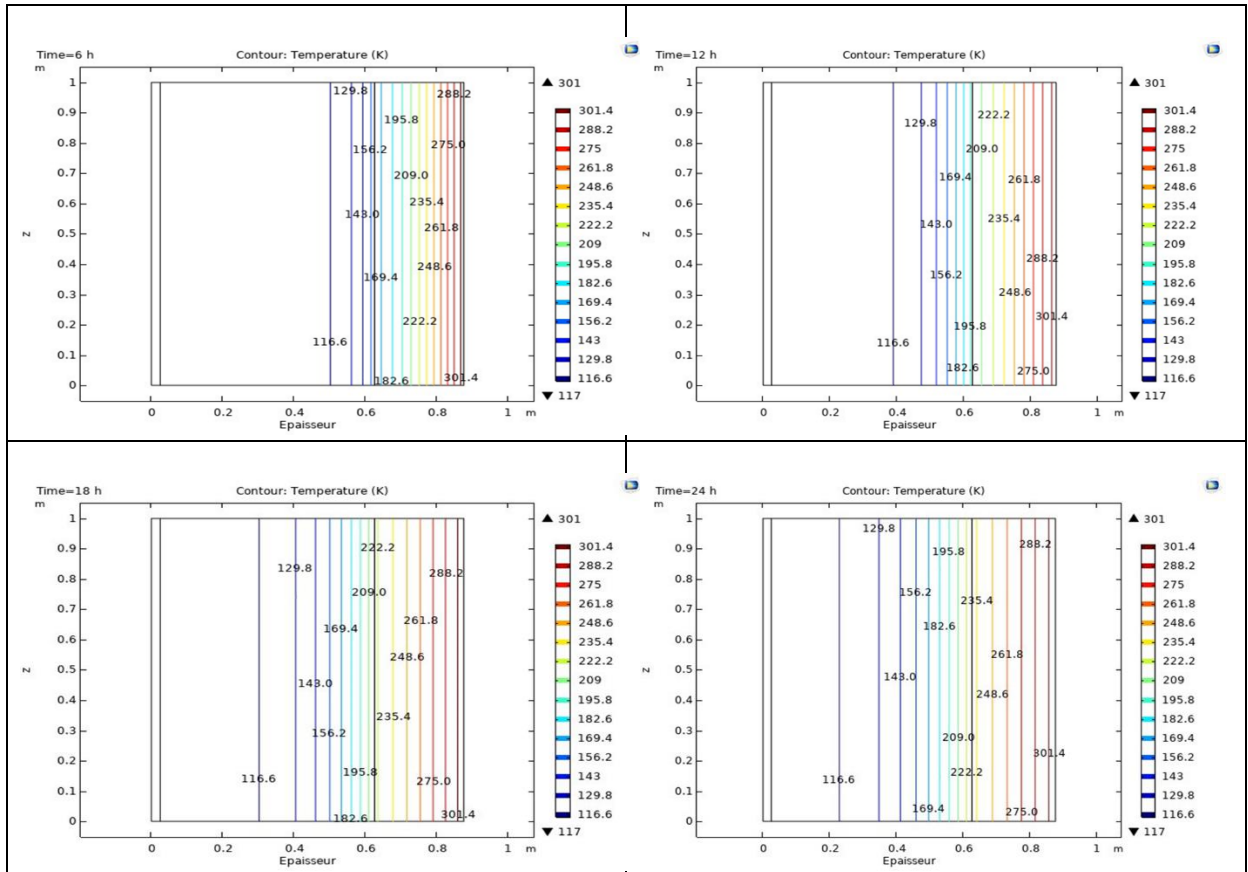


Figure IV.9 : Les champs de température à travers la paroi latérale.

- Les flux de chaleur à travers la paroi latérale du bac :

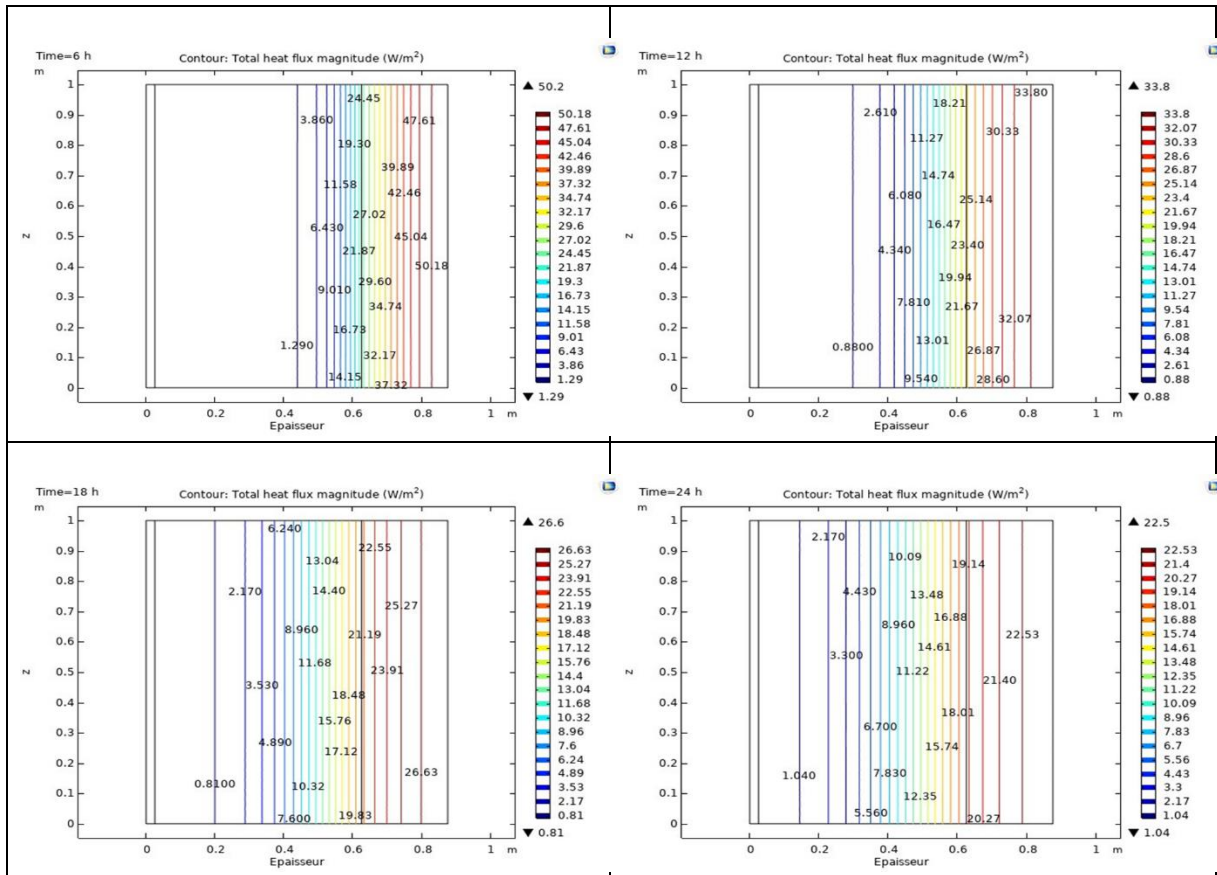


Figure IV.10 : Les flux de chaleur à travers la paroi latérale du bac :

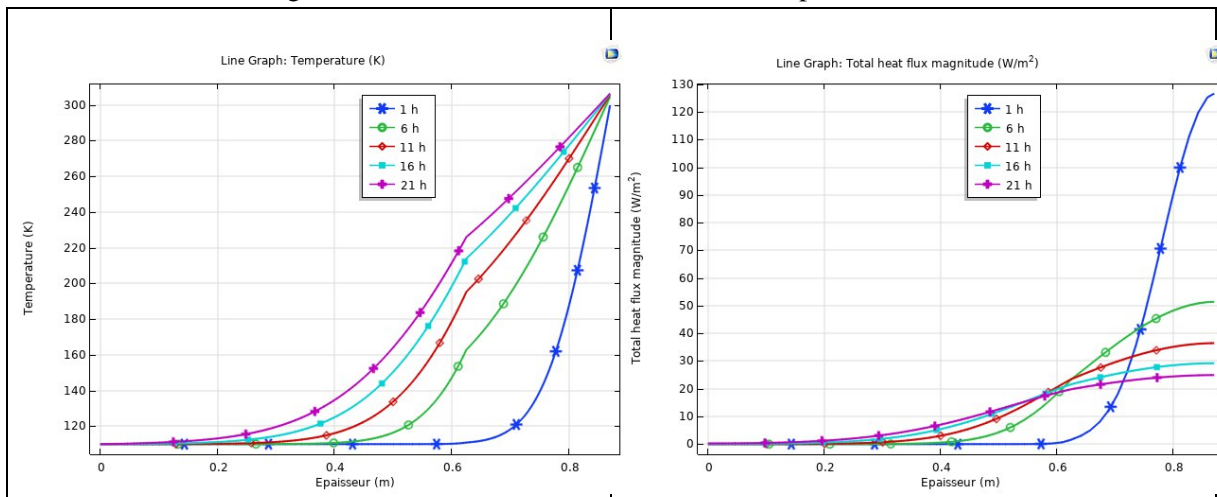


Figure IV.10 : l'évolution des flux et température de paroi à différents moments

Les figures (IV 9 .10) montrent la diffusion de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du réservoir. La différence de températures entre le milieu ambiant et l'intérieur du bac crée un gradient de température à travers la paroi.

La simulation indique l'écart de températures et les flux thermiques pour les différents moments de la journée (24 h) s'accroît sur les couches externe de la paroi, révélant une variation de la

température et du flux thermique. Cela a des implications importantes pour l'isolation du réservoir.

Entre autres, ces figures illustrent de manière complémentaire l'impact crucial des couches d'isolation de la paroi sur les performances thermiques du réservoir.

Conclusion generale :

Ce travail nous a permis d'une part, d'étudier le phénomène de Boil-off dans le bac de stockage du GNL, dont les résultats sont comme les suivants :

- Le phénomène des pertes par évaporation est le phénomène majeur au niveau du complexe GL1Z. Les pertes par évaporation au niveau du complexe GL1Z d'Arzew représentent des quantités très importantes **322478,262 m³** de la production de l'année 2023. Ce qui n'est pas négligeable.
- Les pertes au sein du complexe sont considérables. Ce qui est principalement due à la vieillesse des installations, comme nous venons de le dire précédemment qui sont en service depuis 1978, certes ils ont eu leur part de maintenance, parfois même des travaux de rénovations
- D'après l'analyse menée, les principales raisons de l'augmentation du taux d'évaporation sont l'état des équipements (calorifuge, échangeurs cryogéniques et à eau de mer) et les problèmes d'exploitation (température de coulée, nombre d'arrêts...).

D'une part, la simulation obtenue par Comsol donne une bonne concordance remarquable pour les profils des températures. A partir des résultats de l'étude adoptée on comprend bien que la majorité des infiltrations va se produire au niveau de l'interface liquide-vapeur car le fluide impose sa température de 110 K sur la face interne du réservoir et l'écart de température de part de l'autre de la paroi est maximal (environ 200 K). Toutefois, le réchauffement de la phase vapeur lié aux infiltrations thermique dans la partie haute du réservoir et à travers le toit se traduit également par un flux thermique allant vers le liquide.

Dans cette étude nous avons aussi fait les contours des vitesses qui montrent que la variation de vitesse dû à l'effet dissipatif de la turbulence surtout au niveau de l'interface.

Le taux d'évaporation du GNL est entièrement dépend des conditions thermiques et l'influence de l'interface liquide-vapeur qui crée un changement de volume du a l'effet dissipatif.

D'après tous les résultats obtenus nous proposons de prendre en compte les conditions suivantes :

- ✓ Éviter les bas niveaux de liquide pendant le stockage et surtout dans les périodes chaudes ;
- ✓ Utiliser les super isolants pour les parois latérales et le toit ;
- ✓ Il est préférable de diminuer le temps de stockage du GNL ;
- ✓ Limiter l'augmentation de la température de la paroi externe en utilisant des couleurs de peinture réfléchissants les rayons solaire.
- ✓ Remplacer la ligne de coulée déjà existante par une ligne de diamètre correspondant à la capacité de production des trains.

- ✓ Assurer un programme d'entretien, préventif, fiable afin de réduire efficacement le nombre d'arrêts des unités, car l'amélioration de la température de coulée requiert une stabilisation de l'unité pour une longue durée.
- ✓ Vérifier l'état de calorifuge des lignes de coulée, et procéder à leurs remplacements éventuellement
- ✓ Maintien d'une composition optimal du gaz de cycle MCR.
- ✓ Réparation des échangeurs cryogéniques et la résolution du problème de bouchage des échangeurs.
- ✓ Exiger aux méthaniers de venir avec des cuves froides, afin de réduire le temps de refroidissement, ce qui réduira le taux de boil-off.
- ✓ Procéder à une vidange immédiate des réservoirs de vidange, juste après le vidange des bras, afin d'éviter la perte du produit par évaporation.
- ✓ Assurer une bonne formation aux exploitants, afin de mieux gérer les installations et les utiliser dans les conditions optimales.

Référence bibliographique :

- [1] Abdullah Saleem, Shamsuzzaman Farooq, Iftekhar A. Karimi, Raja Banerjee b “ Une étude de simulation CFD du mécanisme d'ébullition et de la génération de TOURBIÈRES dans un réservoir de stockage de GNL à grande échelle” 2018
- [2] Sixian Wu, Yonglin Ju “ Étude numérique des caractéristiques de génération de gaz d'évaporation (BOG) dans un réservoir de gaz naturel liquéfié (GNL) indépendant de type C sous excitation par balancement” 2021
- [3] Xingchun Wanga, Yiling Xua, Sujing Wangb, Qiang Xua, Thomas C. Ho a “ Étude approfondie sur la production de gaz d'évaporation à partir de camions-citernes de GNL sous les impacts simultanés des fuites de chaleur et des vibrations du transport” 2020
- [4] J.L. Ferrín, L.J. Pérez-Pérez “ Simulation numérique de la convection naturelle et de l'évaporation dans un réservoir de stockage de GNL sous pression de petite taille” 2020
- [5] Younggy Shin, Yoon Pyo Lee “ Conception d'un système de contrôle de la reliquéfaction du gaz naturel évaporé pour les méthaniers” 2008
- [6] Saif Z.S. Al Ghafri, Fernando Perez, Ki Heum Park, Liam Gallagher, Liam Warr, Aaron Stroda, Arman Siahvashi, Yonghee Ryu, Sungwoo Kim, Sung Gyu Kim, Yutaek Seo, Michael L. Johns, Eric F. May “ Études avancées sur le gaz d'évaporation pour le gaz naturel liquéfié” 2021
- [7] Liang Yin, Meng Qi, Yonglin Ju, Il Moon “ Conception et analyse avancées du processus de traitement des TOURBIÈRES dans les navires alimentés au GNL combinées à l'utilisation de l'énergie froide provenant de la gazéification du GNL” 2021
- [8] Agung Widodo, Yuswan Muharam “ Simulation de la récupération du gaz d'évaporation et de l'optimisation du gaz combustible pour augmenter la production de gaz naturel liquéfié” 2023
- [9] Ebenezer Adom, Sheikh Zahidul Islam et Xianda Ji “ Modélisation du gaz d'évaporation dans les réservoirs de GNL : une étude de cas” 2010
- [10] Q.-S. Chen, J. Wegrzyn, V. Prasad “ Analyse de changement de température et de pression dans un bac de stockage cryogénique du GNL “ 2004
- [11] K.J. Petersen, S. Rahbarimanesha, J.R. Brinkerhoff “ Progrès dans la modélisation physique et la simulation numérique des transitions de phase dans l'ébullition et la cavitation des piscines cryogéniques” 2022
- [12] WANG Jieming, SHI Lei, ZHANG Yu, ZHANG Ke, LI Chun, CHEN Xianxue, SUN Junchang, QIU Xiaosong “ Simulation du comportement de la phase pétrolière dans le processus d'injection et de production du stockage souterrain de gaz dans un réservoir de gaz” 2022

- [13] HARITI Rafika "mémoire de Magister : Modélisation des infiltrations thermiques dans le bac de stockage de GNL/ UMBB" 2007
- [14] Mohamed Salah Khelifi Touhami " These de doctorat : Simulation numérique de la convection naturelle dans un bac de stockage de GNL/ UMBB "2012
- [15] Mme Fertikh Nadia " Etude 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". MEMOIRE. Université Badji Mokhtar-Annaba. 2017] [16] [18] [19] [20] [22] Béatrice FISCHER, Gilles FERSCHNEIDER " Liquéfaction du gaz naturel" 2010 /THECNIQUE DE L'INGENIEUR
- [21] A.ROJEY, 1994, Le gaz naturel : production, traitement, transport, Publication de l'institut français du pétrole, éditions Technip. [23] [24] [25] [26] [28] Pierre PETIT " Séparation et liquéfaction des gaz" 1995/ THECNIQUE DE L'INGENIEUR
- [29] Site web "futura-sciences.com"
- [30] NF EN 14620 Parties 1 à 5 (2006) : Conception et fabrication de réservoirs en acier plat, verticaux, cylindriques, construits sur site, destinés au stockage des gaz réfrigérés, liquéfiés, dont les températures de service sont comprises entre 0°C et $- 165^{\circ}\text{C}$.
- [31] [32] RAPPORT D'ÉTUDE N° DRA-11-117405-03833C Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour le stockage de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) - Installations fixes 2011
- [33] KBR, "STOCKAGE ET EXPEDITION DU GNL," ed.
- [34] Pierre PETIT " Séparation et liquéfaction des gaz" 1995/ THECNIQUE DE L'INGENIEUR
- [35] article Cryogénie : propriétés physiques aux basses températures [B 2 380]
- [36] DIVISION GNL & GPL COMPLEXE G L 1. Z SYNTHESE DU PROJET
- [37] Manuel opératoire (GNL1 /Z) BECHTEL
- [38] article Cryogénie : propriétés physiques aux basses températures [B 2 380]