



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Memoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine: Science et de la Technologie

Filière: Génie Mécanique

Spécialité: Énergétique

Présenté par:

LAKEHAL MOHAMMED ELAMINE & GADRA AYMEN

Thème

***ETUDE SUR LES TECHNIQUES DE
STOCKAGE DE GNL***

Soutenu publiquement

Le:13/06/2022

Devant le jury compose de :

Présidente : S. Rahmouni

Examinatrice : D. Damen

Encadrent : T.Guermit

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2021/2022



Dédicaces

Je dédie ce travail :

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

A ma grande mère et grand père

A mes très chers frères : Oussama et Toufik et aboubaker essdik

A notre promotrice

A tous mes amis

A tous ceux qui j'aime.

LAKEHAL Mohammed elamin



Dédicaces

Je dédie ce travail :

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

A ma grande mère et grand père

A mes très chers frères : abdo et taki eddine

A mes très chères sœurs : Malak

A notre promotrice

A tous mes amis

A tous ceux qui j'aime.

GADRA Aymen



Remerciements

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

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à

Mr : Tahar Guermit

Respectivement notre encadreur, pour ses orientations et ses précieux

Conseils.

*Et Département de Génie mécanique Nous voudrions aussi exprimer toute
notre gratitude et nos*

Table des matières

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	
<i>Remerciements</i>	
Table des matières	
La liste des figures	
Laliste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre I :Different types de stockage	2
I.1 Introduction	2
I.2 Gaz naturel en Algérie	2
I.2.1 Description du réseau de transport du gaz	2
I.3 Caractéristique du gaz naturel liquéfié	3
I.4 La chaine de GNL	5
I.4.1 La liquéfaction	5
I.4.2 Le transport	6
I.4.3 Les terminaux de regazéification	6
I.5 Différents types de stockage	7
I.5.1 Réservoir aérien a « simple intégrité »	7
I.5.3 Reservoir Aerien A « Integrite Totale »	11
I.5.4 Réservoir aérien a « membrane »	13
I.5.5 Synthèse des technologies de réservoirs aériens	15
I.5.6 Réservoirs semi-enterrés et enterres à membrane	15
I.5.7 Autres technologies : réservoirs en fosse (« in pit tank »)	17
I.6 Différent type de réservoirs de stockage	18
I.6.1 Réservoir aérien à double enveloppe métallique	19
I.6.2 Réservoir aérien en béton précontraint	20
I.6.3 Réservoir en béton moulé dans le sol	21
I.6.4 Réservoir en terre gelée	21
I.7 La sécurité des installations	22
Chapitre II :isolation thermique du réservoir de stockage	23
II.1. Introduction	26
II.2. Les problèmes physique du stockage du GNL	27
II.2.1 les problèmes mécaniques du stockage	27

Table des matières

II.2.2 Le problème thermique du stockage.....	27
II.3 Critères de choix des matériaux isolants	27
II.3.1 Critères physiques	28
II.3.2 Critères mécaniques	28
II.3.3 Critères de sécurité.....	29
II.3.4 Critères de mise en oeuvre	29
II.3.5 Critères économiques	29
II.4 Les différents types des isolants	29
II.4.1 Les mousses.....	29
II.4.2 Les poudres	30
II.4.3 Les fibres	31
II.4.4 La Superisolation	31
II.4.5 L'isolation par le vide	32
II.5 Etude d'un bac de stockage de GNL	32
II.5.1 Cas bac de stockage de GNL Situe a Arzew (nord-ouest de l'Algérie)	32
II.5.2 Description du bac de stockage d'Arzew	33
II.5.3 Composition des parois du réservoir	34
II.5.4 Technique de construction	35
II.5.5 L'historique du bac et les problèmes rencontrés lors de son exploitation.....	36
Chapitre III : échange thermique entre le bac et le milieu environnant	39
III.1 Introduction	39
III.2 Réservoir en terre gelée	39
III.3 Inconvénients du Réservoir	40
III.4 Présentation du réservoir aérien à double enveloppe métallique	40
III.4.1 Isolation du bac de stockage	42
III.5 les avantages de ce réservoir.....	42
III.6 phénomène de l'évaporation du GNL	43
III.6.1 les effets et les causes des pertes par évaporation.....	44
III.7 Méthode d'évaluation du taux d'évaporation	45
III.7.1 Flux thermique latéral.....	45
III.7.3 Flux radiatif vers la surface de GNL.....	46
III.7.4 La chaleur latente de vaporisation	47
III.8 Détermination du taux d'évaporation	48

Table des matières

III.8.1 Evaluation du Flux de chaleur	48
III.8.2 Influence du niveau du liquide (GNL) sur le taux d'évaporation ..	49
III.8.3 Influence de la hauteur du bac sur le taux d'évaporation	50
III.8.4 Influence du flux solaire sur le taux d'évaporation	50
Conclusion	51
Conclusion Générale	52
Références	53

Table des matières

La liste des figures

Chapitre I	Differents types de stockage
Figure I.1	: caret du réseau de transport du gaz naturel
Figure I.2	: LachainedeGNL
FigureI.3	:TransportduGNLméthanieràsphères.
Figure I.4	: Réservoirs à simple intégrité
Figure I.5	: Exemple deréservoirs à simple intégrité– CovePoint aux USA
Figure I.6	: Réservoirs à double intégrité
FigureI.7	:Exemplederéservoirsàdoubleintégrité–Marmara Eriglisi en Turquie
Figure I.8	: Réservoirs à intégrité totale
Figure I.9	: Réservoir à intégrité totale sur le terminal de Canaport au Canada
Figure I.10	: Réservoir à membrane
Figure I.11	: Exemple de réservoir à membrane – Pyeong Taek en Corée
Figure I.12	: Synthèse des technologiesde réservoirs aériens
Figure I.13	: Exemple de réservoir à membrane semi-enterré
Figure I.14	: Exemple de réservoirs à membrane semi-enterrés
Figure I.15	: Schéma duréservoir de Zeebrugge – Belgique
Figure I.16	: Réservoir semi-enterréà Zeebrugge – Belgique
Figure I.17	: Schéma d'un réservoir « in-pit » avec des parois en terre – RevithousaenGrèce
Figure I. 18	:Réservoirsdu terminal de Revithousaen Grèce
FigureI.19	:Réservoir aérien à double enveloppe métallique
Figure I.20	: Réservoir aérien en béton précontraint
FigureI.21	: réservoir en terre gelée
Chapitre II	isolation thermique du réservoir de stockage
FigureII.1	:détails d'un superisolant
Figure II-2	: Stokagesousterrainavecuneterrecongelée
Figure II-3	: DescriptiondubacenexcavationT5101
FigureII-4	: DescriptiondubacenexcavationT5101associéauxpipes
Figure.II-5	: desfissuresautourdubac
FigureII-6	: Réseau d'auscultation
Chapitre III	Échange thermique entre le bac el le milieu environnant

Table des matières

FigureIII.1	:Réservoir en terre gelée
FigureIII-2	:Réservoir aérien à double enveloppe métallique
Figure III.3	: Schéma du bac de stockage en présence des infiltrations thermiques et évaporation
FigureIII.4	: schémas de stockage de GNL traité
FigureIII.5	: Schéma d'un bac de stockage de GNL
Figure III.6	: l'évolution du taux d'évaporation en fonction du niveau du liquide
FigureIII.7	: taux d'évaporation en fonction de la hauteur du liquide
Figure III.8	: l'influence du flux solaire sur la variation du taux d'évaporation.

Table des matières

Liste des tableaux

Tableau I-1 Caractéristique du gaz naturel et propane butane

Tableau II.1: propriétés de certaines mousses

NOMENCLATURE

C_p	Chaleurspécifiqueàpressionconstante(J/kg/K)
D	DiamètredubacduGNL(m)
E	Energiecinétiquede turbulence
g	Accélérationdelapesanteur(m/s ²)
Gr	NombredeGrashof
h	Coefficient d'échange thermique moyen (W/m ² /K)
h_x	Coefficientd'échangethermique local(W/m ² /K)
H	Hauteurdu bacdestockage(m)
Q	Flux de chaleur thermiquepariétal (W/m ²)
Q'	Flux de chaleur thermique bas du bac (W/m ²)
Nu	NombredeNusselt
P	Pression(Pa)
Pr	NombredePrandtl
Ra	NombredeRayleigh
T	Températuredufluide(K)
T_p	Températurepariétale(K)
T_∞	Températuredansle courantlibre(loindelaparoie)(K)
ΔT	Différencedetempérature(K)
u	Vitesse du fluide dans la couche limite suivant x (m/s)
v	Vitesse du fluide dans la couche limite suivant y (m/s)
x	Positionverticale(m)
y	Positionhorizontale(m)
T	Vitesse adimensionnelle du fluide dans la couche limite suivant
X_V	Vitesse adimensionnelle du fluide dans la couche limite suivant
Y_x	Position adimensionnelle verticale
Y	Positionadimensionnellehorizontale
<u>Lettresgrecques</u>	
λ	Conductivité thermique (W/m. K)
β	Coefficientdedilatationthermique(1/K)
δ	Epaisseur de la couche limite dynamique (m)
δ_t	Epaisseur de la couche limite thermique (m)
θ	Forme adimensionnelle de la température

τ Taux de dissipation

ν Viscosité cinématique (m^2/s)

μ Viscosité dynamique ($\text{kg}/\text{m}/\text{s}$) ou ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

ρ Masse volumique (kg/m^3)

ε Taux de dissipation de l'énergie

Abréviations

GN : Gaz Naturel

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

GPL : Gaz Pétrole_liaéfié

Introduction générale

Introduction générale

Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) joue un rôle de plus en plus important dans l'industrie mondiale de l'énergie, car les réserves de gaz naturel dans le monde sont abondantes et son état condensé les usines de traitement, les usines de liquéfaction rend possible son transport sur de longues distances par les voies maritimes, donnant naissance à de véritables chaînes d'approvisionnement incluant les puits producteurs.

L'Algérie est l'un des plus grands pays producteurs de gaz naturel, pour son exportation vers les pays consommateurs, ce produit est refroidi à une température de -162°C , la température à laquelle il devient liquide. Avant son acheminement vers les méthaniers, il est stocké dans des réservoirs cryogéniques.

Malgré tous les efforts conçus pour la réalisation d'une super isolation thermique de ces réservoirs, les infiltrations de chaleur du milieu ambiant vers l'intérieur des bacs persistent toujours et provoquent l'évaporation du GNL. Le Boil-off représente une perte sensible, surtout que ce phénomène affecte la composition chimique et physique du GNL, après évaporation du méthane.

Dans cette étude on s'intéresse à proposer un bac de stockage de GNL qui présente des avantages par rapport au cas de stockage de GNL est un réservoir en terre gelée situé à Arzew, et l'influence des différents sur le taux d'évaporation du GNL. Pour minimiser les infiltrations de chaleur vers l'intérieur des réservoirs de stockage, et réduction au maximum du taux d'évaporation.

Ce mémoire est composé d'une introduction générale, et trois chapitres :

Chapitre I : Dans le premier chapitre nous exposons des généralités sur le gaz naturel et le gaz naturel liquéfié, ensuite nous présentons les différents types de stockage du GNL.

Chapitre II : Nous présentons étude de cas de stockage de GNL est un réservoir en terre gelée situé à Arzew (Nord –Ouest l'Algérie) avec une description détaillée du bac souterrain, et les problèmes rencontrés lors de son exploitation, et isolants les plus utilisés dans les installations cryogéniques

Chapitre III : proposition d'un bac de stockage de GNL qui moins d'inconvénients que celui étudié dans le chapitre précédent, et l'influence des différents sur le taux d'évaporation du GNL. et enfin une conclusion générale.

et plus particulièrement dans le domaine du gaz naturel liquéfié.

Chapitre I

Differents types de stockage

I.1 Introduction

Le gaz naturel est un combustible fossile. C'est un mélange d'hydrocarbures trouvé naturellement sous forme gazeuse et la deuxième source d'énergie la plus utilisée dans le monde après le pétrole ; son usage se développe rapidement.

Pendant longtemps, le gaz naturel a été considéré comme un sous-produit du pétrole, il était brûlé à la torche sur de nombreux gisements.

Son développement a ensuite été très rapide grâce à l'abondance de ses réserves, à leur répartition sensiblement plus équilibrée que celle des réserves pétrolières et à son excellente qualité pour le consommateur final [1].

Il est connu surtout pour son usage domestique pour le chauffage, la cuisson, et il est comme matière première dans l'industrie chimique, notamment pour la pétrochimie et le raffinage. Il sert à la production d'électricité et pour le transport.

Le gaz naturel est une énergie primaire bien répartie dans le monde, propre et de plus en plus utilisée. Elle dispose de nombreuses qualités abondance relative, souplesse d'utilisation, qualités écologiques, prix compétitifs. La mise en œuvre de cette énergie repose sur la maîtrise technique de l'ensemble de la chaîne gazière, qui va de l'extraction aux utilisateurs, en passant par le stockage, le transport, et la distribution.

I.2 Gaz naturel en Algérie

La découverte du gaz naturel pour la première fois en Algérie remonte à l'année 1956, au mois de novembre, dans les champs de Hassi R'mel et In-Amenas au sud du pays. Ces champs renferment l'une des plus importantes réserves mondiales du gaz naturel. Par la suite, ils se sont reliés aux usines de production du gaz naturel liquéfié GNL aux côtes Est et Ouest du pays (Skikda et Arzew), par des gazoducs comme moyen d'acheminement. La première compagnie algérienne du gaz nommée CAMEL a été installée à Arzew en décembre 1961, par les sociétés françaises air liquide et SNRIPA, et la société anglaise CONTHINTERNATIONAL. [2]

L'Algérie a une importante industrie du gaz naturel, et elle occupe la 7ème place dans le monde en matière de ressources prouvées en gaz naturel, la 5ème en production (3 % de la production mondiale et de 60 % de la production africaine) .

L'Algérie a exporté environ 1,5 milliards de pieds cubes de gaz naturel en 2016, dont environ 910 milliards de pieds cubes ont été transportés via des pipelines et 578 milliards de pieds cubes par méthaniers. L'Algérie est le deuxième fournisseur européen de gaz naturel en dehors de la région

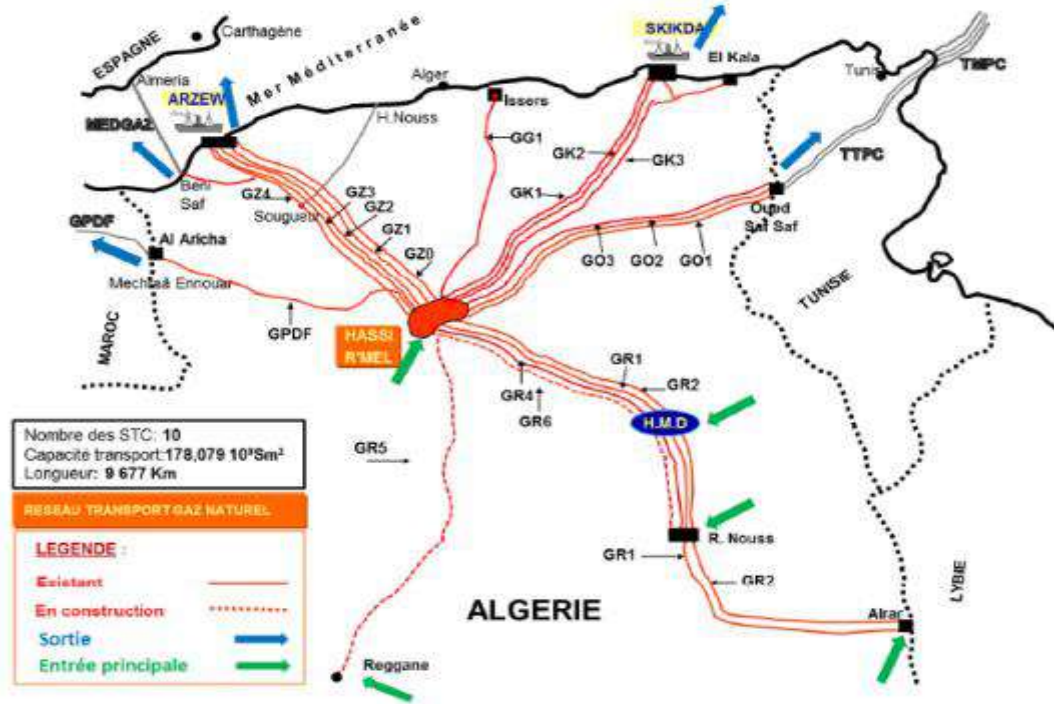
La consommation interne du gaz naturel dans le secteur énergétique (production d'électricité et de chaleur) est estimée de 10186 millions m³ l'équivalent de 427822 Téra joules en 2016. [3]

I.2.1 Description du réseau de transport du gaz

Le transport du gaz consiste à l'acheminer depuis la zone d'extraction jusqu'à la zone de consommation afin d'alimenter les réseaux de distribution. A l'échelle nationale ou internationale, le transport du gaz relie les gisements aux réseaux de distribution de manière

efficace, généralement invisible et en toute sécurité, les moyens de transport du gaz doivent parfois couvrir de longues distances et traverser plusieurs frontières afin de relier les pays producteurs aux pays consommateurs. Il existe deux moyens complémentaires pour transporter le gaz efficacement :

- les gazoducs.
- la transformation en gaz naturel liquéfié (GNL).



I.3 Caractéristique du gaz naturel liquéfié

GNL signifie Gaz Naturel Liquéfié. Le gaz naturel est le même gaz utilisé dans les maisons pour la cuisine et le chauffage. Le GNL est du gaz naturel qui a été transformé en un état liquide en le refroidissant à -162°C (-260°F), à une pression de 1 bar, par un processus de réfrigération dans des usines de liquéfaction. C'est un liquide cryogénique, inodore par nature, clair, non corrosif et non toxique. Il est composé principalement de méthane, ainsi que d'éthane, de propane et d'autres hydrocarbures plus lourds.

Les dangers potentiels du GNL résultent de ses propriétés fondamentales, notamment sa nature cryogénique et ses caractéristiques de dispersion et d'inflammabilité. En raison de sa nature cryogénique, le GNL gèlera tout matériau avec lequel il entre en contact. Sous forme liquide, le GNL ne peut pas exploser et n'est pas inflammable. Ce n'est que lorsque le GNL est réchauffé et retourne à son état gazeux (Avant que l'un de ces dangers puisse se matérialiser, un rejet de GNL devrait se produire).

Principales caractéristiques du GNL :

- Contient principalement du méthane, liquide cryogénique incolore.
- Point d'ébullition atmosphérique de -163°C à -160°C .

- Densité de 458-463 Kg/m³ (selon la composition).

1 m³ de GNL à pression atmosphérique équivaut à 600 m³ de gaz naturel.[8]

Propriétés		Gaz naturel	Propane	Butane
Formule chimique		CH ₄	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Point d'ébullition du liquide à pression atmosphérique	°F °C	-259 -162	-44 -42	32 0
Gravité spécifique de la vapeur (Air=1)		0,6	1,53	2,00
Gravité spécifique du liquide (Eau=1)			0,51	0,58
Pouvoir calorifique à 60°F (15°C)	BTU/cuft Kcal/m ³	1012 9005	2516 22390	3280 29190
	BTU/gal Kcal/L		91690 6100	102032 6790
	BTU/lb Kcal/kg		21591 11995	21221 11790
La chaleur latente de vaporisation	BTU/gal Kcal/kg		785 103	806 93
Poids liquide	Lb/gal Kg/L		4,24 0,508	4,81 0,576
Volume de vapeur de 1 gallon de liquide à 60°F Volume de vapeur de 1 litre de liquide à 15°C	Cuft m ³		36,39 0,272	31,26 0,234
Volume de vapeur de 1 lb de liquide à 60°F Volume de vapeur de 1 kg de liquide à 15°C	Cuft m ³		8,547 0,534	6,506 0,406
Limites combustibles	% de gaz dans l'air	5-15	2,4-9,6	1,9-8,6
Quantité d'air nécessaire pour bruler 1 cuft de gaz Quantité d'air nécessaire pour bruler 1m ³ de gaz	Cuft m ³	9,53	23,86	31,02
Température d'inflammation dans l'air	°F °C	1200 650	920-1020 490-550	900-1000 480-540
Température maximale de la flamme dans l'air	°F °C	3568 1964	3595 1980	3615 1991
Indice d'octane		100	Plus de 100	92

TableauI-1Caractéristique du gaz naturel et propane et butane [9]

I.4 La chaine 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.4).

Les principales étapes sont :

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

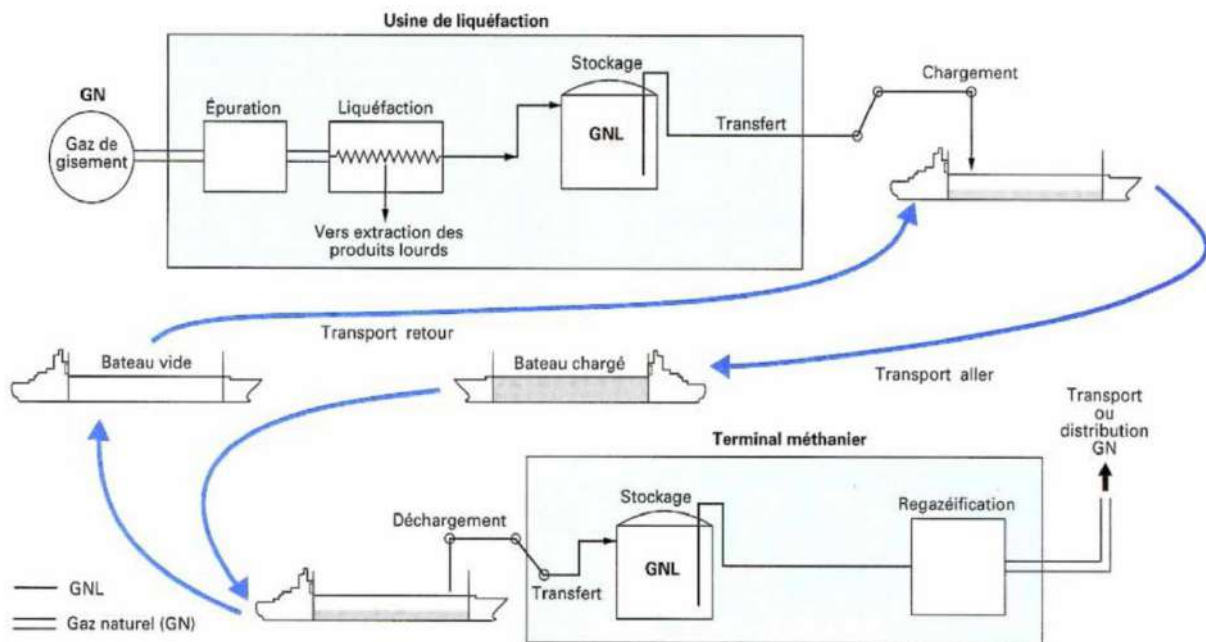


Figure I.2: La chaîne de GNL [10].

Toutes ces opérations s'effectuent à des niveaux de pression et de température très différentes et sont généralement les siéges d'une formation de deux phases : l'une liquide, l'autre gazeuse dont les compositions varient selon leur nature et leur origine.

I.4.1 La liquéfaction

La première usine de GNL à grande échelle a été construite à Arzew, en Algérie, en 1964 et mise en ligne en 1965 [18]. Bien que chaque usine de liquéfaction est unique dans la conception et la taille,

- L'étape de liquéfaction est constituée principalement par :
 1. Des unités d'épuration du gaz : élimination de CO_2 , H_2S , H_2O , gazolines (essences naturelles);
 2. Des unités de liquéfaction, qui comprennent :
 - Les échangeurs cryogéniques et les colonnes de distillation,
 - Le ou les compresseurs de cycle, avec leurs turbines d'entraînement à gaz ou à vapeur,
 - Des chaudières à vapeur, le cas échéant,
 - Le circuit d'eau de mer de réfrigération (compresseur, turbine);

3. Des réservoirs cryogéniques pour le stockage du GNL et des GPL;
4. D'une ligne de chargement.

I.4.2 Le transport

Le transport du GNL se fait principalement par des navires frigorifiques conçus pour le gaz naturel appelé les méthaniers. Ces navires sont exploités à faible pression atmosphérique, le stockage du GNL se fait dans des réservoirs adiabatiques. L'isolation n'étant pas parfaite, le gaz produit par l'évaporation est utilisé par les navires comme carburant.

La première chaîne au monde de transport de GNL est créée en 1964: elle achemine le gaz depuis Hassi R'Mel (Sud-Algérien) jusqu'en Angleterre ($10^9 \text{ Nm}^3/\text{an}$) et en France à Fos-sur-Mer ($0,5 \times 10^9 \text{ Nm}^3/\text{an}$) en passant par l'usine de liquéfaction d'Arzew.

La figure I.3 représente un méthanier avec des compartiments sphériques, et un autre avec un compartiment cubique de $138\,000 \text{ m}^3$. La plupart des usines de GNL ont leur propre flotte dédiée au GNL. La flotte mondiale de méthaniers comporte 103 navires dont les tailles s'échelonnent entre $18\,000$ et $138\,000 \text{ m}^3$ de GNL. Ces navires délivrent leurs cargaisons dans 36 terminaux méthaniers (sur 32 sites) dont plus de la moitié est située au Japon. Ces terminaux comportent, d'une part comme les usines, des installations de déchargement et de stockage, et d'autre part des installations de régazéification de GNL [11].



Figure I.3: Transport du GNL : un méthanier à sphères.

I.4.3 Les terminaux de regazéification

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

Les principales composantes d'une installation de régazéification sont les suivantes:

- 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.

I.5 Différents types de stockage

Il existe plusieurs types de réservoirs qui sont couramment utilisés dans l'industrie mondiale. Les principaux sont : [10]

- 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.

I.5.1 Réservoir aérien à « simple intégrité »

Les premiers réservoirs conçus pour le stockage de GNL étaient issus des pratiques des industries pétrolières, adaptées aux conditions cryogéniques particulières.

Un réservoir « simple intégrité » (confinement simple) est composé de (Figure 4 et Figure 5):

1. une cuve interne autoportante qui contient directement le GNL, réalisée en matériau ductile à basse température (aluminium, acier inoxydable ou acier à 9% de nickel),
2. une isolation permettant de contrôler l'évaporation du contenu liquide de la cuve interne réalisée en :
 - a. matériau pulvérulent pour les parois latérales (nom commercial "perlite", fabriquées sur place par expansion de sable de silice),
 - b. perlite ou laine de verre pour l'isolation haute,
 - c. bloc de verre cellulaire
3. une cuve externe remplissant trois fonctions :
 - a. empêcher la pénétration d'eau provenant de l'extérieur vers la cuve interne,
 - b. contenir l'isolation,
 - c. être étanche au gaz d'évaporation produit par le liquide stocké.

A noter que l'enveloppe externe n'est pas conçue pour contenir le GNL de la cuve primaire (pas de matériau ductile à basse température). En fonction des options prises pour le confinement des vapeurs et l'isolation thermique, il existe plusieurs types de réservoirs à simple intégrité.

Pour permettre de recueillir la totalité du contenu de l'enveloppe primaire en cas de perte de confinement de celle-ci, une cuvette de rétention est construite autour du réservoir dans un matériau adapté aux conditions cryogéniques (talus de terre ou excavation de terre lorsque le relief le permet, muret en béton).

L'historique du GNL ne révèle aucun accident sur un réservoir de ce type (respectant tous les critères de construction). La raison de cette bonne exploitation est due :

- à la bonne adéquation des matériaux face aux conditions cryogéniques,
- à la qualité du GNL exploités exempte de toute impureté évitant les risques de corrosion internes des équipements.

Le système d'assise doit permettre d'éviter la déformation du fond du réservoir (par soulèvement par le gel et poussée hydrostatique).

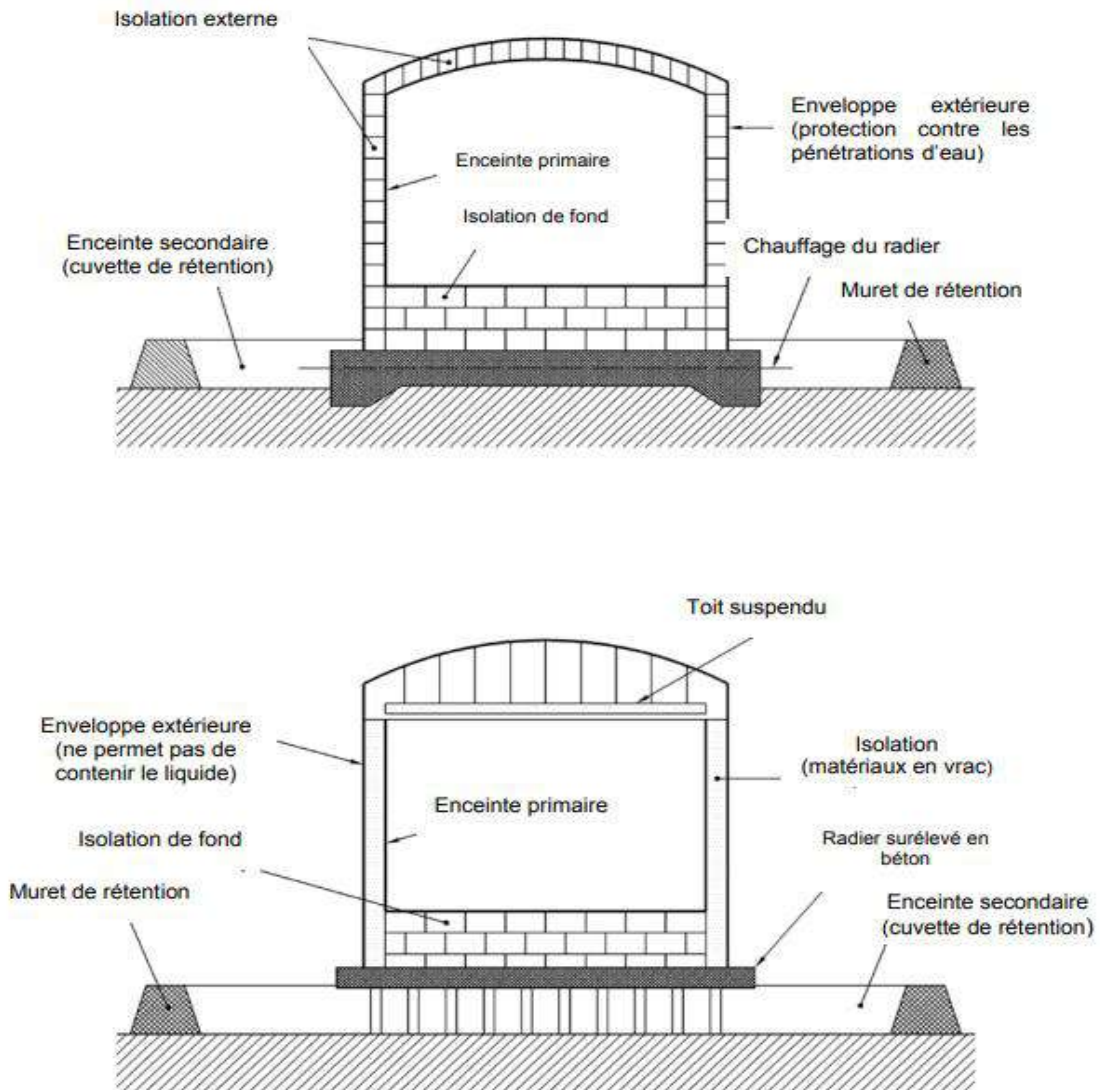


Figure I.4: Réervoirs à simple intégrité[19]

la Figure I.4 suivant présente deux types de réservoirs aériens à simple intégrité:

- le premier réservoir repose sur une dalle en béton chauffée,
- le second réservoir est construit sur un radier surélevé reposant sur des piliers.



Figure I.5: Exemple de réservoirs à simple intégrité– Cove Point aux USA

I.5.2 Réservoir aérien a « double intégrité »

Comme détaillé précédemment, le réservoir à simple intégrité, associé à une cuvette de rétention, conduit à des surfaces de stockage de grandes dimensions sur les terminaux méthaniers, avec des zones d'effets thermiques importantes.

L'objectif de cette seconde technologie de réservoir était de diminuer les surfaces au sol de ces zones de stockage (directement par les cuvettes de rétention et indirectement par les distances d'effets consécutives à un accident majeur) tout en améliorant les conditions de sécurité (limiter les risques d'épandage de GNL suite à des agressions externes, diminuer les zones d'effets thermiques autour des réservoirs) ...

Ainsi, un second type de réservoir a été développé à la fin des années 1970 : le réservoir à double intégrité.

Pour assurer cette fonction de rétention du liquide, la principale modification apportée a été de rapprocher les cuvettes de rétention au plus près des réservoirs (réduisant la superficie) tout en garantissant la collecte de l'ensemble du contenu de l'enceinte primaire.

Les réservoirs à double intégrité (confinement double) sont composés de (Figure 6 et Figure 7)

- une enceinte primaire auto-porteuse en acier spécial (cryogénique – 9% Nickel) capable de contenir le liquide réfrigéré en conditions normales de fonctionnement (cf. réservoir à simple intégrité décrit dans le paragraphe ci-dessus) et comprenant une cuve interne, une isolation et une

enveloppe externe,

- une enceinte secondaire (structures supplémentaire) autour de ce réservoir constituée 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 primaire, en cas de fuite, et placée à proximité de la cuve primaire.

La cuve secondaire est du type à toit ouvert et ne peut donc nullement retenir les vapeurs émises par le produit. L'espace compris entre les cuves primaire et secondaire peut être couvert par un écran anti-pluie » assurant la protection contre les intempéries (pluie, neige), l'infiltration d'impuretés, etc. A noter que les réservoirs à double intégrité ne possèdent pas de cuvette de rétention supplémentaire autour de la cuve extérieure car cette fonction est assurée par l'enceinte secondaire. Ainsi, la zone d'effets thermiques se trouve considérablement réduite.

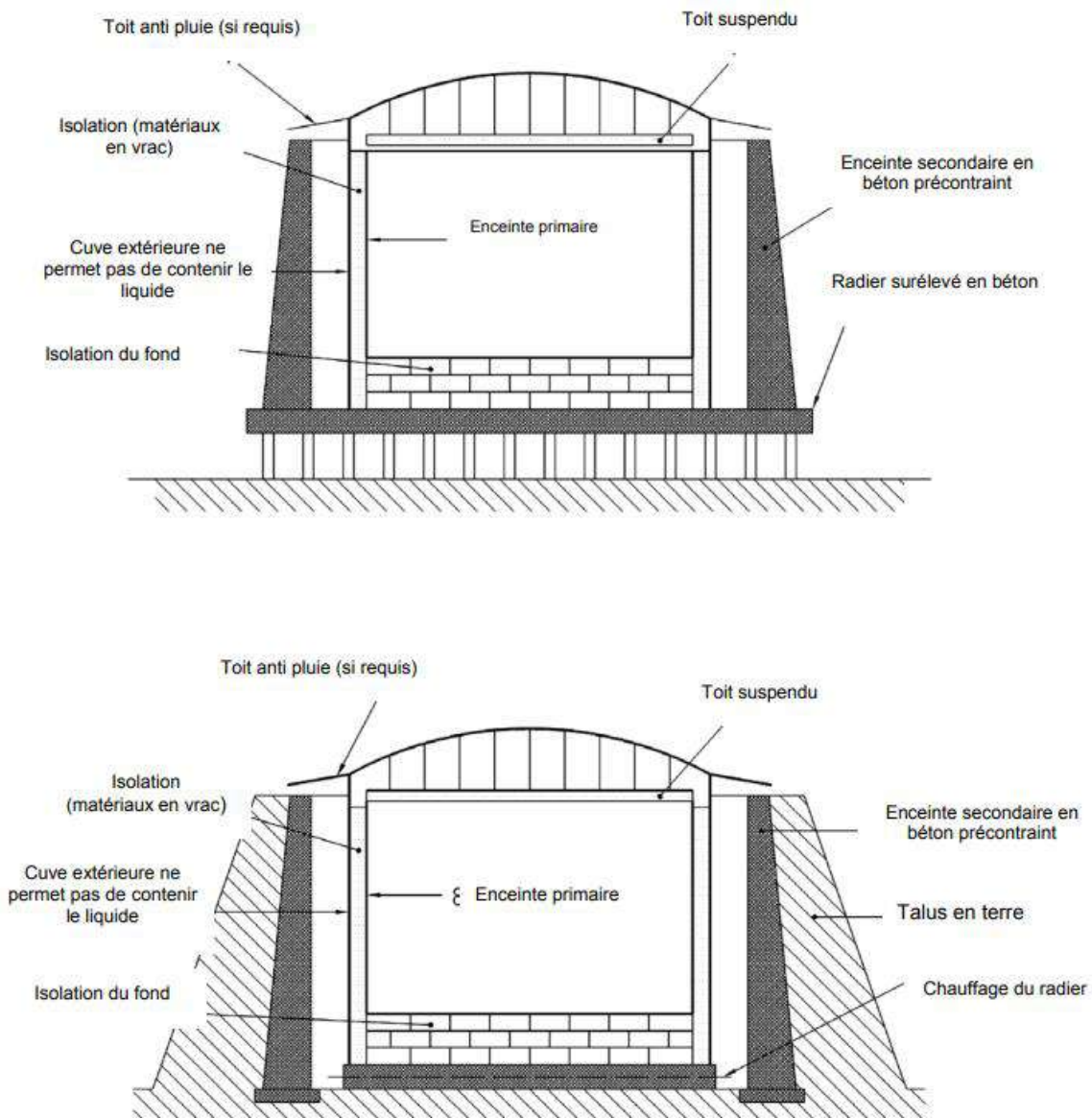


Figure I.6: Réservoirs à double intégrité [19]

La figure I.6 : présente deux types de réservoirs aériens à double intégrité:

- le premier réservoir à double enceinte est posé sur un radiateur élevé et sur des pieux,
- le second réservoir est construit sur une dalle béton chauffée à même le sol.



Figure I.7: Exemple de réservoirs à double intégrité [2 0]

I.5.3 Reservoir Aerien A « Integrite Totale »

La troisième évolution a consisté à intégrer au réservoir lui-même une cuve externe, résistante aux conditions cryogéniques, permettant de protéger le contenu de la cuve interne contre une agression extérieure, de contenir le volume de GNL stocké, de fournir une étanchéité pour les liquides et de confiner les vapeurs de GNL. Ce sont les réservoirs à intégrité totale.

La principale évolution du réservoir à intégrité totale réside dans l'intégration d'une enceinte en béton armé précontraint, directement liée et construite sur la base du réservoir couronné d'un dôme d'acier et de béton armé.

Ces réservoirs sont composés de (Figure 8 et Figure 9):

- une enceinte primaire auto-porteuse en acier spécial (cryogénique – 9% Nickel) capable de contenir le liquide réfrigéré en conditions normales de fonctionnement,
- une isolation identique aux technologies précédentes,
- une enceinte secondaire auto-porteuse en béton armé précontraint pourvue d'un dôme hémisphérique capable d'assurer les fonctions suivantes :
 - ◆ En service normal:
 - contenir les vapeurs émises du réservoir et maintenir l'isolation de la cuve primaire,
 - éviter la perte de capacité de confinement à la suite d'un scénario accidentel résultant d'une agression extérieure (impact, feu...).
 - ◆ En fonctionnement dégradé (cas de fuite de l'enceinte primaire):
 - Contenir la totalité du liquide réfrigéré,
 - Contrôler l'évacuation de la vapeur provenant de cette fuite et ce sans

que la capacité structurelle contenant lavapeurne soit affectée.

La mise à l'air libre des vapeurs est autorisée mais elle doit être contrôlée(système de décharge). Le premier réservoir à intégrité totale fut construit en 1977 sur l'usine de liquéfaction d'Abu Dhabi. Depuis les années 1980, la quasi-totalité des réservoirs construits sur des terminaux en Europe et au Japon sont de cette technologie. Cette sécurité intégrée a permis aux constructeurs de concevoir des réservoirs de grande capacité : 160 000 m³ sur ARZEW (usine de liquéfaction en Algérie) ou CANAPORT (terminal de gazéification au Canada) et jusqu'à 180 000 m³ au Japon et en Angleterre.

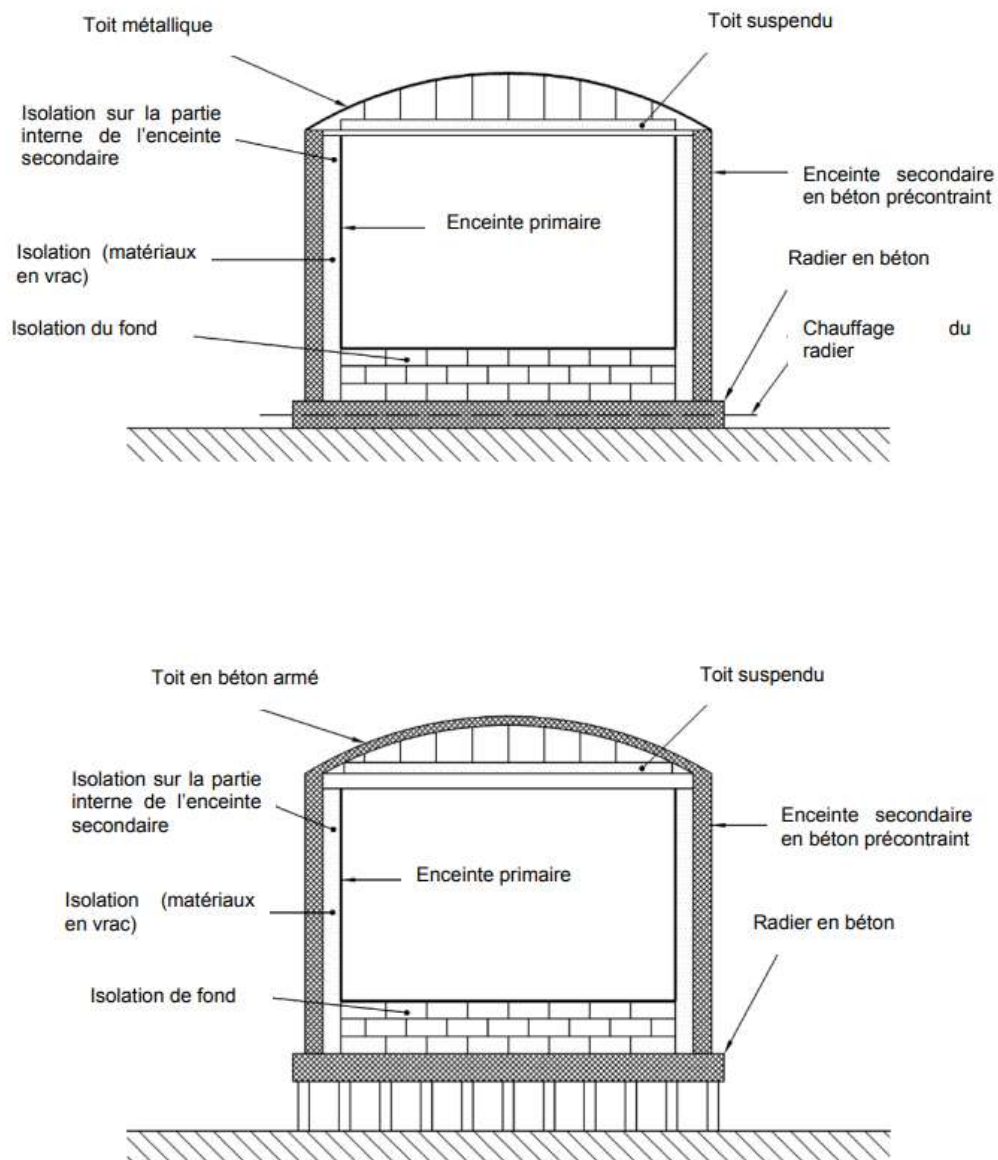


Figure I.8: Réervoirs à intégrité totale [19]

La Figure I.8 : présente deux types de réservoirs aériens à intégrité totale :

- le premier réservoir repose sur une dalle en béton chauffée, le second réservoir est construit sur un radier surélevé reposant sur des piliers. A noter que l'EN 14620 admet la possibilité de conception d'un réservoir à intégrité totale avec la paroi externe en béton mais en acier cryogénique.



Figure I.9: Réservoir à intégrité totale sur le terminal de Canada [20]

I.5.4 Réservoir aérien a « membrane »

Ala différence du réservoir à intégrité totale, le réservoir à membrane (Figure 10 et Fig 11) est basé sur la séparation des fonctions structurelle et d'étanchéité. Cette variante est issue de techniques de conception navale.

Les réservoirs se composent principalement de:

- une enveloppe externe intégrale en béton avec à son sommet (sous le dôme en béton⁶) un toit avec revêtement en acier (même conception qu'un réservoir à intégrité totale),
- une barrière contre l'humidité qui se traduit par un revêtement époxy pour empêcher la pénétration de l'eau du béton vers l'isolation (sous azote),
- une isolation constituée de panneaux sandwich : les couches supérieure et inférieure sont en contreplaqué, l'âme est constituée de panneaux rigides de mousse de polyuréthane ou PVC,
- une membrane ondulée en inox fixée sur les panneaux d'isolation et au fond du réservoir. La membrane est soudée pour former un revêtement interne étanche aux liquides et au gaz (confinement interne).
- Toutes les charges hydrostatiques ainsi que les efforts de compression exercés sur la membrane doivent être transmis, via l'isolation support, à la cuve en béton.
- Les vapeurs doivent être confinées par le dôme du réservoir, lequel peut former une structure composite identique ou constituer un toit
- « conventionnelle » avec un toit bombé étanche aux gaz et une isolation sur un toit

suspendu.

- En service normal, la fonction d'étanchéité au liquide et vapeur est réalisée comme suit :
étanchéité liquide par la membrane inox,
étanchéité vapeur par la membrane inox et le toit hémisphérique en acier.
- Encas de fuite de membrane, l'enceinte béton:
 - contiendra la totalité du liquide réfrigéré,
 - contrôlera l'évacuation de la vapeur provenant de cette fuite et ces ans que la capacité structurelle de contenant de la cuve nesoit affectée.

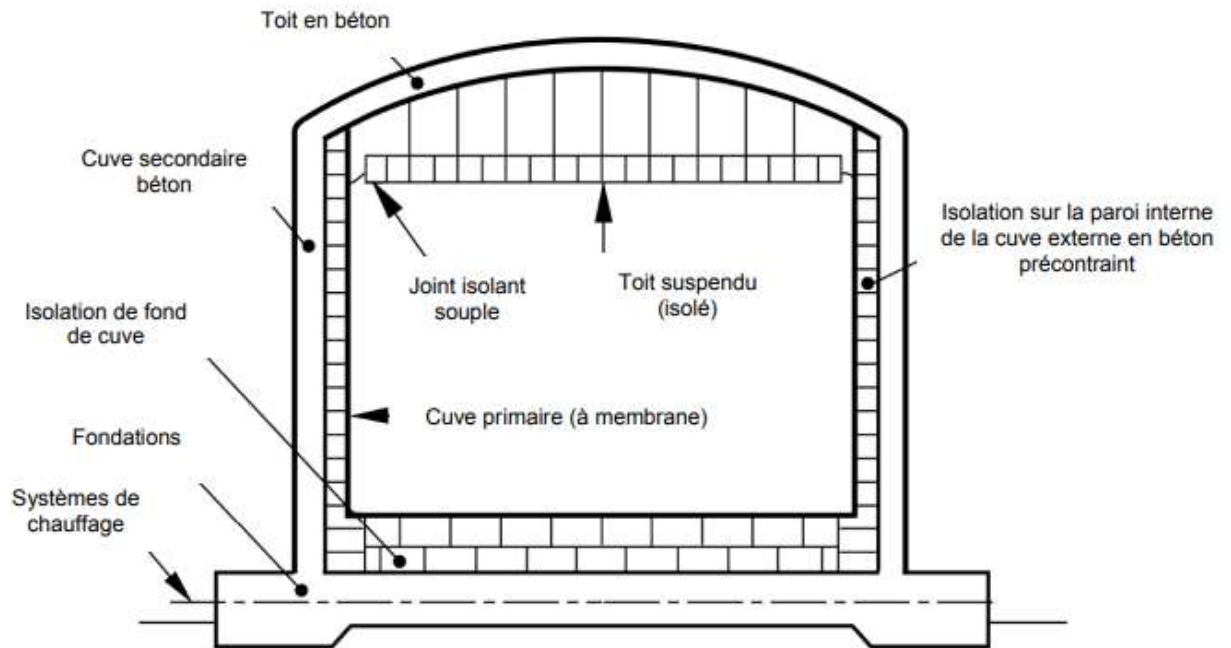


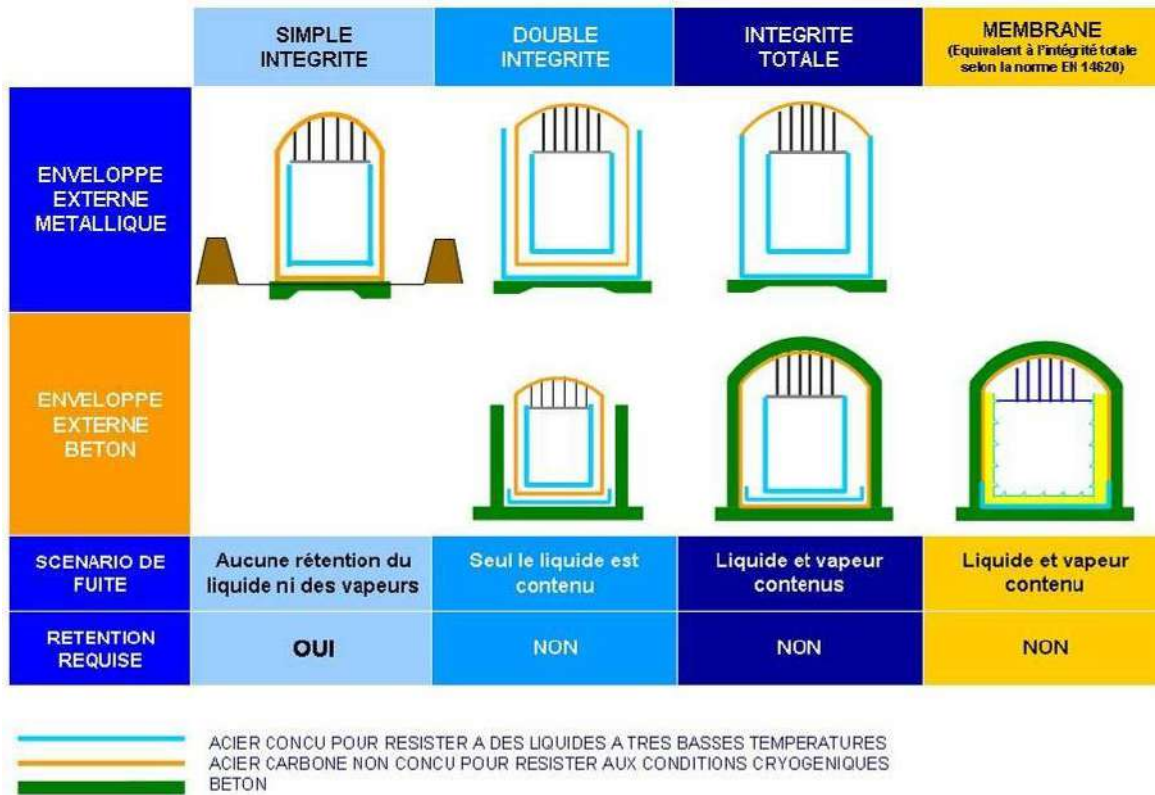
Figure I.10: Réservoir à membrane



Figure I.11: Exemple de réservoir à membrane – Pyeong Taek en Corée [21]

I.5.5 Synthèse des technologies de réservoirs aériens

La figure ci-dessous présente une synthèse des quatre technologies de réservoirs aériens décrites dans les paragraphes précédents.



ragraphes précédents.

Figure I.12: Synthèse des technologies de réservoirs aériens [20]

I.5.6 Réservoirs semi-enterrés et enterrés à membrane

Cette conception a été développée, pour les réservoirs enterrés, au Japon par Tokyo Gas Engineering (TGE) au début des années 1970 puis reprise par la suite par d'autres industries gazières japonaises.

Elle combine deux techniques : la membrane (basée sur un développement de la technologie Technigaz) qui a déjà été décrite dans le paragraphe précédent et la technique d'une cuve en béton semi-enterrée.

Les trois principales raisons associées à cette dominance de technologie de réservoirs sont liées à l'environnement industriel présent sur le pays :

- l'exiguïté des surfaces disponibles,
- la proximité des villes par rapport aux sites industriels,
- le risque de tremblement de terre.

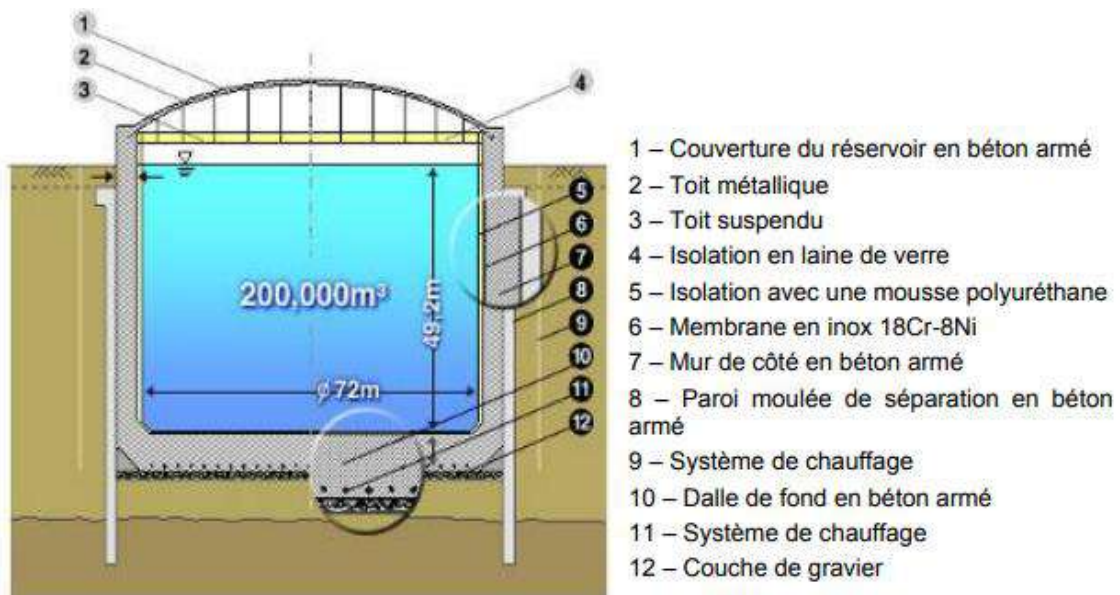
Compte tenu des deux premières situations, la contrainte de construire des réservoirs à l'intérieur de cuvette de rétention de grandes dimensions est apparue très pénalisante.

D'autre part, l'implantation géographique des terminaux méthaniers est une seconde contrainte, ce qui amène à la troisième raison. En effet, tous les réservoirs au Japon sont construits le long de la baie de Tokyo, qui est l'un des endroits les plus sévères pour les tremblements de terre au Japon. Avec cette technologie de réservoir, quelle que soit l'amplitude du tremblement de terre, il n'y aura pas de déversement de liquide sur le sol dès lors que le niveau de liquide est en dessous d'un niveau du sol.

Lesystème de confinement est très similaire à celui décrit précédemment :

- une membrane en acier inoxydable en tôles ondulées soudées entre elles. La principale différence est l'épaisseur de la membrane légèrement supérieure par rapport à celle de la technologie TECHNIGAZ⁷,
- des panneaux d'isolation du type mousse de polyuréthane,
- un toit suspendu à la coupole en acier carbone,
- une structure en béton (comme déjà mentionné).

Il convient de noter que ces réservoirs sont construits dans des zones avec de mauvaises conditions de sol et/ou avec la présence d'eau souterraine. Cette eau va induire une forte pression hydrostatique sur la structure. De ce fait, pour construire le réservoir, il est nécessaire d'assécher la zone où est situé le réservoir (ex : paroi moulée de la Figure 13). D'autre part, la halle



le fond possède une épaisseur suffisante pour compenser la poussée hydrostatique.

Figure I.13: Exemple de réservoir à membrane semi-enterré [21]



Figure I.14: Exemple de réservoirs à membrane semi-enterrés [21]

I.5.7 Autres technologies : réservoirs en fosse (« in pit tank »)

Les réservoirs semi-enterrés ou enterrés sont semblables aux technologies aériennes, sauf qu'ils sont situés dans une fosse. Ces réservoirs peuvent être considérés comme des réservoirs à double intégrité (voire triple) où le mur du second confinement est remplacé par le sol. La fosse contenant le réservoir peut être soit en béton (cas de Zeebrugge en Belgique - Figure 15 et Figure 16) soit directement en terre avec une peau protectrice (cas de Revithousa en Grèce - Figure 17 et Figure 18).

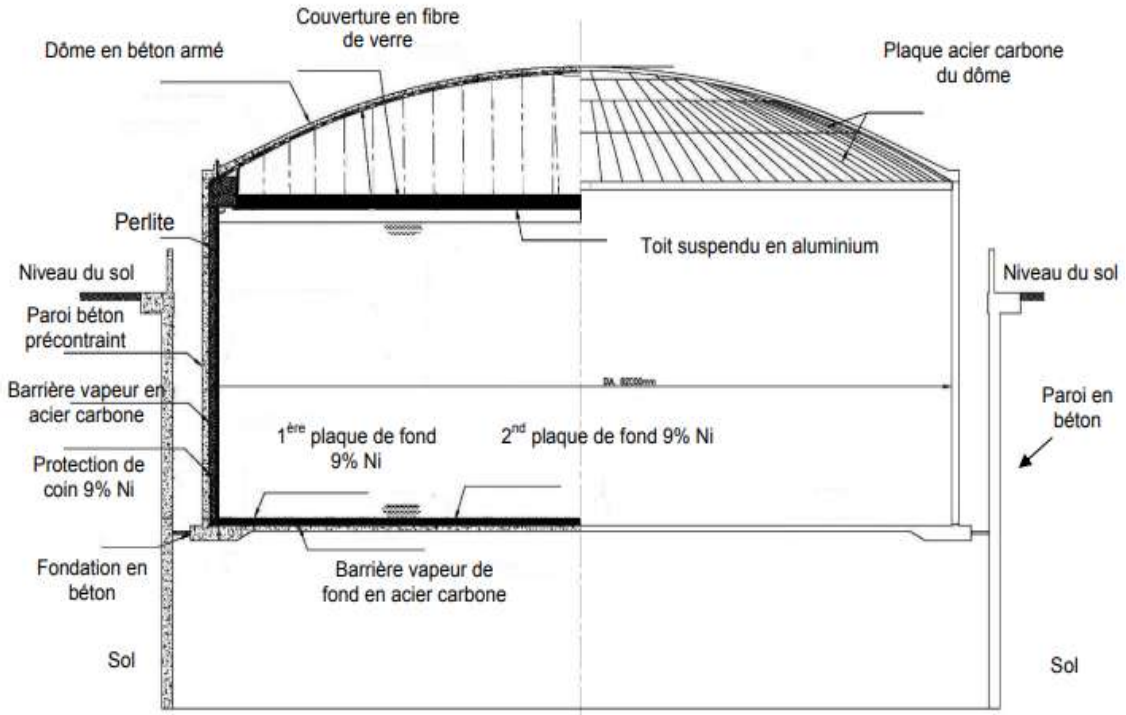


Figure I.15: Schéma du réservoir de Zeebrugge – Belgique [20]



Figure I.16: Réservoir semi-enterré à Zeebrugge – Belgique [20]

La Figure 16 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 de l'enceinte secondaire.

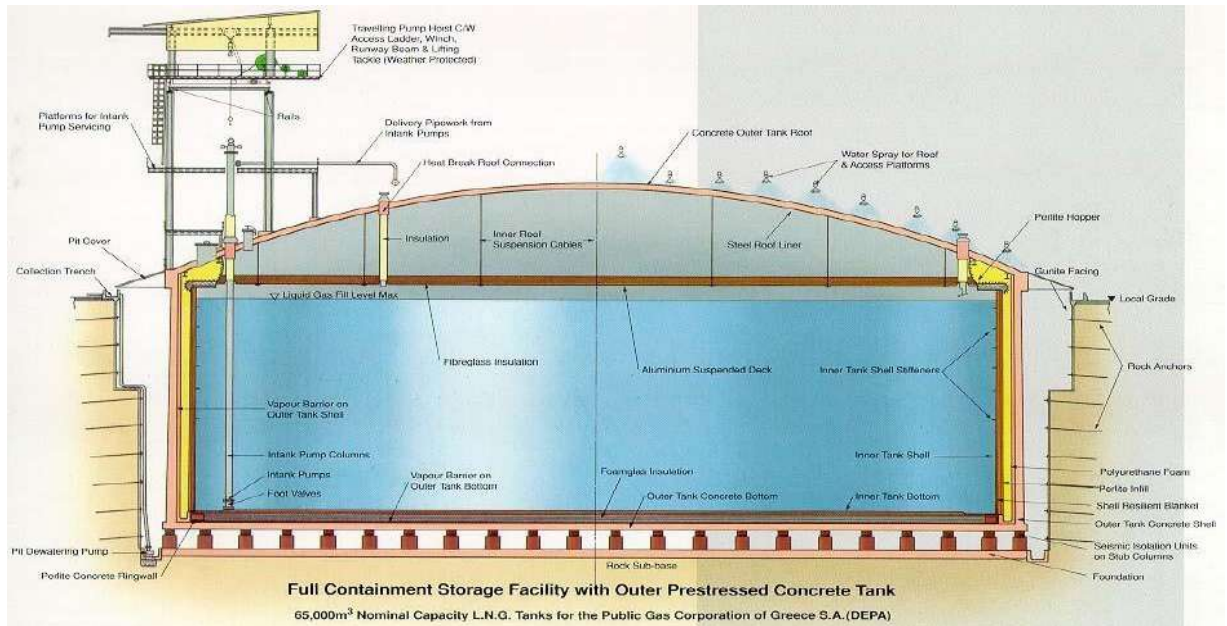


Figure I.17: Schéma d'un réservoir « in-pit » avec des parois en terre –Revithousa en Grèce [20]



Figure I.18 : Réservoirs du terminal de Revithousa en Grèce [20]

I.6 Différent type de réservoirs de stockage

Plusieurs types de réservoirs ont été construit à travers le monde; ils se différencient selon leur configuration par rapport au niveau du sol et selon qu'ils soient entourés ou non d'une cuvette

de rétention.

Une cuvette de rétention a pour fonction de recueillir d'éventuelles fuites importantes de GNL provenant d'une altération du réservoir de stockage; son existence et sa conception dépendent directement de la conception du bac lui même.

Actuellement les réservoirs existants peuvent être classés selon quatre catégories:

- Réservoir aérien à double enveloppe métallique
- Réservoir aérien en béton précontraint
- Réservoir en béton moulé et enterré
- Réservoir en sol gelé

I.6.1 Réservoir aérien à double enveloppe métallique

Les réservoirs aériens à double parois métalliques sont les plus répandus ainsi que les plus largement admis et employés en stockage du GNL.

Parmi les avantages, l'endroit d'implantation de ces réservoirs ne dépend pas des conditions géologiques du site et leur système d'isolation thermique est prévisible pour n'importe

quel taux d'évaporation pratique. C'est en 1957 que le premier réservoir du GNL à double parois métalliques a été construit à Charles Lake en Louisiane (USA) à partir de techniques et des matériaux utilisés auparavant dans l'industrie cryogénique.

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

- La cuve interne (de nature variable suivant les procédés de réalisation) est une membrane mince en métal présentant les propriétés requises pour recevoir le GNL. Certains alliages d'aluminium, d'acier nickelé sont largement utilisés. Cette cuve repose sur un matériau isolant, rigide qui transmet les charges hydrostatiques à une dalle en béton supportant l'ensemble. Le toit de cette cuve est soit autoportant, soit réalisé par un voile métallique suspendu à la charpente.
- Une cuve extérieure en acier au carbone protégée par les matériaux isolants des intempéries et supportant les surcharges climatiques.
- Des matériaux isolants (les plus utilisés sont la perlite, la laine de verre et les matières plastiques expansées) remplissant l'espace entre les cuves. Cet espace est maintenu en atmosphère de gaz inerte pour éviter l'altération des propriétés des isolants par l'humidité.

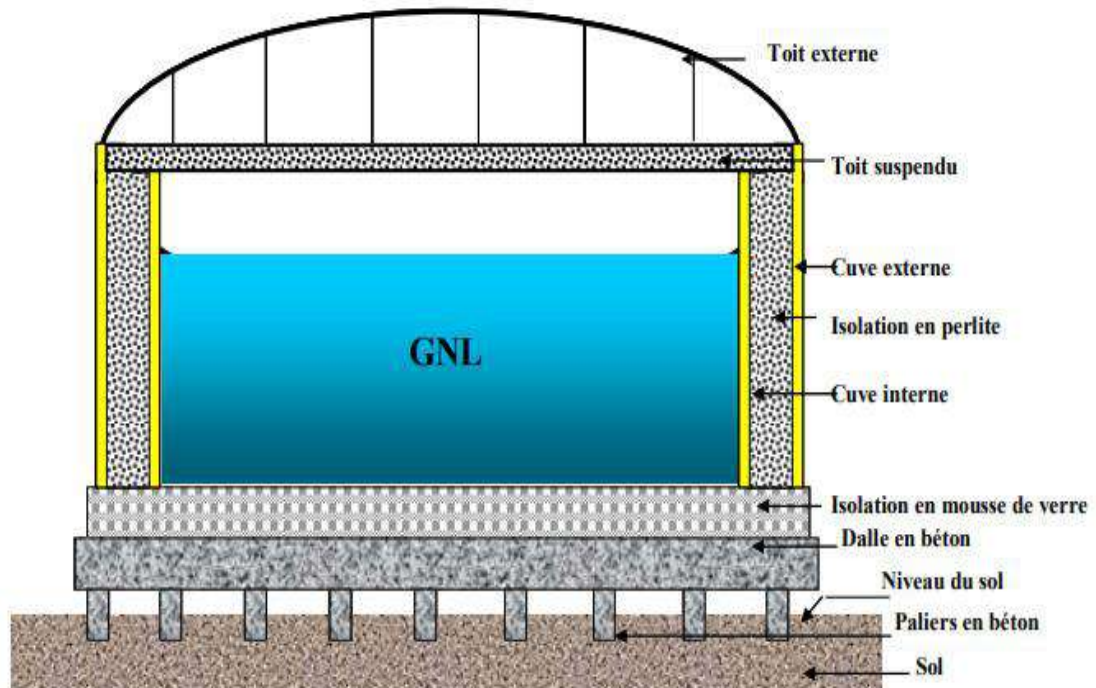


Figure I.19: Réservoir aérien à double enveloppe métallique

Le réservoir est doté d'appareils de contrôle et de sécurité tels que les soupapes, les jauges de niveau et les sondes de mesure de pression et de température. L'isolation du fond est généralement réalisée par des éléments en verre cellulaire (mousse-glass), incombustible, étanches à l'eau et résistant à la compression.

I.6.2 Réservoir aérien en béton précontraint

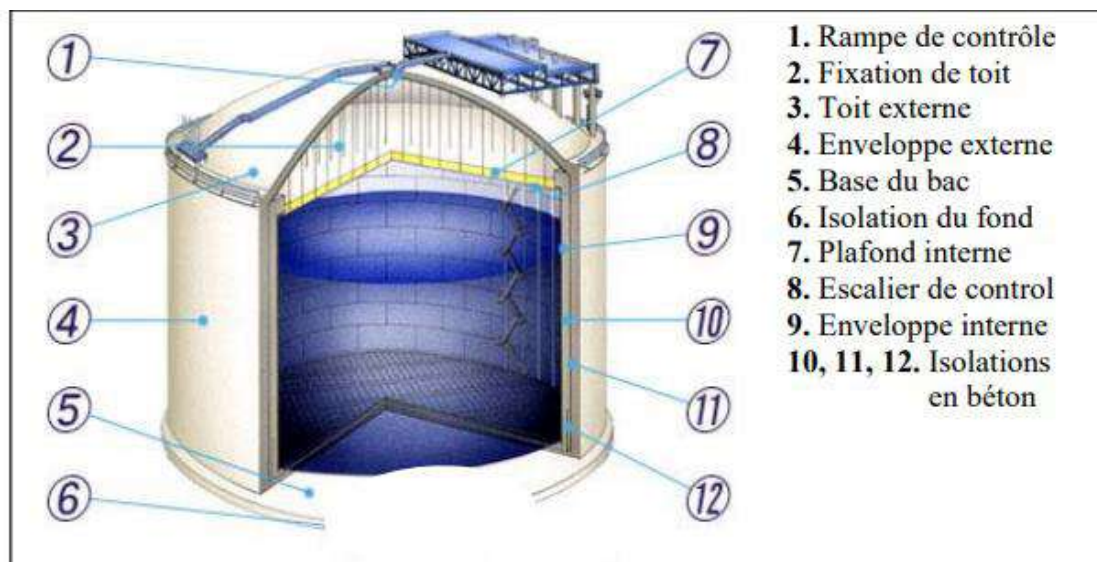


Figure I.20: Réservoir aérien en béton précontraint

La technique des réservoirs en béton précontraint pour les liquides cryogéniques a été étudiée et essayée aux USA dans les années soixante, le premier réservoir été destiné à contenir de l'oxygène liquide.

Dans les réservoirs conçus suivant la technique Précharge, la cuve intérieure est constituée de panneaux préfabriqués en béton précontraint. Ces panneaux sont revêtus extérieurement d'une barrière d'étanchéité en acier au carbone.

I.6.3 Réservoir en béton moulé dans le sol

Le premier réservoir en béton moulé dans le sol à travers le monde et dont la capacité est de 10000 m³ a été conçu et réalisé par IHI au Japon.

Il est constitué par des parois en béton moulé, recouvert d'une isolation en polyuréthane, la membrane en contact avec le GNL étant en acier inoxydable au fré.

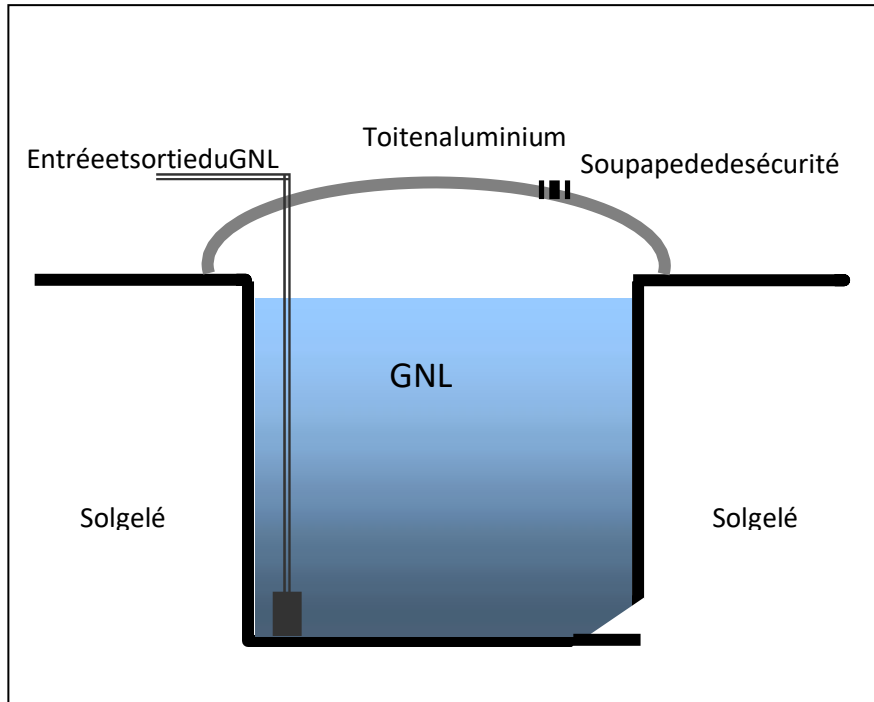
Le fond du bac de stockage est constitué d'une couche de béton précontraint, tandis que la toiture est en charpente métallique. [10]

I.6.4 Réservoir en terre gelée

Le seul réservoir en terre gelée encore en service est celui de la Camel à Arzew, il a été construit vers 1964 et possède une capacité de stockage d'environ 38000 m³.

La construction de tel réservoir dépend essentiellement de la nature du sol qui doit avoir un taux d'humidité supérieure à 30 %. En effet le contact du GNL avec la terre contenant cette eau favorise sa solidification (à 0°C), ce qui constitue par la suite une isolation efficace et naturelle. [10]

De nos jours cette technique a été abandonnée car le taux d'évaporation dans ces bacs de stockage est très important et excède les normes fixées par les industriels.



FigureI.21 : réservoir en terre gelée

I.7 La sécurité des installations

Dans son état liquide, le GNL n'est pas explosif et n'est pas inflammable. Pour que le GNL puisse s'enflammer il faut d'abord le vaporiser, et il doit être mélangé avec de l'air dans les proportions spécifiques (la plage d'inflammabilité est de 5% à 15%). D'où le risque d'explosion en cas de fuite de GNL.

Plusieurs accidents sur le site impliquant ou en relation avec le GNL sont énumérés ci-dessous, ont été à l'origine du déclenchement de plusieurs améliorations techniques:

- **20 Octobre 1944** à Cleveland, 128 personnes ont péri dans une explosion et l'incendie dû à une défaillance dans un réservoir de GNL. Le réservoir n'a pas eu un mur de rétention. Le bac a été construit avec un acier pauvre en Nickel d'où sa fragilité au à des basses températures.
- **Octobre 1979, Maryland, USA**, un accident tuant un travailleur, blessant grièvement un autre à cause d'un joint de la pompe qui a lâché dans l'installation de GNL, dégageant des vapeurs de gaz, ces derniers se sont infiltrés dans les installations électriques causant de lourds dommages matériels.
- **19 Janvier 2004, Skikda, Algérie**. L'explosion dans une usine de liquéfaction de GNL de Sonatrach. 27 tués, 56 blessés, trois trains de liquéfaction détruits, la production a chuté de 76% pour l'année. L'accident était dû à une chaudière à vapeur qui faisait partie d'un train de liquéfaction qui a explosé provoquant une explosion de gaz d'hydrocarbures massive [11].

Chapitre II

Techniques de stockage et isolations

II.1. Introduction

Pour stocker les gaz liquéfiés sous pression atmosphérique, la température du gaz doit être abaissée jusqu'à leur point d'ébullition par un système de réfrigération approprié. Les unités de stockage doivent comprendre des isolations thermiques performantes afin d'éviter le réchauffement du gaz réfrigéré.

Les réservoirs de stockage se caractérisent par leurs formes, leurs dimensions géométriques, la pression et la température du produit stocké qui est liée à sa pression par la loi de vapeur saturante.

Généralement un réservoir de stockage est formé de deux enveloppes séparées par une épaisseur importante de calorifuge (isolation).

Les réservoirs de stockage du GNL peuvent se différencier en :

- réservoirs aériens;
- réservoirs enterrés;
- réservoirs semi- enterrés.

La conception des cuves de stockage de GNL est généralement basée sur l'association d'une enceinte interne, destinée à contenir le liquide stocké et d'une enceinte externe qui contient l'isolation placée autour de l'enceinte interne .

II.2. Les problèmes physique du stockage du GNL

II.2.1 les problèmes mécaniques du stockage

Entermes "d'analyse de la vapeur", les diverses fonctions d'ordre mécanique 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 de s 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...).

II.2.2 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'en sembleuse indel'espace calorifugé (surpression des cheminements préférentiels, emploi de joints contrariés si le calorifuge est formé de blocs solides, etc.)

La conduction est le mode essentiel de transmission de la chaleur, d'où l'importance du choix du calorifuge.

II.3 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. [16]

II.3.1 Critères physiques

- **Lecoefficientde conductivitéthermique**

Lecoefficientde conductivitéthermiquecaractérise lapropriété d'unmatériau à conduire la chaleur satisfaisant la loi énoncée par Fourier.

Lesisolantsutilisés encryogénie ontgénéralement uncoefficientde conductivitéthermique inférieur à 0,050 W/mK

- **Lamasse 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**

A la différence des canalisations vapeur, le froid dans le cas du GNL est à l'intérieur de la tuyauterie; l'humidité atmosphérique a donc tendance à pénétrer dans le calorifuge pour former du givre ou de la glace. Ceci conduit forcément à l'utilisation 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)

II.3.2 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 brute 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 n'aurait donc pas à être fragile.

II.3.3 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.

II.3.4 Critères de mise en oeuvre

La mise en oeuvre 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.

II.3.5 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.

II.4 Les différents types des isolants

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. [17]

II.4.1 Les mousses

Les mousses sont régulièrement utilisées pour le gros stockage cryogénique (azote, méthane, etc.) malgré une conductivité thermique relativement élevée.

Les principales mousses utilisées sont à base de résines polystyréniques, de résines polyvinyliques (les hermoplastiques), de polyuréthane (les thermodurcissables) et les mousses de verre

- **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 oeuvre, elles sont peu utilisées en cryogénie car leurs propriétés thermiques ne sont pas excellentes et elles sont très perméables à la vapeur d'eau. Néanmoins, du fait que cette mousse est mise en forme par moulage, il est possible de réaliser des petits réservoirs économiques de transport d'azote liquide de capacité n'excédant pas une dizaine de litres.

- **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 oeuvre sur le chantier (coulée in situ) ou en usine (préfabrication). Il est soit injecté directement sur la tuyauterie, soit inséré dans des blocs sous la forme de coquilles.

- **Mousses polyvinyliques:**

- le Klégécell (Kléber):

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

➤ Chlorure de polyvinyle:

C'est un excellent isolant ayant une très bonne imperméabilité et une très bonne résistance mécanique. Son prix reste élevé, inconvénient compensé en partie par sa faible conductivité thermique permettant des réductions d'épaisseur intéressantes.

• **Mousses de verre:**

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

➤ 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.

Tableau II.1: propriétés de certaines mousses

Caractéristique	Klégécel		Mousse de polyuréthane		Mousse de verre
Masse volumique (kg/m ³)	33	75	30	60	150 à 200
Conductivité thermique (mW/m.K)	28	30	21	20	50 à 60
Résistance à la compression (bar)	2.5	8	2	6	7 à 10
Perméabilité à la vapeur	0.0 18	0.014	-	-	-
Température max d'utilisation (°C)	70	70	-	-	430

II.4.2 Les poudres

Les poudres entrent fréquemment dans l'isolation thermique des fluides cryogéniques, tout particulièrement pour les réservoirs de taille moyenne et 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 micro sphères (la taille des particules varie de 100 à 200 microns) de plastiques, de carbone, de silicate de calcium, d'oxyde de fer...

La conduction à travers ces types d'isolants est généralement plus faible qu'à travers les mousses, le contact entre les particules étant très petit. Cependant, la grande facilité d'absorption de la vapeur d'eau par les isolants et plus particulièrement la perlite est un sérieux inconvénient; il sera donc nécessaire de stocker ces matériaux à l'abri de l'humidité et de les dégazer à chaud avant leur emploi.

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

• **La perlite:**

Ils'agit de minuscules sphères provenant d'un roche volcanique de type silicate d'alumine. 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 paroi.
- Le nombre important des pores séparant les particules nécessite des tassements fréquents.

- **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. Néanmoins, pas la présence de l'adsorbants ce qui simplifie la conception.

II.4.3 Les fibres

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

II.4.4 La Superisolation

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). Cette disposition réduit aussi les échanges par conduction moléculaire dans le vide résiduel, du fait de très faibles espaces séparant chaque couche.

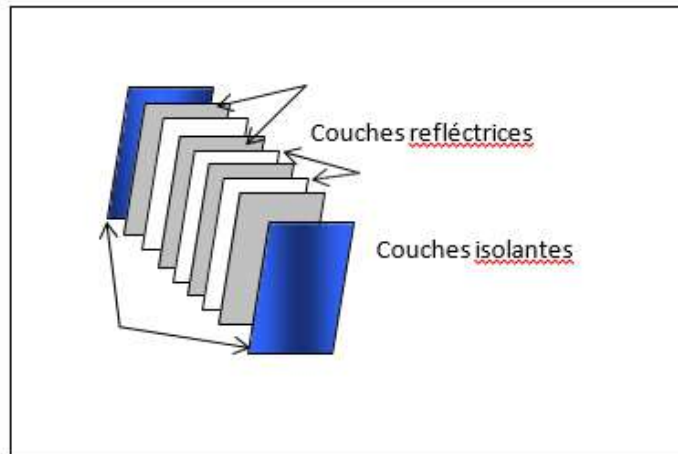


Figure II.1 : détails d'un superisolant

II.4.5 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 poussés (de l'ordre de 10^{-12} torr). Le cryopompage est réalisé par condensation (cryocondensation) et par adsorption (cryosorption) des molécules de gaz à pomper sur plusieurs surfaces portées aux basses températures.

II.5 Etude d'un bac de stockage de GNL

II.5.1 Cas bac de stockage de GNL Situé à Arzew (nord-ouest de l'Algérie)

Il existe dans le monde quatre bacs de GNL constitués avec la terre – congelée. Le premier est situé à Arzew, le deuxième situé près de New Jersey, USA. Les deux autres aux USA ont été abandonnés au profit d'autres formes de stockage [12].

Dans les réservoirs enterrés, la terre utilisée fournit un soutien mécanique, en effet la fosse permet le confinement en cas de fuite ou de rupture.

Les réservoirs sont uniques non seulement en raison de leur taille, mais aussi en raison du fait que l'ensemble du réservoir, y compris le toit et le dôme, est enterré. La figure II.2 représente une configuration de stockage dans le sol avec une terre congelée.

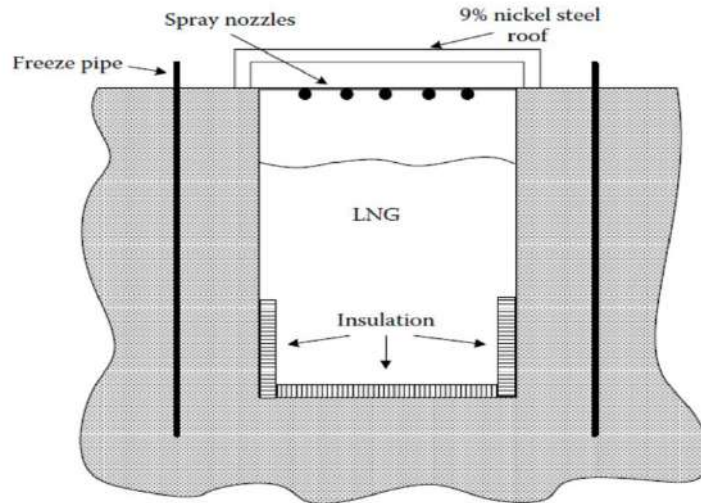
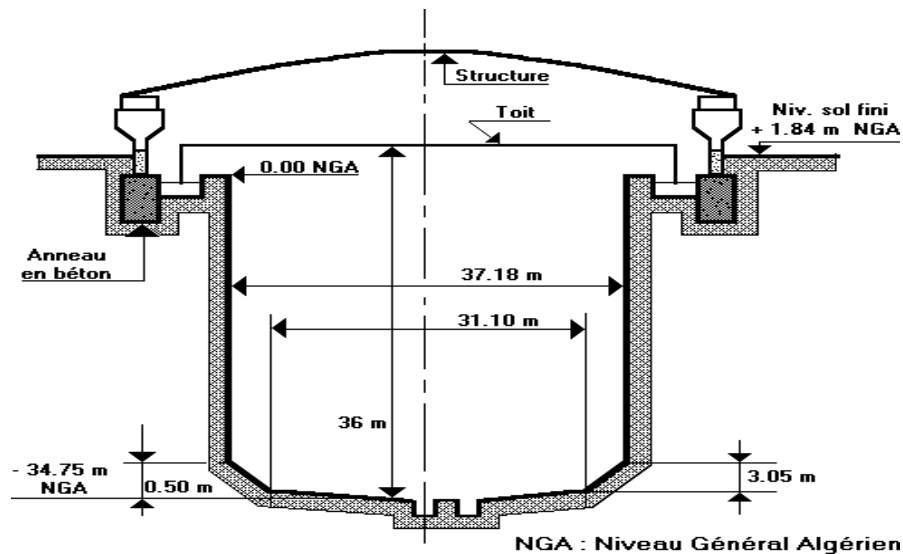


Figure II.2: Stokage sous terrain avec une terre congelée.

II.5.2 Description du bac de stockage d'Arzew

L'installation et la mise en service de ce bac en excavation ont été effectuées par « Technip Pritchard ». Le réservoir du GNL en sol gelé de l'usine Sonatrach GNL 4 d'Arzew a été mis en service en 1964, constitué d'une excavation de 37.18 m de diamètre et d'une profondeur de 36 mètre (figure II-3). Il se situe à 100 mètre du bord de la mer. Couvert par un toit plat en alliage d'aluminium suspendu à une charpente externe en acier au carbone, ce toit est lesté par des blocs de béton armé pour l'équilibre de la pression interne du gaz. Il a une capacité d'environ 38000 m³ de gaz nat



urel [13]

Figure II-3 Description du bac en excavation T5101

La partie supérieure de la paroi du réservoir est renforcée sur 4 mètres environ par une virole en béton sur laquelle, s'appuie la charpente métallique. Des thermocouples au nombre de 48 sont installés à différentes profondeurs et distances du réservoir (16 thermocouples tous les 120°) pour permettre le contrôle de la propagation des isothermes -100°C, -50°C, 0°C.

Ce réservoir est équipé de 02 pompes immergées (figure II-4) ayant un débit de l'ordre de 1200 m³. Le gaz de boî-off du réservoir est repris par des compresseurs et envoyé à la centrale énergétique du complexe pour être brûlé dans les chaudières.

L'excédent de gaz est torché vers l'atmosphère par l'intermédiaire d'une torche froide située à proximité du réservoir. [13]

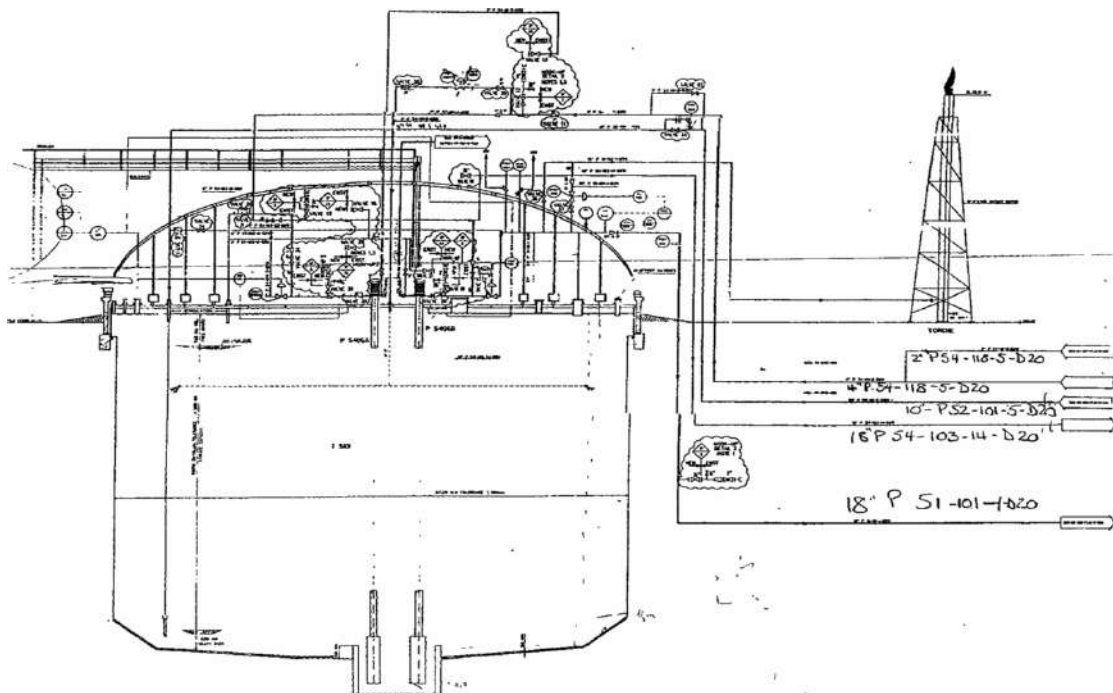


Figure II-4 : Description du bac en excavation T5101 associé aux pipes

II.5.3 Composition des parois du réservoir

La paroi latérale cylindrique est composée de trois couches.

- **La première couche** interne est en Mousse de polyuréthane
- Mousse 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 oeuvre 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

- **La deuxième couche** qui constitue *Les aciers série 304L* dont l'épaisseur est égale à 0,8 m

Cet acier contient 18 % de chrome et 10 % de nickel. En subissant un traitement thermique certaines de ses propriétés mécaniques sont améliorées. Son utilisation est fréquente dans les terminaux méthaniers

- **La troisième couche à l'extérieur**, en en béton armé

béton armé Utilisé pour des ouvrages demandant une résistance élevée à la traction comme réservoirs de gaz liquéfié, le béton armé est le mélange de deux matériaux : le béton et l'acier. Par définition, il s'agit d'un matériau dans lequel des armatures métalliques ont été ajoutées afin d'obtenir un béton renforcé

- **la toiture interne** Couvert en alliage d'aluminium

L'aluminium pur représente des caractéristiques mécaniques faible, bien qu'il soit assez ductile à basse température. Pour cette raison l'aluminium n'est utilisé dans l'industrie du GNL qu'allié avec d'autres corps exp : Aluminium- Magnésium

Ils sont souvent utilisés dans la fabrication des échangeurs de chaleur et des bacs de stockage.

- **Toiture externe** en acier au carbone dans la série des aciers (alliages de fer carbone) nous distinguons deux catégories :

Les aciers inoxydables sans traitement thermique et les aciers inoxydables avec traitement thermique. ce toit est lesté par des blocs de béton armé pour l'équilibre de la pression interne du gaz. Il a une capacité d'environ 38 000 m³. de gaz naturel

- **Le toit du réservoir** est pourvu d'un trou de 0,25 à 0,5 m de diamètre pour permettre l'évacuation des vapeurs de GNL dans l'atmosphère.

- **Le fond** du bac de stockage est constitué d'une couche de béton précontraint.

Le réservoir est instrumenté par des thermocouples répartis sur la hauteur de la paroi interne pour la mesure de la température durant l'exploitation.

II.5.4 Technique de construction

Le principe de cette technique élaboré par la compagnie **CONCH** consiste à une mise en froid par l'azote liquide (-196°C) de la cavité souterraine au travers de tubes convenablement disposés, puis à creuser dans le terrain gelé un réservoir cylindrique. l'excavation est fermée à sa partie supérieure par un toit métallique muni d'une isolation thermique. il se forme un front de glace servant à assurer l'étanchéité de cette cavité. La progression du front de glace, après une

période d'exploitation de 30 ans a été calculée à 50 m pour le cas du GNL.

La caractéristique principale de ce type de stockage est l'absence d'isolation et de barrières d'étanchéité sur les parois verticales et le fond, seul le gel de l'eau contenue dans les sol assure son imperméabilité. [14]

II.5.5 L'historique du bac et les problèmes rencontrés lors de son exploitation.

Pendant 25 ans d'exploitation, le bac fonctionnait de façon satisfaisante, mais le terrain autour subissait des déformations importantes provoquées par la migration de l'eau vers la zone froide et de sa congélation.

En 1984 une inspection interne a été faite à l'intérieur du bac par un moyen endoscopique afin de vérifier l'absence d'éboulement ou de fissure importante sur les parois, ainsi que la bonne tenue de la couronne support du toit.

Le résultat de l'examen n'a pas confirmé d'important désordre à l'intérieur, à part une fissure horizontale à 12 m sous le niveau du sol. Les équipements internes du réservoir sont apparus en bon état, ils agissaient des éléments suivants:

- Les tuyauteries de remplissage.
- Puits de pompes
- Le toit du bac

L'objectif de cette étude était de mener des actions correctives pour permettre de prolonger la durée d'exploitation du bac dans des conditions satisfaisantes de sécurité.

En juillet 1985 la Sonatrach a entrepris l'étude de la progression du froid du sol gelé. Cette étude comprenait l'évaluation des déformations, l'interprétation des désordres et la prédiction de l'évolution du front de gel pour les années à venir. [14]

- Problèmes liés à des causes naturelles

Le résultat de cette étude a révélé un soulèvement constant du réservoir sous l'effet de la Cryo aspiration (un soulèvement plus important coté terre que le coté mer). Ceci a été traduit par la répartition inégale des efforts internes induits par la formation de glace autour et en dessous du réservoir et l'inégalité des réactions dû à l'hétérogénéité des couches de réservoirs.

Les déformations observées aux abords du réservoir consistaient à l'existence de toute une série de fissures d'aspect concentrique Fig. II-5 au niveau du sol et à des distances variables.



Figure II-5 des fissures au tour du bac

- Problèmes d'exploitations

Parmi les problèmes rencontrés au niveau de l'exploitation, il a été constaté une importante fuite de GNL au niveau du thermocouple (-4m, sud ouest) à quelque mètre du bac Fig. II-6 certainement dû à un glissement de terrain qui a entraîné la formation des cavités dans le sol gelé permettant aussi un cheminement constant de gaz froid. Encore l'ouverture intempestive de soupapes lors de la réception du GNL, ce qui a fait augmenter le risque d'incendie surtout en cas de foudre en zone de stockage.

En 2002 une troisième expertise a été faite par la Sonatrach, afin de déterminer l'état général du bac et de trouver les moyens de réhabilitations pour une bonne exploitation. Cette étude a été faite spécialement sur la partie supérieure du bac. Elle comprenait les poteaux en béton armé, le réseau des profilés métalliques constituant la coupole et les appuis métalliques.

Des mouvements des têtes des poteaux sous l'effet des variations des efforts de flexion ont engendrés une dégradation des pieds, accélérés par le gonflement des aciers dus à la corrosion et ponctués par l'alternance des cycles de gel-dégel. Une forte corrosion des appuis métalliques a entraîné leur blocage et empêché le glissement de la couronne sur ces appuis.

Concernant les problèmes naturels au niveau du sol. Les déformations et l'apparition des fissures au début de l'exploitation du bac ont évolués avec le temps avec la propagation du front de gel. Le bac a accusé une montée de 500mm avec

une inclinaison. Ceci a été confirmé en 1972 par des relevés topographiques qui permettaient l'observation de la progression constante de la montée du bacet par auscultation par GPS (Global Positioning System) faites par le centre national des techniques spatiales (CNTS). [14]

II.5.6 L'auscultation du bac

Elle se fait par l'établissement d'un réseau d'auscultation Fig. II-9 composé de 15 points d'appui (borne en béton) éloignés de quelques dizaines de mètres du bac et de 42 points cibles (plaques en aluminium) répartis sur l'ossature du bac.

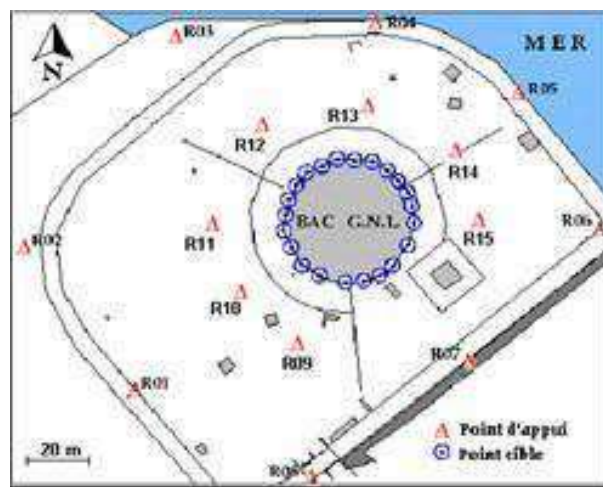


Figure II-6 Réseau d'auscultation

L'Auscultation a été faite en deux sessions la première en 1996-1997 et la deuxième en 2000-2004. L'objectif était de contrôler la stabilité ponctuelle du bac. La première session était en espace de 9 mois ou les déplacements altimétriques et planimétriques étaient de l'ordre de 30 mm et de 20 mm, pour la deuxième session et pendant 4 ans (2000-2004) les déplacements altimétriques et planimétriques étaient de l'ordre de 163 mm et 90 mm. [15]

Chapitre III

Estimation du taux d'évaporation du GNL

III.1 Introduction

Le bac de stockage de 28260 m³ de l'unité de liquéfaction du GNL d' ARZEW, avec une hauteur de 36m et un diamètre de 46m. Un inconvénient majeur de ce type de technologie se trouve être l'emprise au sol (dimension de la rétention). En effet, en cas d'épandage de GNL dans la rétention, les effets associés seront :

en cas d'incendie, des zones d'effets thermiques importantes autour de la rétention et autour du site, en cas d'épandage sans inflammation, l'évaporation d'une grande quantité de gaz naturel due à l'étendue de la nappe

En effet, l'infiltration de la chaleur dans un réservoir de GNL se définit comme l'une des grandes sources des problèmes durant la période du stockage du GNL. Les bacs de stockages dans une unité de liquéfaction du GNL subissent un flux de chaleur pariétal qui provoque un transfert thermique essentiellement par conduction au niveau de la paroi, alors que dans le fluide des courants convectifs de couche limite thermique et dynamique sont créés par le phénomène de convection naturelle.

III.2 Réservoir en terre gelée

Le seul réservoir en terre gelée encore en service est celui de la Camel à Arzew, il a été construit vers 1964 et possède une capacité de stockage d'environ 38000 m³.

La construction de tel réservoir dépend essentiellement de la nature du sol qui doit avoir un taux d'humidité supérieure à 30 %. En effet le contact du GNL avec la terre contenant cette eau favorise la solidification (à 0°C), ce qui constitue par la suite une isolation efficace et naturelle.

De nos jours cette technique a été abandonnée car le taux d'évaporation dans ces bacs de stockage est très important et excède les normes fixées par les industriels.

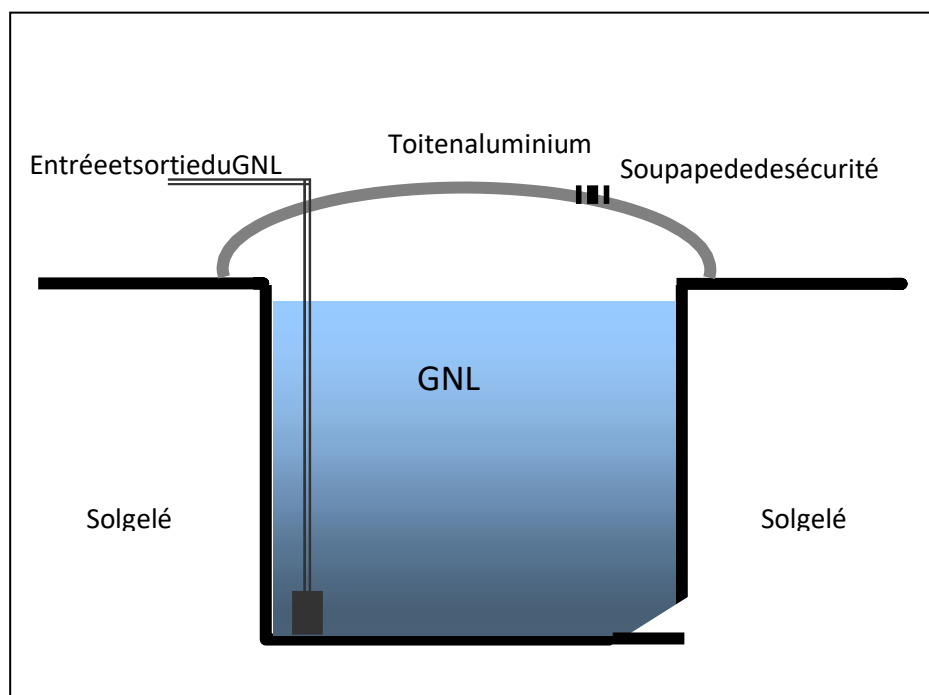


Figure III.1: Réservoir en terre gelée

Ce réservoir de stockage présente plusieurs inconvénients comme on vu dans le chapitre précédent

III.3 Inconvénients du Réservoir

Parmi les inconvénients on peut citer :

- Un inconvénient majeur de ce type de technologie se trouve être l'emprise au sol (dimension de la rétention). En effet, en cas d'épandage de GNL dans la rétention, les effets associés seront :
en cas d'incendie, des zones d'effets thermiques importantes autour de la rétention et autour du site, en cas d'épandage sans inflammation, l'évaporation d'une grande quantité de gaz naturel due à l'étendue de la nappe.
- La modification du climat de la Terre provoque un changement de température sur la structure de la paroi qui entraîne l'évaporation du GNL à l'intérieur du réservoir.
- Il a difficulté à contrôler l'espace annulaire pour les infiltrations d'eau.
- la zone de rétention du liquide autour du réservoir est conçue à ciel ouvert, ne permettant pas de contenir les vapeurs de GNL,
- leur faible pression d'exploitation principalement due au toit métallique (qui induit des contraintes lors du déchargement des navires méthaniers)..
- l'accessibilité à l'intérieur de la structure interne plus complexe pour les opérations de maintenance, de nettoyage, d'inspection..., dans le fait que la structure en béton n'est pas visuellement contrôlable après la construction. Des instruments de contrôles doivent être placés pendant la construction (par exemple détecteurs ultrasoniques)

Pour essayer de remédier à ce problème on propose un réservoir aérien à double enveloppe métallique cylindrique à double paroi. La paroi latérale cylindrique est composée de trois couches. La première couche interne est en acier La deuxième couche qui constitue l'isolation thermique La troisième couche à l'extérieur, en acier . Le bas du réservoir est en béton

III.4 Présentation du réservoir aérien à double enveloppe métallique

Les réservoirs aériens à double parois métalliques sont les plus répandus ainsi que les plus largement admis et employés en stockage du GNL.

Parmi les avantages, l'endroit d'implantation de ces réservoirs ne dépend pas des conditions géologiques du site et leur système d'isolation thermique est prévisible pour n'importe

quel taux d'évaporation pratique. C'est en 1957 que le premier réservoir du GNL à double paroi métallique a été construit à Charles Lake en Louisiane (USA) à partir de techniques et des matériaux utilisés

uparavant dans l'industrie cryogénique.

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

- La cuve interne (de nature variable suivant les procédés de réalisation) est une membrane mince en métal présentant les propriétés requises pour recevoir le GNL. Certains alliages d'aluminium, d'acier nickelé sont largement utilisés. Cette cuve repose sur un matériau isolant, rigide qui transmet les charges hydrostatiques à une dalle en béton supportant l'ensemble. Le toit de cette cuve est soit autoportant, soit réalisé par un voile métallique suspendu à la charpente.
- Une cuve extérieure en acier au carbone protège les matériaux isolants des intempéries et supportant les surcharges climatiques.
- Des matériaux isolants (les plus utilisés sont la perlite, la laine de verre et les matières plastiques expansées) remplissant l'espace entre les cuves. Cet espace est maintenu en atmosphère de gaz inerte pour éviter l'altération des propriétés des isolants par l'humidité.

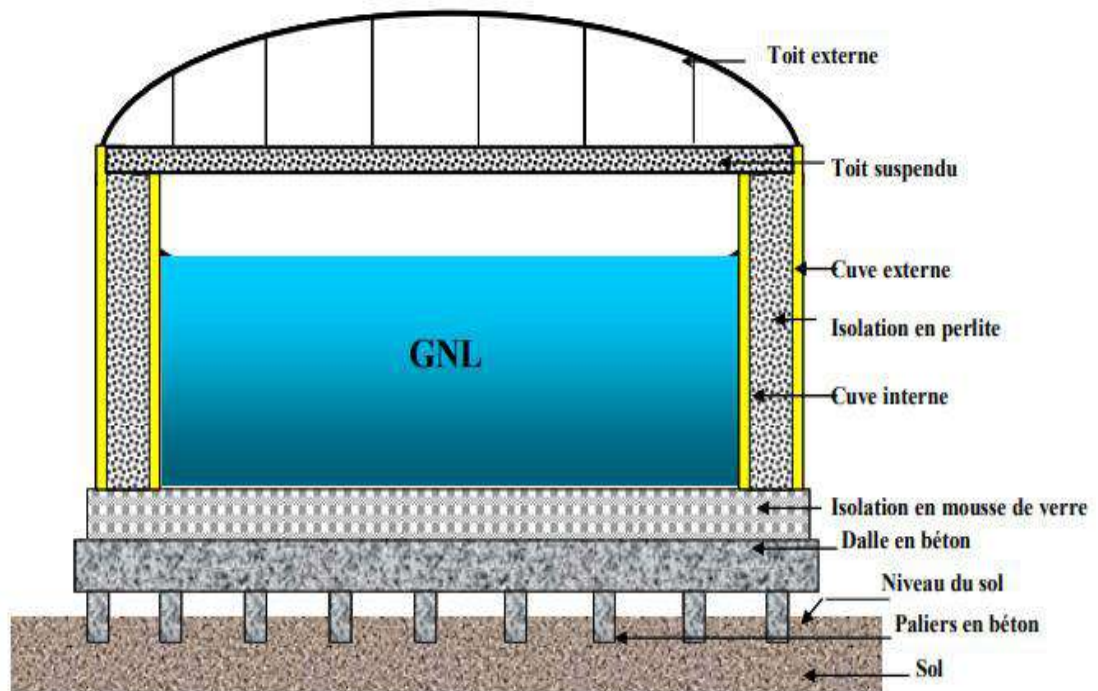


Fig III.2 : Réservoir aérien à double enveloppe métallique

Le bac de stockage de GNL est un réservoir cylindrique à double paroi de 36 m de hauteur et de 46 m de diamètre MAZERAÏ [18]. La paroi latérale cylindrique est composée de trois couches. La première couche interne est en acier (9%Ni) dont l'épaisseur est de 0,1 m. La deuxième couche qui constitue l'isolation thermique à l'aide de perlite (matériau très isolant d'origine roche volcanique) dont l'épaisseur est égale à 0,8 m. La troisième couche à l'extérieur, en acier à une épaisseur de

e0,1m(Fig

III-

2). Le bas du réservoir est en béton, cette paroi est considérée comme étant adiabatique. Le toit du réservoir est pourvu d'un trou de 0,25 à 0,5 m de diamètre pour permettre l'évacuation des vapeurs de GNL dans l'atmosphère.

Le réservoir est instrumenté par des thermocouples répartis sur la hauteur de la paroi interne pour la mesure de la température durant l'exploitation.

Le réservoir est doté d'appareils de contrôle et de sécurité tels que les soupapes, les jauges de niveau et les sondes de mesure de pression et de température.

L'isolation du fond est généralement réalisée par des éléments en verre cellulaire (mousse-glass), incombustible, étanche à l'eau et résistant à la compression

III.4.1 Isolation du bac de stockage

Pour l'isolation du réservoir de stockage propose, on propose d'utiliser la super-isolation. Surtout dans l'isolation des bacs de stockage des cryogènes à très basses températures tel que l'Hélium et l'Hydrogène.

III.5 les avantages de ce réservoir

- leur simplicité de conception,
- leur coût de construction relativement bas en comparaison des autres types de réservoirs
- la nouvelle structure extérieure est capable de contenir le liquide cryogénique provenant d'une fuite de la cuve interne,
- la réduction de l'emprise au sol des zones de rétention autour des réservoirs. Ainsi, la superficie de l'épandage est fortement réduite limitant les effets d'un incendie (rayonnements thermiques plus faibles),
- la structure extérieure protège, de par sa constitution en matériau résistant au feu (talus de terre ou cuve en béton précontraint) le contenu de la cuve interne et évite ainsi des effets dominos en cas d'incendie voisin,
- l'utilisation d'une enceinte secondaire entièrement en béton précontraint permet d'augmenter la sécurité en isolant le réservoir des agressions extérieures accidentelles (chute d'objet, effet de souffle, feu adjacent...),

L'historique du GNL ne révèle aucun accident sur un réservoir de ce type (respectant tous les critères de construction). La raison de cette bonne exploitation est due :

- à la bonne adéquation des matériaux face aux conditions cryogéniques,
- à la qualité du GNL exploités exempte de toute impureté évitant les risques de corrosion interne des équipements.

III.6 phénomène de l'évaporation du GNL

Le phénomène de l'évaporation a fait l'objet de nombreuses recherches au niveau de la surface libre d'un liquide. Ce phénomène est mal connu et les résultats obtenus sont souvent avant tout empiriques et difficilement généralisables. En particulier, l'évaporation à la surface libre du GNL est tout aussi mal connue. Rappelons que le GNL est un liquide multi-constituant stocké aux environs de 113 K à pression atmosphérique, sous des conditions voisines du point d'ébullition (111,7 K sous la pression atmosphérique pour le méthane pur, son constituant majoritaire)

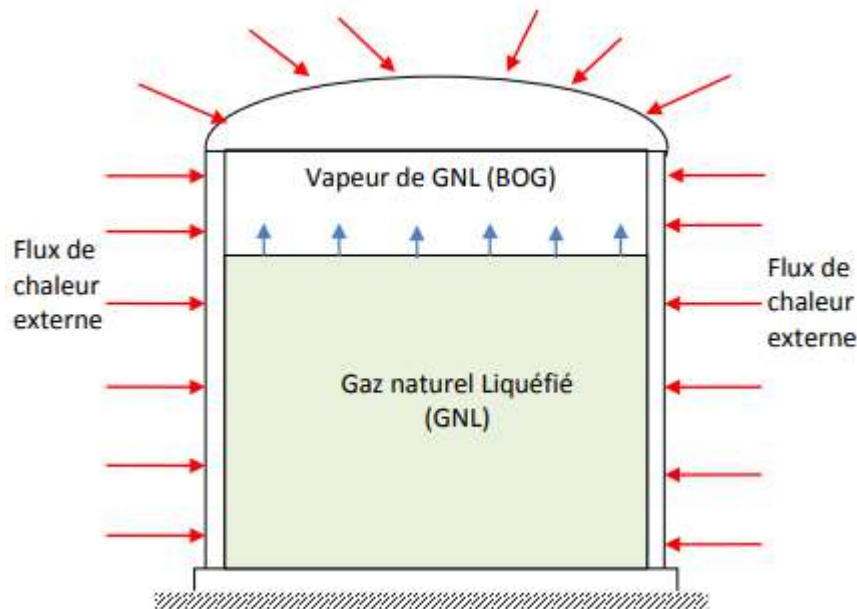


Figure III.3 : Schéma du bac de stockage en présence des infiltrations thermiques et évaporation

Ce point d'ébullition augmente quand les composants les plus légers s'évaporent (le méthane et l'azote s'évaporent en premier lieu). L'évaporation peut être vue ici comme étant essentiellement, un processus de distillation. Par ailleurs, la composition de la phase gazeuse va évidemment surtout évoluer en teneur de méthane. Enfin, le bilan thermique à la surface libre est difficilement calculable. Celui-ci implique probablement, en plus du transfert lié à la vaporisation, des transferts de chaleur sensible par rayonnement de surface et convection en phase gazeuse.

Les auteurs considèrent que la chaleur nécessaire à la vaporisation est fournie de manière continue par le volume de liquide sous la surface. Ce transfert thermique a pour moteur la différence de température entre le volume de liquide et la surface. Ils précisent que cette chaleur peut provenir de l'extérieur par l'intermédiaire des parois de contact avec le liquide. Elle peut également être prélevée sur la chaleur sensible du liquide, ce qui abaisse progressivement sa température, réduisant ainsi l'écart positif de température entre le volume de liquide et la surface, et donc le taux d'évaporation.

III.6.1 les effets et les causes des pertes par évaporation

Dans un stockage statique, le GNL est dans un état d'équilibre dynamique et thermodynamique. La quantité de chaleur absorbée par le réservoir et provenant du milieu extérieur est dissipée sous forme d'évaporation du liquide à la surface. Quand le système est perturbé par des variations de pression en phase vapeur, ce dernier réagit pour rétablir l'équilibre BELLUS [22].

Dans un grand réservoir de stockage bien isolé, l'évaporation du GNL aura lieu essentiellement à la surface du liquide avec la formation des bulles invisibles. Ce phénomène d'évaporation porte le nom de Boil-off. Le taux de Boil-off admissible est de l'ordre de 0.04% par jour du volume total du réservoir de stockage.

Dans la nature, le méthane se retrouve dans des mélanges avec d'autres hydrocarbures - éthane, propane, butane, pentanes et condensats plus lourds ainsi qu'avec d'autres gaz comme le sulfure d'hydrogène, le dioxyde de carbone, et l'azote.

La plupart de ces substances sont éliminées aux usines de transformation du gaz naturel, ce qui donne du gaz prêt au transport par gazoduc et qui a en général une teneur en méthane d'environ 95 %, ainsi que de petites quantités d'éthane et de propane [23] [24], les vapeurs du GNL stocké étant constituées principalement de méthane [25] [26].

Le Boil-off représente une perte sensible, non seulement en volume mais aussi en qualité car il affecte également les propriétés physiques et chimiques du GNL.

Les réservoirs de stockage cryogénique ne sont jamais remplis entièrement. En effet, un espace de vapeur est exigé pour permettre une ébullition (évaporation) adéquate avec le maintien de la pression de stockage. Cet espace de vapeur minimum est d'environ 0.5 % du volume total BRIDGE [27].

L'évaporation permanente du GNL stocké dans les réservoirs représente une perte sensible comme l'affirme de nombreux auteurs. D'après ces mêmes auteurs le taux d'évaporation (Boil-off) est directement lié à l'efficacité de l'isolation thermique d'un réservoir de GNL. pour le méthane pur, son constituant majoritaire pour le méthane pur, son constituant majoritaire

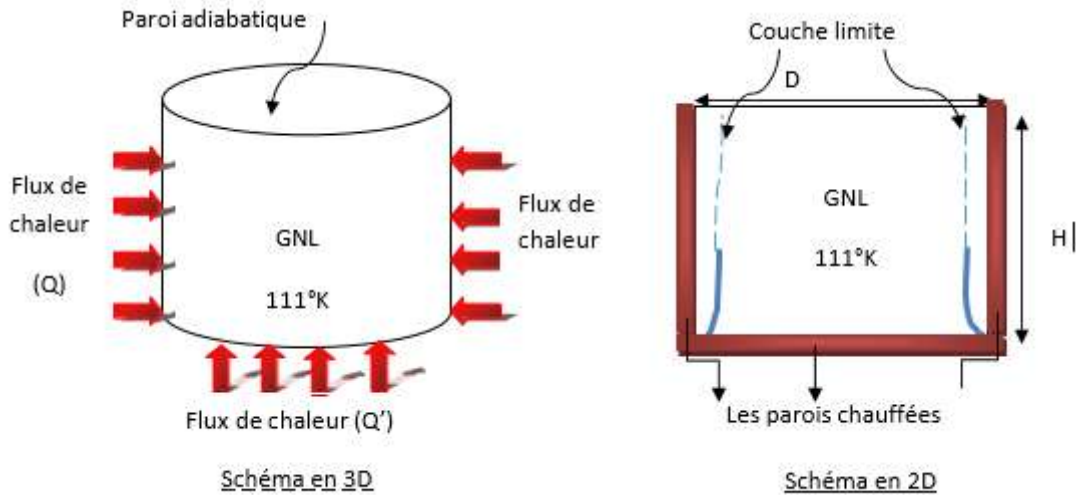


Figure III.4 schémas de stockage de GNL traité

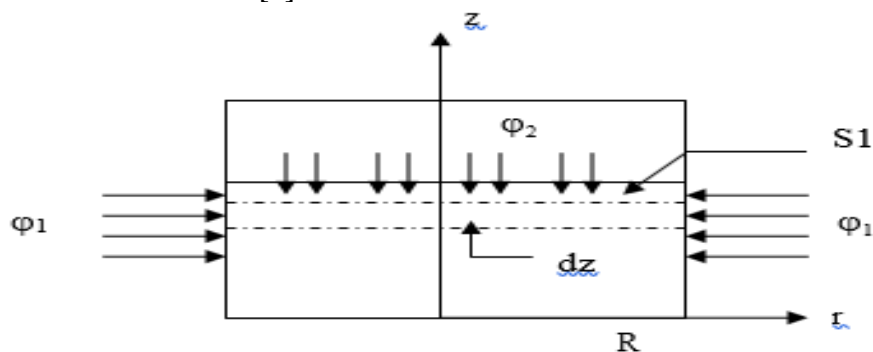
Le mouvement convectif se fait en deux régimes, laminaire et turbulent et affecte sensiblement la stabilité du GNL en engendrant l'évaporation des fractions les plus légères du GNL ce qui augmentera la concentration des composants les plus lourds et par conséquent, l'augmentation du point d'ébullition du liquide. L'infiltration de chaleur à partir du bas et sur les côtés du bac provoque le mélange du produit par convection naturelle.

III.7 Méthode d'évaluation du taux d'évaporation

Quelle que soit la conception des réservoirs de stockage du GNL et le type d'isolation thermique ce dernier reçoit de la chaleur arrivant de l'extérieur.

III.7.1 Flux thermique latéral

Le flux latéral qui provoque l'évaporation du liquide est le flux entrant de l'acier 1. Dans la direction r : [5]



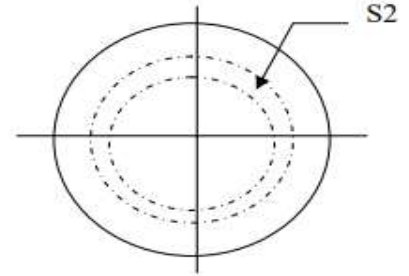
$$\varphi_1 = \frac{dT}{R_{Tot}} = \frac{1}{R_{Tot}} (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$Où R_{Tot} = \frac{1}{S_1} \left(\frac{\Delta r/2}{\lambda_1} + \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta r/2}{\lambda_{acier\ 1}} \right) \quad (2)$$

$$s1 = 2\pi R dz$$

T_2 : température du nœud correspondante à la face interne de la paroi (acier1)

T_1 : température du nœud dans le liquide



III.7.2 Flux de chaleur de la phase vapeur

Flux cédé par la phase vapeur au niveau de la surface du liquide.

Vue de dessus du bac (toit)[6]

$$\text{Dans la direction } z: \varphi_2 = -\lambda \frac{dT}{dz} \cdot S2 = \frac{\lambda_v}{dz} (T_{g\bar{z}} - T_{liq}) \cdot S2 \quad (3)$$

$$S2 = 2\pi r \Delta r$$

T_{gaz} : température du nœud dans la phase vapeur juste au dessus du liquide

T_{liq} : température du nœud à la surface du liquide

III.7.3 Flux radiatif vers la surface de GNL

Le flux de rayonnement des surfaces (toit et verticales) non mouillées opposées à celle du liquide e. Ce flux pour un modèle à trois surface est calculé comme suit:

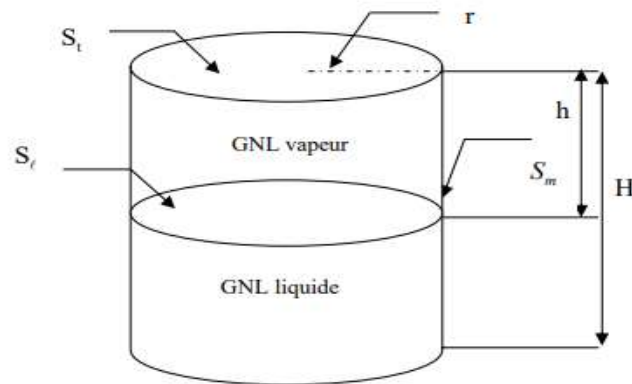


Figure III.5 Schéma d'un bac de stockage de GNL

Le rayonnement par venant à la surface du GNL dans le bac de stockage est issu des parois (face interne des murs verticaux cylindriques et plafond).

On distingue la surface du liquide (S_ℓ), celle du toit (S_t) et celle des murs verticaux cylindriques (S_m). Le liquide représente une surface noire ($\varepsilon = 1$); la radiosité ($J_\ell = \sigma T_\ell^4$) et l'émissivité est la même pour le toit et les murs verticaux cylindriques (ε).

On a $r = R$; h hauteur de la vapeur ; $\eta = h/2R$

Le calcul des facteurs de forme donne

$$f = 1 + 2\eta^2 - 2\eta\sqrt{1 + \eta^2} \quad [28] \quad (4)$$

Et, en remarquant que :

$$\frac{S_\ell}{S_m} = \frac{R}{2h} = \frac{1}{4\eta} \quad (5)$$

Pour simplifier nos formules nous adoptons la notation suivante:

$$\alpha = \sqrt{1 + \eta^2} - \eta$$

$$\varphi_3 = S_\ell q_\ell \quad \text{et} \quad S_\ell = \pi R^2$$

Donc le flux de chaleur total est donné par la relation suivante

$$\varphi_{\text{total}} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \quad (6)$$

L'étude des transferts de chaleur complète l'étude de la thermodynamique pour décrire l'évaluation du débit d'évaporation dans les bacs de stockage. Si le flux de chaleur est dû à l'évaporation, pour que l'évaporation se produise, il faut fournir une quantité de chaleur que l'on appelle chaleur latente de vaporisation.

III.7.4 La chaleur latente de vaporisation

Elle se définit comme la quantité de chaleur nécessaire pour transmettre l'unité de masse de fluide de l'état liquide vers l'état vapeur.

Le flux de chaleur est lié donc au taux d'évaporation par la relation suivante:

$$\tau(\% \text{ par jour}) = \left(\frac{\varphi_{\text{total}}}{P} \right) \left(\frac{3600 \times 24}{\rho V} \right) \times 100 \text{ SACADURA} \quad [28] \quad (7)$$

avec : ρ (kg/m³) est la masse volumique du GNL liquide et V (m³) le volume total du bac
 P (kJ/kg) est la chaleur de vaporisation du GNL et τ le taux d'évaporation.

III.8 Détermination du taux d'évaporation

III.8.1 Evaluation du Flux de chaleur

Pour chaque nœud suivant la hauteur z du liquide dans la direction r [7]

$$\varphi_1 = \frac{1}{R_{Tot}} (T_2 - T_1) \Leftrightarrow \varphi_1 = \frac{(T_2 - T_1)}{\left(\frac{\Delta r/2}{\lambda_1} + \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta r/2}{\lambda_{acier1}}\right)} \cdot S1 \quad (6)$$

et $S1 = 2\pi R \Delta z$

$dr = \Delta r$ Distance entre les nœuds (i) et (i+1)

$T_1 = T_{(i=46)}$: Température du nœud dans le liquide

$T_2 = T_{(i=48)}$: Température du nœud dans l'acier1

Où $\Delta z = \Delta r = 0.5$

On fait la Somme $\varphi_1 = \sum_{j=1}^j \varphi_1$

Pour chaque nœud suivant r dans la direction z

$$\varphi_2 = -\frac{\lambda_v}{dz} (T_{liq} - T_{gaz}) \cdot S2 \Leftrightarrow \varphi_2 = \frac{\lambda_v}{dz} (T_{gaz} - T_{liq}) \cdot S2$$

et $S2 = 2\pi r \Delta r$

$dz = \Delta z$ Distance entre les nœuds (j) et (j + 1)

$$T_{liq} = T_j$$

$$T_{gaz} = T_{j+1}$$

Où j varie suivant la hauteur du liquide ($h = 10m; h = 25m; h = 30m; h = 35m$).

$$(j = 20; 50; 60; 70)$$

Donc : $\varphi_2 = \frac{\lambda_v}{\Delta z} (T(i, j + 1) - T(i, j)) \cdot 2\pi r \Delta r$, $\Delta r = \Delta z = 0.5$ (7)

Ce qui donne

$$\varphi_2 = 2\pi r \lambda_v (T(i, j + 1) - T(i, j)) \quad (8)$$

On fait la Somme $\varphi_2 = \sum_{i=1}^i \varphi_2$

Le flux radiatif émis par toutes les surfaces et reçu par le liquide est égal à φ_3

Le flux total est égal à la somme des trois flux le flux latéral (φ_1), le arrivant de la phase vapeur vers le liquide (φ_2) et le flux radiatif reçu par le liquide (φ_3).

$$\varphi_{Total} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \quad (9)$$

Le flux total reçu éga le flux latéral (φ_1) plus le flux arrivant de la phase vapeur vers le GNL liquide (φ_2) à ces deux flux conductifs s'ajoute le rayonnement émis par les parois situées au-dessus de la surface du liquide (φ_3).

Le taux d'évaporation est évalué comme suit :

$$\tau(\% \text{ par jour}) = \left(\frac{\varphi_{\text{total}}}{P} \right) \left(\frac{3600 \times 24}{\rho V} \right) \times 100 \quad \text{SACADURA [28]} \quad (10)$$

avec : ρ (kg/m³) la masse volumique du GNL liquide et V (m³) le volume total du bac

III.8.2 Influence du niveau du liquide (GNL) sur le taux d'évaporation

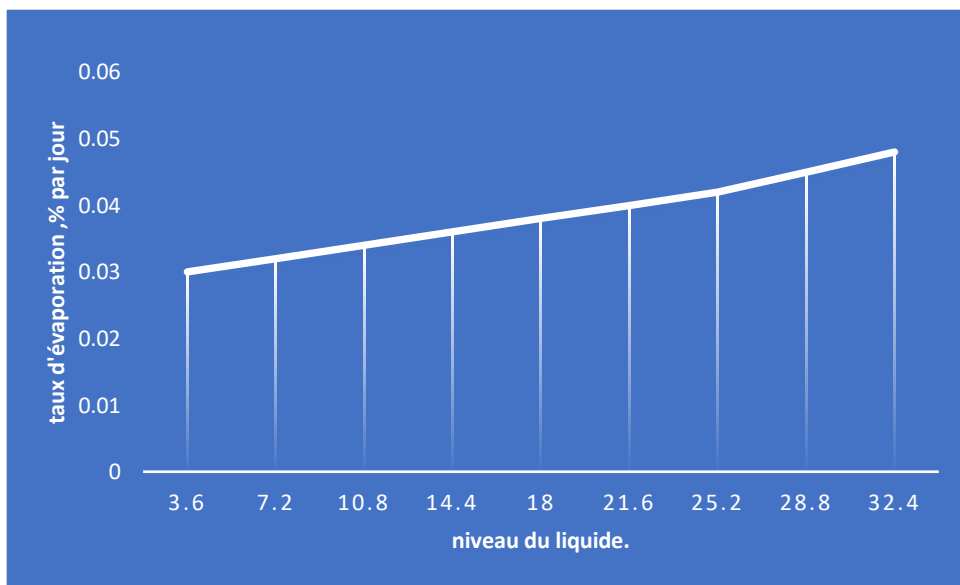


Figure III.6 : l'évolution du taux d'évaporation en fonction du niveau du liquide

La figure III.6 : montre l'évolution du taux d'évaporation en fonction du niveau du liquide, le taux d'évaporation du GNL croît avec l'augmentation du niveau du liquide dans le bac, car la surface d'échange en contact avec le liquide qui augmente avec l'augmentation du niveau du liquide.

III.8.3 Influence de la hauteur du bac sur le taux d'évaporation

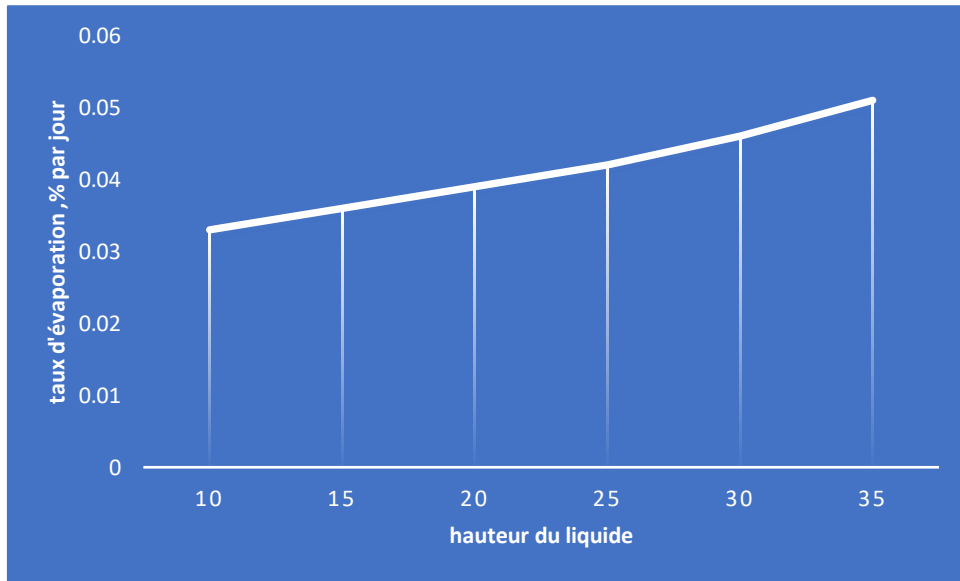


Figure III.7 : taux d'évaporation en fonction de la hauteur du liquide.

la Figure III.7 : Montre la variation du taux d'évaporation du liquide en fonction de la hauteur du liquide du GNL, nous pouvons constater que l'évolution du taux d'évaporation en fonction de la hauteur du liquide, augmente avec l'accroissement du niveau liquide. Ceci s'explique par le gradient de température entre le liquide et l'ambient qui est très important

III.8.4 Influence du flux solaire sur le taux d'évaporation

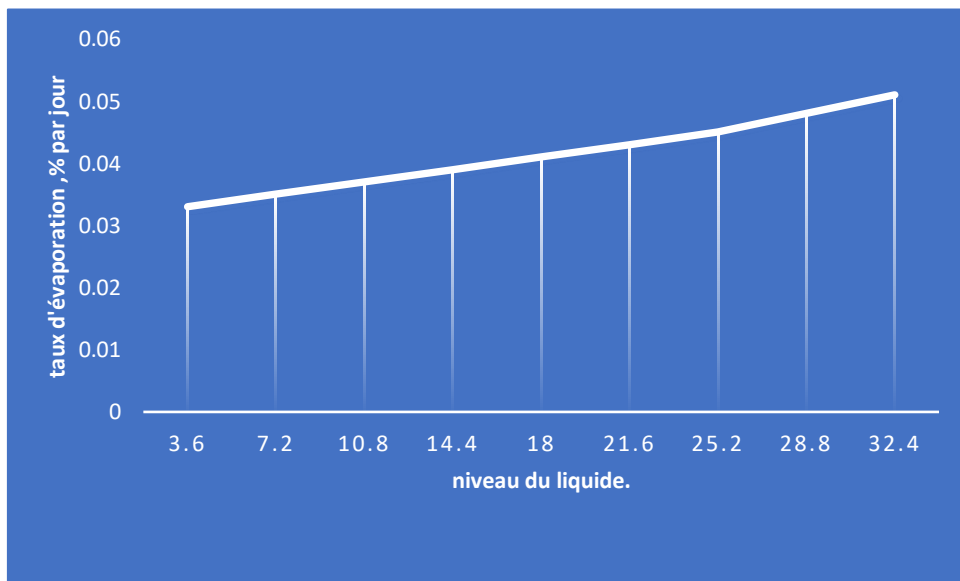


Figure III.8) influence du flux solaire sur la variation du taux d'évaporation

la figure III.8 : montre l'influence du flux solaire sur la variation du taux d'évaporation, l'augmentation de l'émissivité, fait augmenter de façon assez importante le flux de chaleur par rayonnement, ce flux reçu par le liquide fait accroître le taux d'évaporation du GNL. Donc la variation du flux solaire incident influe linéairement sur le taux d'évaporation, quelle que soit la structure du réservoir de stockage et la qualité de l'isolation thermique, il se produit des infiltrations thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bac par rayonnement solaire.

Conclusion

Le taux d'évaporation du GNL croît avec l'augmentation du niveau du liquide dans le bac, car la surface d'échange en contact avec le liquide qui augmente avec l'augmentation du niveau du liquide, nous pouvons constater que l'évolution du taux d'évaporation en fonction de la hauteur du liquide, augmente avec l'accroissement du niveau liquide. Ceci s'explique par le gradient de température entre le liquide et l'ambiant qui est très important

Le flux reçu par le liquide fait accroître le taux d'évaporation du GNL. Donc la variation du flux solaire incident influe linéairement sur le taux d'évaporation, quelle que soit la structure du réservoir de stockage et la qualité de l'isolation thermique, il se produit des infiltrations thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bac par rayonnement solaire

Conclusion General

Conclusion Générale

La maîtrise du phénomène d'évaporation du GNL dans les réservoirs de stockage est étroitement liée à la compréhension de tous les échanges thermiques entre le bac et le milieu environnant, plusieurs travaux de recherche, théoriques, ont été réalisés pour mieux comprendre le phénomène d'évaporation et minimiser les pertes par évaporation.

Nous avons fait une description détaillé sur le réservoir en terre gelée d'Arzew qui présente plusieurs Inconvénients qui sont mentionnés dans le chapitre deux, pour remédier a ce problème on a proposé du réservoir aérien à double enveloppe métallique.

L'historique du GNL ne révèle aucun accident sur un réservoir de ce type (respectant tous les critères de construction). La raison de cette bonne exploitation est due :

- à la bonne adéquation des matériaux face aux conditions cryogéniques,
- à la qualité du GNL exploités exempte de toute impureté évitant les risques de corrosion interne des équipements.

une bonne isolation thermique des réservoirs de stockage du GNL peut minimiser les infiltrations de chaleur vers l'intérieur des réservoirs de stockage , donc réduction au maximum du taux d'évaporation.

Pour l'isolation du réservoir de stockage propose, on propose d'utiliser la super-isolassions

Surtout dans l'isolation des bacs de stockage des cryogènes à très basses températures.

D'après l'étude des paramètres qui influent sur le taux d'évaporation du GNL, les résultats montrent que :

Le taux d'évaporation du GNL croit avec l'augmentation du niveau du liquide dans le bac, car la car la surface d'échange en contact avec le liquide qui augmente avec l'augmentation du niveau du liquide, nous pouvons constater que l'évolution du taux d'évaporation en fonction de la hauteur du liquide, augmente avec l'accroissement du niveau liquide. Ceci s'explique par le gradient de température entre le liquide et l'ambient qui est très important

Le flux reçu par le liquide fait accroître le taux d'évaporation du GNL. Donc la variation du flux solaire incident influe linéairement sur le taux d'évaporation, quelle que soit la structure du réservoir de stockage et la qualité de l'isolation thermique, il se produit des infiltrations thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bac par rayonnement solaire.

Références

Références

- [1] M. CAROUGE, Conception, construction et exploitation des réseaux de gaz naturel : Généralités sur le transport international du gaz, Association Technique de l'industrie du Gaz naturel en France, 1995, p 1.
- [2] 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. juin 2017]
- [3] 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. juin 2017]
- [4] GUELLAL Z'hor Et : GACI Yacine/ Optimisation du transport de gaz naturel par le gazoduc GZ1 Hassi R'mel-Arzew TRC-SONATRACH/ Mémoire master/ 2016]
- [5] [7] [6] Mlle HARITIRafika / MODELISATION DES INFILTRATIONS THERMIQUES DANS LE BAC DESTOCKAGE DE GNL APPLICATION A LA PREDICTION DU TAUX D'EVAPORATION/ Mémoire de Magister/ UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2007
- [8] [<https://lngbc.eu/node/438>]
- [9] [<https://altenergy.com/Technology/>]
- [10] 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°C .
- [11] A. ROJEY, 1994, Le gaz naturel : production, traitement, transport, Publication de l'institut français du pétrole, éditions Technip.
- [12] A.J. KIDNAY, R.W. PARRISH, 2006, Fundamentals of Natural Gas Processing, by Taylor and Francis Group, LLC.
- [13] [AMEURSOUMIA / ETUDE DES RISQUES LIES AU BACSOUTERRAIN DU COMPLEXE GNL4Z/ Thèse de Magister /2009 page 13]
- [14] [AMEURSOUMIA / ETUDE DES RISQUES LIES AU BACSOUTERRAIN DU COMPLEXE GNL4Z/ Thèse de Magister /2009 page 13]
- [15] AMEURSOUMIA* ETUDE DES RISQUES LIES AU BACSOUTERRAIN DU COMPLEXE GNL4Z* Thèse de Magister En Sciences des Risques et Matériaux/2009 page 17/Université D'Oran
- [16] <https://sa0a1bf6ea647fbfa.jimcontent.com/download/version/1417988846/module/6685231354/name/TGNL%202.pdf>

-
- [17] <https://sa0a1bf6ea647fbfa.jimcontent.com/download/version/1417988846/module/6685231354/name/TGNL%202.pdf>
- [18] P. PETIT, 2007, Liquéfaction du gaz naturel, Technique de l'ingénieur, J 3601
- [19]source : EN 1473
- [20]source : SAIPEM-SA
- [21]source : Tokyo gas
- [22] M. BELLUS, M. GINESTE. Etudes et essais sur l'ébullition de GNL au cours de son transfert et de son stockage en grands réservoir, deuxième congrès international et expositions sur le GNL, session 3, 1970
- [23] <http://www.EnergieCocouna.ca/fr/projet.html>
- [24] P.LEBRIS.Le Gaz Naturel Liquéfié, conférence Artset Métiers du 29 Avril 2002, Paris.
- [24] <http://www.Gaz de France.fr>
- [26] M.S.LONGUERUE. Gaz de France, leader européen du Gaz Naturel Liquéfié (GNL), Conférence arts et métiers, Paris 2002.
- [27] C. BRIDGE, I. COMPANY. Cryogenic Storage Facilities, Bull. N° 8650, Chicago Bridge and Iron, Company, III. (1967).
- [28] J.F. SACADURA. Initiation aux Transferts Thermiques. Technique et Documentation, Paris, 1980.