

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

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



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

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

**Master**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Hydrocarbure

**Option** : Génie mécanique-Mécanique des unités Pétrochimiques

Présenté par : FEKHART Mounira

THEME

**Calcul de résistance d'un réservoir de stockage de GNL du complexe  
GL1Z à Arzew**

Devant le jury :

|                      | Nom et Prénom   | Grade | Université/Affiliation |
|----------------------|-----------------|-------|------------------------|
| Présidente du Jury : | MEFTAH Siham    | MCA   | UMBB                   |
| Examineur :          | HALOUANE Yacine | MCA   | UMBB                   |
| Examineur :          | SAHNOUNE Khaled | MCB   | UMBB                   |
| Encadreur :          | BETTAYEB Mourad | MCB   | UMBB                   |

Boumerdes 2023

# *Remerciements*

*Je tiens à exprimer ma gratitude envers la Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie pour l'environnement prolifère qu'elle a su nous imprégner, et qui nous a permis de bénéficier d'une formation complète et à tous les enseignants du département Transport et Equipements des hydrocarbures sans exception.*

*Je tiens également à remercier chaleureusement **Mr M. Bettayeb** mon promoteur pour son dévouement, son expertise et son soutien tout au long de ce travail. Ses orientations, ses suggestions avisées et sa disponibilité m'ont permis de progresser et de mener à bien ce mémoire.*

*Je montre ma reconnaissance envers notre chef de département **Mme A. Talamali** pour sa bienveillance, son aide inestimable et ses précieux conseils.*

*Je tiens également à remercier les professionnels au niveau du complexe GL1Z Arzew qui ont accepté de participer à cette étude et qui ont partagé leur expérience avec moi.*

*Je remercie les membres du jury, pour avoir accepté de juger ce modeste travail.*

*Un merci éternel à mes parents, pour m'avoir donnée la vie, ainsi qu'à toute ma famille et pour ceux qui ont un jour croisé mon chemin et apporté ne serait-ce qu'un brin de savoir et d'amour.*

# *Dédicace*

*Quoi de plus merveilleux que de pouvoir partager les meilleurs moments de sa vie avec les êtres qu'on aime*

*En arrivant au terme de mes études, j'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :*

*- À mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien et surtout pour son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études. Merci père.*

*- À la meilleure mère du monde, ma chère maman, pour ses encouragements, son soutien et ses prières afin que je réussisse dans ma vie. Merci maman.*

*- À mon très cher frère YACINE*

*- À mes adorables sœurs NAZIHA et MALAK*

*À toute ma famille et à tous mes amis.*

## **Résumé**

Les bacs de stockage de GNL jouent un rôle crucial dans l'industrie du gaz naturel en assurant le stockage sûr et efficace de ce combustible précieux. C'est le cas des bacs de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL) du complexe de liquéfaction GL1Z d'Arzew appartenant à la SONATRACH. Ce projet vise à étudier en détail les principes fondamentaux de la résistance de ces derniers et à développer une méthodologie de calcul fiable pour évaluer la résistance structurelle de ces bacs. La méthodologie sera basée sur une analyse approfondie des forces et des contraintes auxquelles les bacs de stockage sont soumis, en prenant en compte des facteurs tels que la pression interne, la charge du matériau stocké, les conditions opérationnelles. Le processus de calcul de la résistance des bacs de stockage nécessite une combinaison de modélisation mathématique, de simulations numériques et de techniques d'ingénierie structurelle. Des logiciels spécialisés seront utilisés pour effectuer des analyses de contraintes et de déformations, en tenant compte des propriétés des matériaux utilisés dans la construction des bacs de stockage. Ce travail fournira une contribution significative à la compréhension et à l'application des principes de calcul de la résistance des bacs de stockage. Il aidera à renforcer la sécurité des installations de stockage et à optimiser leur fonctionnement, tout en réduisant les risques environnementaux et les pertes économiques potentielles associées à des défaillances structurales.

## **Abstract**

LNG storage tanks play a crucial role in the natural gas industry by ensuring the safe and efficient storage of this valuable fuel. This is the case with the liquefied natural gas (LNG) storage tanks at the GL1Z liquefaction complex in Arzew, owned by SONATRACH. This project aims to study in detail the fundamental principles of the strength of these tanks and to develop a reliable calculation methodology to assess the structural strength of these tanks. The methodology will be based on a thorough analysis of the forces and stresses to which the storage tanks are subjected, taking into account factors such as internal pressure, the load of the stored material, and operational conditions. The process of calculating the strength of storage tanks requires a combination of mathematical modeling, numerical simulations, and structural engineering techniques. Specialized software will be used to perform stress and deformation analyses, taking into account the properties of the materials used in the construction of the storage tanks.

This work will provide a significant contribution to the understanding and application of the principles for calculating the strength of storage tanks. It will help enhance the safety of storage facilities and optimize their operation, while reducing environmental risks and potential economic losses associated with structural failures.

## ملخص

تلعب خزانات تخزين الغاز الطبيعي المسال دوراً حاسماً في صناعة الغاز الطبيعي من خلال ضمان تخزين هذه الوقود الثمين بطريقة آمنة وفعالة. وهذا هو الحال بالنسبة لخزانات الغاز الطبيعي المسال (GNL) في مجمع التسييل GLIZ في أرزيو والتابع لشركة سوناطراك. يهدف هذا المشروع إلى دراسة مبادئ مقاومة هذه الخزانات بشكل مفصل وتطوير منهجية حسابية موثوقة لتقييم المقاومة الهيكلية لهذه الخزانات. ستتستند المنهجية إلى تحليل شامل للقوى والضغوط التي تتعرض لها خزانات التخزين، مع مراعاة عوامل مثل الضغط الداخلي وحمولة المواد المخزنة والظروف التشغيلية. يتطلب عملية حساب مقاومة خزانات التخزين مزيجاً من النمذجة الرياضية والمحاكاة العددية وتقنيات الهندسة الهيكلية. ستستخدم برامج متخصصة لإجراء تحليلات الضغوط والتشوهات، مع مراعاة خصائص المواد المستخدمة في بناء خزانات التخزين.

سيقدم هذا العمل مساهمة مهمة في فهم وتطبيق مبادئ حساب مقاومة خزانات التخزين. سيساعد في تعزيز سلامة منشآت التخزين وتحسين أدائها، مع تقليل المخاطر البيئية والخسائر الاقتصادية المحتملة المرتبطة بالفشل الهيكلي.

# Sommaire

## INTRODUCTION

### CHAPITRE I : *Généralités sur les réservoirs de stockage*

|       |  |    |
|-------|--|----|
| I.1   | Introduction .....   | 3  |
| I.2   | Classification des bacs de stockage .....  | 3  |
| I.3   | Eléments constitutifs des réservoirs de stockage.....                                      | 5  |
| I.4   | Type de stockage .....   | 6  |
| I.4.1 | Les réservoirs sous pression.....  | 6  |
| I.4.2 | Les réservoirs de stockage à température contrôlée.....                                    | 7  |
| I.4.3 | Les réservoirs atmosphériques .....  | 8  |
| I.5   | Critères de choix de type de réservoir .....   | 11 |
| I.6   | Description de la zone de stockage d'usine de liquéfaction de gaz Natural GL1Z ARZEW<br>12 |    |
| I.6.1 | Parc de stockage et de chargement du complexe GL1/Z .....                                  | 12 |
| I.6.2 | Les bacs de stockage de GNL .....  | 13 |
| I.6.3 | Conceptions de réalisation d'un réservoir de stockage GNL : .....                          | 14 |
| I.7   | Conclusion .....   | 16 |

### CHAPITRE II : *Mécanismes de dégradations et défaillances des bacs de stockage*

|        |   |    |
|--------|---|----|
| II.1   | Introduction .....  | 18 |
| II.2   | Dégradations liées au fonctionnement cyclique .....               | 18 |
| II.3   | Les fissurations.....   | 19 |
| II.4   | La corrosion.....   | 20 |
| II.4.1 | Les éléments déclencheurs de corrosion .....                      | 20 |
| II.4.2 | Les différents types de corrosion .....                           | 22 |
| II.4.3 | Le taux de corrosion.....   | 23 |
| II.5   | Les affaissements et problèmes associés .....                     | 23 |
| II.6   | Défaillance de structure du réservoir et de ses accessoires ..... | 24 |
| II.7   | Dégradation des assises .....                                     | 24 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| II.8  | Combinaison de mécanismes de dégradation et autres influence..... | 25 |
| II.9  | Techniques de préservation contre les défaillances.....           | 25 |
| II.10 | Conclusion .....  | 26 |

CHAPITRE III : *Calcul de la résistance de bac de stockage du GNL*

|         |  |    |
|---------|--|----|
| III.1   | Introduction.....  | 28 |
| III.2   | Critères d'étude des réservoirs de stockage de GNL .....   | 29 |
| III.3   | La géométrie du réservoir .....  | 30 |
| III.4   | Calcul du réservoir intérieur .....  | 30 |
| III.4.1 | Données du calcul .....  | 30 |
| III.4.2 | Dimension du réservoir intérieur rempli de GNL .....   | 31 |
| III.4.3 | Calcul du volume .....   | 32 |
| III.4.4 | Niveau d'eau des essais hydrauliques .....   | 32 |
| III.4.5 | Calcul des épaisseurs de la robe intérieure.....   | 33 |
| III.4.6 | Contrainte maximale des tôles de la robe intérieure pendant les essais hydrauliques<br>34                            |    |
| III.4.7 | Raidisseurs de la robe intérieure .....  | 35 |
| III.4.8 | Vérification du flambage de la robe intérieure du a la contrainte de flexion et la<br>charge sismique vertical ..... | 37 |
| III.4.9 | Résistance de l'enveloppe intérieure en cas de tremblement de terre.....   | 38 |
| III.5   | Calcul de résistance du réservoir extérieure .....   | 42 |
| III.5.1 | Calcul des épaisseurs de la robe extérieure.....   | 42 |
| III.5.2 | Résistance de la poutre annulaire .....  | 43 |
| III.5.3 | Epaisseur du plateau de toit extérieur .....   | 45 |
| III.5.4 | Résistance du boulon d'ancrage:.....   | 45 |

CHAPITRE IV : *Simulation du test hydrostatique*

|        |  |    |
|--------|--|----|
| IV.1   | Introduction.....  | 50 |
| IV.2   | La méthode des éléments finis.....                                     | 50 |
| IV.2.1 | Principe de base.....  | 50 |
| IV.2.2 | Concept du modèle des éléments finis cinématiquement admissibles ..... | 51 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| IV.2.3   | Disciplines d'application de la MEF .....  | 53 |
| IV.2.4   | Les étapes de calcul d'un logiciel par éléments finis .....  | 53 |
| IV.2.5   | Types d'éléments de maillage .....   | 54 |
| IV.3   | Le logiciel de simulation utilisé - ANSYS .....  | 55 |
| IV.4   | Vérification de résistance durant le test hydrostatique .....  | 56 |
| IV.4.1   | Les étapes à suivre durant la simulation.....  | 56 |
| IV.4.2   | Résultats et interprétations .....   | 62 |
| IV.4.2.1   | Evolution de l'intensité de contrainte .....   | 62 |
| IV.4.2.2   | Evolution de la contrainte équivalente de Von Mises.....   | 62 |
| IV.4.2.3   | Déformation élastique équivalente.....   | 64 |
| IV.4.2.4   | Le coefficient de sécurité .....   | 65 |
| <br>CHAPITRE V : <i>Etude thermique du bac de stockage</i> |  |    |
| V  | .....  | 66 |
| V.1  | INTRODUCTION .....   | 66 |
| V.2  | Le problème thermique du stockage.....   | 66 |
| V.3  | Critères de choix des matériaux isolants : .....   | 66 |
| V.3.1  | Critères physiques : .....   | 66 |
| V.3.2  | Critères mécaniques : .....  | 67 |
| V.3.3  | Critères de sécurité : .....   | 68 |
| V.3.4  | Critères de mise en œuvre .....  | 68 |
| V.3.5  | Critères économiques .....   | 68 |
| V.4  | Les différents types des isolants .....  | 68 |
| V.4.1  | Les mousses: .....   | 68 |
| V.4.2  | Les poudres .....  | 69 |
| V.4.3  | Les fibres .....   | 70 |
| V.4.4  | La Superisolation.....   | 70 |
| V.4.5  | Isolation par le vide .....  | 70 |
| V.5  | Description des isolants utilisés dans différentes parties de bac de stockage étudié et analyse des flux de chaleur associés ..... | 71 |
| V.5.1  | Flux de chaleur dans les parois cylindriques.....  | 71 |
| V.5.2  | Flux de chaleur dans le fond du réservoir .....  | 72 |



|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| V.5.3               | Flux de chaleur dans le toit .....   | 74 |
| V.6                 | Hypothèses pour le calcul :.....   | 75 |
| V.7                 | Calcul analytique .....  | 76 |
| V.8                 | Etude numérique de l'influence de la température ambiante sur le flux de chaleur dans la paroi | 78 |
| V.9                 | CONCLUSION .....   | 85 |
| CONCLUSION GENERALE |  |    |
| Bibliographie       |  |    |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau III 1</b> : Données de calcul pour le bac de stockage .....         | 29 |
| <b>Tableau III 2</b> : Epaisseurs des viroles de la robe intérieure .....      | 33 |
| <b>Tableau III 3</b> : Contraintes calculées pendant l'essai hydraulique ..... | 34 |
| <b>Tableau III 4</b> : Emplacement des raidisseurs de la robe intérieure ..... | 36 |
| <b>Tableau III 5</b> : Moment d'inertie pour les raidisseurs de la robe .....  | 37 |
| <b>Tableau III 6</b> : Pression cinétique calculée avec $\emptyset = 0$ .....  | 39 |
| <b>Tableau III 7</b> : Contraintes au niveau du plateau d'enveloppe.....       | 40 |
| <b>Tableau III 8</b> : Epaisseurs des viroles de la robe extérieure.....       | 43 |
|  |    |
| <b>Tableau IV 1</b> : Disciplines d'application de la MEF .....                | 53 |
| <b>Tableau IV 2</b> : Epaisseur des viroles de la robe intérieure .....        | 57 |
| <b>Tableau IV 3</b> : Caractéristiques de maillage.....                        | 60 |
|  |    |
| <b>Tableau V 1</b> : Conductivités thermique des matériaux d'isolation.....    | 76 |
| <b>Tableau V 2</b> : Matériaux et propriétés du fond .....                     | 76 |
| <b>Tableau V 3</b> : Matériaux et propriété des parois latérales.....          | 77 |
| <b>Tableau V 4</b> : matériaux et propriétés du toit.....                      | 77 |
| <b>Tableau V 5</b> : Caractéristiques du maillage .....                        | 81 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure I 1</b> : Les spheres .....  | 6  |
| <b>Figure I 2</b> : les ballons .....  | 7  |
| <b>Figure I 3</b> : spheroid.....  | 7  |
| <b>Figure I 4</b> : cuve ouverte .....   | 8  |
| <b>Figure I 5</b> : réservoir à toit fixe .....  | 9  |
| <b>Figure I 6</b> : réservoir à toit flottant simple pont .....  | 10 |
| <b>Figure I 7</b> : Réservoir à toit flottant double pont.....   | 10 |
| <b>Figure I 8</b> : Plan du complexe GL1/Z .....   | 12 |
| <b>Figure I 9</b> : Bac de stockage de GNL du complexe GL1Z.....   | 14 |
|  |    |
| <b>Figure II 1</b> : Corrosion interne du fond de réservoir .....  | 21 |
| <b>Figure II 2</b> : Corrosion externe .....   | 22 |
|  |    |
| <b>Figure IV 1</b> : Modélisation d'un problème d'éléments finis .....   | 51 |
| <b>Figure IV 2</b> : : Eléments triangulaires T3 T6 T9 .....   | 54 |
| <b>Figure IV 3</b> : éléments quadrangulaires Q4, Q8 et Q12 .....  | 54 |
| <b>Figure IV 4</b> : Types d'éléments tridimensionnel.....   | 55 |
| <b>Figure IV 5</b> : Définition de systèmes d'analyse .....  | 57 |
| <b>Figure IV 6</b> : Modélisation du réservoir intérieur du bac de stockage .....                                    | 58 |
| <b>Figure IV 7</b> : Définition du matériau .....  | 59 |
| <b>Figure IV 8</b> : Le maillage du bac .....  | 59 |
| <b>Figure IV 9</b> : Introduction d'un support fixe.....   | 60 |
| <b>Figure IV 10</b> : Introduction de la force hydrostatique.....  | 61 |
| <b>Figure IV 11</b> : Gravite terrestre .....  | 61 |
| <b>Figure IV 12</b> : Variation de l'intensité de contrainte.....  | 62 |
| <b>Figure IV 13</b> : Variation de la contrainte équivalente de Von Mises .....                                      | 63 |
| <b>Figure IV 14</b> : La déformations élastique .....  | 63 |
| <b>Figure IV 15</b> : La variation de la contrainte en fonction de la pression hydrostatique .....                   | 64 |
| <b>Figure IV 16</b> : Le coefficient de sécurité .....   | 65 |
|  |    |
| <b>Figure V 1</b> : Détails d'un superisolant.....   | 70 |
| <b>Figure V 2</b> : Isolation des parois .....   | 72 |
| <b>Figure V 3</b> ; Isolation du fond .....  | 73 |
| <b>Figure V 4</b> : Isolation du toit .....  | 74 |
| <b>Figure V 5</b> : Définition du système d'analyse .....  | 79 |
| <b>Figure V 6</b> ; Introduction des matériaux des parois latérales .....  | 80 |
| <b>Figure V 7</b> : Génération du maillage .....   | 81 |
| <b>Figure V 8</b> : Variation des températures et flux de chaleur pour $T_{ext}=28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....  | 82 |
| <b>Figure V 9</b> : Variation des températures et flux de chaleur pour $T_{ext} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....  | 83 |
| <b>Figure V 10</b> : Variation des températures et flux de chaleur pour $T_{ext} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ..... | 84 |

## ***INTRODUCTION***

---

A l'heure actuelle le monde subit des grands développements en matière de technologie dans tous les domaines en particulier dans l'industrie des hydrocarbures qui connaît un progrès considérable dans le monde, en particulier en Algérie, que ce soit dans le domaine de la recherche, la production, la pétrochimie, ou le stockage. Ce dernier est un secteur stratégique dans l'industrie pétrolière et les réservoirs sont très importants pour le stockage. Ils permettent d'assurer une pérennité de la production malgré les interruptions accidentelles.

Les réservoirs de stockage sont nécessaires à l'exploitation des champs pétroliers, ils permettent d'assurer une continuité de la production. Le stockage des différents produits du pétrole, de pétrochimie et de chimie s'effectue principalement dans des réservoirs métalliques, de construction soudée ces réservoirs ont des capacités très variables, car les produits stockés sont nombreux et différents, et pour chacun d'eux, il existe une capacité de stockage fonctionnellement et économiquement adaptée aux caractéristiques du produit stocké. Le stockage des produits d'hydrocarbures dans des réservoirs dépend de la nature et de la volatilité des produits stockés, ainsi que du maintien de la structure à la pression interne développée par ces produits.

Afin de concevoir ces structures en toute sécurité, il est important d'analyser leur comportement sous différentes charges. La première étape de l'analyse du comportement d'une structure sous différentes charges est une analyse des contraintes, qui peut être effectuée à l'aide de différentes méthodes théoriques, numériques et expérimentales. Les réservoirs peuvent être cylindriques, sphériques. Qu'ils soient aériens ou souterrains, horizontaux ou verticaux, cela dépend de la nature, de l'environnement et de l'utilisation du produit stocké. Les réservoirs sont plus complexes en termes de taille, de recherche et de gestion des composants de sécurité. Ils interagissent avec l'environnement extérieur comme les produits stockés, les conditions climatiques, etc. Un réservoir est un équipement dangereux prêt à exploser en raison d'une défaillance interne ou externe. Cet accident nous rappelle les précautions à prendre lors de l'utilisation de tel enceinte et la nécessité d'aller au-delà de la norme et de la convention pour approfondir l'étude technique détaillée, développer de nouveaux concepts dans le cadre de performance et de résolution des problèmes et créer une vision plus dynamique et méthodique dans le cadre de la maintenance prédictive et autonome.

Dans ce mémoire, nous aborderons les chapitres suivants :

Chapitre 01 : Des généralités sur les réservoirs de stockage, leurs types et leurs caractéristiques. Nous fournirons une description du réservoir de stockage spécifique au lieu de stage sur lequel nous baserons notre étude.

Chapitre 02 : Problèmes de dysfonctionnement et de défaillance des réservoirs de stockage. Nous examinerons les différents problèmes auxquels les réservoirs de stockage peuvent être confrontés, tels que les fuites, la corrosion, les problèmes structurels, etc.

Chapitre 03 : Calcul de la résistance mécanique de notre réservoir. Nous effectuerons des calculs pour évaluer la résistance mécanique du réservoir de stockage, en tenant compte des charges auxquelles il est soumis, telles que la pression interne et externe, le poids du contenu, etc.

Chapitre 04 : Simulation numérique pour évaluer la résistance du réservoir de stockage lors de l'essai hydrostatique par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel ANSYS.

Chapitre 05 : Étude thermique pour vérifier la résistance thermique de notre réservoir. Nous examinerons les aspects thermiques liés au réservoir de stockage, tels que les variations de température, les pertes thermiques, etc.

## ***CHAPITRE I : Généralités sur les réservoirs de stockage***

---

## I Généralités sur les réservoirs de stockage

### I.1 Introduction

Pour faire face à la diversité des produits liquides industriels à stocker, les industriels utilisent des réservoirs de formes et de conceptions diverses, visant à s'adapter le plus rationnellement et économiquement possible aux caractéristiques des produits à manipuler. La configuration d'un réservoir de stockage dépend de deux exigences fondamentales, d'une part la préservation du produit en limitant ou en interdisant l'évaporation, et d'autre part la résistance de la structure à la pression interne générée par le produit. La forme cylindrique est la plus courante en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa bonne résistance à la pression interne. Lorsque la pression interne est élevée, une forme sphérique est plus appropriée qu'un cylindre et l'épaisseur de paroi peut être réduite.

Dans ce chapitre, nous examinerons les divers types de réservoirs de stockage, les critères principaux à prendre en compte lors du choix d'un bac de stockage, ainsi qu'une description générale du lieu de stage.

### I.2 Classification des bacs de stockage

Les bacs de stockage sont classés selon plusieurs critères de la manière suivante : [1]

#### ✓ En fonction du produit stocké

Les produits pétroliers sont classés d'après leur volatilité

- **Catégorie A** : produits dont la tension de vapeur aux températures de stockage est toujours supérieure à 1 bar

Pour ce type de produits on peut distinguer deux types de stockage, à savoir :

- Stockage de produit de catégorie A-1

Le but d'un tel stockage est de maintenir le produit à une température suffisamment basse pour réduire sa pression de vapeur sous la pression atmosphérique. L'épaisseur calculée est alors déterminée uniquement à partir de l'effet des charges hydrostatiques. Les matériaux utilisés doivent avoir de bonnes propriétés mécaniques à basse température. Ce type de stockage est utilisé dans les usines pétrochimiques ou de gaz naturel liquéfié.

- Stockage de produit de catégorie A-2

Dans ce cas les produits sont maintenus sous une pression égale à leur tension de vapeur. Le stockage est alors utilisé dans des réservoirs de forme sphérique ou cylindrique et parfois dans des cavités taillées dans la roche pour les volumes très importants exemple GPL.

- **Catégorie B** : produits dont la tension de vapeur est parfois légèrement inférieure à 1 bar.



Ces produits sont stockés dans des bacs à toit fixe, à toit flottant, à écran flottant sous une pression voisine de la pression atmosphérique exemple : essence-kérosène

- **Catégorie C** : produits dont la tension de vapeur est toujours inférieure à 1 bar mais non négligeable.

Les produits de cette catégorie sont stockés dans des bacs à toit fixe sous une pression voisine de la pression atmosphérique.

- **Catégorie D** : produits dont la tension de vapeur est négligeable.

Ces produits sont stockés dans des réservoirs à toits fixes maintenus à température constante ; les enveloppes de ces réservoirs sont généralement calorifugées ; produits lourds comme les huiles de base bitumineuses ou lorsque les volumes à stocker sont importants comme le gasoil.

✓ **En fonction de la matière utilisée pour leur construction**

- Bacs de stockage en acier
- Bacs de stockage en béton.
- Bacs de stockage en matière souples

✓ **En fonction de leur exploitation**

- Bacs de stockage fixes
- Bacs de stockage mobiles
- Bacs de stockage semi fixes

✓ **En fonction de leur position par rapport au niveau du sol**

- Bacs de stockage aériens
- Bacs de stockage semi enterrés
- Bacs de stockage souterrains

### I.3 Eléments constitutifs des réservoirs de stockage

❖ Robe :

Partie cylindrique de l'enveloppe. C'est le corps principal du bac de stockage, qui contient le liquide ou le produit à stocker. La cuve peut être en acier, en béton, en plastique renforcé de fibres de verre (PRFV) ou d'autres matériaux appropriés pour résister aux propriétés chimiques du produit stocké.

❖ Fond :

Partie inférieure de l'enveloppe formant la base de la robe. Il peut être plat ou conique, selon la conception. Il est conçu pour soutenir le poids du liquide stocké et fournir une surface de support stable.

❖ Toit-couverture :

Partie supérieure de l'enveloppe (couverture et charpente qui la porte). Le toit du bac de stockage peut être fixe ou flottant, en fonction de la conception. Il peut être en acier, en aluminium ou en plastique renforcé de fibres de verre (PRFV) et est conçu pour empêcher la contamination du produit stocké et minimiser les émissions de vapeurs.

❖ Joints et joints d'étanchéité :

Les bacs de stockage sont équipés de joints et de joints d'étanchéité pour assurer l'étanchéité entre les différentes parties de la cuve, y compris le toit, le fond et les parois.

❖ Événement ou soupape de dégazage :

Ces composants permettent la libération contrôlée des gaz ou des vapeurs accumulés dans le bac de stockage, garantissant la sécurité et la prévention des surpressions.

❖ Système de détection de fuites :

Pour les produits dangereux ou sensibles à l'environnement, un système de détection de fuites peut être installé pour surveiller les fuites potentielles et alerter en cas de problème.

❖ Systèmes de mesure de niveau :

Des dispositifs de mesure de niveau, tels que des jauges, des flotteurs ou des capteurs, peuvent être utilisés pour surveiller et contrôler le niveau de remplissage du bac de stockage.

❖ Systèmes de transfert et de distribution :

Les bacs de stockage peuvent être équipés de pompes, de tuyauteries, de vannes et d'autres composants nécessaires au transfert et à la distribution du liquide stocké vers d'autres réservoirs ou installations.

### ❖ Système de sécurité et de prévention des incendies :

Des systèmes de sécurité tels que les systèmes de détection d'incendie, les extincteurs, les systèmes de suppression des incendies et les dispositifs de décharge de pression peuvent être intégrés aux bacs de stockage pour prévenir les incidents liés aux incendies.

## I.4 Type de stockage

### I.4.1 Les réservoirs sous pression

Cette catégorie de réservoirs est spécifiquement conçue pour le stockage de liquides volatils dont la pression de vapeur, à la température ambiante, dépasse la pression atmosphérique. Les réservoirs sous pression englobent les types suivants : [1]

#### ✓ Les sphères

Ces réservoirs sphériques sont considérés comme la forme idéal pour le stockage sous haute pression, car ils représentent les contraintes de membrane les plus faibles. Ils permettent d'obtenir des capacités de stockage importantes de manière économique. La forme sphérique optimise l'utilisation de la résistance du matériau et réduit les coûts de fabrication. Le remplissage et le vidange du réservoir se font généralement par une conduite située à la partie inférieure de la sphère, équipée d'un clapet hydraulique de sécurité. Des escaliers facilitent l'accès aux équipements tels que les jauges manuelles, les manomètres, les événements, les thermomètres et les soupapes, qui sont situés au sommet du réservoir. La protection d'incendie est assurée par des rampes de pulvérisation d'eau, qui peuvent également servir de système de réfrigération pendant les périodes estivales.



**Figure I 1** : Les sphères

#### ✓ Les ballons

Ils peuvent être aériens ou placés sous un talus de terre. Ils conviennent bien pour le stockage sous forte pression et c'est leur destination.



**Figure I 2 : les ballons**

✓ **Les sphéroïdes**

Ils sont utilisés comme moyen de stockage intermédiaire entre les réservoirs cylindriques verticaux sous faible pression et les ballons ou les sphères sous forte pression.



**Figure I 3 : spheroid**

### **I.4.2 Les réservoirs de stockage à température contrôlée**

Les réservoirs de stockage à température contrôlée sont utilisés pour contenir des gaz liquéfiés dont la température au point normal d'ébullition (PNE) est inférieure à la température ambiante. Ces gaz se caractérisent par une pression élevée à la température du site, lorsqu'il est nécessaire de stocker de grandes quantités de gaz liquéfiés, cela nécessite un grand nombre d'unités de stockage sous pleine pression, car le volume de chaque unité est limité par les épaisseurs maximales de la paroi qui peuvent être réalisées.

Pour remédier à cette situation contraignante et peu économique, on peut réduire la pression d'exploitation en abaissant la température du produit jusqu'à sa température de vaporisation normale. De cette manière, la capacité des réservoirs peut être considérablement augmentée, tout comme les quantités stockées, car le liquide devient plus dense.

### ✓ **Les réservoirs semi-réfrigérés**

Les réservoirs semi-réfrigérés, comme les sphères ou les ballons, sont conçus pour maintenir une pression intermédiaire entre la pression atmosphérique et la pleine pression à la température ambiante, en utilisant un système de réfrigération.

### ✓ **Les réservoirs réfrigérés ou cryogéniques**

Les réservoirs réfrigérés ou cryogéniques, tels que les réservoirs cylindriques verticaux à fond plat, sont conçus pour fonctionner à une pression proche de la pression atmosphérique au point normal d'ébullition (PNE) du gaz liquéfié. Ces réservoirs sont équipés d'une isolation thermique importante, qui devient d'autant plus essentielle lorsque la température de stockage est basse.

### **I.4.3 Les réservoirs atmosphériques**

Les réservoirs atmosphériques font référence à des réservoirs de stockage utilisés pour contenir des liquides ou des gaz sous pression atmosphérique, c'est-à-dire à la pression ambiante. Ces réservoirs ne sont pas soumis à des pressions élevées et n'impliquent pas de système de compression ou de réfrigération spécifique. Ils sont souvent utilisés pour stocker des produits courants tels que l'eau, les produits pétroliers, les produits chimiques, etc. Les réservoirs atmosphériques sont conçus pour maintenir l'intégrité du contenu et assurer une sécurité appropriée sans nécessiter de pressurisation ou de contrôle de la température en particulier. On peut les différencier par le type de couverture.

#### ✓ **Les cuves ouvertes**

Elles ne comportent pas de toit et leur emploi est limité aux quelques liquides que l'on peut utiliser, sans danger pour leur qualité ou pour l'environnement, exposer à l'air libre (exemples de produits stockés : eau, incendie et industrielle, eau potable ...)

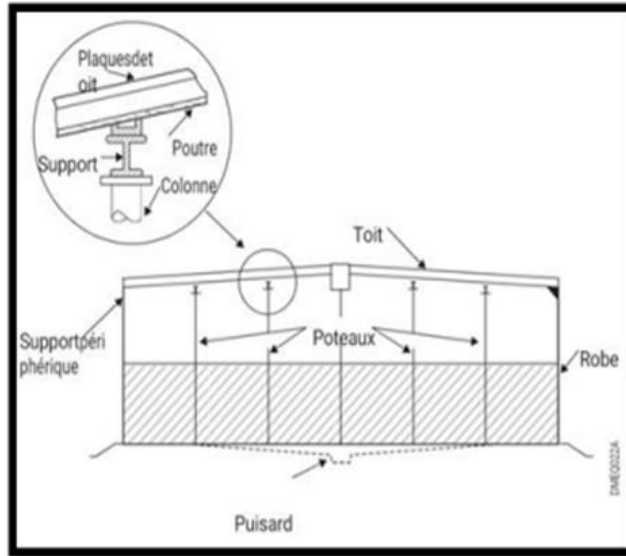


**Figure I 4 :** cuve ouverte

#### ✓ **Les réservoirs à toit fixe**

Un réservoir à toit fixe est équipé d'un toit du type conique, en ombrelle, ou en parasol qui recouvre entièrement le réservoir. Contrairement aux réservoirs à toit flottant, le toit d'un réservoir

à toit fixe reste dans une position fixe et ne flotte pas sur le liquide stocké à l'intérieur. Ces réservoirs sont généralement utilisés pour stocker des liquides qui ne génèrent pas de quantités importantes de vapeur ou qui nécessitent une protection spéciale contre l'évaporation. Les réservoirs à toit fixe sont couramment utilisés dans une variété d'industries, y compris le stockage de l'eau, des produits pétroliers, des produits chimiques et d'autres liquides. Ils offrent une solution de stockage stable et sécurisée lorsque la gestion de la vapeur n'est pas une préoccupation majeure.



**Figure I 5 :** réservoir à toit fixe

✓ **Les réservoirs à toit flottant**

L'espace de vapeur qui existe au-dessus du liquide dans les réservoirs à toit fixe est une source de perte de respiration et de remplissage. Ces pertes peuvent en fait être éliminées en utilisant un réservoir qui élimine cet espace de vapeur. Il s'agit d'installer une structure qui flotte directement à la surface du liquide stocké, appelée toit flottant. Les surcoûts engendrés par la construction de ce toit flottant sont largement compensés par des économies d'inventaire. Aujourd'hui, cette raison économique doit se conjuguer avec la nécessité d'une réglementation locale pour limiter la pollution de l'air. Ces réservoirs sont principalement utilisés pour stocker des liquides volatils avec une pression de vapeur absolue comprise entre 0,1 et 0,75 bar à température ambiante ou avec un point d'éclair inférieur ou égal à 55°C. C'est le cas, par exemple, du pétrole brut, du naphtha et de diverses essences et carburants.

Il existe deux type de toit flottant : à simple pont ou à double pont

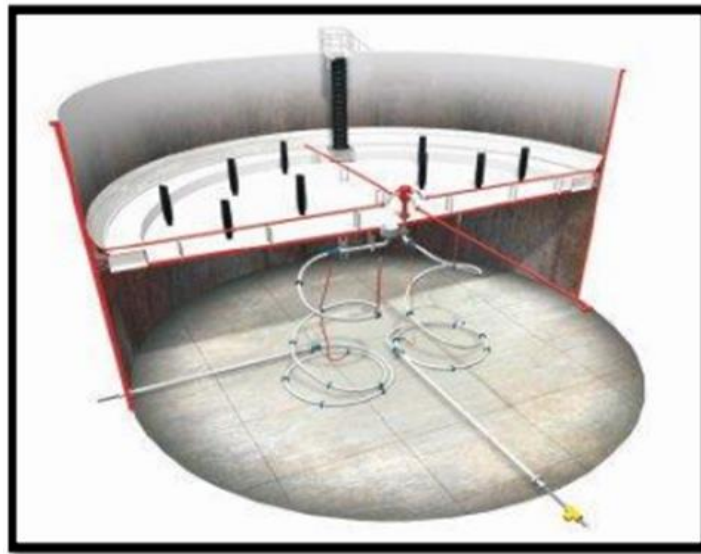
• **Toit flottant à simple pont**

Les toits flottants sont constitués d'une membrane circulaire centrale, appelée pont, qui repose directement sur le liquide stocké. Cette membrane est bordée par un caisson annulaire. Les toits flottants à simple pont sont utilisés pour les réservoirs dont le diamètre varie de 15 à 100

mètres. Ils sont plus légers et moins coûteux que les toits flottants à double pont, mais ils sont plus sensibles aux effets du vent. Deux variantes ont été développées :

- Toit flottant à simple pont avec caisson central : un caisson de flottabilité cylindrique est installé au centre du pont central.
- Toit flottant à simple pont avec bouées multiples : il s'agit d'un ensemble de petits caissons fermés, cylindriques ou cubiques, disposés régulièrement sur toute la surface du pont.

Ces variantes visent à réduire la largeur du caisson, ce qui rend la structure plus économique. Cependant, elles peuvent présenter des difficultés de drainage des eaux et des problèmes de corrosion sur le pont.



**Figure I 6 :** réservoir à toit flottant simple pont

• **Toit flottant à double pont**



**Figure I 7:** Réservoir à toit flottant double pont

Les toits flottants à double pont sont composés de deux voiles circulaires en tôle, avec le pont inférieur en contact direct avec le liquide et le pont supérieur au-dessus. Ces ponts sont séparés par des couronnes concentriques verticales qui forment des caissons étanches au liquide. Le caisson annulaire extérieur est divisé en compartiments par des cloisons radiales, qui sont également étanches au liquide.

Ces toits offrent une isolation thermique efficace grâce au matelas d'air présent entre les deux ponts, ce qui réduit les effets de la température extérieure. Le pont supérieur repose sur des chevrons en profilés, disposés de manière radiale entre les couronnes concentriques qui séparent les deux ponts. Il présente une pente qui favorise le drainage des eaux vers le centre du toit. Les toits flottants à double pont sont utilisés pour les réservoirs ayant un diamètre compris entre 15 et 125 mètres.

Aussi, On peut classer les réservoirs à toit flottants en :

- Les réservoirs à toit flottant interne, dont le toit est placé à l'intérieur de réservoirs à toit fixe
- Les réservoirs à toit flottant externe, dont le toit est installé à l'air libre dans des cuves ouvertes.

### **I.5 Critères de choix de type de réservoir**

Dans les industries du pétrole, de la pétrochimie et de la chimie, le stockage en massif des liquides est principalement réalisé dans des réservoirs métalliques de construction soudée, placés à l'air libre et reposant sur le sol (réservoirs aériens).

Il existe une grande variété de produits stockés, chacun nécessitant une capacité de stockage adaptée à ses caractéristiques spécifiques, à la fois fonctionnellement et économiquement.

On a vu les différents types de réservoirs, les divers et l'application de chaque type de réservoir employé dans l'industrie et on a vu de nombreux types de réservoirs qui peuvent être adaptés pour stocker un même fluide. Ainsi, le choix du réservoir doit être orienté en fonction des besoins particuliers de l'utilisateur, afin de garantir une sélection rationnelle et appropriée.

Le choix d'un réservoir de stockage dépend de plusieurs critères et les données qui faudra communiquer au fabricant sont les suivantes :

- Le domaine d'utilisation du réservoir.
- La nature du fluide stocké et les services à effectuer.
- La température et la pression d'exploitation.
- Le matériau de construction.
- Les dimensions, position et le type de couvercle (fixe, ouvert, à toit flottant).
- Les tubulures et autres connexion exigées.





Face aux trains, le côté proche de la mer se trouve la zone de stockage de GNL, qui comprend 03 réservoirs de stockage de GNL aériens d'une capacité de 100 000 mètres cubes, et le complexe dispose de 02 poste de chargements pour méthaniers d'une capacité de 50 000 mètres cubes à 125 000 mètres.

### **I.6.2 Les bacs de stockage de GNL**

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est stocké et transporté dans des réservoirs cryogéniques, ce qui signifie qu'il est maintenu à une température inférieure à son point d'ébullition. Comme tout liquide le GNL s'évapore à des températures au-dessus de son point d'ébullition et génère du Boil-Off-Gas (BOG). L'ébullition est causée par la chaleur pénétrant dans le GNL pendant les opérations de stockage, de transport et de manutention. Le nombre de BOG dépend de la conception et des conditions d'exploitation du réservoir de stockage. [3]

Les 03 réservoirs de stockage sont implantés dans un site se trouvant en position adjacente à la mer méditerranée, au nord de Béthioua et au sud du Port d'Arzew EL DJEDID à environ 7 Km de la ville d'Arzew, ces bacs sont délimités :

- Au nord par la mer méditerranée
- À l'est par le complexe GL2Z
- À l'ouest par des usines telle que : ASMIDAL, FLERTAGE....
- Au sud par la zone des utilités et les six trains d'exploitation du complexe GL1Z

Les réservoirs de stockage ont une forme cylindrique, et chaque réservoir de stockage est construit dans une cuvette compartimentée appelée cuvette de rétention de réservoir de GNL. Ils sont à environ 300 mètres de la mer à une altitude de (+2,00 m). Le bassin de rétention est constitué de digues (du tuf compacté de forme trapézoïdale à 95% de densité PROCTOR) autour de trois bacs, d'une capacité suffisante pour contenir le volume des 03 réservoirs de stockage de GNL. Ce mode d'installation est conforme aux exigences de sécurité et représente un système préventif pour éviter les accidents et limiter leurs conséquences (protection contre les projections d'objet par vent ou par explosion).

Ils sont conçus en double paroi et sont identiques dans leurs conceptions, leurs instrumentations et leurs fonctionnements.

- Le GNL est stocké à une température de (-163°C) et à une pression de 1,034 bars absolus (légèrement supérieure à la pression atmosphérique : (Une atmosphère = 1,013 bars).
- Pour une production des six (06) unités de procès à capacité d'étude (100%), un réservoir de stockage peut être rempli en 43,5 heures, soit presque 02 jours.

- La capacité de stockage de chaque réservoir est de 100.000 m<sup>3</sup> de GNL.
- La hauteur maximale de remplissage d'un réservoir de stockage GNL est égale à 29,52 m.
- La capacité totale des 03 réservoirs de stockage est égale à 2,4 fois la capacité d'un méthanier de 125.000 m<sup>3</sup>.
- Le chargement d'un méthanier de 125.000 m<sup>3</sup> de GNL peut être réalisé en 12,5 heures environ ; avec un débit de chargement maximum de 10.000 m<sup>3</sup>/heures.

### I.6.3 Conceptions de réalisation d'un réservoir de stockage GNL :

Le réservoir ou bac de stockage du GNL, est conçu essentiellement par deux (02) ossatures distinctes :

- Ossature métallique
- Ossature en béton armé

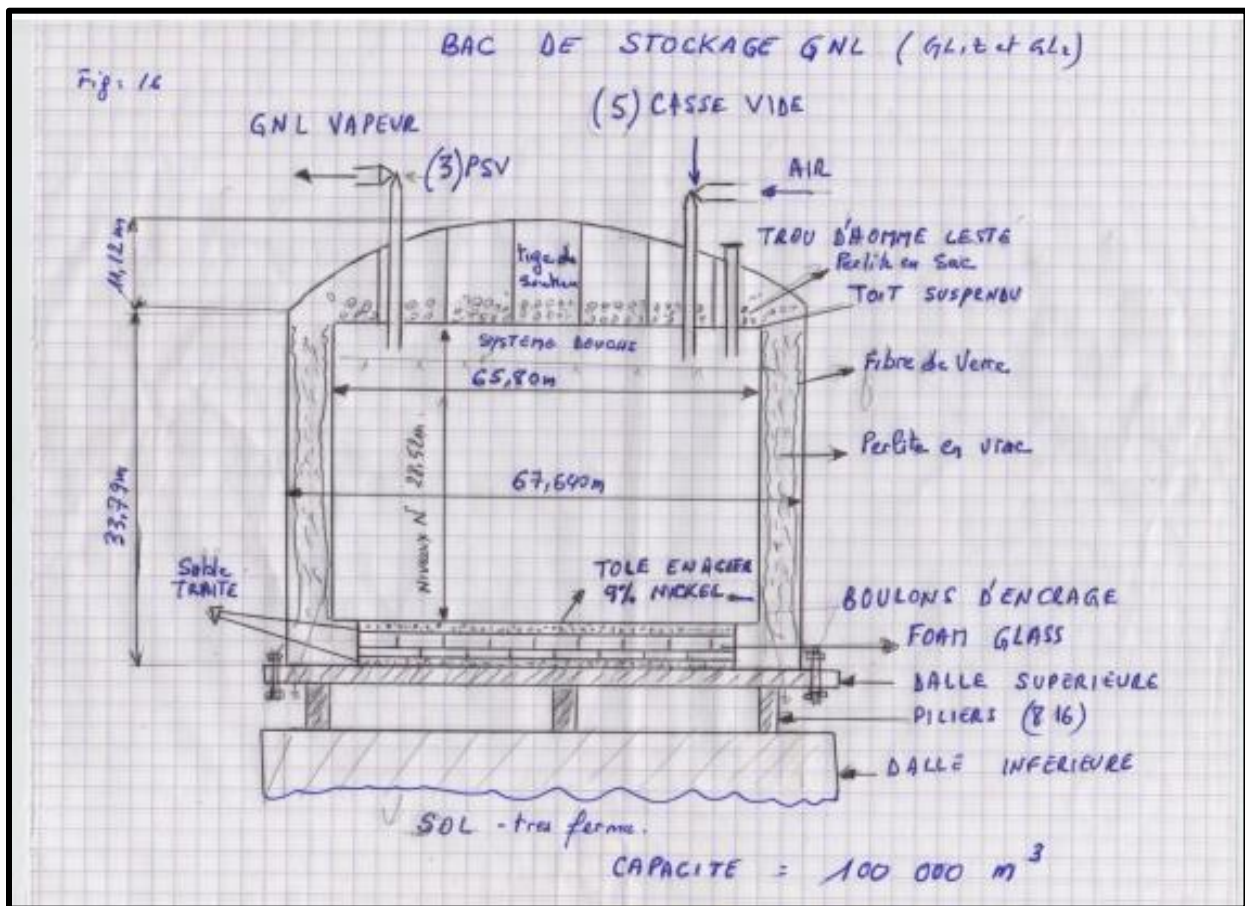


Figure I 9 : Bac de stockage de GNL du complexe GL1Z

### **I.6.3.1 Ossature Métallique**

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

- Une paroi interne construite en acier inox à 9% de Nickel, d'un diamètre de 65,80 m et d'une hauteur de 32,10 m.
- Une paroi externe construite en acier au Carbone d'un diamètre de 67,64 m, d'une hauteur d'environ 33,80 m.
- Un toit bombé nommé Dôme construit en acier au Carbone à 10,99 m de hauteur, ce qui donne au centre du bac une hauteur totale de 44,80 m et d'une épaisseur de 5,5 mm
- Un toit intérieur en aluminium d'une épaisseur de 5 mm est suspendu depuis le dôme. Il couvre la paroi interne et protège le dôme contre les vapeurs cryogéniques. [4]

### **I.6.3.2 Ossature en béton armé**

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

- En superstructure : La résultante de la descente des charges due au poids du fluide cryogénique GNL et au poids de l'ossature métallique du réservoir de stockage est transmise aux fondations par l'intermédiaire de la dalle supérieure en béton armé de forme circulaire de diamètre  $D= 70,00$  m et d'une épaisseur  $e = 76$  cm. La dalle est posée sur un nombre considérable de 716 Poteaux/Supports en béton armé ; d'une section carrée (60X60) cm<sup>2</sup> et d'une hauteur  $h=1,24$ m.
- En infrastructure : Une fondation circulaire en béton armé enterrée et non profonde appelée Radier, d'un diamètre  $D= 70,00$  m et d'une épaisseur  $e = 76$  cm. Ce Radier est réalisé de manière à résister à l'effet de surcharge d'un poids d'au moins 1,25 fois la capacité d'un bac de stockage

### **I.6.3.3 Isolation des réservoirs de stockage**

Les processus cryogéniques exigent une parfaite isolation thermique. Plusieurs paramètres sont à considérer pour leur application tels que : l'efficacité, l'économie, la commodité, le poids, la rugosité.

- ✓ Isolation des parois et du toit

La paroi interne du réservoir est recouverte de son extérieure par une couche (matelas) d'isolant thermique constituée de laine de verre (glass wool) d'une épaisseur 240 mm

La paroi externe du réservoir est aussi recouverte de son intérieure par une couche (matelas) de l'aine de verre d'une épaisseur 25mm.

L'espace annulaire compris entre les deux parois externe et interne est rempli par un isolant en poudre appelé perlite expansée. La flexibilité de la couche du glass wool permet la dilatation du réservoir interne sans perturber la perlite et en empêcher sa compression et par conséquent son entassement.

Le toit en aluminium suspendu au-dessus de la paroi interne du réservoir est isolé par des sacs de perlite (en vrac) d'une épaisseur  $e=700$  mm recouverte d'un tissu de verre.

### ✓ Isolation du fond

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

#### - Zone A :

- ❖ Une première couche de sable sec.

- ❖ 05 couches de mousse de verre (foam glass), dont des feuilles de feutres sont insérées dans ses différents étages.

- ❖ Une deuxième couche de sable sec.

#### - Zone B :

- ❖ Une contre plaque en bois.

- ❖ Un bloc de béton de perlite.

- ❖ Une chape de béton.

## **I.7 Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a permis d'explorer les différents types et formes de réservoirs de stockage. Nous avons examiné les caractéristiques et les applications spécifiques de chaque type de réservoir. Il est clair que le choix du réservoir de stockage dépend de nombreux facteurs, tels que la nature du produit à stocker, la capacité de stockage requise, les contraintes environnementales et réglementaires, ainsi que les considérations économiques. Il est important de prendre en compte ces critères lors de la sélection du réservoir de stockage approprié, afin d'assurer une solution efficace, sûre et économique.

En fin de compte, la diversité des réservoirs de stockage offre une flexibilité et une adaptabilité précieuses pour répondre aux exigences variées de l'industrie, en assurant un stockage efficace et fiable des liquides et des gaz.

***CHAPITRE II : Mécanismes de dégradations et de défaillances  
des bacs de stockage***

---

## II Mécanismes de dégradations et de défaillances des bacs de stockage

### II.1 Introduction

Les bacs de stockage jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels tels que le pétrole, la chimie, l'agroalimentaire, et bien d'autres. Ces structures robustes sont conçues pour stocker en toute sécurité des liquides, des gaz ou des produits en vrac sur de longues périodes. Cependant, malgré leur conception soigneusement planifiée et leur fabrication rigoureuse, les bacs de stockage peuvent être sujets à des défaillances qui peuvent compromettre leur intégrité structurelle et la sécurité des installations.

Ce chapitre se concentre sur l'étude des défaillances des bacs de stockage, en mettant en évidence les mécanismes qui peuvent conduire à leur détérioration. Comprendre ces mécanismes est crucial pour prévenir les incidents et maintenir la fiabilité des installations de stockage.

Nous explorerons les différents facteurs qui contribuent aux défaillances des bacs de stockage, tels que la corrosion, la fissuration, le vieillissement et la fatigue. En comprenant les mécanismes de défaillance potentiels et en adoptant une approche proactive en matière de gestion des risques, il est possible de préserver l'intégrité des bacs de stockage, de garantir la sécurité des opérations et de prévenir les incidents indésirables. Ce chapitre vise à fournir une vision globale des défaillances des bacs de stockage et à offrir des perspectives essentielles pour leur maintenance et leur durabilité à long terme.

De plus, nous aborderons également les méthodes et les techniques utiliser pour lutter et minimiser les risques de défaillance des bacs de stockage.

Les principaux mécanismes de dégradation et de défaillance des réservoirs sont :

- ✓ Dégradations liées au fonctionnement cyclique
- ✓ La fissuration
- ✓ La corrosion
- ✓ Les affaissements et problèmes associés
- ✓ Les défaillances de structure du réservoir et ses accessoires
- ✓ Dégradation des assises

### II.2 Dégradations liées au fonctionnement cyclique

Lors des cycles de vidange et de remplissage de fortes amplitudes, la paroi du réservoir subit des contraintes transversales entraînant une déformation élastique. Cependant, le fond du réservoir ne se déforme pas de la même manière, ce qui génère des contraintes au niveau de la zone critique. Le nombre de cycles subis par un réservoir de stockage est généralement faible pour engendrer des



problèmes de fatigue métallurgique. Même avec un stockage quotidien sur une durée d'exploitation de 100 ans, le nombre de cycles ne dépasse pas  $3,6 \times 10^4$ . Pour un stockage de dépôt, le nombre de cycles est encore plus réduit, soit inférieur à  $3 \times 10^3$ . Dans de telles conditions de cycle, la fatigue métallurgique ne se manifeste généralement que si les contraintes sont proches de la résistance à la rupture. Cependant, les codes de construction imposent des limites de contraintes typiquement inférieures à 40 % de la résistance à la rupture et 66 % de la limite élastique pour prévenir de tels problèmes.

Une autre manifestation des contraintes cycliques peut être la "fatigue/corrosion". Il s'agit d'une perte d'épaisseur liée à une corrosion accélérée par les contraintes répétées qui érodent et fragilisent la zone attaquée. Ce phénomène peut éventuellement se manifester sous le talon ou en face externe après environ un millier de cycles. Il est détectable par une perte anormale d'épaisseur et est assimilé à de la corrosion, bien que son nom suggère une fatigue.

Pour minimiser ces dégradations, il est essentiel de prendre en compte les conditions de fonctionnement cyclique lors de la conception et de la fabrication des bacs de stockage. Cela peut impliquer l'utilisation de matériaux appropriés, de revêtements de protection, de techniques de soudage avancées, ainsi que des programmes d'inspection et de maintenance réguliers pour détecter et traiter les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques. [5]

### II.3 Les fissurations

Les fissurations sont un problème potentiel qui peut survenir en fonction de la nature des produits stockés et de la métallurgie du réservoir. Elles se manifestent généralement dans les zones soumises à de fortes contraintes. [5]

#### ✓ **Fissuration par corrosion**

Fissuration due à la corrosion chimique ou électrochimique causée par la présence de substances corrosives dans le produit stocké. Cette corrosion peut créer des fissures localisées ou généralisées dans les parois du bac, affaiblissant sa résistance structurelle.

#### ✓ **Fissuration par fatigue**

Fissuration résultant de charges répétées ou fluctuantes appliquées sur le bac de stockage au fil du temps. Les cycles de charge peuvent provoquer des microfissures qui se propagent progressivement jusqu'à la défaillance structurelle.

#### ✓ **Fissuration par contrainte**

Fissuration induite par des contraintes mécaniques excessives dans les parois du bac de stockage. Des charges statiques ou dynamiques élevées peuvent conduire à la formation de fissures, notamment aux points de concentration de contraintes.

#### ✓ **Fissuration par corrosion sous contrainte :**

La présence de substances corrosives combinée à des contraintes de traction ou de compression peut entraîner une fissuration rapide du matériau.

### ✓ **Fissuration par environnement agressif**

Fissuration due à des conditions environnementales sévères, telles que des températures extrêmes, des variations thermiques rapides, une exposition à des produits chimiques agressifs, etc. L'environnement agressif peut altérer les propriétés du matériau et provoquer des fissures dans le bac de stockage.

### ✓ **Fissuration par surcharge**

C'est une fissuration causée par une surcharge ponctuelle ou une surpression soudaine dans le bac de stockage. Une charge excessive peut dépasser les limites de résistance du bac, entraînant des fissures ou une rupture brutale.

## **II.4 La corrosion**

La corrosion est l'une des principales façons dont les réservoirs se dégradent, elle peut être électrochimique, bactérienne et peut affecter tous les composants à l'intérieur et à l'extérieur du réservoir. Et elle peut être localisée ou généralisée. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à la corrosion des bacs de stockage. Tout d'abord, la nature des produits stockés est un élément clé, car certains liquides ou produits chimiques corrosifs peuvent réagir avec les matériaux métalliques, provoquant ainsi une corrosion accélérée. Des conditions environnementales telles que l'humidité, la présence de contaminants et la température peuvent également influencer la vitesse de corrosion.

La corrosion des bacs de stockage peut avoir des conséquences graves. Elle peut entraîner des fuites de liquides toxiques ou inflammables, mettant en danger la sécurité des travailleurs et de l'environnement. De plus, la corrosion peut affaiblir la structure du réservoir, réduisant ainsi sa durée de vie et nécessitant des réparations coûteuses. [6]

### **II.4.1 Les éléments déclencheurs de corrosion**

#### ✓ **La corrosion interne**

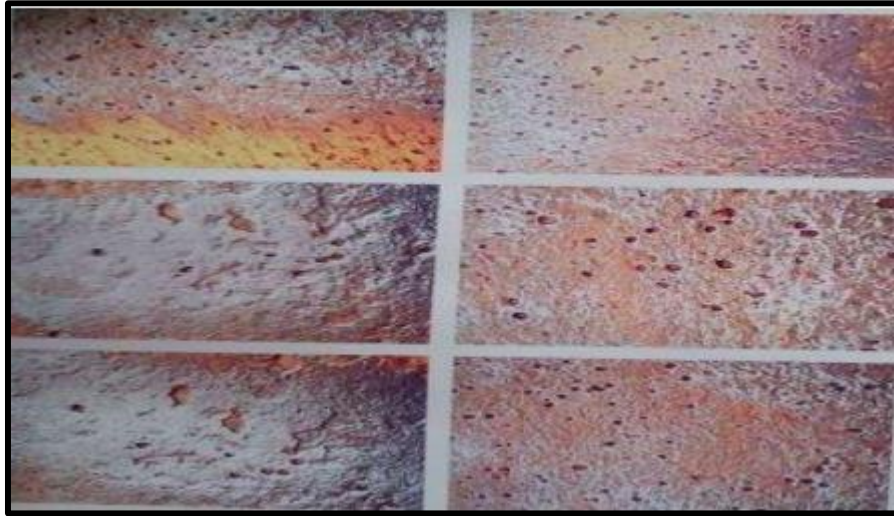
Peut résulter de :

- Présence de substances agressives ou polluantes dans le produit stocké : Certains produits chimiques ou composés présents dans le produit stocké peuvent être corrosifs et contribuer à la corrosion du bac. Par exemple, la présence de composés soufrés et de vapeur d'eau peut provoquer la corrosion du ciel du réservoir, affectant ainsi la partie interne du toit et de la robe du réservoir.

- Entrée et accumulation d'eau dans le réservoir : L'eau peut pénétrer dans le réservoir de stockage de différentes manières. Cela peut être dû à la respiration du réservoir, qui est causée par des différences de température et la condensation de la vapeur d'eau. De plus, la présence

d'eau dans le produit stocké ou l'entrée d'eau de pluie par le joint des toits flottants peut également entraîner l'accumulation d'eau et favoriser la corrosion.

- Qualité inadéquate des matériaux d'apport des soudures : Lors de la construction ou de la maintenance du bac de stockage, si les matériaux d'apport utilisés pour les soudures ne sont pas de qualité appropriée, cela peut entraîner une corrosion prématurée dans ces zones. Les soudures peuvent être des points faibles où la corrosion peut se produire en premier.



**Figure II 1** : Corrosion interne du fond de réservoir

### ✓ **La corrosion externe**

Peut résulter de :

- Mauvaise qualité de la couche supérieure de l'assise du réservoir : La présence de polluants tels que de l'argile, des pierres, des cendres ou d'autres matériaux acérés dans la couche supérieure de la fondation peut créer des zones de concentration d'oxygène au niveau des points de contact avec le fond du réservoir. Ces petites zones de contact agissent comme des anodes, tandis que le reste du fond fonctionne comme une cathode, entraînant ainsi une corrosion ponctuelle au point de contact.

- Entrée d'eau de pluie par la pénétration et/ou la capillarité : Un mauvais contact entre la tôle marginale du réservoir et l'assise peut permettre à l'eau de pluie de pénétrer dans le réservoir par capillarité ou par infiltration directe.

- Accumulation d'eau de pluie : Des zones propices à l'accumulation d'eau de pluie peuvent se former au niveau de la tôle marginale, des cornières sur les viroles ou des tôles de toit. Cette accumulation d'eau crée un environnement favorable à la corrosion.

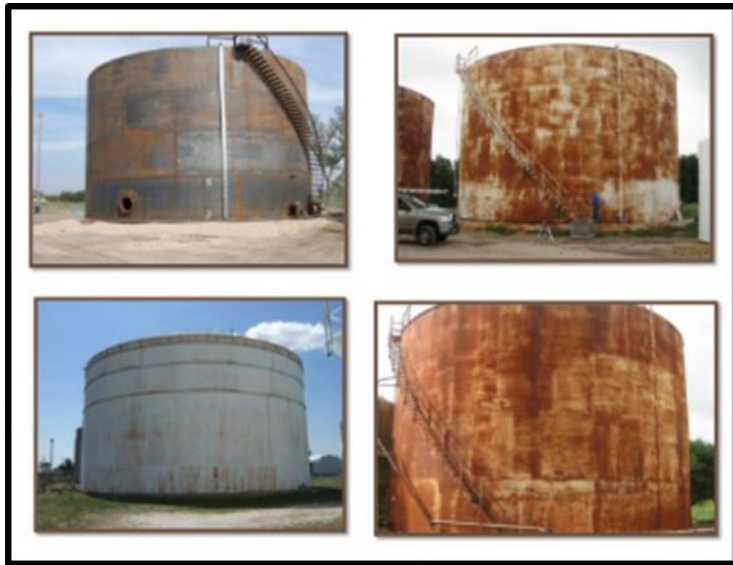
- Délamination de la tôle marginale : La présence d'eau et de débris autour de la base du réservoir peut provoquer la délamination de la tôle marginale, favorisant ainsi la corrosion.

- Qualité inadéquate des matériaux d'apport des soudures : L'utilisation de matériaux d'apport de soudures de mauvaise qualité pour les plaques annulaires et les tôles de fond peut conduire à une corrosion prématurée.

- Restes de calamine sur les plaques : La présence de calamine, une couche d'oxyde qui se forme sur les plaques d'acier lors de leur fabrication, peut favoriser la corrosion si elle n'est pas correctement éliminée.

- Température du produit stocké : Une température élevée du produit stocké peut accélérer le processus de corrosion, notamment sous le calorifuge.

- Agressivité des conditions ambiantes : Les conditions ambiantes telles que les atmosphères agricoles, industrielles, maritimes ou tropicales, ainsi que l'humidité relative, la teneur en chlorures et d'autres espèces chimiques provenant de la pollution (en particulier le dioxyde de soufre), la température, le vent et la pluie peuvent aggraver la corrosion.



**Figure II 2 :** Corrosion externe

### II.4.2 Les différents types de corrosion

#### ✓ La corrosion électrochimique

Les réservoirs de stockage peuvent être affectés par différents types de corrosion qui sont de nature électrochimique, nécessitant la présence d'eau liquide en contact avec la paroi de l'acier. Pour que la corrosion se produise, une espèce "oxydante" est nécessaire pour alimenter les piles de corrosion, soit sous forme d'ions  $H^+$  (corrosion acide, significative à bas pH), soit sous forme d'oxygène dissous dans l'eau. La corrosion peut se produire à l'intérieur des réservoirs par l'eau liquide qui entre en contact avec l'acier, ainsi qu'à l'extérieur des réservoirs exposés à l'air (corrosion atmosphérique due à l'humidité adsorbée sur l'acier et aux précipitations) ou aux sols (corrosion due à l'humidité présente dans tous les types de sols).

#### ✓ La corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne, souvent rencontrée sous forme de cratères, est provoquée par une augmentation locale de la corrosivité dans des zones où des colonies de bactéries sulfato-

réductrices (BSR) trouvent des conditions physico-chimiques favorables à leur prolifération. Ces conditions comprennent l'absence totale d'oxygène dissous (bactéries anaérobies), la présence de sources de carbone (hydrocarbures et autres composés organiques) et la présence d'ions sulfates qu'elles réduisent en sulfure, généralement sous forme de H<sub>2</sub>S (qui provoque ensuite la corrosion en présence d'eau en raison de son caractère acide). Les caractéristiques clés de la corrosion bactérienne sont des taux de corrosion plus élevés que les mécanismes de corrosion "normaux" et des niveaux élevés de réparation.

### II.4.3 Le taux de corrosion

Le taux de corrosion fait référence à la mesure de la vitesse à laquelle un matériau se corrode. Il représente la quantité de perte de matière du matériau due à la corrosion par unité de temps. Le taux de corrosion peut être exprimé en différentes unités, telles que millimètres par an (mm/an) ou milligrammes par centimètre carré par heure (mg/cm<sup>2</sup>/h). Il peut être influencé par divers facteurs, tels que la composition chimique du matériau, les conditions environnementales, la présence de contaminants, la température, la concentration des produits chimiques corrosifs, les propriétés électrochimiques, etc.

Il est important de surveiller le taux de corrosion dans les installations industrielles et les structures pour évaluer l'efficacité des mesures de protection contre la corrosion mises en place, ainsi que pour planifier l'entretien et le remplacement des équipements lorsque le taux de corrosion devient préoccupant. Le taux de corrosion est établi sur la base de l'historique des épaisseurs mesurées lors des différentes inspections.

### II.5 Les affaissements et problèmes associés

Le tassement de la fondation du réservoir peut entraîner l'un des effets ou une combinaison de plusieurs effets décrits ci-dessous :

- Tassement différentiel et/ou marginal dû à l'érosion de la litière.
- L'affaissement général provoque une instabilité du réservoir.
- Dommages à tout revêtement sous le réservoir.
- Toit flottant ou écran obstrué.
- Créer des contraintes au niveau des réservoirs et/ou de la tuyauterie adjacente.

Le réservoir s'adapte généralement aux mouvements du sol sur lequel il repose. Ces mouvements peuvent être uniformes ou non uniformes, et il est important de les vérifier. Les mouvements uniformes du sol ne sont généralement pas dangereux car ils se produisent progressivement et de manière équilibrée. Cependant, il est possible que des creux se forment autour de la base du réservoir, entraînant l'accumulation d'eau et pouvant provoquer une corrosion de la bordure annulaire ainsi que des plaques de fond.

Les mouvements non uniformes sous la base du réservoir présentent un risque plus élevé pour la zone périphérique du fond. Ces conditions sont défavorables à la jonction entre la base du réservoir et la structure. Il est important de surveiller les problèmes de mouvements locaux non uniformes sous la base du réservoir. Si nécessaire, le réservoir peut être relevé localement aux points bas pour corriger ce défaut, ou dans les cas les plus graves, il peut être soulevé entièrement afin de remettre les fondations à niveau.

Des mouvements importants peuvent causer une déformation de la structure du réservoir, entraînant des contraintes supplémentaires, en particulier aux connexions des tuyauteries, à la liaison entre la base et le toit fixe, ainsi que des interférences avec les toits flottants.

### **II.6 Défaillance de structure du réservoir et de ses accessoires**

Les principales défaillances sont :

- Flambage de réservoirs de stockage à écrans internes en raison de support inadéquat, vide, ou blocage au niveau du joint.
- Flambage du toit flottant en raison d'un supportage inadéquat par les béquilles et/ou blocage au niveau du joint de toit
- Perte de flottabilité de l'écran interne ou du toit flottant du fait de la présence de produit sur l'écran ou le toit ou dans les pontons des toits flottants
- Blocage du drain articulé
- Déraillement d'échelle sur les réservoirs à toit flottant
- Blocage d'écran interne ou de toit flottant
- Défaut de verticalité des poteaux de support de la charpente
- La combinaison de deux ou plusieurs de ces causes augmente le risque de flambement de la robe. Ce mode de défaillance se rencontre essentiellement dans les viroles minces supérieures de la robe du réservoir.

L'ajout d'un raidisseur supplémentaire peut résoudre le problème de flambement. Cette forme de flambement existe généralement pour les réservoirs à toits flottants de gros diamètre et pour les réservoirs présentant des problèmes de rotondité.

### **II.7 Dégradation des assises**

Les principales causes de détérioration des fondations sont les suivantes :

- Tassement des fondations : Les fondations peuvent subir des tassements, ce qui peut entraîner des problèmes de stabilité et de nivellement du réservoir.

- Érosion : L'érosion peut affecter les fondations du réservoir, notamment en cas de mouvement des sols ou de l'action de l'eau en mouvement.
- Dégradation du béton : Le béton des fondations peut se détériorer en raison de divers facteurs tels que la calcination, l'attaque par l'eau souterraine, l'attaque par le gel, l'attaque chimique et la croissance non contrôlée de la végétation. Les fissures causées par cette dégradation peuvent créer des voies d'entrée pour l'eau et contribuer à des phénomènes de corrosion au niveau des parois annulaires et du fond du réservoir.
- De plus, selon que la dégradation des fondations est uniforme ou non uniforme, elle peut entraîner des phénomènes similaires à ceux évoqués précédemment, tels que :
  - Inclinaison du réservoir.
  - Tassements différentiels.
  - Déformation du fond en raison des contraintes générées. [6]

### **II.8 Combinaison de mécanismes de dégradation et autres influence**

La fuite des fonds de réservoir est principalement causée par la corrosion, à la fois interne et externe, associée à un tassement excessif. Il est essentiel de prendre en compte l'interface entre la structure du réservoir et la fondation, ainsi que la conception et la construction de la fondation, car ces éléments jouent un rôle crucial. Lorsque des contraintes cycliques sont combinées à des tassements irréguliers ou excessifs, cela peut entraîner des fuites dans les réservoirs. Cette combinaison de contraintes et de tassements peut affaiblir les parois du réservoir, provoquer des fissures et des déformations, et finalement causer des fuites.

### **II.9 Techniques de préservation contre les défaillances**

Il existe plusieurs méthodes et techniques pour lutter contre les défaillances et la dégradation des bacs de stockage. Voici quelques-unes des principales :

✓ Inspection régulière : Effectuer des inspections régulières permet de détecter rapidement les signes de dégradation ou de défaillance potentielle. Cela peut inclure des inspections visuelles, des tests non destructifs comme la radiographie, l'ultrason...et des analyses de laboratoire.

✓ Maintenance préventive : Mettre en place un programme de maintenance préventive pour prévenir les problèmes avant qu'ils ne deviennent graves. Cela peut inclure des activités telles que le nettoyage, le revêtement de protection, le remplacement des pièces usées, la réparation des fissures et la surveillance des paramètres de fonctionnement.

✓ Protection cathodique : La protection cathodique est une méthode utilisée pour prévenir la corrosion des bacs de stockage métalliques. Elle consiste à appliquer un courant électrique ou à utiliser des anodes sacrificielles pour protéger le réservoir contre la corrosion.

✓ Revêtements de protection : L'application de revêtements de protection sur les surfaces internes et externes du réservoir peut aider à prévenir la corrosion et la dégradation. Ces revêtements peuvent être à base de peinture, de résine époxy, de polymères ou d'autres matériaux résistants à la corrosion.

✓ Surveillance de taux de corrosion : Utiliser des techniques de surveillance de la corrosion, telles que la mesure de l'épaisseur des parois, les capteurs de corrosion ou les techniques d'imagerie, pour évaluer l'état de corrosion et prendre des mesures appropriées en cas de dégradation, et ajouter des produits inhibiteurs de corrosion dans le produit stocké ou à la surface du bac, ils agissent en bloquant les réactions.

✓ Contrôle du milieu : contrôler des paramètres comme le PH, la température, l'oxygène dissous, les microorganismes...etc. Un milieu moins agressif ralentit la corrosion.

✓ Protection mécanique : Protéger mécaniquement le bac par un revêtement en béton ou des anodes sacrificielles enfouies dans le sol autour du bac.

✓ Formation et sensibilisation : Former le personnel sur les bonnes pratiques de maintenance, les procédures d'inspection et les techniques de lutte contre la corrosion. Sensibiliser les employés à l'importance de la maintenance régulière et de la détection précoce des problèmes.

✓ Gestion des eaux : Mettre en place des systèmes de drainage appropriés pour évacuer l'eau des bacs de stockage et éviter l'accumulation d'humidité, qui peut contribuer à la corrosion et à d'autres problèmes de dégradation.

Il est important de noter que les mesures et techniques spécifiques à mettre en œuvre peuvent varier en fonction du type de bac de stockage, du matériau de construction et de l'environnement dans lequel il est utilisé.

### **II.10 Conclusion**

En conclusion, il est essentiel de comprendre que les bacs de stockage sont soumis à divers facteurs de dégradation et de défaillance, allant des contraintes mécaniques aux processus chimiques et environnementaux. On a examiné les différents mécanismes de dégradation qui peuvent affecter les bacs de stockage, et qui peuvent entraîner des conséquences graves, allant des



fuites potentielles aux ruptures structurelles, mettant ainsi en péril la sécurité des installations et de l'environnement

Il est primordial de prendre en compte les mécanismes de dégradations et de défaillances des bacs de stockage afin de garantir leur intégrité structurelle et leur fonctionnement sécuritaire. La compréhension de ces mécanismes permet d'adopter des mesures préventives appropriées et de mettre en place des stratégies de maintenance adaptées.

En continuant à approfondir notre connaissance dans ce domaine, nous pourrions améliorer la durabilité et la fiabilité des bacs de stockage, assurant ainsi une gestion plus efficace des produits stockés et préservant la sécurité des personnes et de l'environnement.

### ***CHAPITRE III : Calcul de la résistance du bac de stockage***

---

## III Calcul de la résistance du bac de stockage

### III.1 Introduction

Le stockage du gaz naturel liquéfié (GNL) est devenu une composante essentielle de l'industrie énergétique mondiale. Le GNL offre une solution pratique et économique pour le transport et le stockage du gaz naturel, permettant ainsi son utilisation dans des régions éloignées ou dépourvues d'infrastructures de gazoducs. Cependant, en raison des propriétés spécifiques du GNL, la conception et la résistance structurelle des bacs de stockage de GNL nécessitent une attention particulière.

La particularité du GNL réside dans le fait qu'il est stocké à des températures cryogéniques extrêmement basses, proches de  $-163^{\circ}\text{C}$ . Cette transformation du gaz naturel en liquide réduit son volume et facilite son transport et son stockage. Cependant, ces températures extrêmes présentent des défis significatifs en matière de résistance structurelle et de sécurité. Par conséquent, il est crucial de comprendre en détail les principes de calcul de résistance spécifiques aux bacs de stockage de GNL.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les aspects clés du calcul de résistance appliqués aux bacs de stockage de GNL. Nous aborderons les forces et les contraintes auxquelles ces structures sont soumises, ainsi que les précautions spéciales à prendre en compte pour garantir la sécurité et la fiabilité des installations.

L'une des forces principales auxquelles les bacs de stockage de GNL sont confrontés est le poids du liquide lui-même. Le GNL est densément liquéfié, ce qui signifie qu'une grande quantité de gaz naturel peut être stockée dans un espace réduit. Cette masse considérable exerce une pression sur les parois du réservoir, nécessitant des calculs précis pour déterminer la résistance et l'épaisseur requise du matériau de construction.

De plus, les bacs de stockage de GNL sont soumis à des variations thermiques importantes. Les températures cryogéniques extrêmes provoquent une contraction du matériau, ce qui peut entraîner des contraintes et des déformations potentiellement dangereuses. Les coefficients de dilatation thermique et les effets d'isolation seront donc pris en compte pour assurer une conception structurelle appropriée.

La sécurité est une préoccupation majeure lorsqu'il s'agit de stocker du GNL. Les bacs de stockage doivent être conçus pour résister à des événements tels que les fuites, les incendies ou les explosions potentielles. Les charges externes, les forces sismiques et les contraintes de pression doivent être évaluées pour garantir la résistance structurelle face à ces situations d'urgence.

### III.2 Critères d'étude des réservoirs de stockage de GNL

**Tableau III 1 :** Données de calcul pour le bac de stockage

| Description                         | Réservoir intérieur  | Réservoir extérieur  |
|-------------------------------------|--|--|
| Contenu                             | GNL  | Vapeur gaz naturel   |
| Capacité                            | 100 000 m <sup>3</sup>   | -  |
| Type de réservoir                   | A toit suspendu  | A toit bombe   |
| Pression d'étude                    | 0.0703 kg/cm <sup>2</sup> ( 1.0 psi )  | + 0.0703 kg/cm <sup>2</sup><br>-0.0050 kg /cm <sup>2</sup> |
| Pression de service                 | 0.0211 Kg/cm <sup>2</sup> ( 0.3 psi )  | 0.0211 kg/cm <sup>2</sup>                                  |
| Température d'étude                 | -163 °C (-262 F )  | Ambiante   |
| Température de service              | -163 °C (-262 F )  | Ambiante   |
| Densité du liquide stocke à -163 °C | 469 Kg/m <sup>3</sup>  |  |
| Taux de vaporisation garanti        | 0.07 % par jour (600 000BTU/H)=( 151 210 Kcal/heure )  |  |
| Matériaux                           | Réservoir intérieur  | Réservoir extérieur  |
| Robe                                | ASTM A553 Gr. A (Acier à 9 % nickel )  | ASTM A283 Gr.A   |
| Raidisseurs                         | ASTM A353-71   | ASTM A36   |
| Fond                                | ASTM A553 Gr.A   | ASTM A283 Gr.C   |
| Toit                                | ASTM B209-66 ALLIAGE 5083 )  | ASTM A283 Gr.C   |
| Codes et specifications             | API 620 annexe Q<br>Code API 620<br>Spécification CHEMICO – condition d'ingénierie du projet |  |

### III.3 La géométrie du réservoir

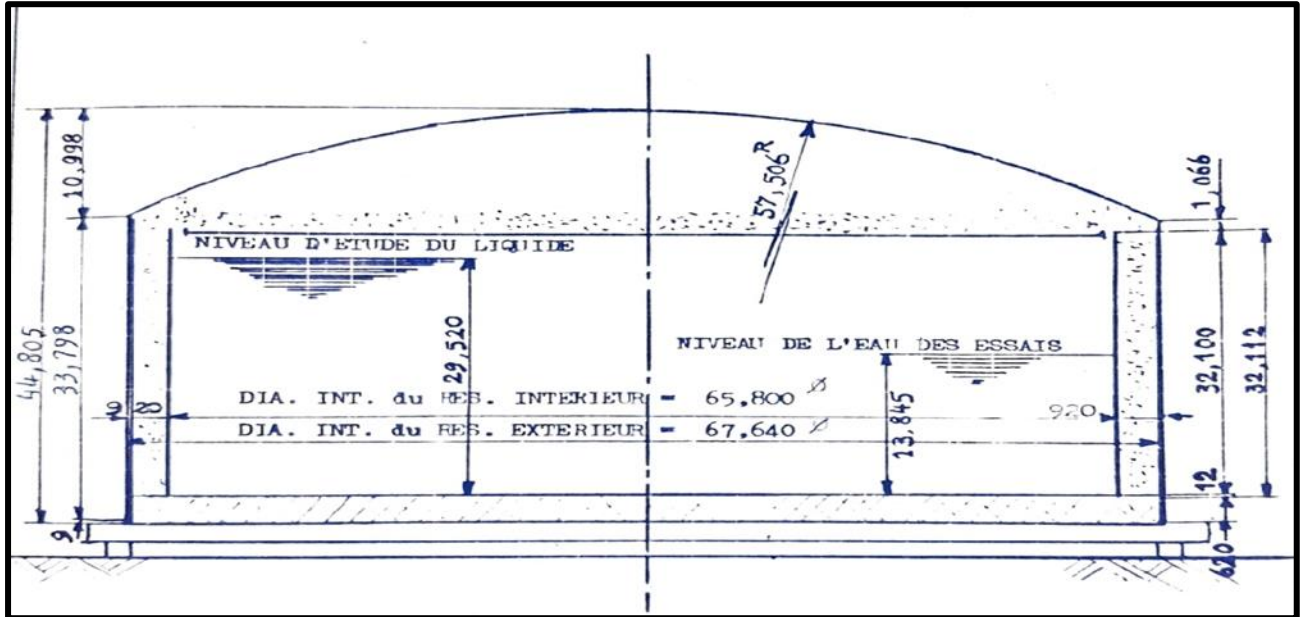


Figure III 1 : Géométrie de réservoir de stockage du GNL

### III.4 Calcul du réservoir intérieur

#### III.4.1 Données du calcul

Capacité : 100 000 m<sup>3</sup>

Contenu : gaz naturel liquéfié

Densité d'étude = 469 Kg/m<sup>3</sup>

Pression d'étude = 0.0703 kg/cm<sup>2</sup>

Température d'étude = -163° C

Matériaux : ASTM A553-71 Gr. acier à 9% de nickel.

ASTM A353-71 acier à 9% nickel à double normalisation et trempage.

ASTM B209-66 ALLIAGE D'ALUMINUM 5083.

Surépaisseur de corrosion : 0 mm pour robe, toit et fond.

La contrainte admissible

D'après l'annexe Q de l'API 620

Pour l'acier à 9 % de nickel, la résistance minimale à la traction de 95 000 psi ( $R_m$ ) et une limite élastique minimal de 52 500 psi ( $\sigma_e$ )

D'après le code SNCT C162 1 a) et C171 la contrainte admissible sera la moins forte de  $\sigma_e/x_1$  ou  $R_m/x_2$ .

Ici nous avons :

$$X_1 = 1,6$$

$$X_2 = 3,0 \quad \text{d'après tableau C162 1 a)}$$

$$52\,500 / 1,6 = 32\,812 \text{ psi}$$

$$95\,000 / 3,0 = 31\,666 \text{ psi}$$

La contrainte d'étude admissible est égale à 31 666 psi

$$\sigma_{adm} = 218.33 \text{ MPa}$$

Pour l'alliage d'aluminium : en se basant sur la résistance avec une résistance minimale à la traction de 40000 psi et une limite élastique minimal de 18 000 psi

D'après code API 620 annexe Q

La contrainte d'étude admissible est égale à 12 000 psi

$$\sigma_{adm} = 82.74 \text{ MPa}$$

### **III.4.2 Dimension du réservoir intérieur rempli de GNL**

Le remplissage est jusqu'au niveau maximum d'étude de liquide.

Le coefficient de dilatation pour l'acier à 9 % nickel

$$25 \text{ °C a } 0 \text{ °C} = 11 \times 10^{-6}$$

$$0 \text{ °C a } -150 \text{ °C} = 9.5 \times 10^{-6}$$

$$-150 \text{ °C a } -163 \text{ °C} = 7.2 \times 10^{-6}$$

La déformation unitaire selon la température est donnée par,

$$\varepsilon = \alpha (T - T_0)$$

$\varepsilon$  : est la déformation unitaire

$\alpha$  : est le coefficient de dilatation thermique.

Et 
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\begin{aligned} \text{Diamètre à froid} &= 65\,800 - 65\,800 \times (11 \times 25 + 9.5 \times 150 + 7.2 \times 13) \\ &= 65\,680 \text{ mm de } \varnothing. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Hauteur de robe à froid} &= 32\,100 - 32\,100 \times (11 \times 25 + 9.5 \times 150 + 7.2 \times 13) \\ &= 32\,100 \text{ mm} \end{aligned}$$

### III.4.3 Calcul du volume

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H$$

Dans laquelle :

$$D = \text{diamètre à froid} = 65\,680 \text{ mm}$$

$$H = \text{niveau maximum d'étude du liquide}$$

$$V = \text{capacité nécessaire} = 100\,000 \text{ m}^3$$

$$H = \frac{V}{\frac{\pi}{4} \times D^2} = \frac{100\,000}{\frac{\pi}{4} \times 65.68^2}$$

$$H = 29.515 \text{ m}$$

Le niveau maximum d'étude du liquide est 29,520 m

### III.4.4 Niveau d'eau des essais hydrauliques

Suivant la spécification CHEMICO « La charge réelle d'eau pendant les essais doit être égale à celle d'un réservoir de gaz naturel liquéfié remplie et en plus une pression de 1.50 fois la pression d'étude de la robe extérieure doit être surimposée à la charge statique du liquide pour les essais » Par conséquent :

$$\text{Le niveau d'eau des essais hydraulique est : } 29.520 \times 0.469 = 13.845 \text{ m}$$

$$\text{La pression d'essai pneumatique est : } 0.0703 \times 1.50 = 0.1054 \text{ kg/cm}^2$$

**III.4.5 Calcul des épaisseurs de la robe intérieure**

$$t = (P \cdot D) / (2 \sigma_{adm} \cdot E) + C$$

Dans laquelle :

D = diamètre du réservoir à froid = 65 680 mm

$\sigma_{adm}$  = contrainte d'étude admissible

E = coefficient de joint = 9/10

G = densité d'étude du GNL

C = surépaisseur de corrosion = 0 mm

H = hauteur du bas de la virole considérée jusqu'au niveau maximum d'étude du liquide

P = charge statique de liquide plus pression des vapeurs = (H x G) + pression vapeurs

**Tableau III 2 : Epaisseurs des viroles de la robe intérieure**

| N °   | Hauteur du liquide (cm) | charge statique du liquide (kg/cm <sup>2</sup> ) | épaisseur calculée (mm) | épaisseur recommandée (mm) |
|-------|-------------------------|--|-------------------------|----------------------------|
| 12ème |                         |  | 0                       | 8,5                        |
| 11ème | 246,9                   | 115,7961   | 1,898145                | 8,5                        |
| 10ème | 496,4                   | 232,8116   | 3,816279                | 8,5                        |
| 9ème  | 746                     | 349,874  | 5,735181                | 8,5                        |
| 8ème  | 995,5                   | 466,8895   | 7,653315                | 8,5                        |
| 7ème  | 1275                    | 597,975  | 9,802086                | 9,9                        |
| 6ème  | 1554,5                  | 729,0605   | 11,95086                | 12,1                       |
| 5ème  | 1834                    | 860,146  | 14,09963                | 14,2                       |
| 4ème  | 2113,5                  | 991,2315   | 16,2484                 | 16,4                       |
| 3ème  | 2393                    | 1122,317   | 18,39717                | 18,5                       |
| 2ème  | 2672,6                  | 1253,449   | 20,54671                | 20,7                       |
| 1 ère | 2952                    | 1384,488   | 22,69471                | 22,8                       |
|       |                         |  | épaisseur moyenne       | 13,30623mm                 |



Notes

1 / “ dans le cas d’un réservoir de type « A plafond suspendu » la pression de vapeur du GNL atteindra l’état d’équilibre entre le réservoir intérieure et l’espace annulaire en conséquence la pression de vapeur n’entrera pas en considération pour les calculs portant sur l’épaisseur de la paroi intérieure “

2 / “ les joints verticaux seront entièrement soumis à un examen radiographique : les joints horizontaux seront soumis à un examen radiographique portant sur 20 % de la longueur totale tandis que tous les joints en T seront examinés radio graphiquement “

**III.4.6 Contrainte maximale des tôles de la robe intérieure pendant les essais hydrauliques**

La hauteur d’eau pour les essais hydrauliques est égale à 13,845 m

La contrainte admissible pendant les essais à l’eau suivant l’appendice Q du code API 620 est égale à 42 000 Psi = 289,6MPa

**Tableau III 3** : Contraintes calculées pendant l’essai hydraulique

| Virole de robe<br>N ° | Niveau<br>d’eau (m) | Pression<br>hydraulique<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Epaisseur tôle<br>de robe (mm) | Contrainte<br>circulaire<br>maximale<br>(MPa) | Contrainte<br>admissible<br>(MPa) |
|-----------------------|---------------------|--|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| 12eme                 | 0,0                 | 0,0  | 8,5                            | 0,0   | 289,6                             |
| 11eme                 | 0,0                 | 0,0  | 8,5                            | 0,0   | 289,6                             |
| 10eme                 | 0,0                 | 0,0  | 8,5                            | 0,0   | 289,6                             |
| 9eme                  | 0,0                 | 0,0  | 8,5                            | 0,0   | 289,6                             |
| 8eme                  | 0,0                 | 0,0  | 8,5                            | 0,0   | 289,6                             |
| 7eme                  | 0,0                 | 0,0  | 9,9                            | 0,0   | 289,6                             |
| 6eme                  | 0,0                 | 0,0  | 12,1                           | 0,0   | 289,6                             |
| 5eme                  | 2,645               | 0,2645   | 14,2                           | 60,10   | 289,6                             |
| 4eme                  | 5,445               | 0,5445   | 16,4                           | 107,13  | 289,6                             |
| 3eme                  | 8,245               | 0,8245   | 18,5                           | 143,80  | 289,6                             |
| 2eme                  | 11,045              | 1,1045   | 20,7                           | 172,15  | 289,6                             |
| 1eme                  | 13,845              | 1,3845   | 22,8                           | 195,92  | 289,6                             |

Les contraintes circulaires au niveau de toutes les viroles sont inférieure à la contrainte admissible pendant les essais à l’eau, d’où la structure du bac testé est capable de supporter des charges plus élevées que celles auxquelles il est soumis lors de cet essai hydraulique. Cela indique une marge de sécurité supplémentaire.

### III.4.7 Raidisseurs de la robe intérieure

#### III.4.7.1 Système raidisseurs de la robe intérieure

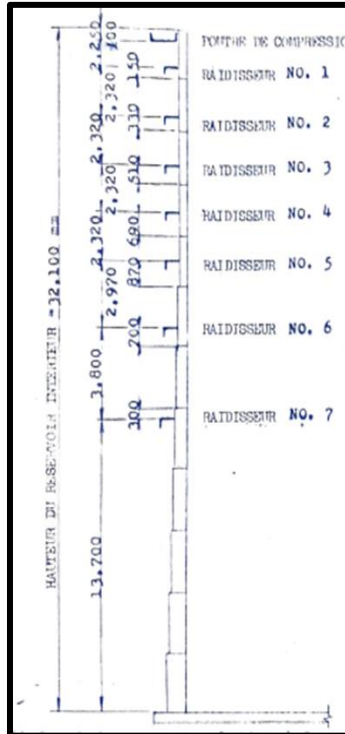


Figure III 2: Raidisseurs de la robe intérieure

#### III.4.7.2 Poutre de compression du réservoir intérieur

D'après l'affaissement par instabilité d'une robe cylindrique mince sous pression extérieure et la théorie de la stabilité élastique de TIMOSHENKO et GERE. [7]

$$I_{NEC} = \frac{P_{cr} * R^3 * L}{E * (N^2 - 1)} \quad \text{avec: } N^2 = \frac{2,657 * D * \sqrt{D}}{FS * H * \sqrt{t}}$$

Formule dans laquelle :

N = nombre de nœuds de rupture

D = diamètre du réservoir (cm) = 6580 cm

H = hauteur de robe du réservoir (cm) = 3210 cm

t = épaisseur moyenne de robe (cm) 1,330623

FS = coefficient de sécurité

$I_{nec}$  = moment d'inertie nécessaire (cm<sup>4</sup>)

$$P_{cr} = \text{pression critique (kg/cm}^2) = 3 * P \text{ (pression latérale)} = 3 * 0,0171 \text{ (kg/cm}^2)$$

$$R = \text{rayon du réservoir} = 3290 \text{ cm}$$

$$E = \text{module d'élasticité} = 2,1 * 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$L = \text{espacement des raidisseurs} = H/2$$

$$N^2 = \frac{2,657 * 6580 * \sqrt{6580}}{4 * 3210 * \sqrt{1,330623}} = 96,640 \quad N = 9,82$$

- Moment d'inertie calculé pour une poutre de sommet

$$I_{NEC} = \frac{0,0513 * 3290^3 * 1605}{2,1 * 106 * (9^2 - 1)} = 17,454 \text{ cm}^4$$

- Surface de section droite nécessaire pour poutre de compression :

$$A_{nec} = \frac{P * R * L}{F_c}$$

$$\text{Avec : } F_c = 15000 \text{ psi} = 1055 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_{nec} = \frac{0,0171 * 3290 * 1605}{1055} = 85,6 \text{ cm}^2$$

### III.4.7.3 Emplacement des Raidisseurs de la robe intérieure

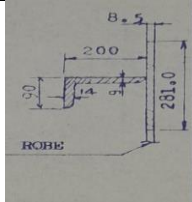
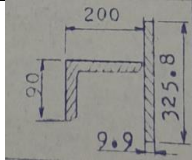
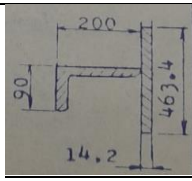
$$\text{Espacement } L, \quad L = \frac{2,6 * E * \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{5}{2}} * D}{P_{cr}} + 0,45 \sqrt{D * t}$$

**Tableau III 4 :** Emplacement des raidisseurs de la robe intérieure

| Raidisseur N° | t ( cm ) | Espacement calculé L (cm) | Espacement retenu (cm) |
|---------------|----------|---------------------------|------------------------|
| 1             | 8,5      | 232,9                     | 225,0                  |
| 2             | 8,5      | 232,9                     | 232,0                  |
| 3             | 8,5      | 232,9                     | 232,0                  |
| 4             | 8,5      | 232,9                     | 232,0                  |
| 5             | 8,5      | 232,9                     | 232,0                  |
| 6             | 9,49     | 298,0                     | 297,0                  |
| 7             | 11,86    | 498,0                     | 380,0                  |

- Moment d'inertie calculé pour les raidisseurs de robe

**Tableau III 5** : Moment d’inertie pour les raidisseurs de la robe

| Raidisseur N°         | Espacement (cm)                           | L | Moment nec d’inertie (cm <sup>4</sup> ) | Dimension croquis du raidisseur   | Moment d’inertie disponible (cm <sup>4</sup> ) |
|-----------------------|---|---|---|---|--|
| 1<br>2<br>3<br>4<br>5 | 225,0<br>232,0<br>232,0<br>232,0<br>232,0 |   | 2 338<br>2 523<br>2523<br>2523<br>2523  |   | 3 823<br>3823<br>3823<br>3823<br>3823          |
| 6                     | 297,0                                     |   | 3 230                                   |   | 4298   |
| 7                     | 380,0                                     |   | 4 133                                   |  | 4920   |

**III.4.8 Vérification du flambage de la robe intérieure du a la contrainte de flexion et la charge sismique vertical**

Contrainte de flexion :

$$\sigma_f = \frac{M_f}{\pi * R^2 * t}$$

Formule dans laquelle : M<sub>f</sub>= moment de flexion

R = rayon de réservoir

t = épaisseur de robe la plus faible

$$\sigma_f = \frac{105,1 * 10^8}{\pi * 3284^2 * 2,28}$$

$$\sigma_f = 136 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_f = 13,34 \text{ MPa}$$

- Contrainte du a la charge sismique verticale :

$$\sigma_{sis} = \frac{A_v * W_s}{S}$$

Formule dans laquelle :  $A_v$  = Accélération vertical = 0,18

$W_s$  = poids de la robe intérieure

$S$  = section droite de la virole de la robe la plus basse

$$\sigma_{sis} = \frac{0,18 * 0,955 * 10^6}{47,062}$$

$$\sigma_{sis} = 0,36 \text{ MPa}$$

- contrainte de compression combinée :

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{sis}^2 + \sigma_f^2}$$

$$\sigma_c = 13,342 \text{ MPa}$$

- Calcul de facteur de sécurité de flambage :

$\sigma$  = contrainte de flambage classique

$$\sigma = 0.6 * E * t / R$$

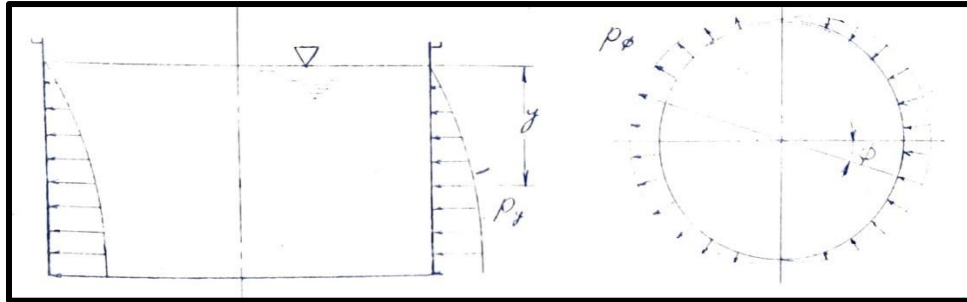
$$\sigma = 85,8 \text{ MPa}$$

$$F.S = 85,8 / 13,342$$

$$F.S = 6,43 \rightarrow \text{la sécurité est assurée}$$

### III.4.9 Résistance de l'enveloppe intérieure en cas de tremblement de terre

#### III.4.9.1 Le contrôle du plateau d'enveloppe



**Figure III 3** : Distribution de la charge cinétique

La distribution de la pression cinétique est donnée par la formule d'HAUSNER [8]

$$P(y,\varnothing) = \sqrt{3} * K * H \left[ \frac{y}{H} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{H} \right)^2 \right] \tan \left( \sqrt{3} * \frac{R}{H} \right) \cos \varnothing$$

Où : K= facteur sismique 0,24

W= densité de liquide 0,000469

H =hauteur de liquide 2 952 cm

Y= profondeur du niveau sous considération

R = rayon du réservoir 3 284 cm

$$P(y,\varnothing) = \sqrt{3} * 0,24 * 0,000469 * 2\,952 \left[ \frac{y}{2\,952} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{2\,952} \right)^2 \right] \tan \left( \sqrt{3} * \frac{3\,284}{2\,952} \right) \cos \varnothing$$

$$P(y,\varnothing) = 0,0001869 y \left( 1 - \frac{y}{5\,904} \right) \cos \varnothing$$

Pression cinétique calculée avec  $\varnothing = 0$

**Tableau III 6** : Pression cinétique calculée avec  $\varnothing = 0$

| N ° | Profondeur ( y ) cm | Pression (y,0) kg/cm <sup>2</sup> |
|-----|---------------------|-----------------------------------|
| 1   | 2 952               | 0,27586                           |
| 2   | 2 672               | 0,27339                           |
| 3   | 2 393               | 0,26597                           |
| 4   | 2 113               | 0,25361                           |
| 5   | 1 834               | 0,23630                           |
| 6   | 1 554               | 0,21404                           |
| 7   | 1275                | 0,18684                           |
| 8   | 995                 | 0,15469                           |
| 9   | 746                 | 0,12181                           |
| 10  | 496                 | 0,08497                           |
| 11  | 247                 | 0,04421                           |

Cette pression crée une contrainte circulaire dans l’enveloppe du réservoir, mais elle ne crée pas de tension de traction dans les contreforts.

Donc seules les contraintes circulaires sont calculées. Elles devraient être combinées avec les tensions circulaires dues au niveau du liquide statique.

La contrainte admissible :  $\sigma_e = 52\,500 \text{ psi} * 0,8 = 42\,000 \text{ psi} (289,6)$

Les contraintes seront calculées avec l’équation :  $\sigma = P * R/t$

**Tableau III 7 : Contraintes au niveau du plateau d’enveloppe**

| Phase N ° | Charge statique du liquide (kg/cm <sup>2</sup> ) | Contrainte due aux tremblements de terre (kg/cm <sup>2</sup> ) | Contrainte due au niveau statique (kg/cm <sup>2</sup> ) | Contrainte combinée (kg/cm <sup>2</sup> ) | Contrainte combinée (MPa ) | Contrainte admissible $\sigma_e$ (MPa) |
|-----------|--|--|---|---|----------------------------|--|
| 1         | 1,3845   | 398  | 1,994   | 2392                                      | 234,6                      | 289,6                                  |
| 2         | 1,2535   | 434  | 1,989   | 2423                                      | 237,6                      | 289,6                                  |
| 3         | 1,1224   | 472  | 1,993   | 2465                                      | 241,7                      | 289,6                                  |
| 4         | 0,9913   | 508  | 1,985   | 2493                                      | 244,5                      | 289,6                                  |
| 5         | 0,8602   | 547  | 1,990   | 2537                                      | 248,8                      | 289,6                                  |
| 6         | 0,7291   | 581  | 1,979   | 2560                                      | 251,1                      | 289,6                                  |
| 7         | 0,5980   | 620  | 1,984   | 2604                                      | 255,4                      | 289,6                                  |
| 8         | 0,4669   | 598  | 1,804   | 2 402                                     | 235,5                      | 289,6                                  |
| 9         | 0,3499   | 471  | 1,352   | 1 823                                     | 178,7                      | 289,6                                  |
| 10        | 0,2328   | 329  | 900   | 1 229                                     | 120,5                      | 289,6                                  |
| 11        | 0,1158   | 172  | 448   | 620                                       | 60,8                       | 289,6                                  |
| 12        | 0,0  | 0  | 0   | 0   | 0                          | 289,6                                  |

### III.4.9.2 Contrôle du contrefort d’enveloppe

Le moment et la butée dans l’anneau avec la charge distribuée peuvent être obtenus pour combinaison avec le cas 2 et le cas 25 dans {formulas for stress and strain} [8]

Moment et butée dans le cas 25 :  $X = 180^\circ$





Le moment et la butée à  $X = 180^\circ$  sera la combinaison de  $M_1$  et  $M_2$

$$M = R^2 \int_0^\pi (2 W_1 * C_{1\theta} + W_2 * C_{3\theta}) d\theta$$

$$T = R \int_0^\pi (2 W_1 * C_{2\theta} + W_2 * C_{4\theta}) d\theta$$

Les résultats de ces intégrations sont les suivantes

$$M = 0,0 \quad T = 1,0$$

Il n'est donc pas nécessaire que le moment de flexion dans les contreforts d'enveloppes soit considéré, et par conséquent la butée seulement sera examinée.

### III.5 Calcul de résistance du réservoir extérieure

#### III.5.1 Calcul des épaisseurs de la robe extérieure

La contrainte de compression admissible suivant le code API 620 [9]

$$S_a = 1800000 \left( \frac{t}{R} \right) \text{ Psi}$$

$$\text{Donc } S_a = 12410,6 \left( \frac{t}{R} \right) \text{ MPa}$$

La contrainte de compression au niveau considéré

$$S_c = \frac{W_n + 7,85 * D * H * t * \pi}{3,14 * D * t}$$

L'épaisseur au niveau considéré:

A partir de  $S_a = S_c$ .

$$t = 0,00155 * D * H + 0,01121 * \sqrt{\frac{(D * H)}{52,3 + W_n}}$$

Formule dans laquelle :  $D$  = diamètre de robe extérieur en mètre

$H$  = largeur de la tôle de robe de la virole  $N$  en mètres

$W_n$  = poids mort imposé au bord supérieur de la tôle considérée en kg

Poids mort au sommet des tôles de robe

Tôles du toit extérieur .....165 000 kg  
 Charpente du toit extérieur .....120 000 kg  
 Cornière raidisseuse .....78 000 kg  
 Isolation du toit .....155 000 kg  
 Toit intérieur suspendu .....68 000 kg  
 Charge vive .....529 000 kg  
 Poids divers .....10 000 kg  
 Poids mort total .....1125 000 kg

**Tableau III 8 : Epaisseurs des viroles de la robe extérieure**

| Virole de robe N° | $W_n$<br>(kg) | Epaisseur calculée (mm) | Epaisseur recommandée (mm) |
|-------------------|---------------|-------------------------|----------------------------|
| 12ème             | 1125000       | 12,1551                 | 12,2                       |
| 11ème             | 1175880       | 12,421                  | 12,5                       |
| 10ème             | 1228010       | 12,688                  | 12,7                       |
| 9ème              | 1280980       | 12,953                  | 13,0                       |
| 8ème              | 1335200       | 13,218                  | 13,3                       |
| 7ème              | 1390670       | 13,516                  | 13,6                       |
| 6ème              | 1454200       | 13,815                  | 13,9                       |
| 5ème              | 1519130       | 14,113                  | 14,2                       |
| 4ème              | 1585460       | 14,412                  | 14,5                       |
| 3ème              | 1633190       | 14,732                  | 14,8                       |
| 2ème              | 1727500       | 15,053                  | 15,1                       |
| 1 ère             | 1803320       | 15,372                  | 15,4                       |

**III.5.2 Résistance de la poutre annulaire**

Suivant le paragraphe 5-12-4 du code API 620

Poids du toit, du voile suspendu, [9]

La perlite et autres :

Chevrons.... 120 000 kg

Tôles de toit...165 000 kg

Toit suspendu...68 000 kg

Isolation.....155 000 kg

Poids total = 508 000 kg

- Pression équivalente du poids total :

$$P_c = W / S$$

$$P_c = \frac{508\,000}{3,14 * \frac{67642}{4}}$$

$$P_c = 0,0142 \text{ kg/cm}^2$$

-

- Pression intérieure d'étude

$$P_d = 0,0703 \text{ kg/cm}^2$$

- Section efficace de la poutre annulaire

$$W_H = 0,6 * \sqrt{5,750 * 3,05} = 79,45 \text{ cm}$$

$$W_C = 0,6 * \sqrt{3,382 * 2,65} = 56,8 \text{ cm}$$

$$P_d - P_c = 0,0703 - 0,0142 = 0,0561 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_d + P_c = 0,0703 + 0,0142 = 0,0845 \text{ kg/cm}^2$$

- Force de compression dans la poutre annulaire :

$$Q = T_2 W_h + T_2 W_c - T_1 R_c \sin(54^\circ)$$

$$\text{Ici : } T_2 = R_s (P_d + P_c) / 2 = 243,0 \text{ kg/cm}$$

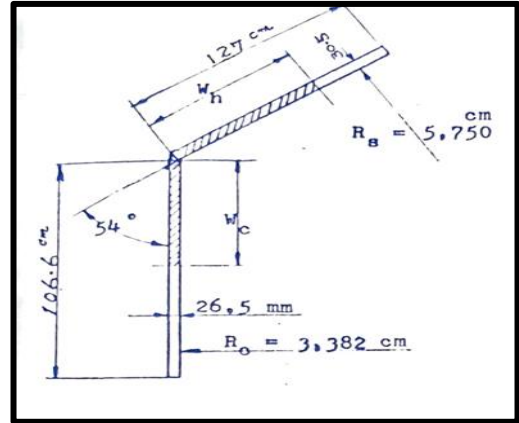


Figure III 4 : Dimensions de la poutre annulaire

$$T1 = R_S (P_d - P_c) / 2 = 161,3 \text{ kg/cm}$$

$$T'2 = P_d * R_C = 238,0 \text{ kg/cm}$$

$$Q = 243,0 * 79,45 + 238,0 * 56,8 = 161,3 * 3,382 * 0,8090$$

$$Q = -408,499 \text{ kg}$$

- Section droite nécessaire

$$A_{nec} = \frac{Q}{15\,000}$$

$$(S_a = 15\,000 \text{ Psi} = 1054 \text{ kg/cm}^2)$$

$$A_{nec} = 387,57 \text{ cm}^2$$

- Section droite prévue

$$A_p = 79,45 * 3,05 + 56,8 * 2,65$$

$$A_p = 392,84 \text{ cm}^2 > 387,57 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{La résistance de la plaque annulaire est bien vérifiée.}$$

### III.5.3 Epaisseur du plateau de toit extérieur

$$t = (P * R) / (2 * \sigma_{adm} * E)$$

Où : P = pression interne = 0,0703 kg/cm<sup>2</sup>

R = rayon du toit 5,750 cm

$\sigma_{adm}$  = 15 200 psi (104,8 MPa)

E = efficace jointe 0,35

$$t = \frac{0,0703 * 5,750}{2 * 1,069 * 0,35}$$

$$t = 5,4 \text{ mm} \rightarrow \text{Par conséquent, un plateau de toit de 5,5 mm était fourni}$$

### III.5.4 Résistance du boulon d'ancrage:

Caractéristiques des boulon d'ancrage :

Filetage .....  $1 \frac{1}{2}$  – 8 un

Nombre de boulons d’ancrage N=253

Diamètre minimal.....3,4147 cm

Surface de sectionnement ...a=9,15 cm<sup>2</sup>

Matériau.....ASTM A307 Gr. A

Tension admissible .....  $\sigma_e = 15\,000 \text{ psi } (1054 \text{ kg/cm}^2) * 1,25 = 1\,317 \text{ kg/cm}^2$

### III.5.4.1 Contrôle de résistance des boulons d’ancrage extérieur durant les essais pneumatiques

- Pression de vapeur totale

$$Pv = 1,50 P \cdot \pi \cdot D^2 / 4$$

P = pression conforme au dessin = 703kg/m<sup>2</sup>

Pv = 3 789 180 kg

D = diamètre du réservoir extérieur =67,64 m

- Force de soulèvement

$$Fu = Pv - W$$

Pv : la pression de vapeur totale

W : le poids de plateau de toit extérieure

F<sub>u</sub> = 3 789 180 – 1 242 000

F<sub>u</sub> = 2 547 180 kg

- Calcul de contrainte

$$\sigma = \frac{F_u}{N * a}$$

F<sub>u</sub> : force de soulèvement

N : nombre de boulon d’ancrage

a : surface sectionnelle

$$\sigma = \frac{2547180}{253 \cdot 9,1}$$

$$\sigma = 1\,106 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma = 108,5 \text{ MPa}$$

Tension admissible .....  $\sigma_e = 15\,000 \text{ psi } (1054 \text{ kg/cm}^2) \cdot 1,25 = 129 \text{ MPa}$

$$\sigma < \sigma_e \rightarrow \text{La sécurité est assurée}$$

### III.5.4.2 Contrôle de résistance des boulons d'ancrage extérieur a la charge de vent

- Module de section du réservoir extérieur juste au-dessus du fond

$$Z = \pi \cdot R^2 \cdot t$$

$$Z = 55,337 \text{ m}^3$$

- Zone de coup transversale de l'enveloppe du réservoir extérieur juste au-dessus du fond

$$A = 0,7854 (D_o^2 - D_i^2)$$

$$A = 32,732 \text{ cm}^2$$

- Force de traction :

$$f = M \cdot t / z$$

M : moment de chavirage due à la charge de vent

z : Module de section du réservoir extérieur juste au-dessus du fond

$$f = 5\,689\,500 \cdot 0,0154 / 55,337$$

$$f = 15,84 \text{ kg/cm}$$

- Force de soulèvement :

$$u = F_{up} \cdot t / A$$

$F_{up}$  : force de soulèvement net

A : coup transversale de l'enveloppe du réservoir extérieur juste au-dessus du fond

$$u = 1\,118\,000 * 1,54 / 32,732$$

$$\mathbf{u = 52,60\ kg/cm}$$

- Force de soulèvement net dans le boulon :

$$\mathbf{n = f + u}$$

f : Force de traction :

u : Force de soulèvement

$$\mathbf{n = 68,44\ kg/cm}$$

- Force de tension dans le boulon d'ancrage  $T_a$  :

$$\mathbf{T_a = n * D * \pi / N}$$

$$T_a = 68,44 * D * \pi / 253$$

$$\mathbf{T_a = 5748\ kg}$$

- Contrainte de traction :

$$\mathbf{\sigma = T_a / a}$$

$T_a$  : Force de tension dans le boulon d'ancrage

a: Surface sectionnement du boulon

$$\sigma = 5794\ kg / 9,15$$

$$\sigma = 628\ kg/cm^2$$

$$\sigma = 61,6 \text{ MPa}$$

$$\text{Tension admissible} \dots\dots\dots \sigma_e = 15\,000 \text{ psi} (1054 \text{ kg/cm}^2) * 1,25 = 129 \text{ MPa}$$

$$\sigma < \sigma_e \rightarrow \textit{La s\u00e9curit\u00e9 est assur\u00e9e}$$

### III.6 Conclusion

Les calculs effectu\u00e9s indiquent que le bac de stockage de GNL est conforme aux normes de r\u00e9sistance et qu'il offre une s\u00e9curit\u00e9 ad\u00e9quate pour le stockage de ce gaz. Il convient de souligner que la surveillance continue du bac de stockage, en utilisant des techniques de contr\u00f4le et de suivi appropri\u00e9es, est essentielle pour garantir sa performance \u00e0 long terme et pr\u00e9venir tout dysfonctionnement \u00e9ventuel.



## **CHAPITRE IV : *Simulation du test hydrostatique***

---

## **IV Simulation du test hydrostatique**

### **IV.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons étudier et simuler numériquement le test hydrostatique effectué sur le bac de stockage avec un logiciel de calcul par éléments finis ‘‘ANSYS’’, cette étude nous permettra d’ajuster différents paramètres du test tels que la pression, le niveau d’eau des essais. Cette simulation offre une visualisation détaillée des performances du bac de stockage, notamment la distribution des contraintes, les déformations.

### **IV.2 La méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est une technique numérique utilisée pour résoudre des problèmes complexes de manière approchée. Elle est largement utilisée dans le domaine de l’ingénierie et des sciences appliquées pour modéliser et analyser des structures et des systèmes. La méthode consiste à approximer la solution du problème en utilisant des fonctions d’interpolation pour décrire le comportement de la solution à l’intérieur de chaque élément. Ces fonctions d’interpolation sont généralement polynomiales et sont définies en fonction des positions des nœuds de chaque élément.

Elle permet de prendre en compte différentes conditions aux limites et propriétés matérielles, ce qui en fait une approche polyvalente pour résoudre une large gamme de problèmes d’ingénierie, tels que l’analyse des structures, la mécanique des fluides, la thermique, l’électromagnétisme, etc. Elle offre également la possibilité de modéliser des géométries complexes et de traiter des systèmes non linéaires. [10]

#### **IV.2.1 Principe de base**

La méthode des éléments finis est utilisée pour trouver une solution approximative d’un problème gouverné par un système d’équations aux dérivées partielles avec des conditions aux limites dans un domaine de volume. Les étapes de la méthode des éléments finis, dans le contexte de l’analyse statique de la mécanique des solides, sont les suivantes :

- ✓ **Discretisation du domaine** : Le domaine ou la structure à étudier est divisé en un ensemble d’éléments plus petits, tels que des triangles, des quadrilatères, des tétraèdres ou des hexaèdres. Cette étape est appelée maillage. Chaque élément est défini par un certain nombre de points appelés nœuds.
  
- ✓ **Approximation de la solution** : Une fonction d’interpolation est utilisée pour approximer le comportement de la solution à l’intérieur de chaque élément. Cette fonction est généralement polynomiale et est définie en fonction des positions des nœuds de chaque

élément. L'approximation globale de la solution est obtenue en assemblant les approximations locales des éléments.

✓ Formulation des équations : Les équations mathématiques qui décrivent le comportement du système sont formulées en termes des inconnues associées aux nœuds. Ces équations peuvent provenir de lois physiques, telles que les équations de la mécanique des solides ou des fluides, ou d'autres principes mathématiques.

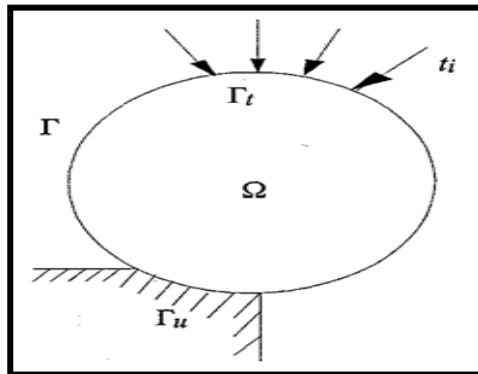
✓ Discrétisation des équations : Les équations formulées dans l'étape précédente sont discrétisées en utilisant les fonctions d'interpolation définies à la deuxième étape. Cela conduit à un système d'équations linéaires, qui peut être résolu numériquement.

✓ Résolution numérique : Le système d'équations linéaires est résolu pour obtenir les valeurs des inconnues aux nœuds. Différentes méthodes numériques, telles que la méthode de Gauss, la méthode de Jacobi..., peuvent être utilisées pour résoudre ce système.

✓ Post-traitement : Une fois que les valeurs des inconnues sont obtenues, des calculs supplémentaires peuvent être effectués pour analyser et visualiser les résultats. Cela peut inclure le calcul des contraintes, des déformations, des flux, des courbes de niveau, etc.  
[10]

### IV.2.2 Concept du modèle des éléments finis cinématiquement admissibles

Soit une structure de volume  $\Omega$ , de frontière  $\Gamma$ , soumise à des charges mécaniques  $t_i$  sur  $\Gamma_t$ ,



**Figure IV 1** : Modélisation d'un problème d'éléments finis

Choisissons un champ de déplacement cinématiquement admissible de la forme :

$$\{u\} = [N]\{q\}$$

où :  $[N]$  est la matrice des fonctions de forme

et  $\{q\}$  est le vecteur des déplacements nodaux

Par dérivation on trouve les déformations sous la forme :

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\}$$

où :  $[B]$  est la matrice de déformation

et  $\{\varepsilon\}$  est le vecteur des déformation.

L'énergie de déformation d'un tel milieu s'écrit :

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} (\{\varepsilon\}^T [H] \{\varepsilon\}) d\Omega \\ &= \frac{1}{2} \{q\}^T \left( \iiint_{\Omega} ([B]^T [H] [B]) d\Omega \right) \{q\} \end{aligned}$$

L'énergie potentielle des charges mécaniques appliquées  $\{t\}$  sur  $\Gamma_t$  est :

$$P = -\frac{1}{2} \{q\}^T \left( \iint_{\Gamma_t} [N]^T \{t\} d\Gamma \right)$$

L'énergie de déformation totale s'écrit :

$$\Pi(q) = U + P = \frac{1}{2} \{q\}^T [K] \{q\} - \{q\}^T \{g\}$$

Avec

$$[K] = \iiint_{\Omega} ([B]^T [H] [B]) d\Omega$$

$[k]$  : Matrice de raideur,

$$\{g\} = \iint_{\Gamma_t} [N]^T \{t\} d\Gamma$$

$\{g\}$  : Vecteur de charges mécaniques

La variation de l'énergie de déformation par rapport aux déplacements nodaux  $\{q\}$  restitue la condition d'équilibre aux nœuds :

$$[K]\{q\} = \{g\}$$

### IV.2.3 Disciplines d'application de la MEF

Dans le cas général, on donne les différentes disciplines d'application de la MEF en équilibre stationnaire ou statique dans le tableau ci-dessous, avec les degrés de liberté (DOF-Degrees of freedom en anglais) et vecteurs charges utilisés. Dans le cadre de ce mémoire on utilise le cas du solide/ mécanique des structures et la conduction thermique.

**Tableau IV 1** : Disciplines d'application de la MEF

| Disciplines                        | Degrés de liberté-DOF (q)                   | Vecteur charge (g)            |
|------------------------------------|---|-------------------------------|
| Solide/mécanique des structures    | Déplacements                                | Force                         |
| Conduction thermique               | température                                 | Flux de chaleur               |
| électrostatique                    | Potentiel électrique                        | Densité de charge             |
| CFD (Computational fluid Dynamics) | Potentiel déplacements ,pression , vitesse. | Vitesses des particules, flux |
|                                    |   |                               |
| Magnétostatique                    | Potentiel Magnétique                        | Intensité magnétique          |

### IV.2.4 Les étapes de calcul d'un logiciel par éléments finis

Tout logiciel de calcul par éléments finis suit les trois étapes de calcul suivantes : [11]

- Pré – processeur (Prétraitement)
  - Choisir le type des éléments
  - Entrer les propriétés géométriques
  - Entrer les propriétés mécaniques
  - Créer le modèle géométrique
  - Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
  - Appliquer les sollicitations
  - Imposer les conditions aux limite
- Solveur - Résolution
  - Choisir le type d'analyse (exemple : statique)
  - Construire les matrices et les vecteurs élémentaires
  - Assembler, dans le système global de la structure
  - Calculer les réactions, les déplacements, les déformations et contrainte

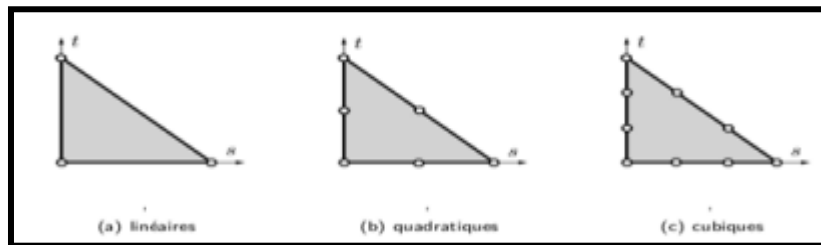
- Post – processeur (Post-traitement)
  - Présenter les résultats de façon claire et synthétique :
    - Sous forme numérique
    - Sous forme graphique
  - Effectuer des fonctions complémentaires telles que l’animation

#### IV.2.5 Types d’éléments de maillage

Le maillage, dans le contexte de la méthode des éléments finis, est une étape fondamentale de la discrétisation d'un domaine continu en éléments finis. Il consiste à subdiviser le domaine en un ensemble de petits éléments géométriques en fonction de la dimension du problème. Ce qui est le cas dans le cadre de ce travail où le problème étudié est d’équilibre stationnaire pour le calcul statique de mécanique des solides où des éléments volumiques ont été utilisés. Par contre des éléments bidimensionnels ont été utilisés pour le calcul de transfert de chaleur tels que : [10]

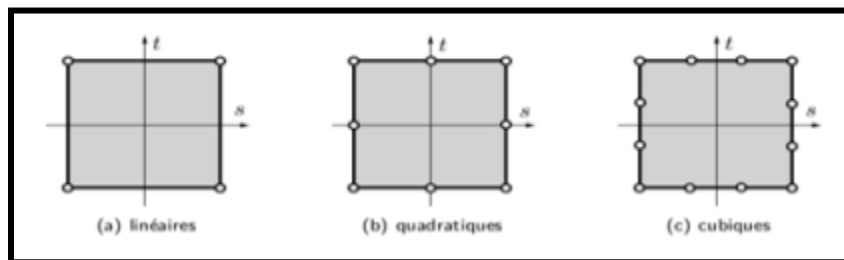
- **Les éléments bidimensionnels (surfacique-2D)**

- Les éléments triangulaires: T3, T6 et T9 à trois (linéaire), six (Quadratique) et neuf (Cubique) nœuds respectivement



**Figure IV 2:** : Eléments triangulaires T3 T6 T9

- Les éléments quadrangulaires: Q4, Q8 et Q12 à quatre (linéaire), huit (Quadratique) et douze (cubique) nœuds respectivement



**Figure IV 3:** Eléments quadrangulaires Q4, Q8 et Q12

- **Les éléments tridimensionnels (Volumiques-3D)**

Dans la plupart des cas, des éléments volumiques (3D) sont utilisés pour le maillage dans la méthode des éléments finis. Parmi les types d'éléments couramment utilisés, on trouve :

- Les éléments linéaires : Tétraédriques  $TE_4$  (à quatre nœuds), prismatiques  $P_6$  (à six nœuds), hexaédriques  $H_8$  (à huit nœuds)
- Les éléments quadratiques : Tétraédriques  $TE_{10}$  (à dix nœuds), prismatiques  $P_{15}$  (à quinze nœuds), hexaédriques  $H_{20}$  (à vingt nœuds)
- Les éléments cubiques : Tétraédriques  $TE_{16}$  (à seize nœuds), prismatiques  $P_{24}$  (à vingt-quatre nœuds) et hexaédriques  $H_{32}$  (à trente-deux nœuds)

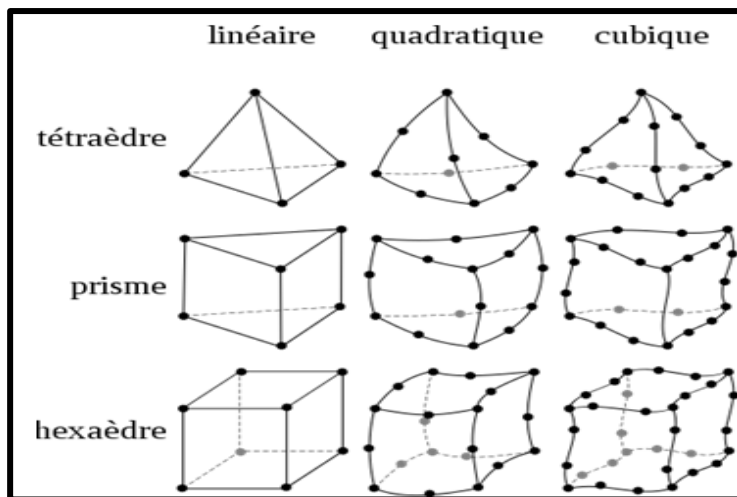


Figure IV 4 : Types d'éléments tridimensionnel

### IV.3 Le logiciel de simulation utilisé - ANSYS



ANSYS est un logiciel de simulation numérique puissant et multifonctionnel, leader de son marché utilisé dans le domaine de l'ingénierie et de l'analyse numérique aussi dans le développement de produits industriels. Le mot "ANSYS" provient du mot "Système d'analyse". Dans divers domaines, tels que la mécanique des structures, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme, l'optimisation et bien d'autres, ANSYS offre une gamme complète d'outils de

simulation la résolution de problèmes complexes. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation.

Le programme permet de créer des modèles numériques de systèmes physiques tridimensionnels (3D) en tenant compte des propriétés des matériaux, des charges appliquées, des contraintes environnementales, etc. Il utilise des méthodes numériques avancées pour résoudre les équations mathématiques qui décrivent le comportement du système, permettant ainsi d'obtenir des résultats précis et détaillés de plus il permet d'effectuer des analyses de contraintes, des simulations de flux de fluides, des simulations électromagnétiques, des analyses thermiques, des analyses de fatigue, des optimisations de conception, des simulations d'impact, des analyses de vibrations, des analyses acoustiques, et bien plus encore. Le logiciel offre également des fonctionnalités avancées telles que l'interaction fluide-structure, l'analyse non linéaire, la simulation multiphasique et la simulation en temps réel.

ANSYS propose une large gamme de systèmes d'analyse, comme l'analyse structurelle et l'analyse thermique utilisées dans ce mémoire. Ces systèmes d'analyse sont généralement disponibles dans les différentes solutions. Il convient de noter que les fonctionnalités spécifiques peuvent varier en fonction de la version d'ANSYS et des modules utilisés [12]

### **IV.4 Vérification de résistance durant le test hydrostatique**

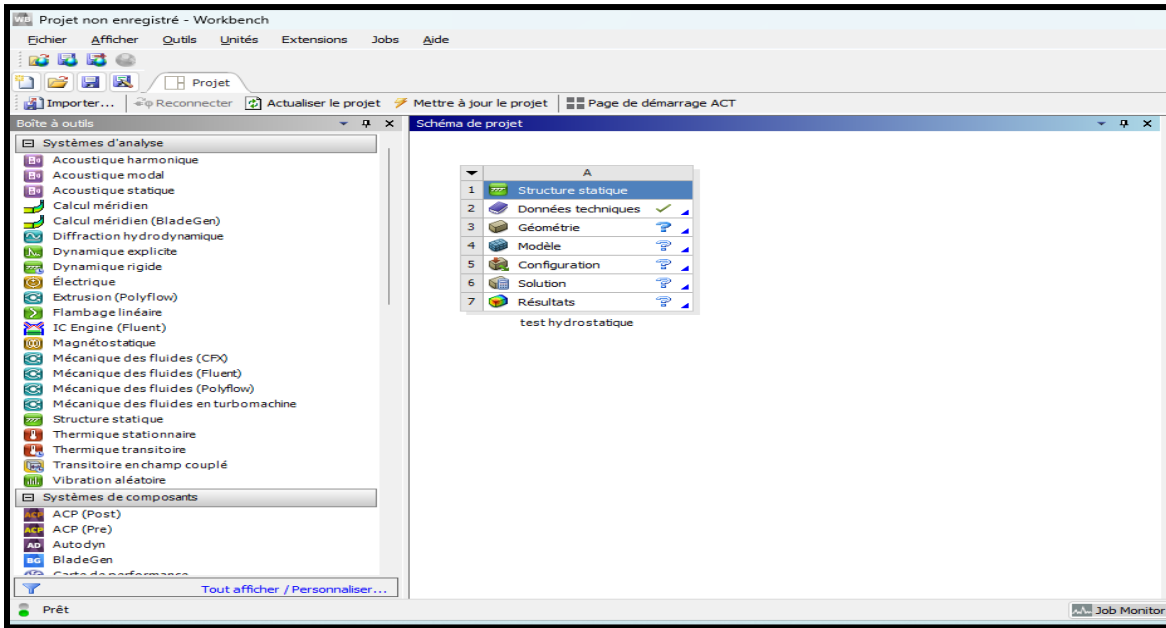
#### **IV.4.1 Les étapes à suivre durant la simulation**

Pour effectuer cette simulation, on suit les étapes suivantes : [11]

✓ *1<sup>ère</sup> étape* : Définitions des analyses

Configuration des paramètres d'analyse appropriés pour notre simulation, et comme indiqué précédemment, nous utiliserons le système d'analyse "structure statique".





**Figure IV 5:** Définition du systèmes d’analyse

✓ *2<sup>eme</sup> étape* : Modélisation géométrique

Modélisation de la géométrie du réservoir intérieure du bac de stockage qu’on va soumettre au test hydrostatique à l’aide des outils de modélisation d’ANSYS. La géométrie a été créé à l’aide de l’outil ‘‘ DESIGN MODELER ‘‘

Design Modeler est un logiciel de modélisation géométrique 3D inclus dans la suite logicielle ANSYS, il permet aux utilisateurs de créer, modifier et préparer des modèles géométriques pour une analyse ultérieure dans d'autres modules ANSYS, tels que Mechanical.

Le réservoir intérieure se compose de 12 viroles avec différentes épaisseurs.

**Tableau IV 2 :** Epaisseur des viroles de la robe intérieure

| Virole N <sup>0</sup> | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Epaisseur (mm)        | 22,8 | 20,7 | 18,5 | 16,4 | 14,2 | 12,1 | 9,9 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |

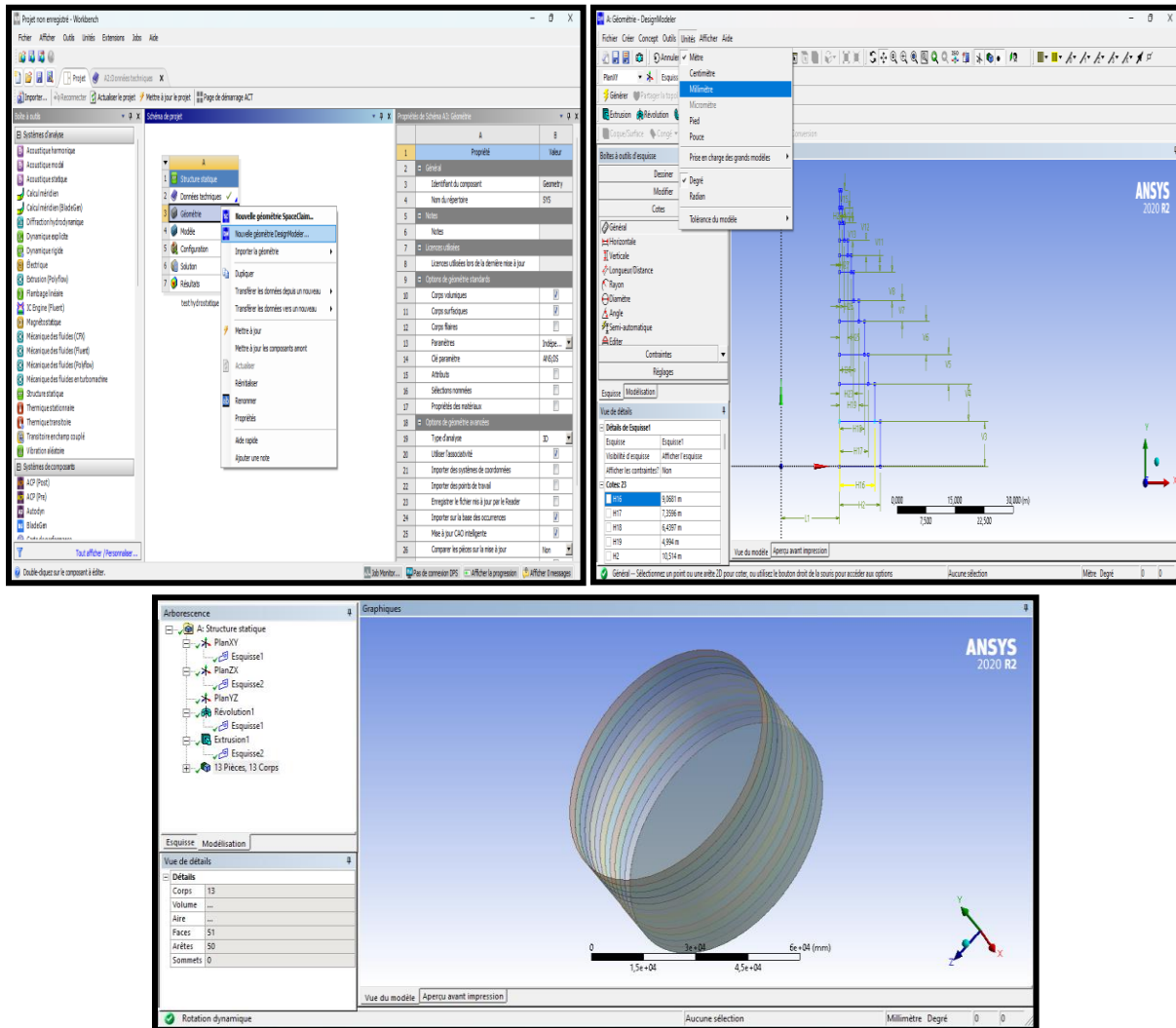


Figure IV 6 : Modélisation du réservoir intérieur du bac de stockage

✓ 3<sup>eme</sup> étape : Définition des matériaux

Le matériau utilisé pour les parois du réservoir intérieur est l'acier A553 Gr. A

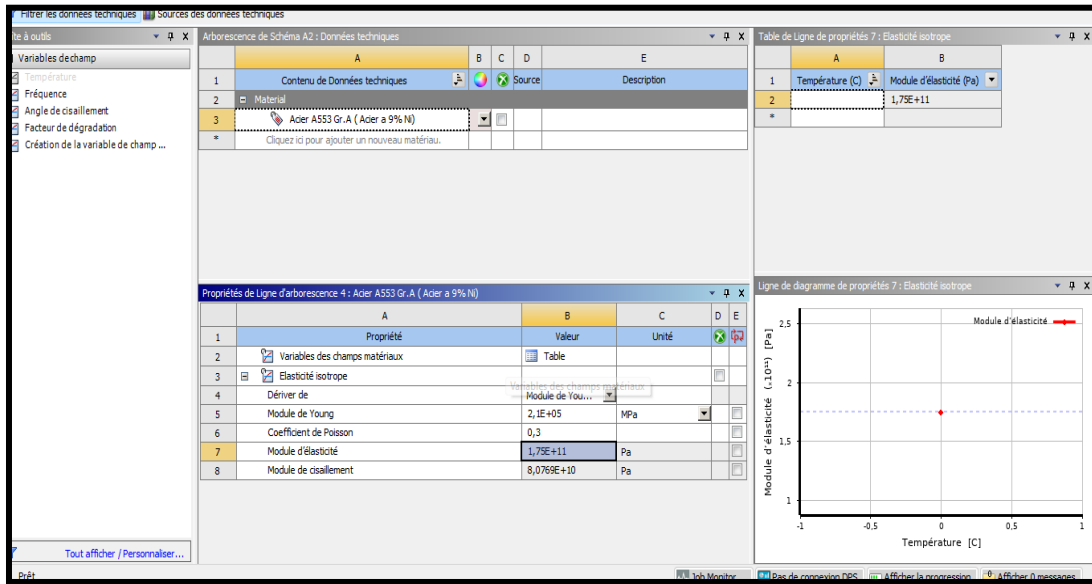


Figure IV 7: Définition du matériau

✓ 4<sup>ème</sup> étape : Maillage

Génération d'un maillage de haute qualité pour le modèle pour s'assurer que le maillage est suffisamment fin pour capturer les déformations et les réactions à la pression hydrostatique.

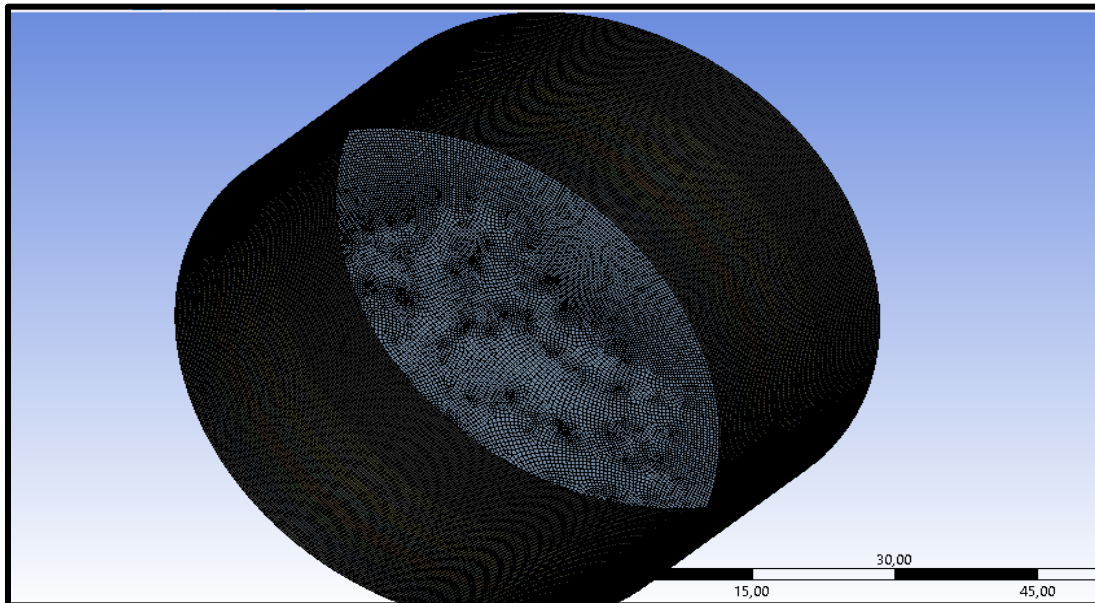


Figure IV 8: Le maillage du bac

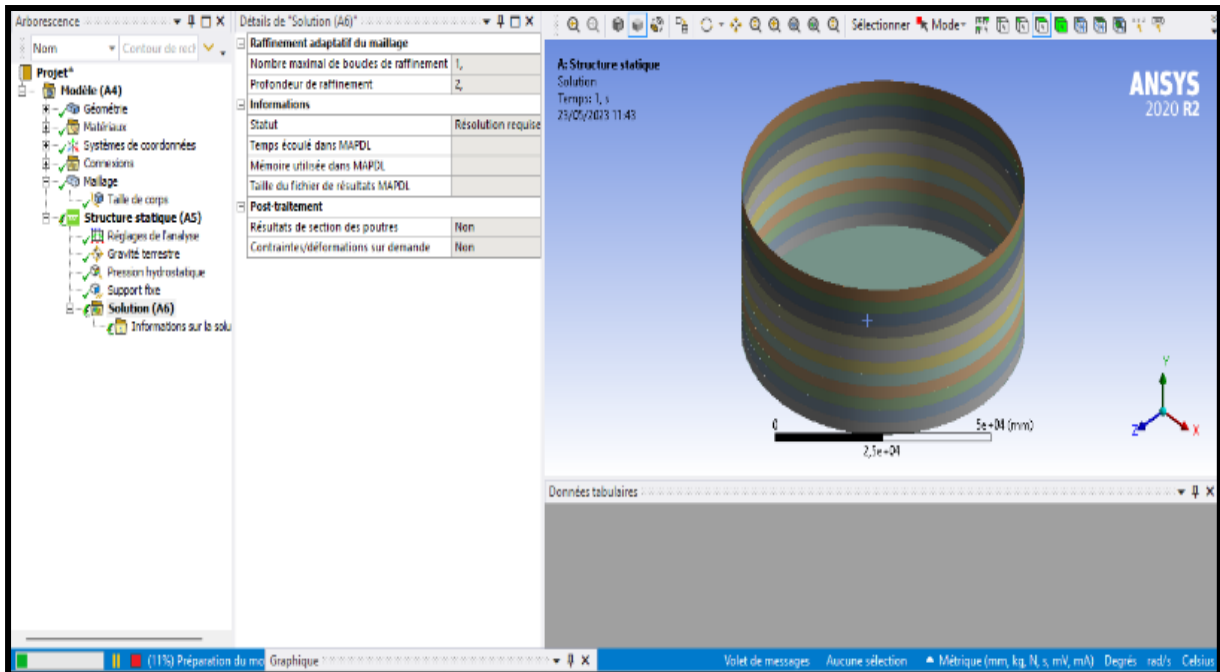
La figure montre le maillage réalisé sur Mechanical, et le tableau suivant résume les caractéristiques principales de maillage généré.

**Tableau IV 3 : Caractéristiques de maillage**

| Paramètres du maillage | Qualité de l'élément |
|------------------------|----------------------|
| Taille des éléments    | 500 mm               |
| Nœuds                  | 393024               |
| Eléments               | 77258                |

✓ **5<sup>eme</sup> étape** : Conditions aux limites

- Le bac de stockage est supposé fixe au-dessous par l'utilisation de support fixe du plan sous le bac.



**Figure IV 9:** Introduction d'un support fixe

✓ **6<sup>eme</sup> étape** : Définition du chargement et configuration des paramètres d'analyse

- Application d'une pression hydrostatique uniforme a l'intérieur du bac avec une valeur et une direction spécifiées.  
Selon la spécification du constructeur : le niveau de l'eau pendant les essais hydrauliques = 13,845 m.

Donc on doit définir l'emplacement de la pression hydrostatique à 13,845 m sur les faces intérieures de réservoir.

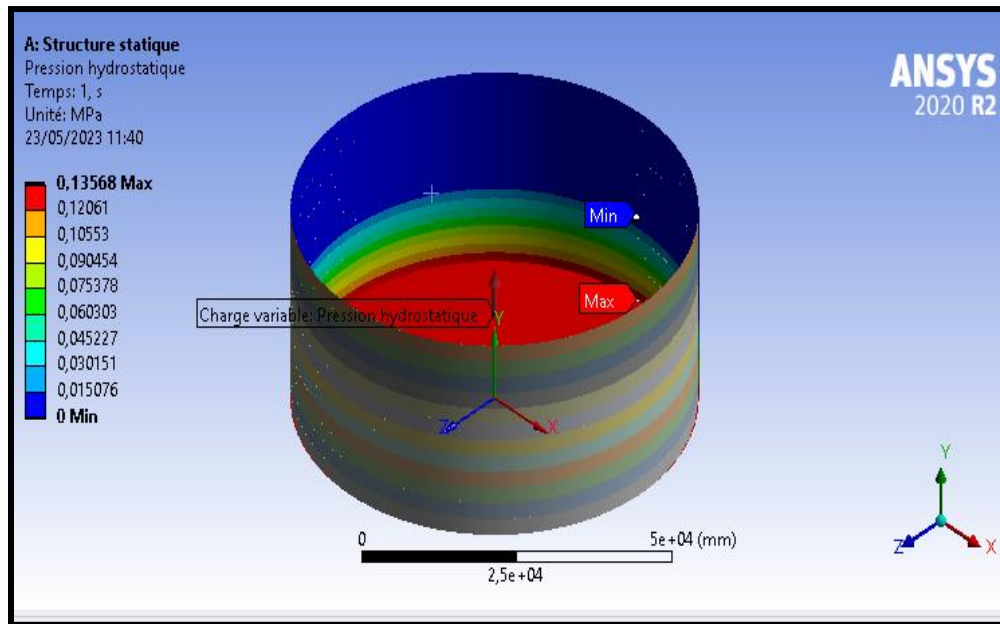


Figure IV 10 : Introduction de la force hydrostatique

- Introduction de la gravité terrestre pour tenir compte du poids de l'eau utilisée.

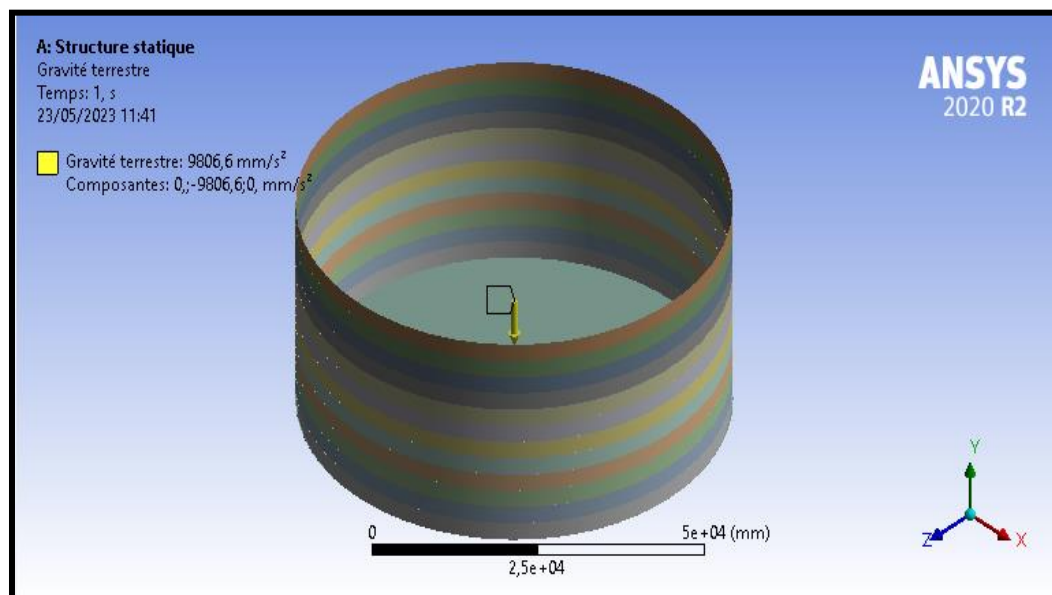


Figure IV 11 : Gravite terrestre

- ✓ 7<sup>eme</sup> étape : Résolution: exécution de la simulation
- ✓ 8<sup>eme</sup> étape ; Analyse des résultats

## IV.4.2 Résultats et interprétations

### IV.4.2.1 Evolution de l'intensité de contrainte

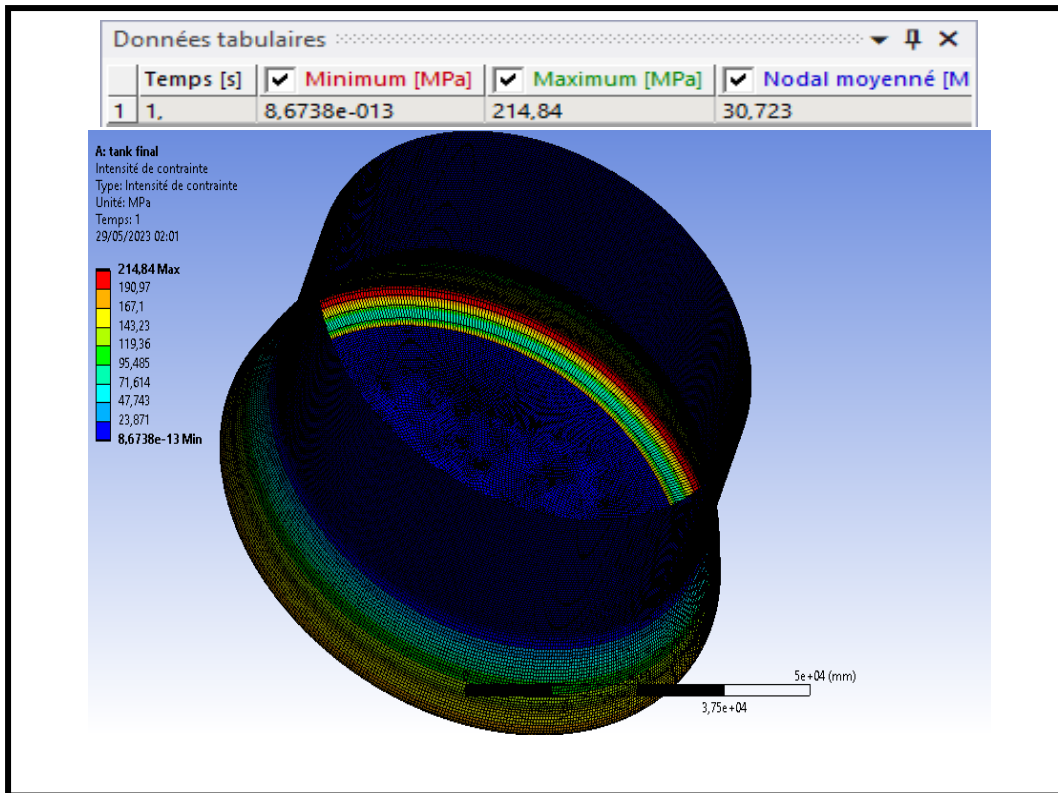


Figure IV 12 : Variation de l'intensité de contrainte

### IV.4.2.2 Evolution de la contrainte équivalente de Von Mises

On remarque quand durant cet essai hydrostatique, la contrainte au fond du réservoir de stockage est plus élevée, l'intensité de la contrainte maximale est de 214.84 MPa et la contrainte équivalente maximale est de 189,76 MPa. Puisque lorsqu'un réservoir est soumis à une épreuve hydrostatique avec de l'eau, la pression exercée par le poids de l'eau augmente proportionnellement à la profondeur. Par conséquent, la pression est la plus élevée au fond du réservoir à la plus grande profondeur, ce qui entraîne des contraintes plus élevées. (Voir figure IV 13)



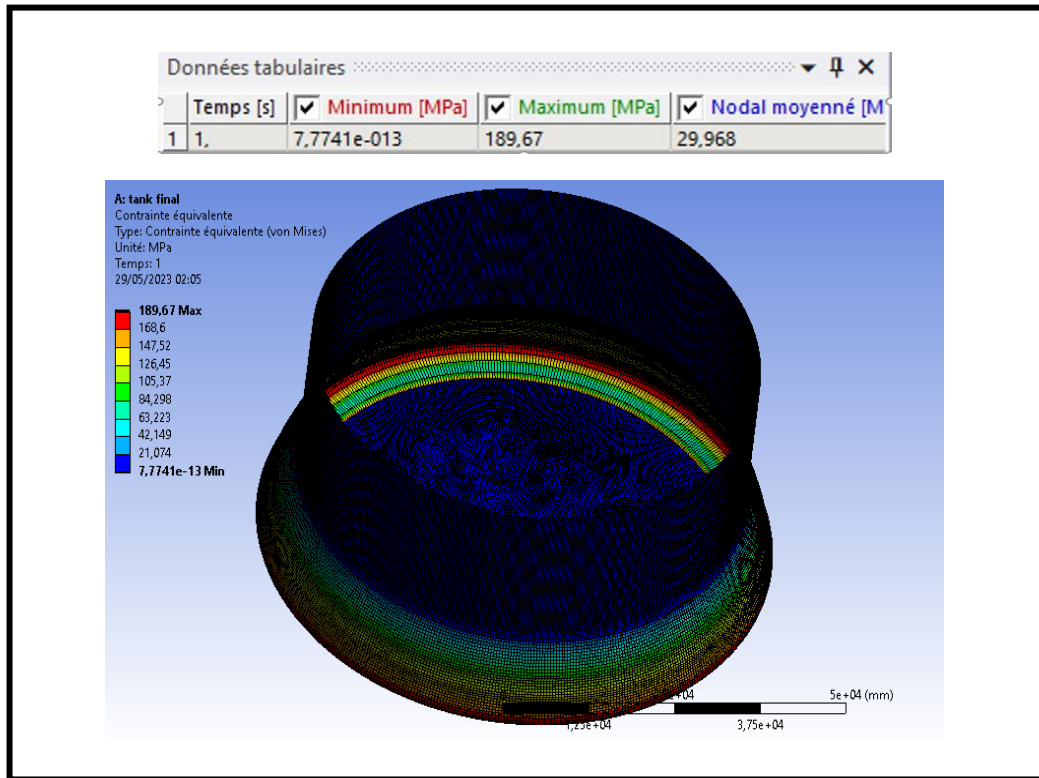


Figure IV 13 : Variation de la contrainte équivalente de Von Mises

#### IV.4.2.3 Déformations élastiques équivalentes

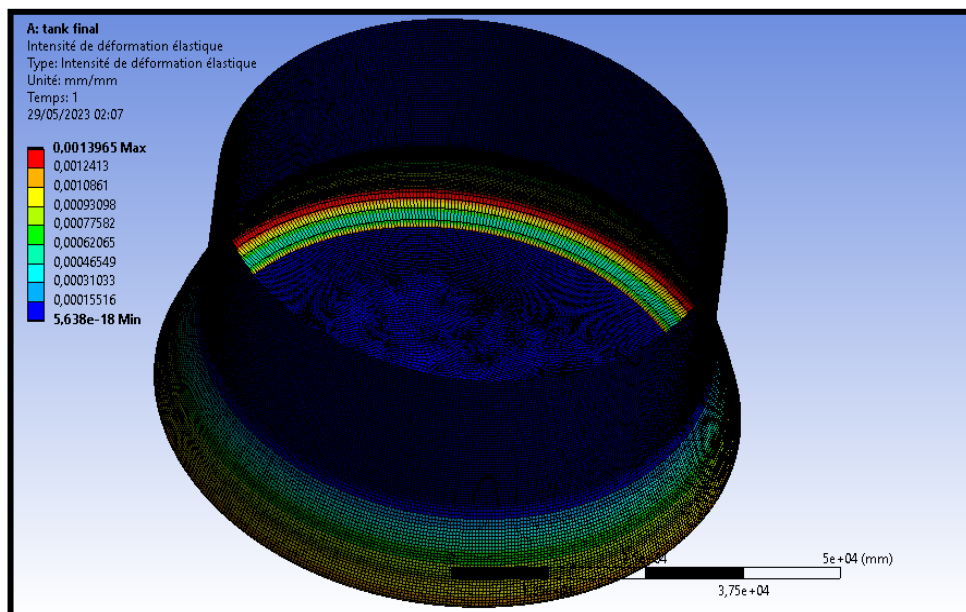
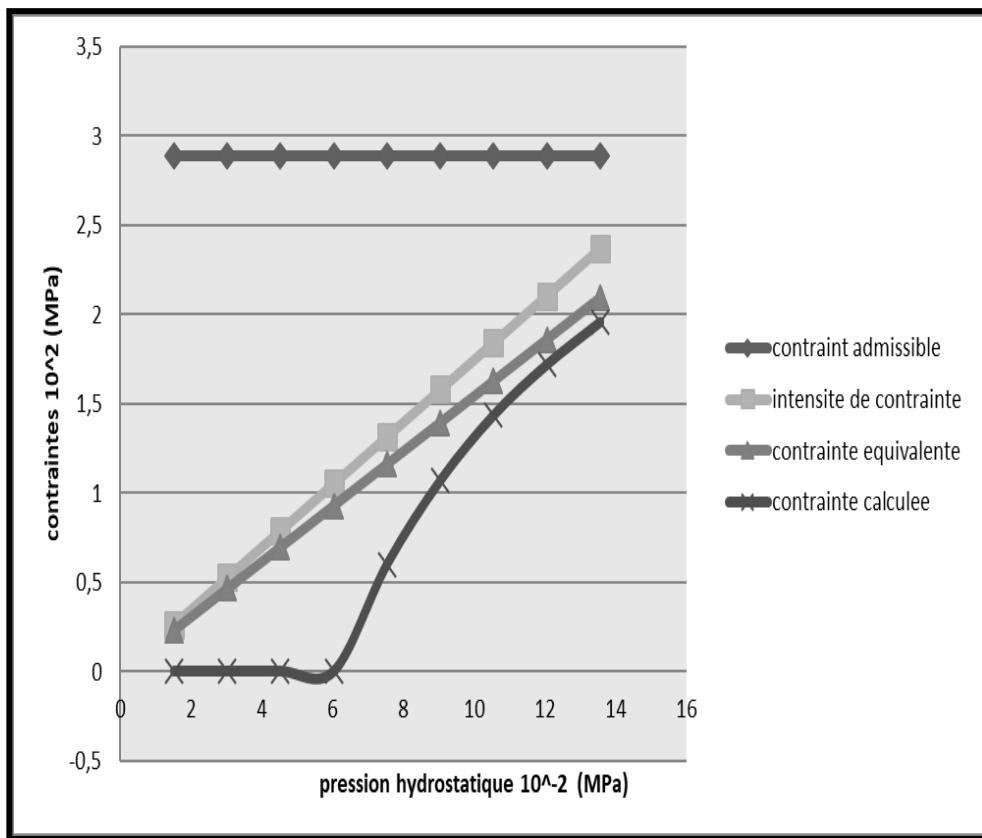


Figure IV 14 : La déformations élastique

La répartition de la charge dans le bac pendant l'essai hydrostatique peut contribuer à une déformation accrue au fond. En raison de la pression hydrostatique, la charge exercée sur les parois du bac augmente avec la profondeur. Cela crée un déséquilibre des forces et peut entraîner une déformation plus importante au fond du bac, où la charge est la plus élevée.

Sachant que la contrainte admissible durant l'essai hydrostatique est donnée par l'API 620 égal à 42000 psi = 289.6 MPa. On peut illustrer les différentes contraintes de la simulation par éléments donc la contrainte équivalente de Von Mises et l'intensité de contrainte ainsi que la contrainte calculée issues des calculs précédents dans la figure suivante :

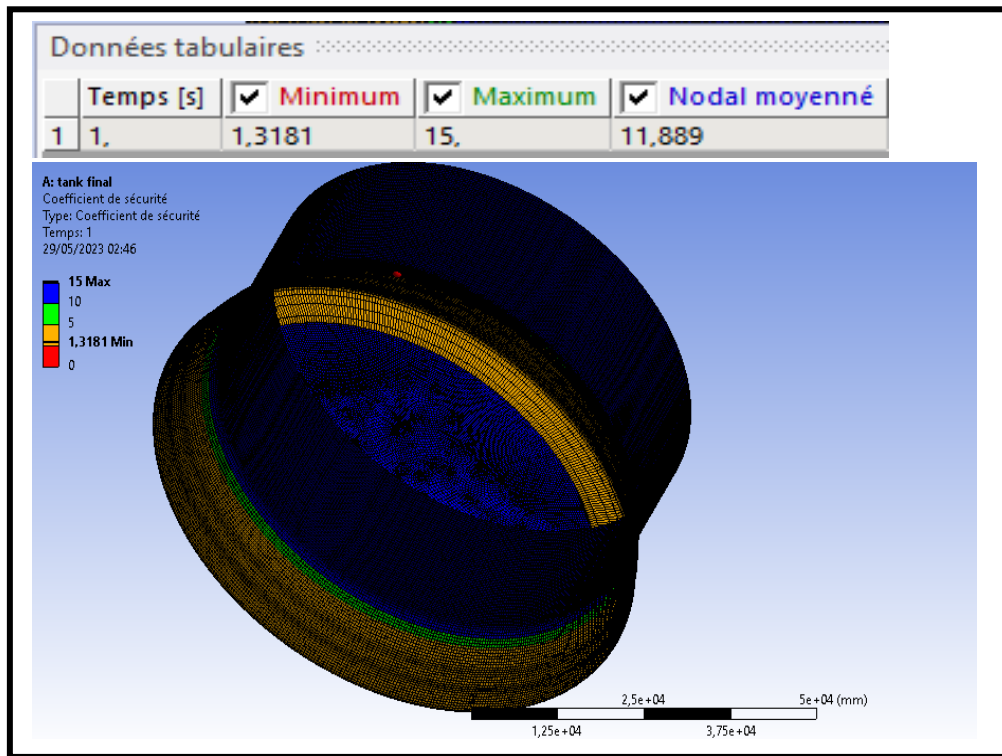


**Figure IV 16 :** La variation de la contrainte en fonction de la pression hydrostatique

D'après l'étude globale, on a trouvé que le bac de stockage résiste mais il reste encore à confirmer ces résultats par une vérification de coefficient de sécurité.



#### IV.4.2.4 Le coefficient de sécurité



**Figure IV 17** : Le coefficient de sécurité

D'après la figure ci-dessus qui représente la distribution du coefficient de sécurité on trouve que la résistance du bac de stockage est vérifiée durant le test hydrostatique.

#### IV.5 CONCLUSION

D'après les résultats de la simulation la résistance du bac de stockage pendant le test hydrostatique est bien vérifiée. Cette résistance du bac de stockage indique que sa structure est capable de supporter les différentes charges appliquées durant le test, ce qui est essentiel pour assurer la sécurité des opérations de stockage. Cela suggère que le réservoir est suffisamment robuste pour résister aux contraintes mécaniques induites par le contenu du réservoir et la pression interne et il peut être utilisé en toute sécurité pour le stockage du GNL.

## ***CHAPITRE V : Etude thermique du bac de stockage***

---

## V Etude thermique du bac de stockage

### V.1 Introduction

Au cours de l'évaluation de la résistance d'un bac de stockage, le calcul thermique est important et nécessaire. Le flux de chaleur et les pertes thermiques peuvent avoir un impact significatif sur la température du contenu du réservoir, ce qui à son tour peut influencer la résistance et l'intégrité du bac. Le calcul précis des flux de chaleur et des pertes thermiques permet d'estimer la température des parois du réservoir dans différentes conditions de fonctionnement. Cela permet de déterminer si le matériau utilisé pour la construction du réservoir est capable de résister aux variations de température sans compromettre sa résistance et son intégrité.

De plus, les pertes thermiques peuvent également influencer d'autres aspects du réservoir, tels que la condensation, la formation de dépôts ou la corrosion. Par conséquent, en prenant en compte les pertes thermiques dans le calcul de la résistance du bac de stockage, on peut mieux évaluer les risques potentiels et prendre les mesures nécessaires pour assurer une conception et une construction appropriées. L'objectif principal de ce chapitre est de calculer ces pertes thermiques et d'étudier l'effet de la température sur le flux de chaleur à travers les parois

### V.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 rôle mineur si l'on prend la précaution d'éviter les mouvements gazeux d'ensemble au sein de l'espace calorifugé, tels que la suppression des cheminements préférentiels ou l'emploi de joints contrariés si le calorifuge est formé de blocs solides."
- La conduction est le mode essentiel de transmission de la chaleur, d'où l'importance du choix du calorifuge. [13]

### V.3 Critères de choix des matériaux isolants

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

#### V.3.1 Critères physiques

- ✓ Coefficient de conductivité thermique :

Le coefficient de conductivité thermique caractérise la capacité d'un matériau à conduire la chaleur, conformément à la loi de Fourier. Les isolants utilisés en cryogénie ont généralement un coefficient de conductivité thermique inférieur à 0,050 W/mK.

✓ Masse volumique :

La masse volumique est un critère simple pour déterminer la catégorie à laquelle appartient un produit, sans nécessiter des tests longs et coûteux. Un bon isolant doit être aussi léger que possible pour éviter d'alourdir les structures sur lesquelles il est posé.

✓ Imperméabilité à la vapeur d'eau :

Contrairement aux canalisations de vapeur, le froid dans le cas du GNL se trouve à l'intérieur du tuyau, ce qui entraîne une tendance à la pénétration de l'humidité atmosphérique dans le calorifuge, provoquant la formation de givre ou de glace. Par conséquent, l'utilisation d'un isolant imperméable est nécessaire.

✓ Vieillessement :

En dehors de la pénétration d'humidité, certains isolants subissent des transformations altérant leurs caractéristiques d'isolation initiales en raison de modifications chimiques internes (réactions secondaires lentes, migrations de constituants) ou externes (modifications de structure, effet des rayons ultraviolets du soleil, par exemple).

✓ Chaleur spécifique :

Il s'agit de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré la température d'une unité de masse d'une substance donnée, soit à pression constante, soit à volume constant.

### V.3.2 Critères mécaniques

✓ Contrainte thermique

Si le matériau isolant et la structure sur laquelle il est appliqué ont des coefficients de contraction thermique différents, il est nécessaire d'incorporer des joints de dilatation dans le calorifuge afin de compenser cette différence.

✓ Résistance mécanique

La résistance à la compression est une caractéristique essentielle à prendre en compte pour les matériaux destinés à des utilisations isolantes des sols. Il est important que l'isolant puisse résister aux charges mécaniques auxquelles il peut être soumis.

✓ Essais de traction

Les matériaux peuvent être classés en fonction de leur courbe de traction, qui caractérise leur comportement mécanique. Un matériau ductile sera représenté par une courbe divisée en trois zones : une zone de déformation élastique, une zone de déformation plastique et une zone de contrainte et de rupture. En revanche, un matériau malléable sera représenté par une ligne droite sur le graphique.

### ✓ Résistance aux chocs

Ce critère est particulièrement important pour le calorifuge des tuyauteries. Étant donné que les installations de liquéfaction sont souvent situées en bord de mer, exposées aux intempéries, il est essentiel que l'isolant de la tuyauterie soit résistant aux chocs. Cela garantit que les travaux d'installation peuvent être effectués dans des conditions difficiles sans risque de dommages.

### **V.3.3 Critères de sécurité**

Pour des raisons évidentes liées aux installations gazières, il est essentiel que les isolants résistent au feu. Les normes internationales classifient les matériaux en fonction de leurs performances en termes de résistance au feu. Selon la littérature, les isolants d'origine minérale sont ceux qui offrent la meilleure résistance au feu.

### **V.3.4 Critères de mise en œuvre**

La facilité de mise en œuvre de l'isolant est un aspect important, tout comme sa facilité de contrôle. Des points spécifiques tels que les compensateurs, les vannes et les supports de tuyauterie nécessitent une attention particulière lors de l'installation.

### **V.3.5 Critères économiques**

Les critères économiques représentent en quelque sorte une synthèse de tous les autres critères mentionnés précédemment. Il est évident qu'il est difficile de trouver un calorifuge qui possède toutes les qualités requises tout en étant bon marché. Ainsi, il existe un compromis économique à réaliser, qui peut varier d'une installation à une autre en fonction des contraintes budgétaires et des priorités spécifiques.

## **V.4 Les différents types des isolants**

Dans ce paragraphe, nous nous concentrerons sur les isolants les plus couramment utilisés dans les installations cryogéniques, en particulier dans le domaine du gaz naturel liquéfié.

### **V.4.1 Les mousses**

Les mousses sont fréquemment utilisées pour les grandes installations de stockage cryogénique, telles que l'azote et le méthane, malgré leur conductivité thermique relativement élevée. Les mousses les plus couramment utilisées sont basées sur des résines polystyréniques, des résines polyvinyliques (thermoplastiques), du polyuréthane (thermodurcissable) et des mousses de verre.

✓ **Les mousses de polystyrène** sont fabriquées à partir d'éthylène et de benzène, et elles sont disponibles sous forme d'éléments préfabriqués. Bien qu'elles soient faciles à mettre en œuvre, elles sont peu utilisées dans les applications cryogéniques en raison de leurs propriétés thermiques limitées et de leur perméabilité élevée à la vapeur d'eau. Cependant, grâce à leur procédé de moulage, il est possible de réaliser des petits réservoirs économiques pour le transport de l'azote liquide, avec une capacité n'excédant pas une dizaine de litres.

✓ **Les mousses de polyuréthane** sont largement utilisées dans les entrepôts frigorifiques, le transport frigorifique, ainsi que pour le transport de gaz naturel et d'éthylène liquide par camion-

citerne. Ces mousses présentent les caractéristiques les plus intéressantes, surpassant tous les autres matériaux rigides de la même famille. Le polyuréthane peut être appliqué sur site (coulée in situ) ou en usine (préfabrication). Il peut être injecté directement sur la tuyauterie ou utilisé sous forme de blocs en coquilles.

✓ **Les mousses polyvinyliques** comprennent notamment le Klégécell (Kléber) et le chlorure de polyvinyle.

Le Klégécell, sous différentes formes, est une mousse expansée à cellules fermées, ce qui la rend moins sensible à la diffusion de vapeur d'eau. Il est largement utilisé en cryogénie et est notamment utilisé dans l'isolation des cuves de certains méthaniers et des réservoirs cryogéniques de stockage de la fusée Ariane.

Le chlorure de polyvinyle, quant à lui, est un excellent isolant avec une très bonne imperméabilité et une résistance mécanique élevée. Bien que son prix soit relativement élevé, son faible coefficient de conductivité thermique permet des réductions d'épaisseur intéressantes, ce qui compense en partie son coût.

✓ **Les mousses de verre** ont des propriétés thermiques assez limitées. Elles sont utilisées dans les grandes unités de séparation de l'air et sur les canalisations d'oxygène liquide au niveau des vannes.

En ce qui concerne la fibre de verre, c'est un matériau fibreux très léger, sans odeur, et qui est neutre vis-à-vis des autres matériaux. Cependant, son principal inconvénient réside dans sa résistance à l'écrasement qui est relativement faible.

### V.4.2 Les poudres

Les poudres sont fréquemment utilisées pour l'isolation thermique des fluides cryogéniques, en particulier dans les réservoirs de taille moyenne à basse pression, les évaporateurs et certaines lignes de transfert.

L'isolation par les poudres implique la disposition de fines particules de différents matériaux entre les parois à des températures différentes. Ces particules peuvent être des microsphères de plastique, de carbone, de silicate de calcium, d'oxyde de fer, etc. La conduction thermique à travers ces isolants est généralement plus faible que celle des mousses, car le contact entre les particules est très limité.

Cependant, l'absorption facile de la vapeur d'eau par ces isolants, en particulier la perlite, constitue un inconvénient majeur. Il est donc nécessaire de stocker ces matériaux à l'abri de l'humidité et de les dégazer à chaud avant leur utilisation.

Les composés les plus utilisés et les plus étudiés dans ce domaine sont la perlite et le silice-aérogel.

**La perlite** est composée de minuscules sphères dérivées d'une roche volcanique de type silicate d'alumine. Elle est finement broyée et expansée, ce qui la rend totalement incombustible. La perlite est peu coûteuse et facile à installer. Cependant, elle présente deux inconvénients : elle est très

perméable aux vapeurs d'eau, ce qui nécessite l'utilisation d'un adsorbant et d'une enveloppe à double parois, et le grand nombre de pores entre les particules nécessite des tassements fréquents.

Quant au **silica-aérogel**, il s'agit d'un produit à base de silice avec une forte densité, ce qui limite son utilisation aux applications fixes, notamment dans les lignes de transfert de l'oxygène liquide et de l'azote liquide. Contrairement à la perlite, il ne nécessite pas la présence d'un adsorbant, ce qui simplifie la conception.

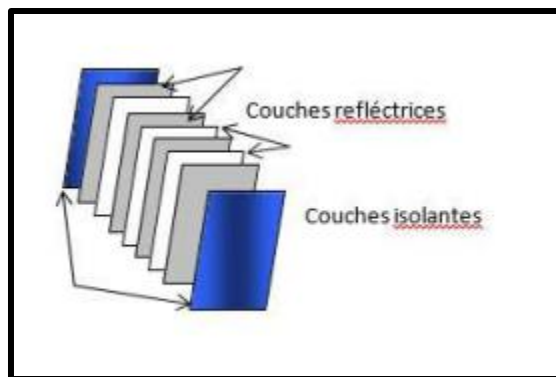
### V.4.3 Les fibres

Les laines de verre et les laines de roche sont les fibres les plus couramment utilisées dans les industries du bâtiment et du froid. Cependant, ces deux types d'isolants présentent un inconvénient majeur, à savoir leur capacité à absorber facilement l'humidité. Afin de remédier à cela, l'espace d'isolation est soit pressurisé avec un gaz sec, soit rendu étanche et maintenu sous faible pression absolue.

### V.4.4 La Superisolation

La superisolation est une technique d'isolation relativement récente, dont les premiers essais remontent aux années 60. Son nom provient de sa capacité à réduire considérablement les flux thermiques échangés entre deux enceintes présentant un fort gradient de température. Elle permet ainsi de minimiser les échanges de chaleur par rayonnement sans augmenter les échanges par conduction solide ou dans les gaz.

La superisolation peut être réalisée en utilisant des feuilles réfléchissantes, telles que l'aluminium ou le cuivre, séparées par des feuilles isolantes, comme le nylon. Une autre configuration possible est l'utilisation de feuilles présentant des propriétés isolantes d'un côté et réfléchissantes de l'autre, telles que le mylar aluminisé. Cette disposition réduit également les échanges par conduction moléculaire dans l'espace résiduel très étroit séparant chaque couche.



**Figure V 1 :** Détails d'un superisolant

### V.4.5 Isolation par le vide

Le vide est couramment utilisé dans les petits cryostats de laboratoire et pour les formes complexes. Son rôle principal est d'éliminer deux modes de transfert de chaleur : la conduction

dans les solides et la convection. Pour réduire les échanges de chaleur par rayonnement, le vide est souvent combiné avec l'utilisation de feuilles d'aluminium.

L'application la plus répandue de ce type d'isolant est le cryopompage. Ce procédé permet d'atteindre des niveaux de vide extrêmement élevés (de l'ordre de 10-12 torr). Le cryopompage est réalisé en condensant (Cryocondensation) et en adsorbant (cryosorption) les molécules de gaz à pomper sur des surfaces maintenues à de basses températures. [4]

### **V.5 Description des isolants utilisés et analyse des flux de chaleur associés dans le bac de stockage**

Les calculs de transfert de chaleur sont basés sur la loi de fourrier suivante :

$$Q = -K * S * \frac{dT}{dx}$$

Et pour les parois latérales des réservoirs de stockage, Les coordonnées cylindriques doivent être utilisées.

$$Q = -k * S * \frac{dT}{dr}$$

Où : Q = chaleur transférée [W]

K = Conductivité thermique [W/m k]

T = Température [K]

S = surface [m<sup>2</sup>]

r = rayon [m]

x = longueur [m]

#### **V.5.1 Flux de chaleur dans les parois cylindriques**

Le réservoir de stockage est une construction complexe à structure multicouche. Chaque couche a des propriétés thermiques spécifiques. Le transfert de chaleur doit également être pris en compte, et pas seulement pour les parois latérales du réservoir. L'énergie sous forme de chaleur est également transférée au fluide cryogénique (GNL) par le toit et le fond du réservoir.



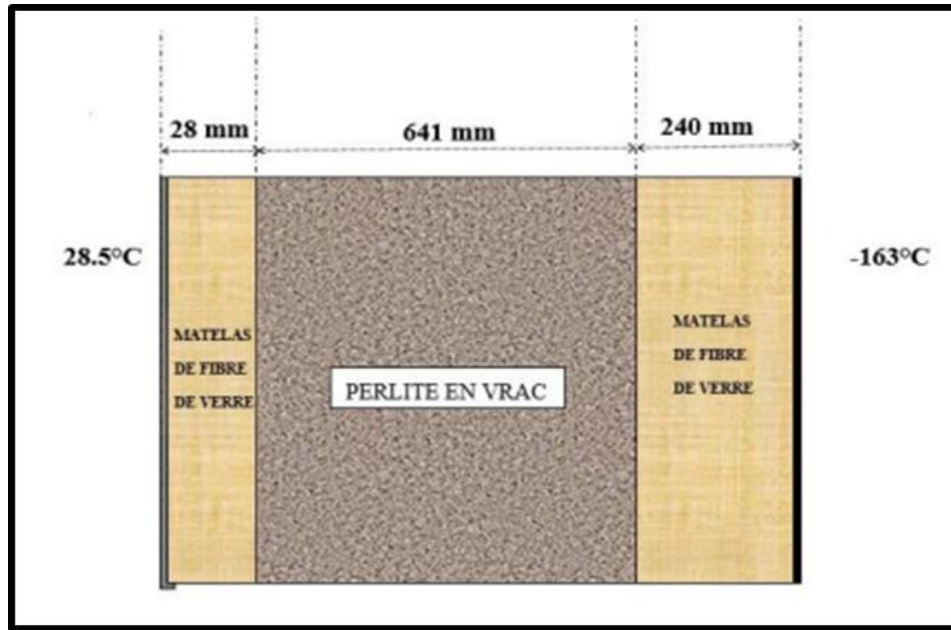


Figure V 2 : Isolation des parois

Le transfert de chaleur à travers les parois du réservoir est défini par la formule suivante :

$$Q_{parois} = \frac{T_{amb} - T_{int}}{\frac{1}{2\pi L_{parois}} \left( \frac{1}{r_4 h_{ext}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{K_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{K_3} + \frac{1}{r_1 h_{int}} \right)}$$

Où :  $Q_{parois}$  : chaleur transférée [W],

$k_i$ : conductivité thermique de chaque couche [W/ (mK)],

$T_{amb}$ : température ambiante [K],

$T_{GNL}$ : température GNL [K],

$L_{parois}$ : Hauteur des parois latérales[m],

$r_i$ : rayon de chacune des isolations [m],

$h_{int}$ : coefficient de transfert de chaleur convective interne [W/ (m<sup>2</sup>K)],

$h_{ext}$ : coefficient de transfert de chaleur convective externe [W/ (m<sup>2</sup>K)].

### V.5.2 Flux de chaleur dans le fond du réservoir

Le fond du réservoir est aussi considéré comme une plaque plate qui se constitue d'une fondation en béton et de plusieurs couches d'isolations.

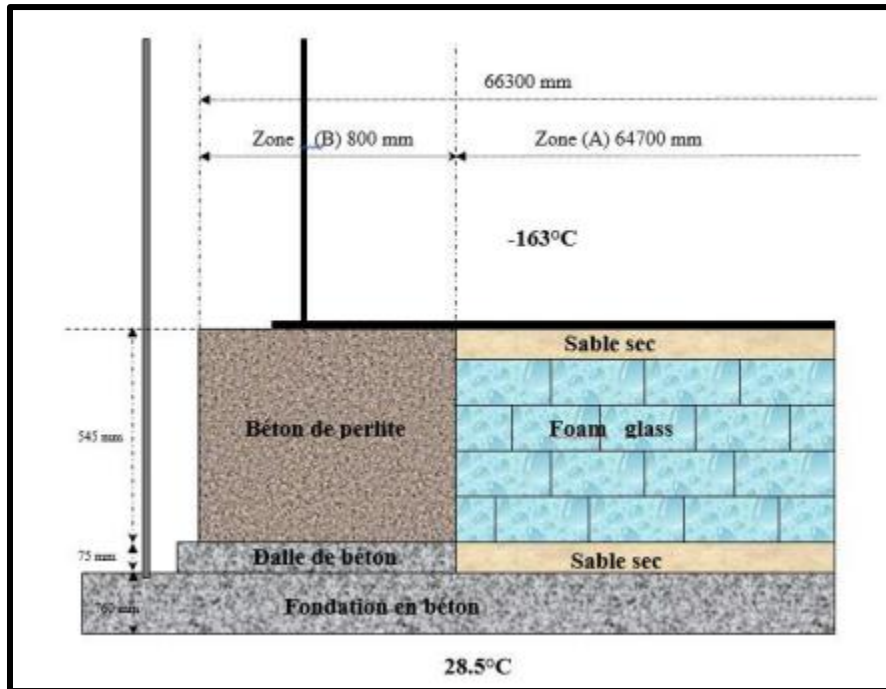


Figure V 3 : Isolation du fond

Le transfert de chaleur à travers le fond du réservoir est défini par la formule suivante :

Zone A:

$$Q_{zone A} = \frac{T_{sol} - T_{int}}{\frac{1}{S_{zoneA}} \left( \frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_1}{K_1} + \frac{e_1}{K_1} + \frac{e_1}{K_1} + \frac{1}{h_{ext}} \right)}$$

Zone B:

$$Q_{zone B} = \frac{T_{sol} - T_{int}}{\frac{1}{S_{zoneB}} \left( \frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_1}{K_1} + \frac{e_4}{K_4} + \frac{e_s}{K_s} + \frac{1}{h_{int}} \right)}$$

A Travers le fond:

$$Q_{Fond} = Q_{Zone A} + Q_{Zone B}$$

Où :

$Q_{fond}$ : chaleur transférée [W],

$ki$ ; conductivité thermique de chaque couche [W/ (mK)],

$T_{sol}$ : température du sol [K],  $T_{GNL}$  - température GNL [K],

$S_A$ , ; surfaces des zones A et B [m<sup>2</sup>],

$e_i$ ; épaisseur de chacune des isolations [m],

$h_{int}$ : coefficient de transfert de chaleur convective interne [W/ (m<sup>2</sup>K)],

$h_{ext}$ : coefficient de transfert de chaleur convective externe [W/ (m<sup>2</sup>K)].

### V.5.3 Flux de chaleur dans le toit

Les réservoirs de GNL ont un toit sphérique, dans le cas présent le transfert de chaleur par le toit est simplifié. Le toit du réservoir est considéré comme une plaque plate, normalement il devrait être considéré comme un dôme sphérique avec une plaque plane.

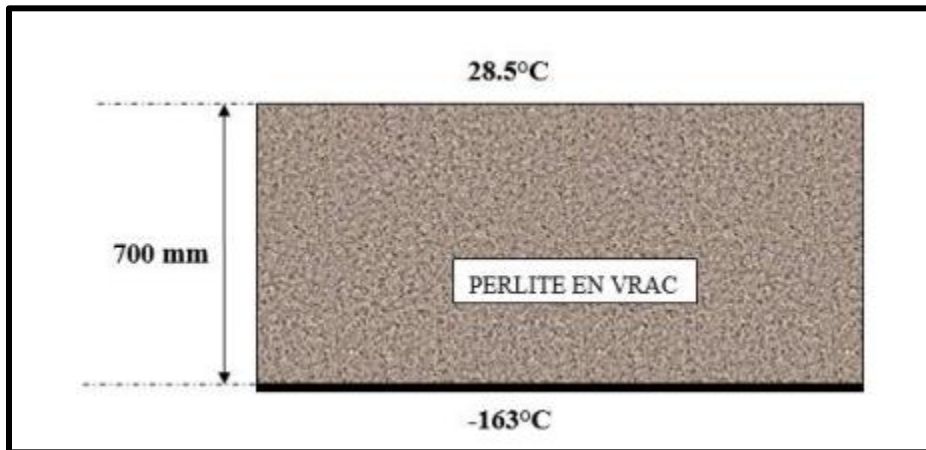


Figure V 4 : Isolation du toit

Le transfert de chaleur à travers le toit du réservoir est défini par la formule suivante :

$$Q_{toit} = \frac{T_{amb} - T_{ext}}{\frac{1}{S_{toit}} \left( \frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_{toit}}{K_{toit}} + \frac{1}{h_{int}} \right)}$$

$Q_{toit}$  : chaleur transférée [W],

$k_{toit}$  : conductivité thermique du toit [W/ (mK)],

$T_{amb}$  : température de l'ambiante [K],

$T_{GNL}$  ; température GNL [K],

$S_{toit}$  : surface du toit [m<sup>2</sup>],

$e_i$  : épaisseur du toit [m],

$h_{int}$  : coefficient de transfert de chaleur convective interne [W/ (m<sup>2</sup>K)],

$h_{ext}$  : coefficient de transfert de chaleur convective externe [W/ (m<sup>2</sup>K)]

❖ **Flux de chaleur total**

Le flux de chaleur totale que reçoit le réservoir cryogénique depuis le milieu ambiant s'écrit comme suit :

$$Q_{total} = Q_{fond} + Q_{toit} + Q_{parois}$$

## V.6 Hypothèses pour le calcul

L'objectif principal de notre étude thermique est d'évaluer l'impact de la température ambiante sur le flux de chaleur à travers les parois d'un bac de stockage. Afin de mener une analyse approfondie et de se concentrer sur les résultats recherchés, nous avons choisi de définir des hypothèses spécifiques pour simplifier l'étude. Ces hypothèses sont les suivantes :

1. Présence de GNL à 100 % : Nous supposons que le réservoir est rempli à pleine capacité de gaz naturel liquéfié (GNL).
2. Pas de changement de phases : Nous négligeons les changements de phases du GNL, en considérant que le fluide reste à l'état liquide tout au long de l'étude. Cette simplification est justifiée par la température de stockage et les conditions opérationnelles spécifiques du réservoir.
3. Fluide en repos : Nous supposons que le fluide à l'intérieur du réservoir est en repos, c'est-à-dire qu'il ne subit pas de mouvement ou d'agitation significatifs. Cette hypothèse simplifie l'analyse des flux de chaleur en éliminant les effets convectifs induits par le mouvement du fluide.
4. Résistance thermique négligeable de l'acier par rapport à celle de l'isolant : Nous considérons que la résistance thermique de l'acier constituant les parois du réservoir est négligeable par rapport à celle de l'isolant. Cette hypothèse est basée sur la conductivité thermique relativement élevée de l'acier par rapport à celle de l'isolant utilisé. Ainsi, nous concentrons notre analyse sur la résistance thermique principale offerte par l'isolant.

Ces hypothèses sont énoncées afin de simplifier l'étude thermique tout en ciblant spécifiquement l'effet de la température ambiante sur le flux de chaleur à travers les parois du bac

**V.7 Calcul analytique**

Conductibilité thermique des matériaux d'isolation

**Tableau V 1 :** Conductivités thermique des matériaux d'isolation

| Isolant                       | Béton | Sable sec | Faom Glass | Béton en perlite | Perlite en vrac | Fibre de verre |
|-------------------------------|-------|-----------|------------|------------------|-----------------|----------------|
| Conductivité thermique [W/mK] | 1,74  | 0,65      | 0,040      | 0,29             | 0,033           | 0,071          |

Equation paramétrique pour le calcul des pertes calorifiques :

$$Q = U * A * \Delta T$$

Sachant que : U = Coefficient de transfert calorifique global en W/mk

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_2}$$

A : la surface en m<sup>2</sup>

➤ **Perte calorifique à travers du fond**

▪ **Perte calorifique à travers de la zone (A)**

**Tableau V 2 :** Matériaux et propriétés du fond

| Isolant                      | béton | Sable sec | Foam glass | béton | Béton de perlite |
|------------------------------|-------|-----------|------------|-------|------------------|
| Epaisseur(m)                 | 0,760 | 0,120     | 0,500      | 0,835 | 0,545            |
| Conductivité thermique(W/mk) | 1,74  | 0,65      | 0,040      | 1,74  | 0,29             |

- Coefficient de transfert calorifique global

$$U = 1 / \left( \frac{0,12}{0,65} + \frac{0,500}{0,040} + \frac{0,76}{1,74} \right)$$

$$U = 0.0775 \text{ W/mK.}$$

- Perte calorifique

$$Q = 0.0775 \times \frac{\pi}{4} \times 64,7^2 \times 191,5$$

$$Q = 48737,08 \text{ W}$$

▪ **Perte calorifique au travers de la zone (B)**

- Coefficient de transfert calorifique globale

$$U = 1 / \left( \frac{0,545}{0,29} + \frac{0,835}{1,74} \right)$$

$$U = 0,426 \text{ W/m.K}$$

- Perte calorifique :

$$Q = 0,426 \times \frac{3,14}{4} \times (66,32 - 64,72) \times 191,5$$

$$Q = 13463,71 \text{ W}$$

Perte calorifique total à travers de la surface du fond

$$Q = 62200,79 \text{ W}$$

➤ **Perte au travers des parois latérales**

**Tableau V 3 :** Matériaux et propriété des parois latérales

| Isolant                      | Fibre de verre | Perlite |
|------------------------------|----------------|---------|
| Epaisseur(m)                 | 0,265          | 0,641   |
| Conductivité thermique(W/mK) | 0,033          | 0,071   |

- Coefficient de transfert calorifique total

$$U = 1 / \left( \frac{0,641}{0,033} + \frac{0,265}{0,071} \right)$$

$$U = 0,04325 \text{ W/mK.}$$

- Perte calorifique

$$Q = 0,04325 \times \pi \times 65,8 \times 32,100 \times 191,5 \times 1,15$$

$$Q = 63249,06 \text{ W}$$

➤ **Perte calorifique à travers du toit**

**Tableau V 4 :** matériaux et propriétés du toit

| Isolant         | Epaisseur (mm) | Conductivité thermique (W/mk) |
|-----------------|----------------|-------------------------------|
| Perlite en vrac | 700            | 0.033                         |

- Coefficient de transfert calorifique global

$$U = 1 / \left( \frac{0,7}{0,033} \right)$$

$$U = 0,0474 \text{ W/mK}$$

- Perte calorifique

$$Q = 0,0474 \times \frac{\pi}{4} \times 65,682 \times 191,5 \times 1,15$$

$$Q = 35397.14 \text{ W}$$

➤ **Perte calorifique calculée totale  $Q_t$**

$$Q_t = (62200,79 + 63249,06 + 35397,14) \times 1,05$$

$$Q_t = 168678.25 \text{ W}$$

Perte calorifique admissible :

Le taux d'évaporation garanti pour notre bac égale à 0,07 %

Puissance thermique (W) = Taux d'évaporation garanti \* Valeur calorifique du GNL

$$= 175970.93 \text{ W}$$

$$Q = 168678.25 \text{ W} < 0.07 \% (175970.93 \text{ W})$$

Sachant que :

1,15 sera le facteur d'augmentation de 15 % en présence d'une purge de méthane

1,05 sera le facteur de pertes calorifiques divers

## V.8 Etude numérique de l'influence de la température ambiante sur le flux de chaleur dans la paroi

Pour réaliser une étude thermique dans le but d'évaluer l'effet de température sur le flux de chaleur dans les bacs de stockage on va utiliser le logiciel de simulation numérique ANSYS avec un système d'analyse « Thermique Transitoire »

### ❖ Les équations utilisées

ANSYS utilise généralement la méthode des éléments finis pour résoudre les problèmes de thermique transitoire, y compris le calcul des flux de chaleur. Dans ce contexte, l'équation de la chaleur est discrétisée et résolue numériquement sur un maillage.

L'équation de la chaleur dans le domaine du temps et de l'espace s'exprime comme suit :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + k \nabla^2 T + Q = 0$$

Où :

- $\rho$  est la densité du matériau,
- $C$  est la capacité thermique massique,
- $T$  est la température,

- $t$  est le temps,
- $\nabla$  est l'opérateur nabla représentant le gradient spatial,
- $k$  est la conductivité thermique,
- $Q$  est la source interne de chaleur.

Cette équation est résolue pour obtenir la distribution de température  $T$  dans le domaine d'intérêt, en fonction des conditions initiales, des conditions aux limites et des propriétés thermiques du matériau.

Dans ANSYS, cette équation est discrétisée en utilisant la méthode des éléments finis. Le domaine d'étude est subdivisé en éléments finis, et une fonction d'interpolation est utilisée pour approximer la solution à l'intérieur de chaque élément. Les inconnues sont les valeurs de température aux nœuds des éléments finis. En utilisant les propriétés du matériau, les conditions aux limites et les conditions initiales, un système d'équations algébriques est formé, qui est ensuite résolu numériquement pour obtenir les températures aux différents nœuds du maillage.

Une fois les températures calculées, les flux de chaleur peuvent être déterminés à l'aide de la loi de Fourier :

$$q = -k\nabla T$$

Où  $q$  représente le flux de chaleur et  $k$  est la conductivité thermique. Cette équation permet de calculer les flux de chaleur à travers les interfaces ou les surfaces d'intérêt du modèle.

### ❖ Les étapes à suivre pour réaliser la simulation

- ✓ Définitions de l'analyse

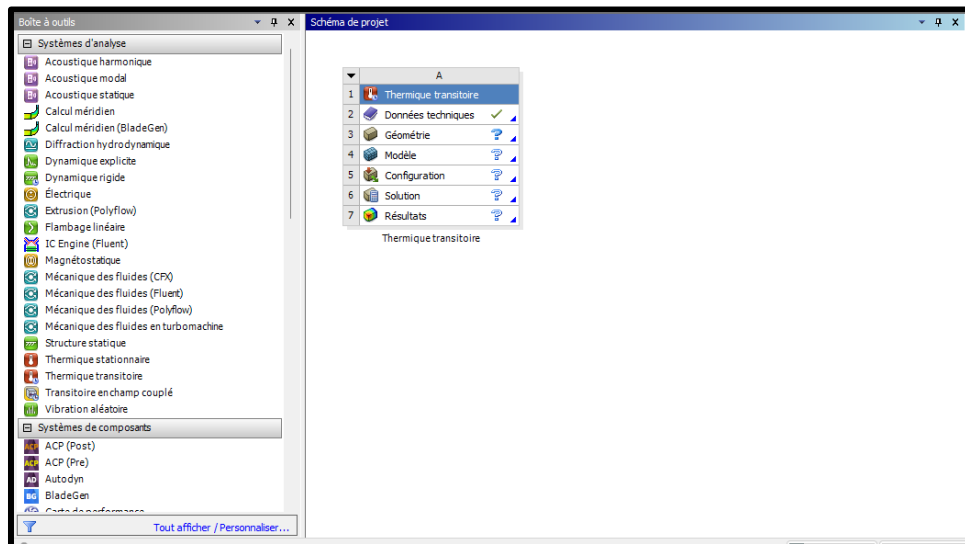
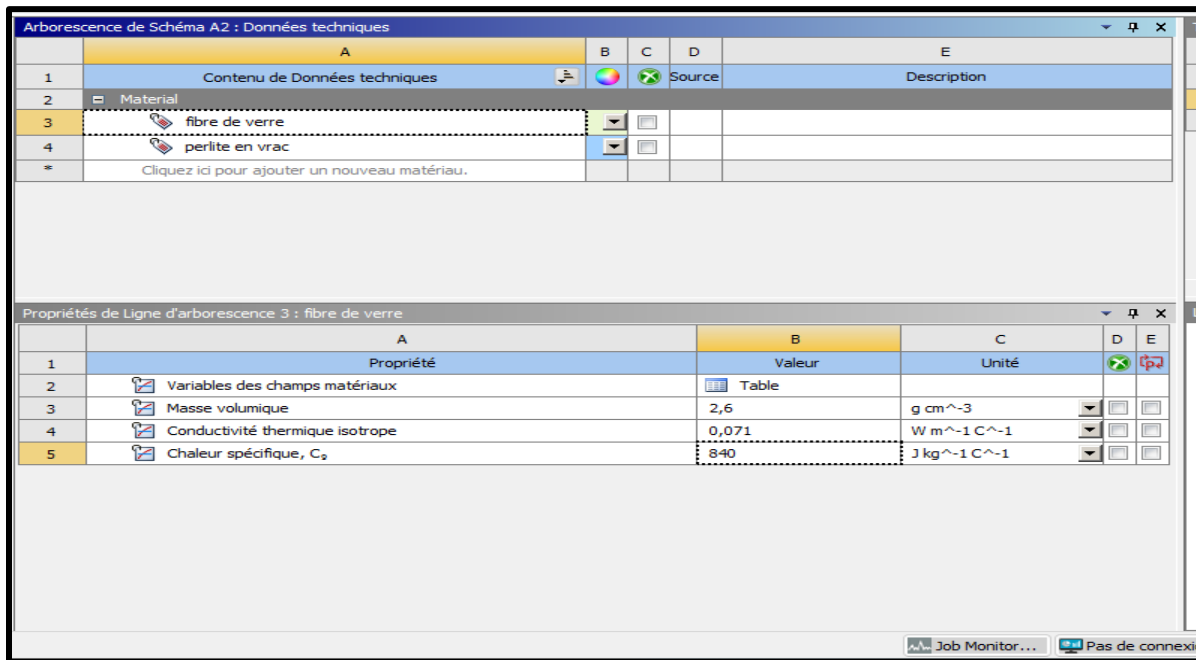


Figure V 5 : Définition du système d'analyse



✓ **Définition des matériaux d'isolation utiliser dans la paroi**



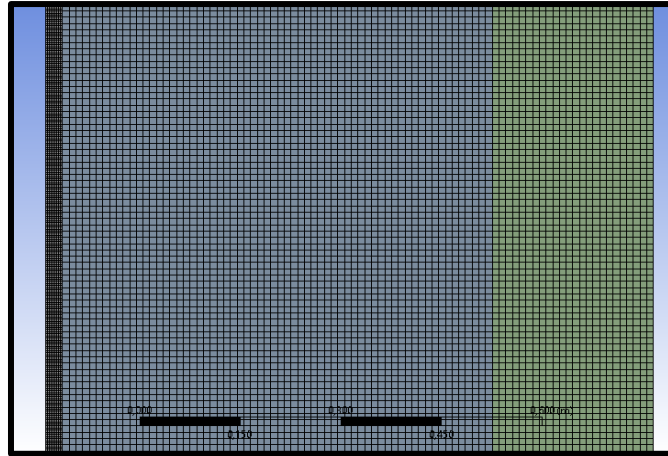
**Figure V 6 :** Introduction des matériaux des parois latérales

✓ **Modélisation géométrique**

- Création de la géométrie en 2D à l'aide de l'outil de modélisation « Design Modeler » : un modèle en 2D a été utilisé.
- Attribuez les matériaux appropriés aux différentes parties du modèle, en utilisant les propriétés thermiques définies précédemment

✓ **Maillage :**

- Générez un maillage de qualité sur la paroi du bac de stockage.
- Application d'un raffinement du maillage au niveau des zones avec de petites épaisseurs
- On doit s'assurer d'avoir un maillage adéquat autour de toute la paroi où le flux de chaleur est analysé.



**Figure V 7 :** Génération du maillage

**Tableau V 5 :**

Caractéristiques du maillage

|                     |        |
|---------------------|--------|
| Taille des éléments | 0,02 m |
| Nœuds               | 270548 |
| Eléments            | 84817  |
| Raffinement         | 2      |

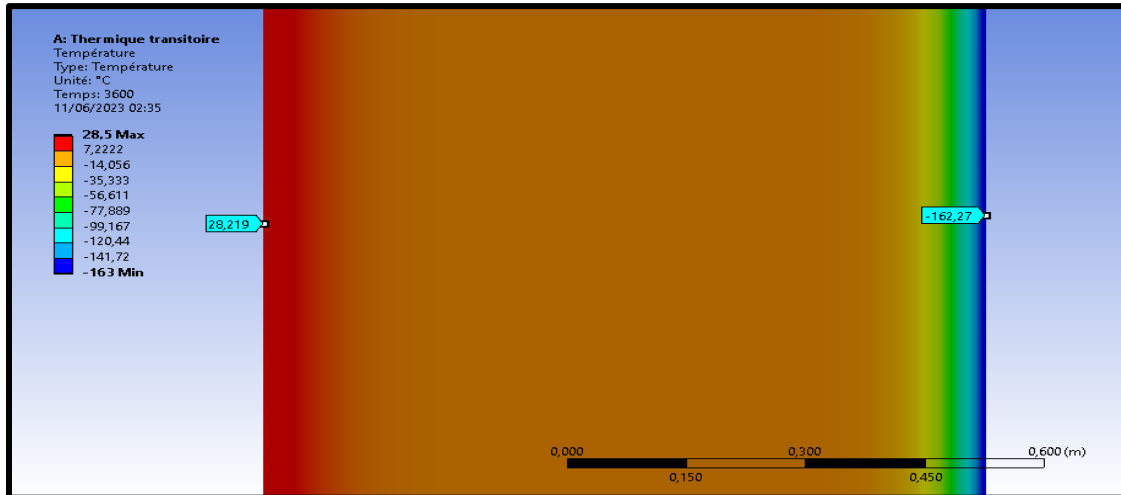
- ✓ **Application des conditions au limites**
  - On impose une température de  $-163^{\circ}\text{C}$  sur la paroi intérieure et une température de  $28,5^{\circ}\text{C}$  sur la paroi extérieure.
- ✓ **Configuration de l'analyse thermique transitoire**
  - Définissez les paramètres de l'analyse, tels que la durée de la simulation qu'on va fixer à 3600 secondes.
- ✓ **Résolution du modèle**
  - Lancez la résolution du modèle pour effectuer l'analyse thermique transitoire.
  - ANSYS effectuera les calculs nécessaires pour résoudre les équations de la chaleur sur la base du maillage, des conditions aux limites et des propriétés thermiques définies.

Après avoir effectué la simulation, nous allons modifier la température de la paroi extérieure afin d'observer son impact sur le flux de chaleur. Plus précisément, nous allons imposer une température de  $-5$  degrés Celsius pour simuler des conditions climatiques extrêmement froides, et une température de  $50$  degrés Celsius pour simuler des conditions climatiques extrêmement chaudes. Ces valeurs ont été choisies pour représenter les pires circonstances climatiques possibles.

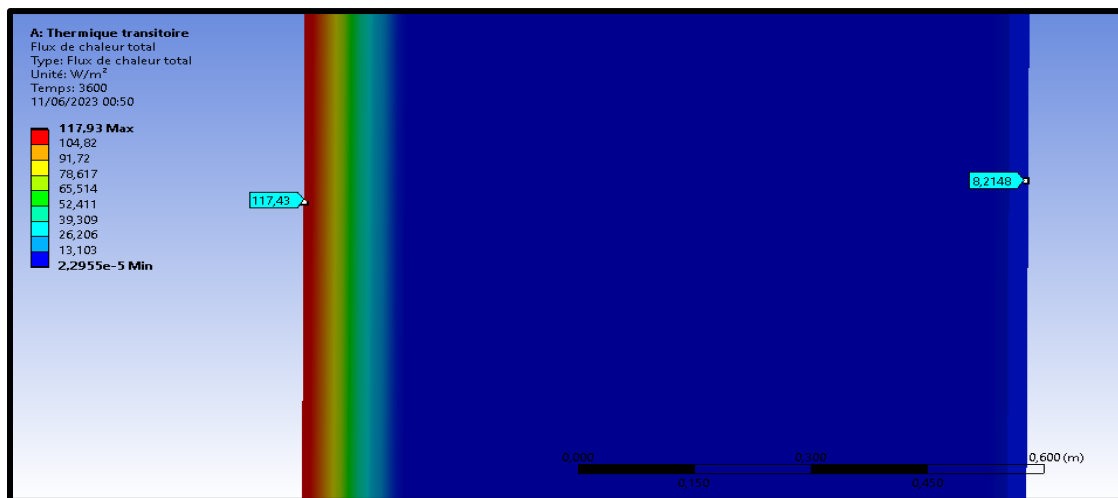
## ❖ Résultats et interprétation

### ✓ Température extérieure de 28,5 °C :

- Profil de température :



- Densité de flux de chaleur :



**Figure V 7 :** Variation des températures et flux de chaleur pour  $T_{\text{ext}}=28,5\text{ °C}$

On a utilisé la température de 28,5°C comme une condition de référence, le flux de chaleur à travers la paroi du bac de stockage de GNL est maximum dans la paroi extérieure et minimum dans la paroi intérieure avec une valeur de densité de flux de 8,2148 W/m<sup>2</sup>, cette valeur est relativement faible, ce qui indique une bonne isolation thermique.

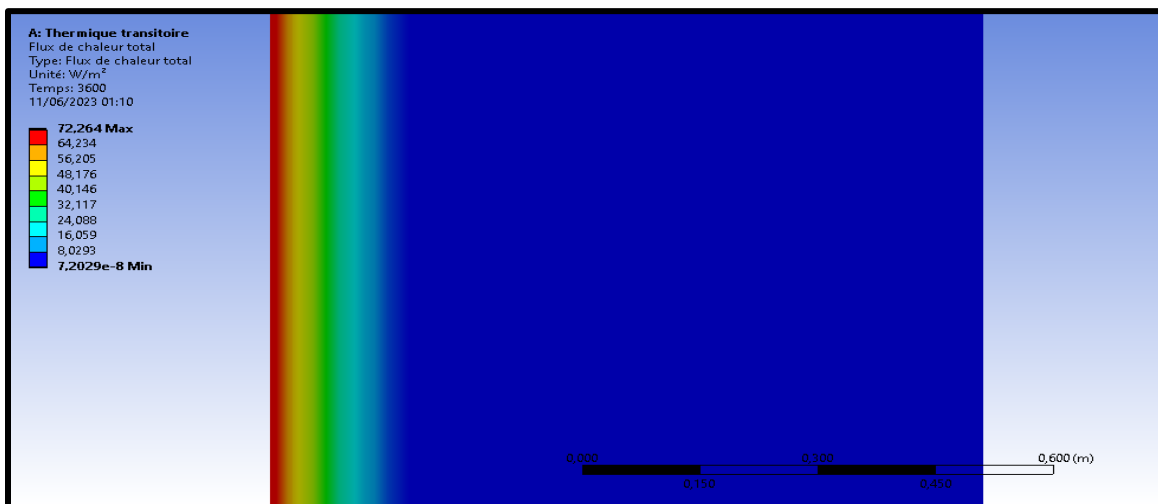
Les matériaux de la paroi, les couches de fibre de verre et de perlite en vrac, ainsi que leur épaisseur, sont efficaces pour limiter le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du réservoir.

✓ Température extérieure de  $-5^{\circ}\text{C}$  :

- Profil de température :



- Densité de flux de chaleur :



**Figure V 8:** Variation des températures et flux de chaleur pour  $T_{\text{ext}} = -5^{\circ}\text{C}$

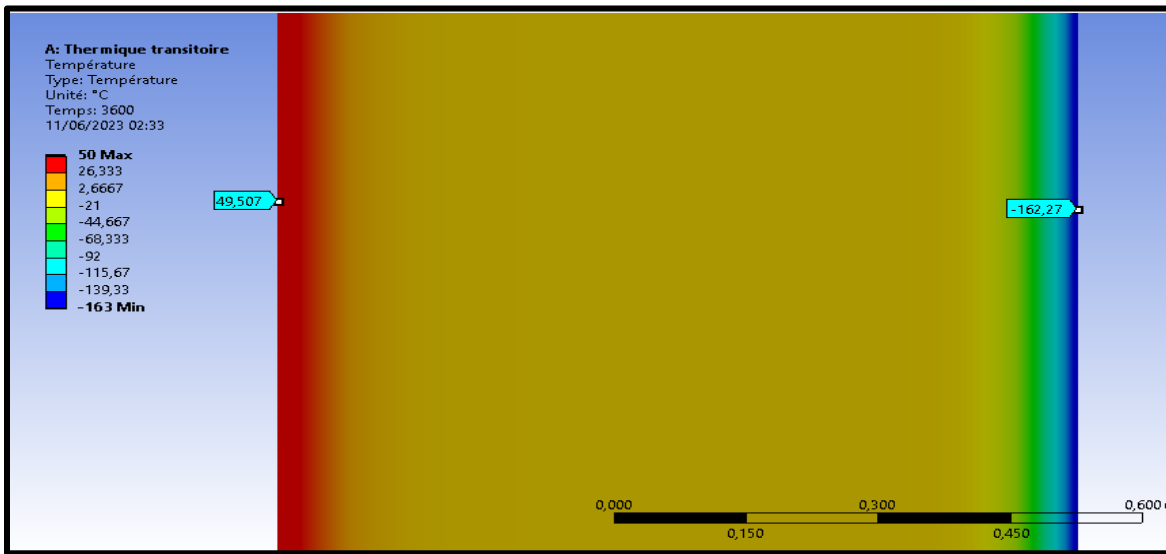
Le flux de chaleur à travers la paroi du bac de stockage de GNL est réduit par rapport au cas normal. La diminution de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bac de stockage entraîne une diminution du transfert de chaleur à travers la paroi.

Cela indique que les matériaux de la paroi, ainsi que leur épaisseur, sont efficaces pour limiter le flux de chaleur et maintenir la température intérieure.

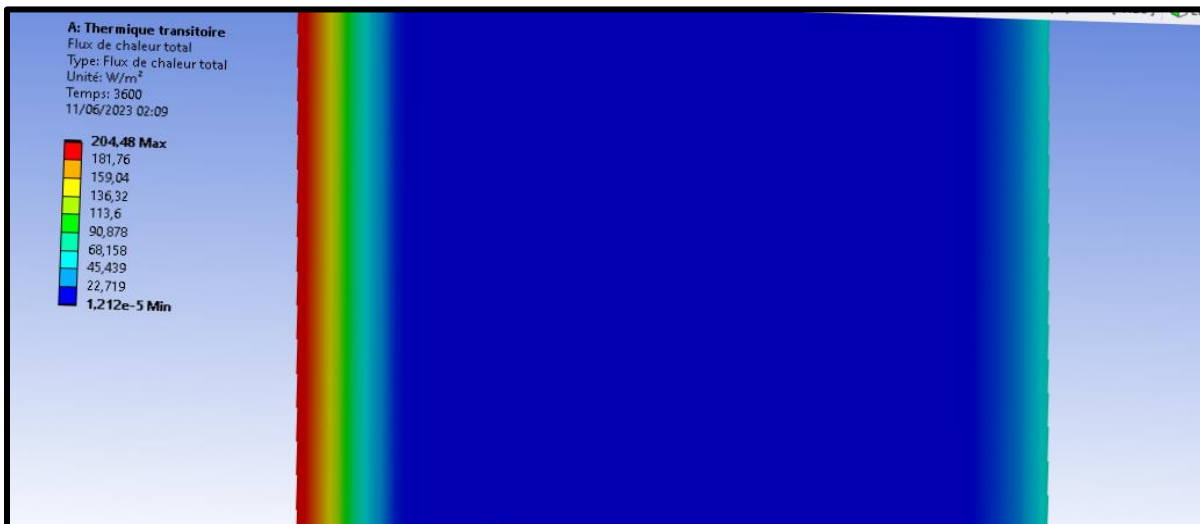
Ces résultats démontrent que le système d'isolation thermique du bac de stockage de GNL fonctionne efficacement même dans des conditions de température extérieure plus froides.

✓ Température extérieure de 50°C :

- Profil de température :



- Densité de flux de chaleur :



**Figure V 9 :** Variation des températures et flux de chaleur pour  $T_{ext} = 50\text{ °C}$

Le flux de chaleur à travers la paroi du bac de stockage de GNL est significativement plus élevé que dans le cas normal. La température extérieure élevée entraîne une augmentation du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur la valeur de la densité de flux est de 22,

Les résultats soulignent l'importance d'une isolation thermique adéquate pour minimiser le flux de chaleur et maintenir une température intérieure basse.

Il peut être nécessaire de revoir les matériaux et l'épaisseur de la paroi afin d'améliorer l'isolation thermique et de maintenir les conditions optimales à l'intérieur du bac de stockage de GNL, en particulier lorsqu'il est exposé à des températures extérieures élevées

### ❖ Discussion

Tout d'abord, on a constaté que le flux de chaleur à travers la paroi du bac de stockage de GNL varie de manière significative en fonction des variations de température extérieure. Lorsque la température extérieure augmente, le flux de chaleur à travers la paroi augmente également, et inversement. Cette relation directe entre la température extérieure et le flux de chaleur met en évidence l'importance de prendre en compte les conditions environnementales lors de la conception et de l'exploitation des bacs de stockage de GNL.

De plus, la simulation a révélé que la paroi du bac de stockage de GNL présente une bonne capacité d'isolation thermique. Malgré les fluctuations de la température extérieure, la paroi maintient une température relativement constante, limitant ainsi les perturbations thermiques dans le réservoir de GNL. Cela démontre l'efficacité de l'isolation thermique et la capacité du système à préserver la température du GNL stocké.

Cependant, il a été observé des pertes thermiques significatives à travers la paroi du bac de stockage de GNL, notamment lorsque la température extérieure est élevée. Ces pertes de chaleur pourraient avoir un impact sur l'efficacité globale du stockage du GNL et nécessiteraient une attention particulière pour minimiser ces pertes, par exemple en améliorant l'isolation thermique de la paroi ou en optimisant les systèmes de contrôle de la température.

Enfin, les résultats de la simulation ont permis de déterminer les conditions de fonctionnement optimales du bac de stockage de GNL en fonction de la température extérieure. Nous avons identifié une plage de température extérieure où le flux de chaleur est minimal, ce qui pourrait être bénéfique pour réduire les pertes thermiques et optimiser les coûts énergétiques associés au stockage du GNL.

Ces conclusions soulignent l'importance de prendre en compte les variations de température extérieure dans la conception et l'exploitation des bacs de stockage de GNL, ainsi que la nécessité d'améliorer l'isolation thermique pour réduire les pertes de chaleur.

## V.9 CONCLUSION

L'étude thermique est une composante essentielle de l'analyse approfondie du système de stockage de GNL. Elle fournit une compréhension détaillée des flux de chaleur, permet de quantifier les pertes thermiques, assure la sécurité du stockage et sert de fondement pour l'optimisation des performances thermiques. En intégrant cette dimension thermique, nous sommes en mesure de développer des solutions plus efficaces et durables pour le stockage du GNL.

Dans le but d'améliorer l'isolation thermique et d'adopter des pratiques efficaces afin de favoriser un stockage du GNL plus respectueux de l'environnement sur le plan énergétique, des approches pratiques pourront être fournies à travers les recommandations ci-après :

- ✓ Renforcer l'isolation thermique de la paroi : l'ajout de couches supplémentaires d'isolation thermique peut réduire les pertes thermiques et améliorer l'efficacité énergétique du système. On peut augmenter l'épaisseur de la perlite en vrac ou utiliser un isolant plus performant.
- ✓ Vérifier si le dimensionnement du système de refroidissement du réservoir est adapté aux variations de flux de chaleur en fonction de la température. Le système doit être capable de maintenir la température du GNL dans la plage de fonctionnement quelle que soit la température extérieure. Sinon, on doit surdimensionner le système de refroidissement.
- ✓ Optimisation des systèmes de contrôle de la température : pour minimiser les variations de température et les pertes thermiques, il est recommandé d'examiner et d'optimiser les systèmes de contrôle de la température du bac de stockage de GNL et l'automatisation du processus de contrôle pour une gestion plus efficace."

L'étude thermique est une composante essentielle de l'analyse approfondie du système de stockage de GNL. Elle fournit une compréhension détaillée des flux de chaleur, permet de quantifier les pertes thermiques, assure la sécurité du stockage et sert de fondement pour l'optimisation des performances thermiques. En intégrant cette dimension thermique, nous sommes en mesure de développer des solutions plus efficaces et durables pour le stockage du GNL.

## ***CONCLUSION GENERALE***

---



## Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études concernant le calcul de résistance dans les bacs de stockage de GNL. J'ai approfondie mes connaissances sur les différents aspects liés à la sécurité, à la performance et à l'efficacité de ces bacs. En analysant les défaillances potentielles, en effectuant des calculs mécaniques, des simulations numériques de test hydrostatique, des études thermiques et des analyses de l'effet de la température extérieure, où j'ai pu obtenir des résultats significatifs. Il est essentiel de souligner que ce projet m'a permis d'améliorer mes connaissances sur le stockage du GNL et de renforcer la compréhension des défis et des enjeux associés. Les résultats obtenus ont des implications pratiques importantes pour la conception, la sécurité et l'efficacité des bacs de stockage du GNL dans diverses applications industrielles.

L'identification des défaillances potentielles dans les bacs de stockage permet de prendre des mesures préventives pour minimiser les risques de fuites ou de déformations structurales. Les calculs mécaniques et les simulations numériques du test hydrostatique ont fourni des informations précieuses sur la résistance du bac de stockage, confirmant sa capacité à supporter les charges attendues.

L'étude thermique a permis d'évaluer les pertes thermiques et d'identifier des mesures pour améliorer l'efficacité énergétique. L'analyse de l'effet de la température extérieure a permis de comprendre l'impact de ce paramètre sur la paroi du bac de stockage, ce qui est crucial pour la gestion adéquate des températures de fonctionnement.

En conclusion, ce projet a fourni une vision globale et approfondie du calcul de résistance dans les bacs de stockage de GNL, en intégrant des aspects mécaniques, thermiques et de sécurité. Les résultats obtenus et les recommandations formulées auront des retombées pratiques importantes pour l'industrie du stockage de GNL, en améliorant la conception des bacs, en garantissant la sécurité des opérations et en optimisant l'efficacité énergétique.

## **Bibliographie**

- [1] B. Smail, "cours stockage des hydrocarbures," 2022.
- [2] "Sonatrach.com," 2023. [Online]. Available: <https://sonatrach.com/liquefaction-et-separation>.
- [3] "off-shore Technology , LNG terminal profile: Arzew GL1Z LNG Liquefaction Terminal, Algeria," 2023. [Online]. Available: <https://www.offshore-technology.com/marketdata/arzew-gl1z-lng-liquefaction-terminal-a>
- [4] A. Nassim, "Evaluation Numérique et Analytique du Boil-off dans les Bacs de," 2020.
- [5] V. T. & D. V. T. Nguyen, "Failure modes and effects analysis for LNG storage tanks," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019.
- [6] R. C. Pessier, " Failure scenarios for cryogenic tanks. Cryogenics," 2009.
- [7] T. S. P. & G. M, *Théorie de la stabilité élastique*, paris, 1972.
- [8] R. J. Y. W. C. B. R. G. & S. Roark, *Roark's Formulas for Stress and Strain* (8th edition), New York, 2012.
- [9] A. P. Institute, *API Standard 620: Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks*, Washington: API, 2018.
- [10] M. Bettayeb, "cours methode des elements finis," FHC UMBB Boumerdes , 2021.
- [11] X. S. C. C. J. & Y. Y. hen, "Parametric analysis of large-scale LNG storage tank by finite element method. *Journal of Constructional Steel Research*," 2012.
- [12] A. I. (2020), "ANSYS Workbench User's Guide," 2020.
- [13] Q. e. Q. L. Wang, "Finite element simulation of hydrostatic test for LNG storage tanks," 2017.
- [14] J. P. Holman, *Heat Transfer* (10th edition), New York, 2010.