

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 :

SAIDI Dhia Elhak

SALIM Haithem Ammar

THEME

**ETUDE DE LA RESISTANCE ET DE LA RUPTURE DU RESERVOIR DE
STOCKAGE DES HYDROCARBURES**

Soutenu publiquement le / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Président de jury	KHELIFI Touhami mohamed salah	MCA	UMBB
Examinateur	YAHY Fatma	MCB	UMBB
Examinateur	HARKAT Yamina	MAA	UMBB
Encadreur	BETTAYEB Mourad	MCA	UMBB

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : Généralités sur les réservoirs de stockage	
1 Généralités sur les réservoirs de stockage	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur le stockage des produits pétroliers.....	3
1.2.1 Classification des bacs de stockage.....	3
1.2.2 Types de bacs de stockage.....	5
1.2.3 Choix du réservoir de stockage	12
1.2.4 Terminologie concernant les réservoirs de stockage.....	12
1.3 Description de la zone de stockage d'usine de liquéfaction de gaz Natural GL1Z ARZEW	13
1.3.1 Parc de stockage et de chargement du complexe GL1/Z	14
1.3.2 Les bacs de stockage de GNL	14
1.3.3 Conceptions de réalisation d'un réservoir de stockage GNL	15
1.4 Conclusion.....	17
CHAPITRE 2 : Mécanismes de dégradations et de défaillances des bacs de stockage	
2 Mécanismes de dégradations et de défaillances des bacs de stockage	19
2.1 Introduction	19
2.2 La corrosion.....	19
2.2.1 Les différents types de corrosion.....	20
2.2.2 Taux de corrosion	21
2.3 Les affaissements et problèmes associés	21
2.4 Défaillance de structure du réservoir et de ses accessoires	22

2.5	Dégradations liées au fonctionnement cyclique	23
2.6	Dégradation des assises	23
2.7	Les fissurations	24
2.8	Techniques de préservation contre les défaillances	25
2.9	Conclusion	26

CHAPITRE 3 : Calcul de la résistance du bac de stockage

3	Calcul de la résistance du bac de stockage	27
3.1	Introduction	27
3.2	La géométrie du réservoir	27
3.3	Calcul du réservoir intérieur	28
3.3.1	Données du calcul	28
3.3.2	Dimensions du réservoir intérieur rempli de GNL	29
3.3.3	Calcul du volume	29
3.3.4	Niveau d'eau des essais hydrauliques	30
3.3.5	Calcul des épaisseurs de la robe intérieure	30
3.3.6	Contraintes maximales pendant les essais hydrauliques	32
3.4	Modèle du réservoir	32
3.5	Analyse des contraintes de la coque cylindrique	33
3.6	Conclusions	39

CHAPITRE 4 : Etude de la fissuration du bac de stockage

4	Etude de la fissuration du bac de stockage	41
4.1	Introduction	41
4.2	La mécanique de la rupture	41
4.2.1	Les trois modes de la rupture	41

4.2.2	Modélisation de la fissure du bac	42
4.3	La méthode FAD (Failure Assessment Diagram).....	43
4.3.1	Les paramètres de rupture	43
4.3.2	Niveaux d'investigation	44
4.3.3	Interprétation des résultats du diagramme FAD.....	46
4.4	Calcul par éléments finis - simulation par ANSYS	47
4.4.1	Simulation du test hydrostatique	47
4.4.2	Etude de la résistance du réservoir en présence d'une fissure	51
4.5	Conclusion.....	61
	CONCLUSION GENERALE	63

Liste des figures

Figure 1.1 Toits fixes autoportants	6
Figure 1.2 Réservoir à toit fixe type GIS	6
Figure 1.3 Toit conique supporté	7
Figure 1.4 Toit type ponton annulaire (les caissons recouvrent jusqu'à 50% de la surface du liquide).....	8
Figure 1.5 Bac à toit flottant type ponton annulaire.....	8
Figure 1.6 Toit type double pont (le caisson recouvre toute la surface du bac).....	9
Figure 1.7 Les sphères.....	10
Figure 1.8 Les sphéroïdes	10
Figure 1.9 Ballons	11
Figure 1.10 Types Equipements de la structure des bacs.....	13
Figure 1.11 Plan du complexe GL1/Z	14
Figure 1.12 Bac de stockage de GNL du complexe GL1Z	16
Figure 2.1 Corrosion interne de robe et d'un toit de bac	20
Figure 2.2 Détails de fissuration sur la paroi du réservoir	25
Figure 3.1 Géométrie du réservoir de stockage du GNL	27
Figure 3.2 Paroi étagée d'un réservoir sous pression d'eau	32
Figure 3.3 Cylindre semi-infini sous pression d'eau	33
Figure 3.4 Répartition des contraintes σ_C (2) et σ_L (1) dans la paroi du réservoir avec une épaisseur de paroi uniforme ($t_1=0.0228$ m)	37
Figure 3.5 Répartition des contraintes σ_C (2) et σ_L (1) dans la paroi du réservoir avec une épaisseur de paroi différente.....	37
Figure 3.6 Répartition du σ_c (2) et σ_L (1) contraintes dans la paroi latérale du réservoir de stockage de GNL. ($T = -163^\circ\text{C}$)	38
Figure 3.7 Diagramme du moment de flexion	38

Figure 4.1 Les trois modes de rupture.....	42
Figure 4.2 Modèle de plaque avec fissure.....	42
Figure 4.3 FAD pour les trois niveaux d'investigation possibles	44
Figure 4.4 Détermination de la taille critique des fissures-FAD.....	46
Figure 4.5 Liste des données.....	47
Figure 4.6 Modélisation du bac de stockage.....	48
Figure 4.7 Le maillage du bac.....	49
Figure 4.8 La variation de l'intensité de contrainte	50
Figure 4.9 Introduction de la force hydrostatique.....	50
Figure 4.10 Variation de la contrainte équivalente de Von Mises	51
Figure 4.11 Liste des données et Géométrie	52
Figure 4.12 Le maillage de la plaque et raffinement du maillage.....	53
Figure 4.13 Paramètres de la fissure	54
Figure 4.14 Système de coordonnées.....	54
Figure 4.15 Contraintes équivalentes de Von Mises	57
Figure 4.16 Distributions de K_I au front des fissures	59
Figure 4.17 comparaison des résultats analytiques(1) et numériques par Ansys(2)	60

Liste des tableaux

Tableau 3-1 Epaisseurs des viroles de la robe intérieure	31
Tableau 3-2 Principales données techniques du réservoir de stockage du GNL	33
Tableau 4-1 les résultats du calcul	45
Tableau 4-2 Différentes dimensions de fissures	55
Tableau 4-3 comparaison des résultats analytiques et numériques par Ansys de K_1 ...	60

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, le monde est confronté à d'importants progrès technologiques dans tous les domaines, notamment dans l'industrie des hydrocarbures qui connaît un développement remarquable à travers le monde, notamment en Algérie, que ce soit dans le domaine de la recherche, la fabrication, la pétrochimie ou la conservation. Ce domaine revêt une grande importance dans l'industrie pétrolière et les réservoirs jouent un rôle crucial dans le stockage. Ils garantissent la durabilité de la production même en cas d'interruptions accidentelles. Les réservoirs de stockage jouent un rôle essentiel dans l'exploitation des champs pétroliers, car ils garantissent une production continue.

Les produits d'hydrocarbures sont stockés dans des réservoirs en fonction de leur nature et de leur volatilité, ainsi que de la capacité à maintenir leur structure à la pression interne développée par ces produits. Cette analyse peut être réalisée en utilisant des outils tels que différentes approches théoriques, numériques et pratiques. On peut trouver des réservoirs de forme cylindrique ou sphérique. La nature, l'environnement et l'utilisation du produit stocké déterminent qu'ils soient aériens ou souterrains, horizontaux ou verticaux.

Dans ce mémoire, nous aborderons les chapitres suivants :

Chapitre 01 : Introduction aux réservoirs de stockage, à leurs différents types et à leurs particularités. Notre étude se basera sur une description du réservoir de stockage spécifique au lieu de notre stage.

Chapitre 02 : Problèmes de dysfonctionnement et types des de défaillance dans les 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, le poids du contenu, etc.

Chapitre 04 : Simulation numérique pour évaluer la résistance du réservoir de stockage en présence d'une fissure dans sa paroi latérale qui peut se produire dans la direction axiale de la première couche de la coque, où les contraintes circonférentielles les plus importantes se manifestent. Une analyse par le diagramme d'analyse des défaillances FAD a été effectuée dans le but d'obtenir les dimensions critiques de la fissure. Ainsi que le calcul par la méthode des éléments finis, par simulation par Ansys.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les réservoirs de stockage

1 Généralités sur les réservoirs de stockage

1.1 Introduction

Pour répondre à la grande variété des produits liquides industriels à stocker, les constructeurs ont recours à des réservoirs de formes diverses et de conceptions différentes, étudiés pour s'adapter le plus rationnellement et le plus économiquement possible aux caractéristiques du produit à traiter.

La configuration d'un réservoir dépend de deux impératifs essentiels qui sont :

- La conservation du produit en limitant ou en interdisant les évaporations.
- La tenue de la structure à la pression interne développée par le produit ou maintenue à un certain niveau pour faciliter l'exploitation.

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 importante, on a recours à des formes sphériques mieux adaptées que les cylindres et qui permettent de réduire les épaisseurs de paroi.

Dans ce chapitre, nous allons examiner les différents types de réservoirs de stockage, les critères principaux à considérer lors du choix d'un bac de stockage, ainsi qu'une description générale du lieu de stage.

1.2 Généralités sur le stockage des produits pétroliers

1.2.1 Classification des bacs de stockage

Les bacs de stockage sont classés de la manière suivante :

i. En fonction du produit stocké

- Catégorie "A" hydrocarbures liquéfiés dont la pression de vapeur à 15 C ° est supérieure à 1bar.
 - Catégorie "A-1" hydrocarbures maintenus liquéfiés à une température inférieure à 0 C°.
 - Catégorie "A-2" hydrocarbures liquéfiés dans d'autres conditions
- Catégorie "B" hydrocarbures liquides dont le point d'éclair est inférieur à 55 C °.
- Catégorie "C" hydrocarbures liquides à point d'éclair supérieur ou égal à 55 C° et inférieur à 100 C°.

- Catégorie "D" hydrocarbures liquides dont le point d'éclair est supérieur ou égal à 100 C° [1].

- ✓ ***Stockage de produit de catégorie A-1***

- L'objectif de ce stockage est de maintenir le produit à une température suffisamment basse pour réduire sa tension de vapeur sous l'action de la pression atmosphérique.

-Les épaisseurs utilisées déterminées par rapport à l'action de la charge hydrostatique.

-Les matériaux utilisés doivent avoir un bon comportement mécanique aux basses températures.

-Ce type de stockage ne s'intéresse pas aux dépôts, mais seulement à la pétrochimie ou les usines de gaz naturel liquéfié *G.N.L.*

- ✓ ***Stockage de produits catégorie A-2***

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.

- ✓ ***Stockage de produits de catégorie B***

Les produits sont stockés dans des bacs, à toit fixe, à toit flottant, à écran flottant, sous une pression voisine de la pression atmosphérique.

- ✓ ***Stockage de produits de catégorie C***

Les produits de cette catégorie sont stockés dans des bacs à toit fixe sous une pression voisine de pression atmosphérique. Lorsque les volumes à stocker sont importants.

- ✓ ***Stockage de produits de catégorie D***

Ces produits sont stockés dans des bacs à toit fixe [2].

ii. En fonction de la matière utilisée pour leur construction

En générale, dans l'industrie pétrolière, on utilise des bacs de stockage en acier, le choix de l'acier dépend de trois facteurs qui sont :

- La résistance mécanique de l'acier ;
- La résistance à la corrosion
- Les conditions de travail (pression et dépression)

Mais on trouve aussi autres matières de construction comme :

- Bacs de stockage en acier ;
- Bacs de stockage en béton armé
- Bacs de stockage en matières souple

iii. En fonction de leur exploitation

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

iv. En fonction de leur position par rapport au niveau du sol

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

1.2.2 Types de bacs de stockage

I. Réservoirs de stockage à pression atmosphérique

Les réservoirs atmosphériques représentent la très grande majorité du parc de réservoir de grande capacité contenant des liquides inflammables. Ce type de stockage est constitué d'un ensemble de tôle d'acier au carbone assemblé par soudage et est utilisé sous une pression voisine de la pression atmosphérique. Ces bacs de stockage sont sous forme cylindrique et sont constitués de :

- Un fond généralement bombé ;
- Une robe ou virole ;
- De différents accessoires : échelle d'accès, soupapes de sureté, protection anti-incendie.

✓ **Les bacs à toit fixe**

Le bac équipé d'un toit fixe du type conique en parasol est le plus économique à installer. Le toit fixe est d'une construction simple et, selon la taille du bac, il peut être du type

Autoportant ou conique supporté.

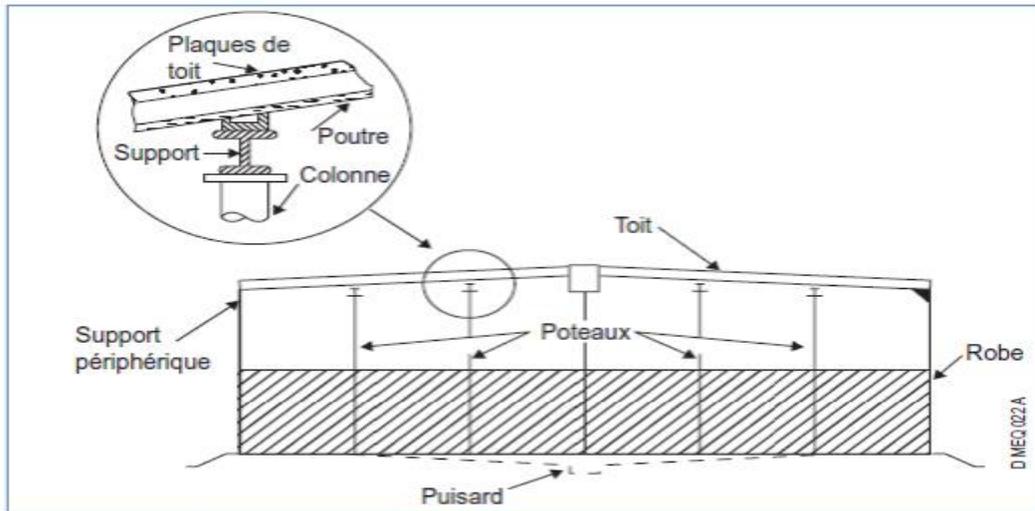


Figure 1.1 Toits fixes autoportants

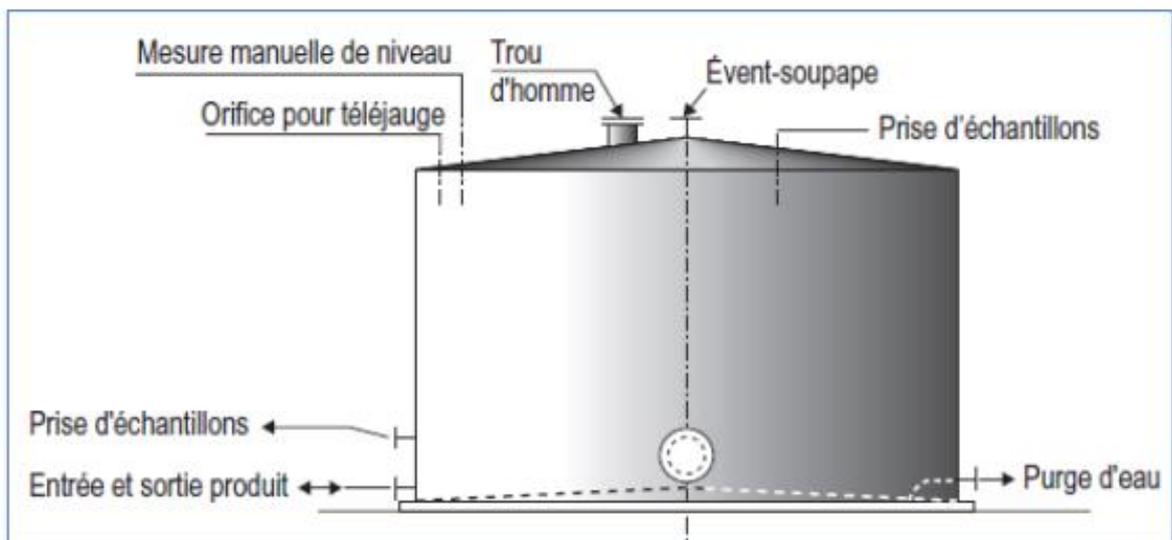


Figure 1.2 Réservoir à toit fixe type GIS

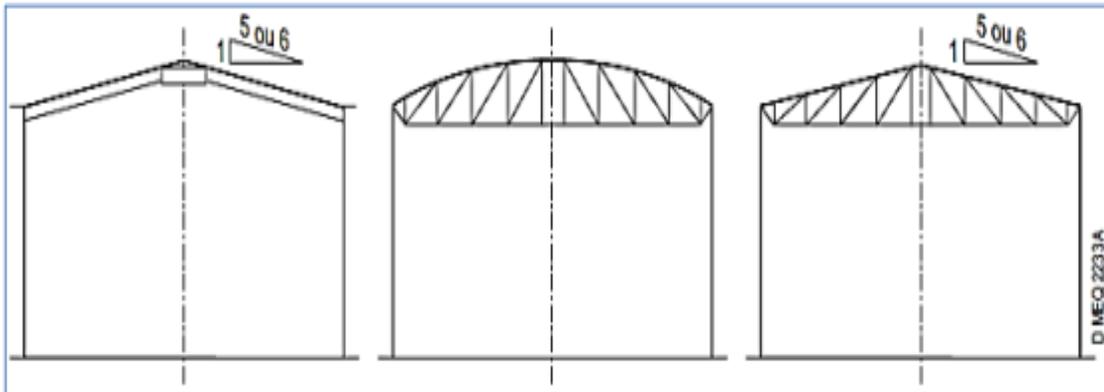


Figure 1.3 Toit conique supporté

✓ Les bacs à toit flottant

Un toit flottant est posé directement sur la surface du liquide. Il suit les mouvements de montée et de descente du produit.

Ils présentent trois avantages :

- Réduction des pertes par évaporation
- Diminution des risques d'incendie
- Diminution de la pollution atmosphérique (odeurs)

❖ Les types de toits flottants

Il existe différents types de toits flottants.

a) Le toit à simple pont (ponton annulaire)

Un toit flottant à simple pont est constitué d'un ponton annulaire formé de caissons compartimentés et d'un caisson central. L'espace entre les caissons est constitué d'une surface métallique étanche formée de tôles soudées. Le rapport entre la surface des caissons et la surface totale du toit fonction de la taille du bac, et aussi de la portance offerte par le liquide Stocké [3].

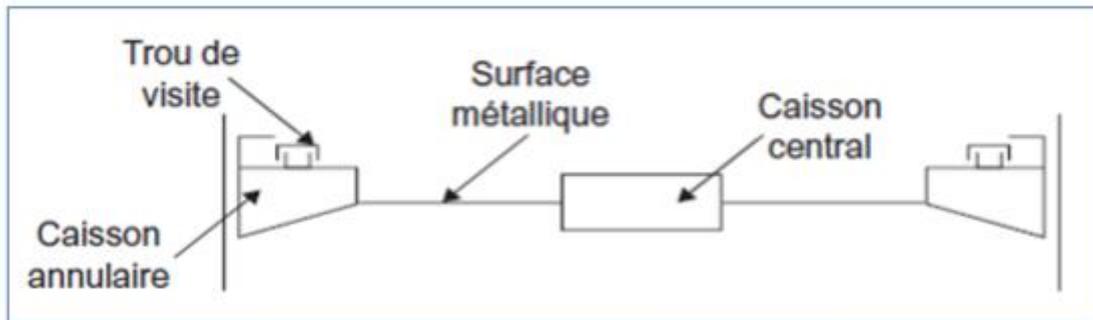


Figure 1.4 Toit type ponton annulaire (les caissons recouvrent jusqu'à 50% de la surface du liquide)

Cet accessoire de toit type ponton annulaire suivant :

- Les caissons de ponton constituent un matelas d'air qui protège le liquide contre une trop importante élévation de température due à la chaleur solaire.
- La surface métallique est libre de gonfler pour libérer l'espace nécessaire aux vapeurs qui peuvent se former
- Les pontons sont compartimentés par des cloisons radiales, ce qui assure la flottaison du toit
- Le drainage des eaux de pluie est nécessaire, car la pluie, la neige, qui tombent sur le toit flottant, diminuent la flottabilité, augmentant la corrosion.

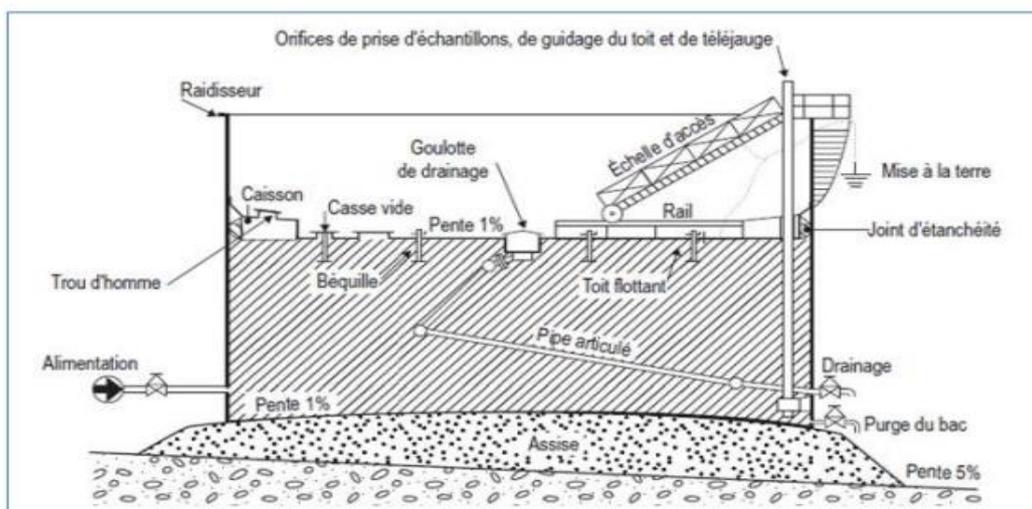


Figure 1.5 Bac à toit flottant type ponton annulaire

b) Le toit à double pont

Le toit à double pont est constitué par deux couches de tôle d'acier, séparées par un espace vide d'environ 40cm compartimenté en caissons indépendants renforçant la structure du toit.

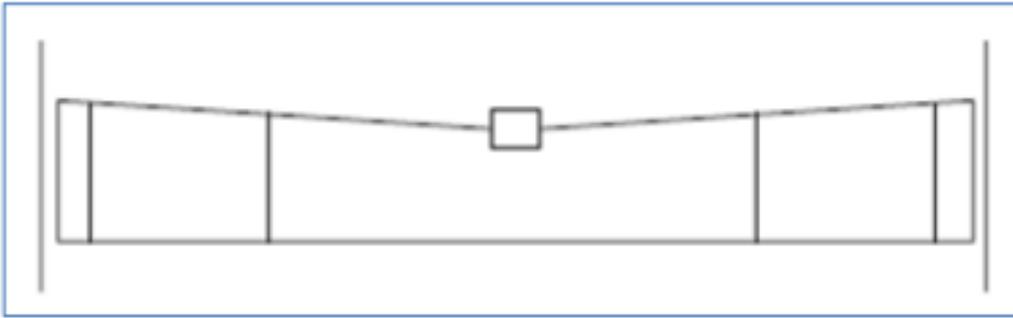


Figure 1.6 Toit type double pont (le caisson recouvre toute la surface du bac)

II. Bacs de stockage sous pression

Ils concernent principalement les hydrocarbures liquéfiés qui appartiennent à la catégorie A, Ces derniers se trouvent alors stockés sous leur propre tension de vapeur et la pression de stockage, dépend uniquement :

- De la nature du produit ;
- De la température de stockage.

Le plus souvent, les gaz liquéfiés sont stockés à la température ambiante. Pour ce mode de Stockage différents types de capacités sont utilisés : les sphères, Sphéroïdes, Ballons.

✓ Les sphères

La forme sphérique permet de mieux utiliser la résistance de la tôle et d'obtenir un moindre coût de fabrication. Le remplissage et la vidange s'effectuent à la partie inférieure de la sphère par une conduite sur laquelle est monté en général un clapet hydraulique de sécurité.

Des escaliers permettent l'exploitation des matériels tels que jauges manuelle, manomètres, événements, thermomètres, soupapes, situés au sommet. La protection incendie est assurée par des rampes de pulvérisation d'eau qui peuvent être éventuellement pendant l'été comme rampes de réfrigération.

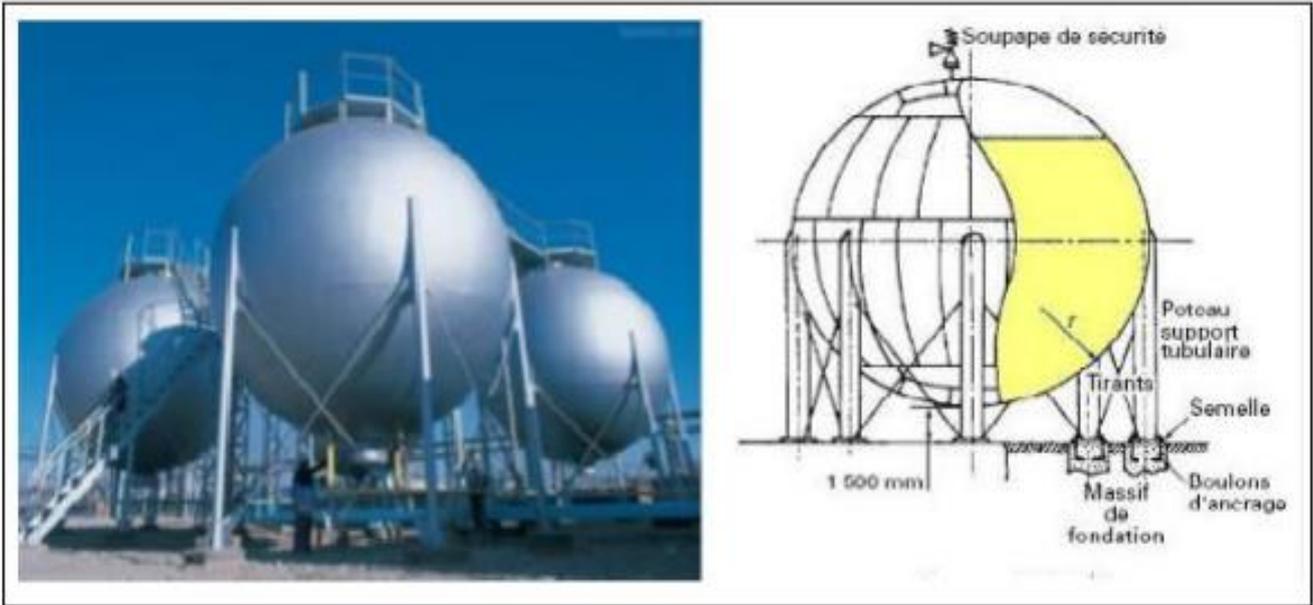


Figure 1.7 Les sphères

✓ **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.

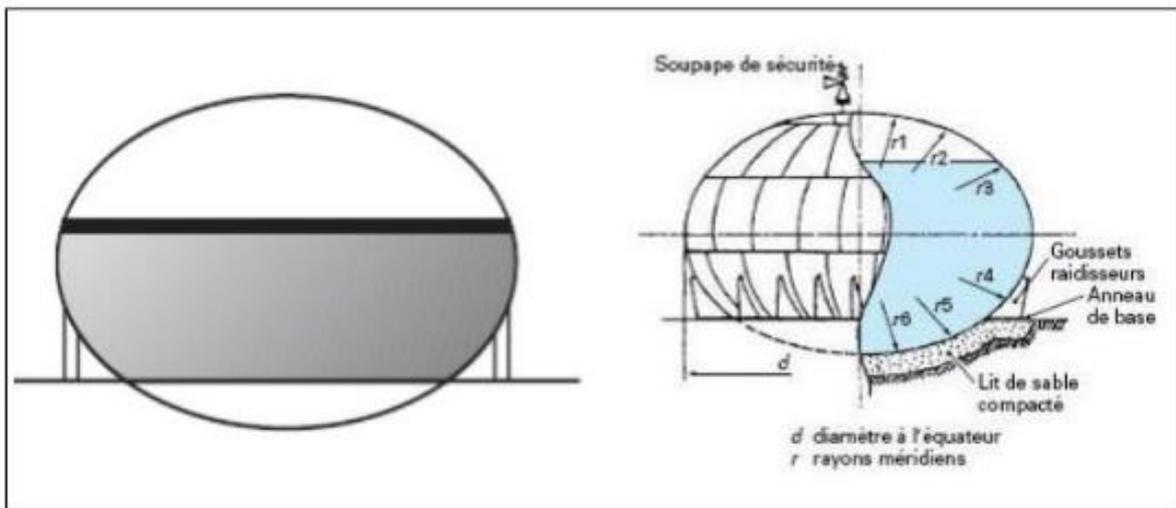


Figure 1.8 Les sphéroïdes

✓ Ballons

Ce genre de réservoir est destiné en premier choix pour le stockage des produits qui nécessitent une pression importante, ils peuvent être aérien ou placés sous un talus de terre.

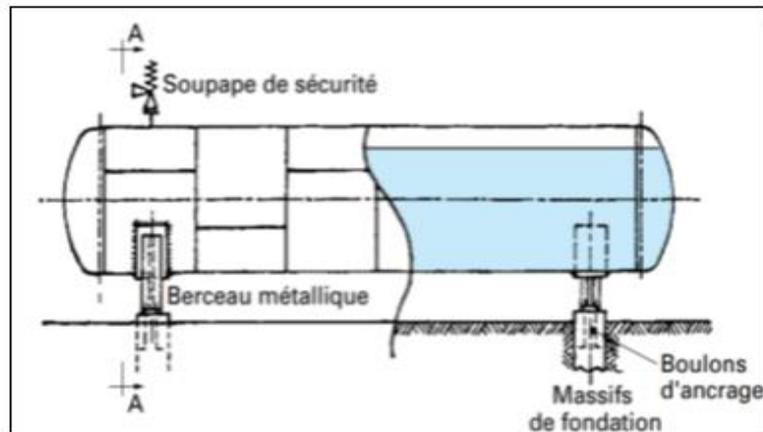


Figure 1.9 Ballons

III. 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.

1.2.3 Choix du réservoir de stockage

La définition des hypothèses du choix d'un réservoir de stockage se passe par :

a) Conditions du site

Selon l'emplacement du réservoir, il y a des normes de vent et de séisme relatif à chaque Pays à chaque région qui définit la zone, la pression du vent et du séisme et la classe de L'ouvrage.

b) Condition de service

Les conditions de service englobent la densité du produit la température, la pression, la dépression, la surpression qui émanent de l'exploitation finale.

c) Géométrie du réservoir

La description de la géométrie du réservoir se fait à partir du cahier des charges du client ou à partir d'un besoin client bien exprimé qui contient un plan de détail du réservoir où simplement à partir des données géométriques voulues.

1.2.4 Terminologie concernant les réservoirs de stockage

Robe : partie cylindrique de l'enveloppe.

Fond : partie inférieure de l'enveloppe formant la base de la robe.

Toit-couverture : partie supérieure de l'enveloppe (couverture et charpente qui La porte).

Charpente : raidisseur, fermes, longrines et chevrons portant la couverture.

Virole : de la robe correspondant à la hauteur d'une tôle. Le numérotage des viroles s'effectue du bas vers le haut.

Cornière de tête (ou de rive) : liaison entre robe et couverture.

Joint : liaison entre 2 tôles, entre profilé et tôle et 2 profilés.

Soudure : apport de métal assurant le joint.

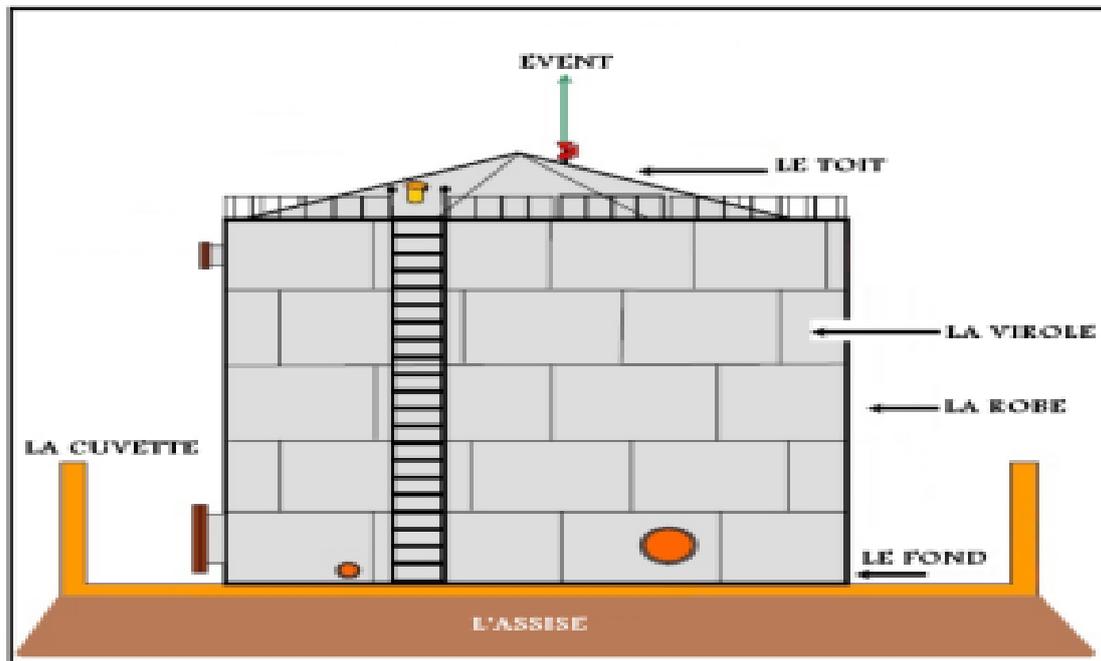


Figure 1.10 Types Equipements de la structure des bacs

1.3 Description de la zone de stockage d'usine de liquéfaction de gaz Natural GL1Z ARZEW

Dans le cadre de l'objectif stratégique de valorisation des ressources en gaz naturel, principalement, du gisement de HASSI R'MEL, des usines de GNL ont été construites dans le nord du pays dont le but principal est l'exportation du GNL vers l'Europe et les USA par méthaniers. Parmi ces usines, nous citons le complexe GL1/Z d'ARZEW. Le Parc Industriel GNL GL1/Z, l'une des réalisations industrielles les plus importantes de la chaîne de traitement des hydrocarbures, est exploitée par la société algérienne SONATRACH. Le complexe GL1/Z a pour tâche de transformer le gaz naturel transporté par pipeline depuis le champ Hassi R'mel en gaz naturel liquéfié (GNL), avec la possibilité d'extraire du propane, du butane et de l'essence, qui sera ensuite transporté par méthanier à sa destination pour les pays étrangers. [4].

- 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 m³ 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 m³.

- Le chargement d'un méthanier de 125.000 m³ de GNL peut être réalisé en 12,5 heures environ ; avec un débit de chargement maximum de 10.000 m³/heures.

1.3.3 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

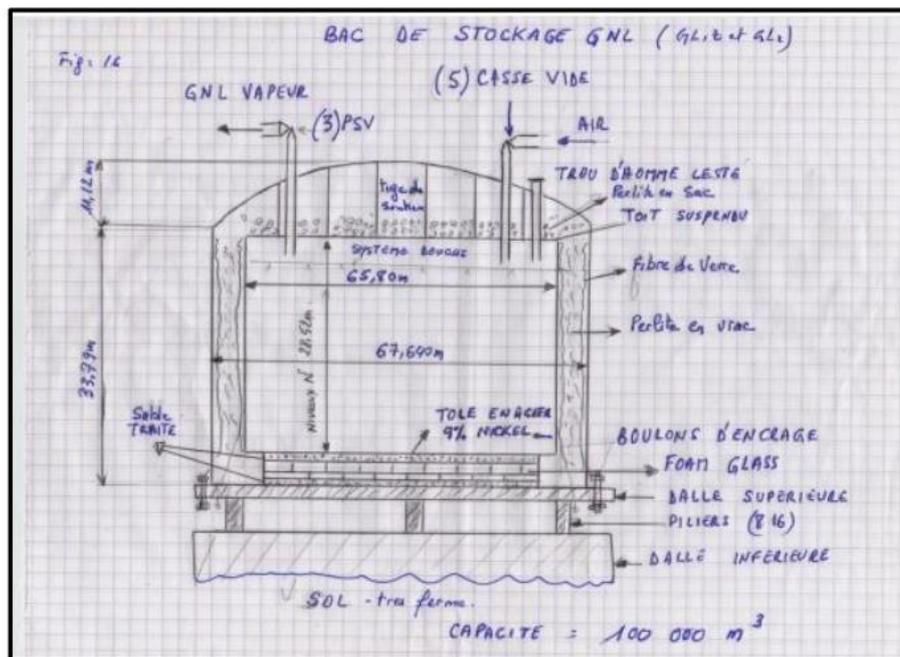


Figure 1.12 Bac de stockage de GNL du complexe GL1Z

✓ 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.[6]

✓ 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 $D= 70$ 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 (60×60) cm² 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 $D= 70$ 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

1.4 Conclusion

En résumé, ce chapitre nous a donné l'occasion d'explorer les diverses catégories et formes de réservoirs de stockage. Les caractéristiques et les utilisations particulières de chaque type de réservoir ont été étudiées. Il est évident que la sélection du réservoir de stockage repose sur divers éléments, tels que la nature du produit à conserver, la capacité de stockage nécessaire, les exigences environnementales et réglementaires, ainsi que les aspects économiques. Il est crucial de considérer ces critères lorsqu'on choisit le réservoir de stockage adéquat, pour garantir une solution performante, sécurisée et abordable.

Finalement, la variété des réservoirs de stockage apporte une grande souplesse et une capacité d'adaptation précieuse afin de satisfaire les différentes exigences de l'industrie, en garantissant un stockage efficace et fiable des produits.

CHAPITRE 2 : Mécanismes de dégradations et de défaillances des bacs de stockage

2 Mécanismes de dégradations et de défaillances des bacs de stockage

2.1 Introduction

Les bacs de stockage jouent un rôle crucial dans diverses industries en permettant le stockage sécurisé et efficace de liquides, de produits chimiques et de matériaux divers. Cependant, malgré leur importance, ces bacs sont sujets à des mécanismes de dégradations et de défaillances qui peuvent compromettre leur intégrité et entraîner des conséquences potentiellement graves sur l'environnement, la sécurité des travailleurs et la viabilité économique des entreprises.

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. 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 :

- La corrosion.
- Les affaissements et problèmes associés.
- Les défaillances de structure du réservoir et de ses accessoires.
- Dégradations liées au fonctionnement cyclique.
- Dégradation des assises.
- La fissuration. [7]

2.2 La corrosion

La corrosion est l'un des principaux modes de dégradation des réservoirs de stockage, elle peut être de nature électrochimique, bactérienne et peut affecter l'ensemble des composants d'un réservoir de stockage tant en interne qu'en externe. Par ailleurs, la corrosion peut être soit localisée soit généralisée.

La corrosion généralisée associée à la corrosion par piqûres peut se produire à l'intérieur ou à l'extérieur. Alors que des piqûres isolées peuvent créer des fuites mineures, la concentration d'un grand nombre de piqûres ou une zone de corrosion localisée, peuvent provoquer une fuite majeure.[7]



Figure 2.1 Corrosion interne de robe et d'un toit de bac

2.2.1 Les différents types de corrosion

Les divers cas de corrosion affectant les réservoirs de stockage ne peuvent être que de nature électrochimique, c'est à dire qu'ils nécessitent la présence d'eau liquide au contact de la paroi de l'acier. Une espèce " oxydante " est par ailleurs indispensable pour alimenter les piles de corrosion : c'est soit l'ion H^+ , et on parlera alors de corrosion " acide " (significative aux bas pH), soit l'oxygène dissous dans l'eau. C'est aussi bien le cas de la corrosion de l'intérieur des réservoirs par l'eau liquide pouvant séparer et venir au contact de l'acier, que celle de la corrosion de leur paroi externe exposée à l'air (la corrosion atmosphérique provient de l'humidité adsorbée sur l'acier et des pluies) ou aux sols (la corrosion provient de l'humidité inhérente à tous terrains).

La corrosion dite " bactérienne " rencontrée fréquemment (sous la forme de cratères) est provoquée par une augmentation locale de la corrosivité dans des zones où des colonies de bactéries sulfato-réductrices (BSR) trouvent les conditions physico-chimiques favorables à leur prolifération : absence totale d'oxygène dissous (bactéries anaérobies), présence de sources de carbone (hydrocarbures et autres composés organiques), présence d'ions sulfates qu'elles " respirent " pour les réduire en sulfure, généralement sous la forme de H_2S (qui provoque ensuite la corrosion du fait de son caractère acide en présence d'eau), pH et température modérés.

- Les points essentiels de la corrosion bactérienne sont :
 - des taux de corrosion plus élevés que les mécanismes de corrosion « normaux »,
 - des niveaux élevés de réparation.
- Les options principales qui existent pour empêcher la corrosion bactérienne sont de façon préventive :
 - le drainage régulier de l'eau présente au niveau du fond réservoir,
 - la réalisation d'un revêtement interne lors de l'arrêt du réservoir.

A titre curatif si nécessaire : utilisation de bactéricides sous réserve de respecter les précautions relatives à l'usage de ces produits.

2.2.2 Taux de corrosion

La nature du produit stocké et la vapeur présente dans l'espace situé au-dessus du produit dans les réservoirs à toit fixe sont toutes deux des facteurs déterminants pour la vitesse de corrosion.

La nuance et la qualité du matériau du réservoir par rapport à sa résistance et à l'agressivité du produit stocké sont un autre facteur. Le taux de corrosion est établi sur la base de l'historique des épaisseurs mesurées lors des différentes inspections.

En l'absence d'historique de taux de corrosion sur un réservoir il pourra être nécessaire d'utiliser soit des données issues de la littérature soit des données issues de réservoirs témoins ou bien de réservoirs similaires.

Il convient de noter que les taux de corrosion sont différents selon les parties du réservoir considérées. Par ailleurs, il convient de prendre en considération les effets engendrés par les modifications passées et futures des conditions de service sur la durée de vie du réservoir.

2.3 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.[8]

2.4 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.
- Rainurage de la robe par un écran interne ou un toit flottant.
- Flambage de la robe.
- Défaut de verticalité des poteaux de support de la charpente.

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.

2.5 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 $3,6 * 10^4$. Pour un stockage de dépôt, le nombre de cycles est encore plus réduit, soit inférieur à $3 * 10^3$. 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. [9]

2.6 Dégradation des assises

Les causes principales de détérioration des assises sont :

- Le tassement des assises
- L'érosion
- La dégradation du béton par : calcination, attaque par eau souterraine, attaque par gel, attaque chimique et végétation non contrôlée.

Les fissures créées par la dégradation du béton peuvent créer des points d'entrée pour l'eau et contribuer à des phénomènes de corrosion au niveau de la tôle annulaire voire du fond.

Par ailleurs, selon que la dégradation des assises soit uniforme ou non, celle-ci peut induire des phénomènes similaires à ceux des tassements évoqués précédemment, à savoir :

- Inclinaison du réservoir
- Tassements différentiels
- Déformation du fond du fait des contraintes générées. [8]

2.7 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.[9]

- **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.



Figure 2.2 Détails de fissuration sur la paroi du réservoir

2.8 Techniques de préservation contre les défaillances

Il existe plusieurs méthodes et techniques pour lutter contre les défaillances et la dégradation des bacs de stockage :

- 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.

2.9 Conclusion

En conclusion, la compréhension des mécanismes de dégradation et de défaillance des bacs de stockage est essentielle pour assurer leur intégrité structurelle et prévenir les incidents potentiellement dangereux. En adoptant une approche proactive en matière de maintenance et de gestion des risques, il est possible d'améliorer la fiabilité et la sécurité des installations de stockage, tout en préservant l'environnement et la santé publique.

De plus, une culture de sécurité solide, associée à une formation adéquate du personnel, est essentielle pour sensibiliser aux risques et garantir une intervention rapide en cas de détection de dégradations potentielles.

CHAPITRE 3 : Calcul de la résistance du bac de stockage

3 Calcul de la résistance du bac de stockage

3.1 Introduction

Le GNL est stocké à des températures cryogéniques extrêmement basses, proches de -163°C , ce qui réduit son volume et facilite son transport et son stockage. Cependant, ces températures extrêmes présentent des défis en matière de résistance structurelle et de sécurité. Ce chapitre explore les principes de calcul de résistance spécifiques aux réservoirs de GNL, en abordant les forces et les contraintes auxquelles ils sont soumis, ainsi que les précautions nécessaires pour garantir leur sécurité et fiabilité. Les principales forces incluent le poids du liquide, nécessitant des calculs précis pour déterminer l'épaisseur requise du matériau de construction, et les variations thermiques importantes, qui exigent la prise en compte des coefficients de dilatation thermique et des effets d'isolation pour assurer une conception structurelle appropriée. En outre, la sécurité est une préoccupation majeure, avec la nécessité de concevoir les réservoirs pour résister à des événements tels que les fuites, les incendies ou les explosions potentielles, en évaluant les charges externes, les forces sismiques et les contraintes de pression pour assurer la résistance structurelle face à ces situations d'urgence.

3.2 La géométrie du réservoir

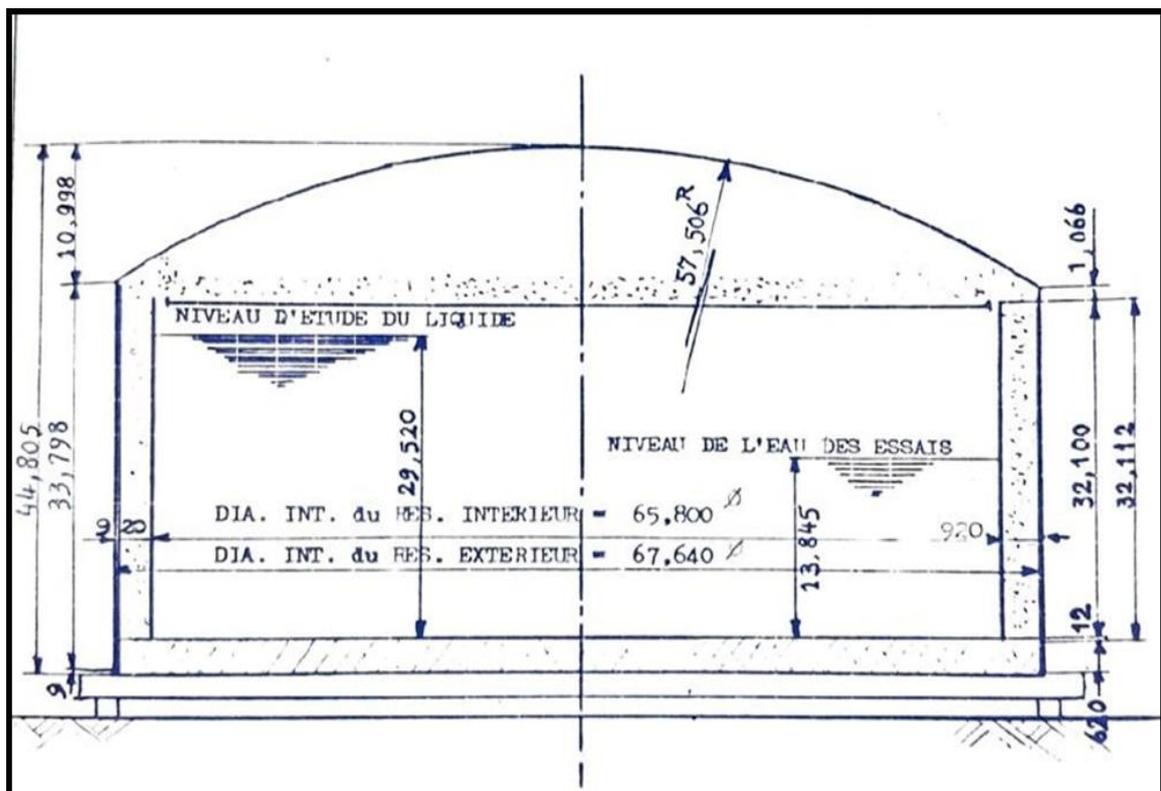


Figure 3.1 Géométrie du réservoir de stockage du GNL

3.3 Calcul du réservoir intérieur

3.3.1 Données du calcul

Capacité de stockage : $100\ 000\ m^3$

Contenu : gaz naturel liquéfié - GNL

Densité du liquide d'étude = $469\ Kg/m^3$

Pression d'étude interne = $0.0703\ kg/cm^2$

Température d'étude interne = $-163^\circ\ C$

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

- **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 $R_m = 95\ 000\ psi$ et une limite élastique minimal de $\sigma_e = 52\ 500\ psi$.

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

Ici nous avons :

$$x_1 = 1,6$$

$$x_2 = 3,0 \quad \text{d'après tableau C162 1 a)}$$

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

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

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

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

3.3.2 Dimensions du réservoir intérieur rempli de GNL

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

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

$$25\text{ °C à }0\text{ °C} = 11 \times 10^{-6}\text{ °C}^{-1}$$

$$0\text{ °C à }-150\text{ °C} = 9.5 * 10^{-6}\text{ °C}^{-1}$$

$$-150\text{ °C à }-163\text{ °C} = 7.2 * 10^{-6}\text{ °C}^{-1}$$

La déformation unitaire selon la température est donnée par,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\alpha} (T - T_0)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$: est la déformation unitaire

$\boldsymbol{\alpha}$: est le coefficient de dilatation thermique.

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

$$\begin{aligned} \text{Diamètre à froid} &= 65\,800 - 65\,800 * (11*25 + 9.5*150 + 7.2*13) * 10^{-6} \\ &= 65681.98\text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Hauteur de robe à froid} &= 32\,100 - 32\,100 * (11*25 + 9.5*150 + 7.2*13) * 10^{-6} \\ &= 32042.425\text{ mm} \end{aligned}$$

3.3.3 Calcul du volume

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

Dans lequel :

$$D = \text{diamètre à froid} = 65\,682\text{ mm}$$

H = niveau maximum d'étude du liquide

V = capacité nécessaire = 100 000 m³

$$H = \frac{V}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{100000}{\frac{\pi}{4} * 65.682^2}$$

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

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

3.3.4 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 1.5 fois la pression d'étude de la robe extérieure doit être surimposée à la charge statique du liquide pour les essais » Par conséquent :

Le niveau d'eau des essais hydraulique est : 29.520 * 0.469 = 13.845 m

La pression d'essai pneumatique est : 0.0703 x 1.50 = 0.1054 Kg/cm²

3.3.5 Calcul des épaisseurs de la robe intérieure

$$t = (PD)/(2\sigma_{adm}E) + C$$

Dans laquelle :

D = diamètre du réservoir à froid = 65 680 mm

σ_{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 3-1 Épaisseurs des viroles de la robe intérieure

N °	Hauteur du liquide (cm)	Charge statique du liquide (kg/cm ²)	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

3.3.6 Contraintes maximales 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. [10]

3.4 Modèle du réservoir

La modélisation des réservoirs de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL) est une étape cruciale pour assurer la conception, l'analyse et la sécurité de ces structures complexes. Cette modélisation permet de simuler les conditions réelles et d'évaluer les performances des réservoirs sous différentes contraintes.

Le fond du réservoir est constitué d'une plaque annulaire de $t=22.8\text{mm}$ d'épaisseur. Les plaques du réservoir sont soudées. Les parois latérales de la coque du réservoir sont soudées à partir de tôles d'acier séparées disposées selon une forme quadrangulaire régulière. Les tôles sont soudées entre elles et disposées en bandes horizontales dont l'épaisseur diminue vers le haut (Figure 3.2).

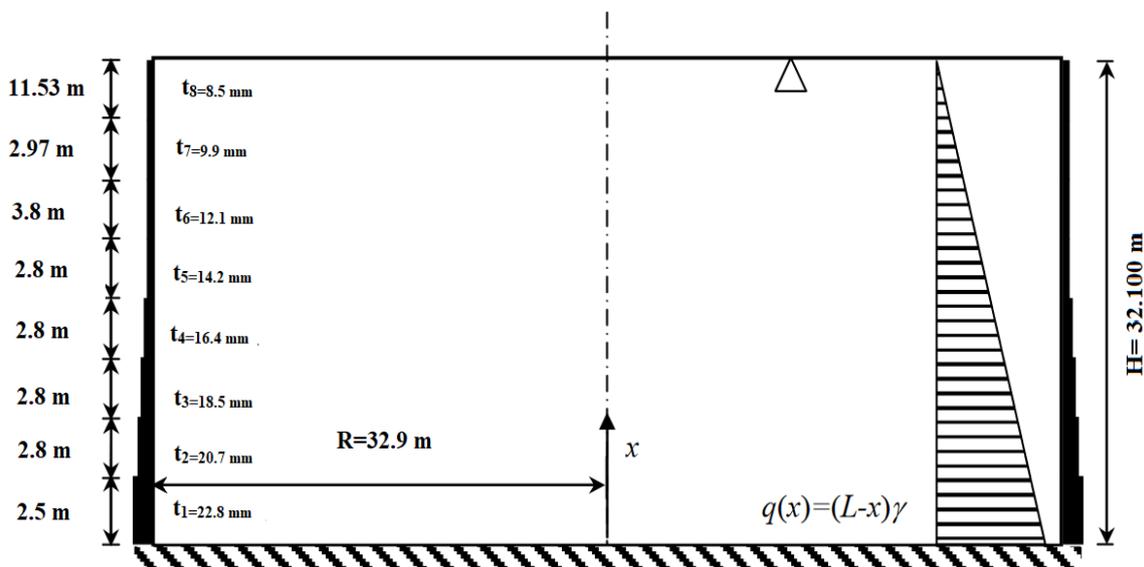


Figure 3.2 Paroi étagée d'un réservoir sous pression d'eau

Tableau 3-2 Principales données techniques du réservoir de stockage du GNL

Paramètre	Valeur
Diamètre intérieur, m	65.8
Hauteur de la partie cylindrique, m	32.1
Épaisseur de la coque cylindrique, mm	À partir de 22.8 à 8.5
Épaisseur de la coque inférieure, mm	22.8
Volume, m ³ (pour la hauteur de surface du GNL)	100 000

3.5 Analyse des contraintes de la coque cylindrique

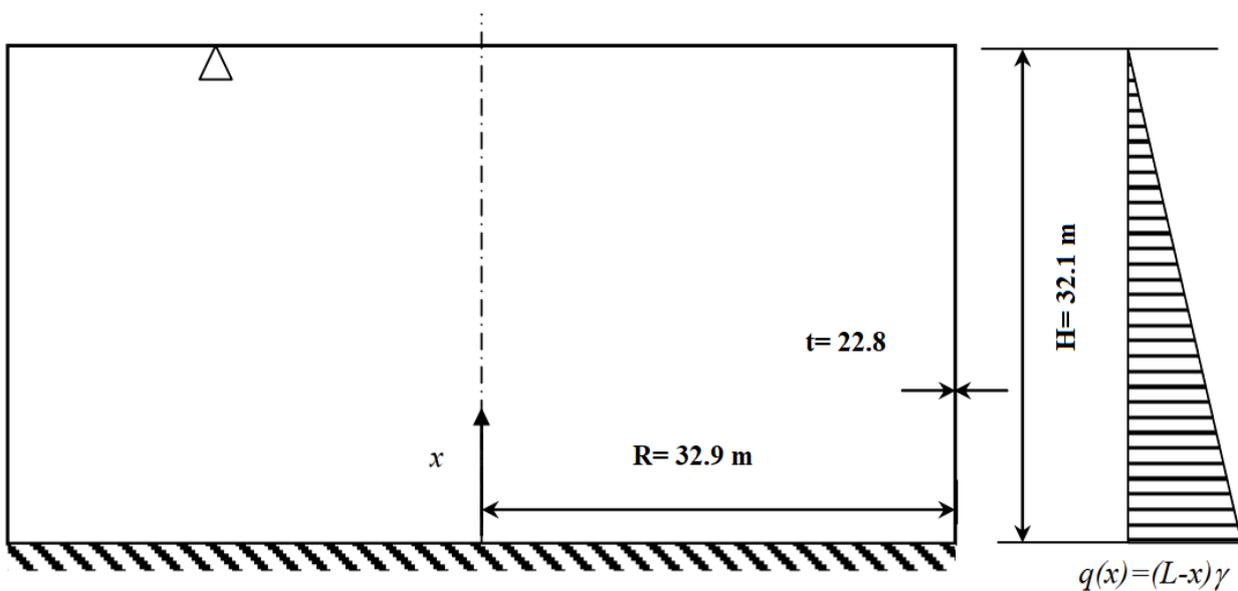


Figure 3.3 Cylindre semi-infini sous pression d'eau

La probabilité la plus élevée est que des fissures apparaissent dans la paroi cylindrique latérale du réservoir, c'est-à-dire dans la zone de charge la plus élevée. Ainsi, la coque de forme cylindrique a été choisie. Une pression de gaz uniforme et une pression de liquide hydrostatique sont généralement prises en compte dans le processus de conception. [11-12]

Les contraintes peuvent être calculées par la théorie des membranes. En raison des effets de frontière, des discontinuités géométriques et autres, qui sont souvent présents dans la réalité, il faut recourir à la théorie de la flexion, qui aboutit à une équation différentielle de quatrième ordre.

Le réservoir doit subir un test hydrostatique avant d'entrer en service. La hauteur de remplissage d'eau est $h=13.845$ m. Pour les grands réservoirs de stockage, l'effet de bord est généralement limité au premier et au deuxième rang. Pour l'assise supérieure de la coque, le moment de flexion et l'effort tranchant sont vraiment négligeables et donc supposés nuls. Par conséquent, dans ce travail, on a pris en considération du 1^{er} au 8^{-ème} rang qui ont une hauteur différente, comme indiqué sur la figure (3.2). Une coque cylindrique avec une épaisseur de paroi uniforme a été considérée comme indiqué sur la figure (3.3). Ainsi qu'une coque cylindrique avec une épaisseur de paroi étagée a été considérée comme indiqué sur la figure (3.2).

L'équation directrice est une équation bien connue qui définit la variation de la charge de pression due au liquide. [12]

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + 4D\beta^4 w = -\gamma g(h - x) \quad (3.1)$$

Où,

γ est la densité du liquide.

h est la hauteur du stockage réservoir.

β est la constante qui peut être calculée :

$$\beta = \left(\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2} \right)^{\frac{1}{4}}$$

t est une épaisseur de paroi uniforme ; R est le rayon du réservoir; ν est le coefficient de Poisson.

D est rigidité en flexion et peut être calculé par :

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

E est le module de Young.

La partie intégrante particulière de la solution est $-\Upsilon g(h-x)/4D\beta^4$

Et la solution complète est :

$$w = \exp(\beta x) (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + \exp(-\beta x) (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) - \frac{\Upsilon g(h-x)}{4D\beta^4} \quad (3.2)$$

Les conditions aux limites sont les suivantes.

La hauteur du cylindre peut être considérée comme "infini", donc que

$$M \rightarrow 0 \text{ Et } w \rightarrow 0$$

Donnant

$$C_1 = C_2 = 0$$

$$C_3 = \frac{\Upsilon gh}{4D\beta^4}$$

Et

$$C_4 = \frac{\Upsilon g}{4D\beta^4} \left(h - \frac{1}{\beta} \right)$$

En mettant ces valeurs dans l'équation. (2) donne la déviation courbe.

À $x = 0$ $w = 0$ et $\frac{dw}{dx} = 0$; ainsi

$$w(x) = \frac{\Upsilon gh}{4D\beta^4} \left[1 - \frac{x}{h} - \exp^{-\beta x} \cos(\beta x) - \exp^{-\beta x} \left(1 - \frac{1}{\beta h} \right) \sin(\beta x) \right] \quad (3.3)$$

Mais

$$\mathbf{M} = -\mathbf{D}(\mathbf{d}^2\mathbf{w}/\mathbf{d}\mathbf{x}^2)$$

Après dérivation deux fois de l'eq. (3.3) et le remplacement donne :

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) = \frac{\rho g h}{2\beta^2} [-\exp^{-\beta x} \sin(\beta x) + (1 - \frac{1}{\beta h}) \exp^{-\beta x} \cos(\beta x)] \quad (3.4)$$

Les contraintes axiales ou longitudinales résultantes peuvent maintenant être calculées par :

$$\sigma_L(\mathbf{x}) = \frac{6\mathbf{M}(\mathbf{x})}{t^2} \quad (3.5)$$

Les contraintes circonférentielle résultantes peuvent être calculées :

$$\sigma_C(\mathbf{x}) = \frac{Q_0(\mathbf{x})\exp^{-\beta x}}{\beta t^2} [6w \sin(\beta x) - \frac{12(1-\nu^2)}{2\beta^2 t R} \cos(\beta x)] + \frac{\gamma g(h-x)R}{t} \quad (3.6)$$

σ_L = la contrainte longitudinales (axiale)

σ_C = la contrainte circonférentielle

Où $Q_0(\mathbf{x})$ est la force de cisaillement par unité de longueur et peut être calculée :

$$Q_0(\mathbf{x}) = \frac{\gamma g(h-x)}{8\beta} \quad (3.7)$$

Les résultats de l'analyse de la répartition des contraintes dans la coque sont présentés sur les **Figures (3.4) et (3.5)**. Comme mentionné ci-dessus, la répartition des contraintes circonférentielles et axiales dans la paroi du réservoir avec une épaisseur uniforme a d'abord été analysée lorsque le réservoir était *sous pression hydrostatique*. On a supposé que le niveau d'eau dans le réservoir atteignît 13.845 m. Les résultats des calculs analytiques selon les formules précédentes sont présentés sur la figure (3.4).

Le tracé des résultats dans le cas des parois du réservoir rempli de GNL jusqu'au niveau 29.520 m, pour une épaisseur supposée constante ; est illustré par la figure (3.6).

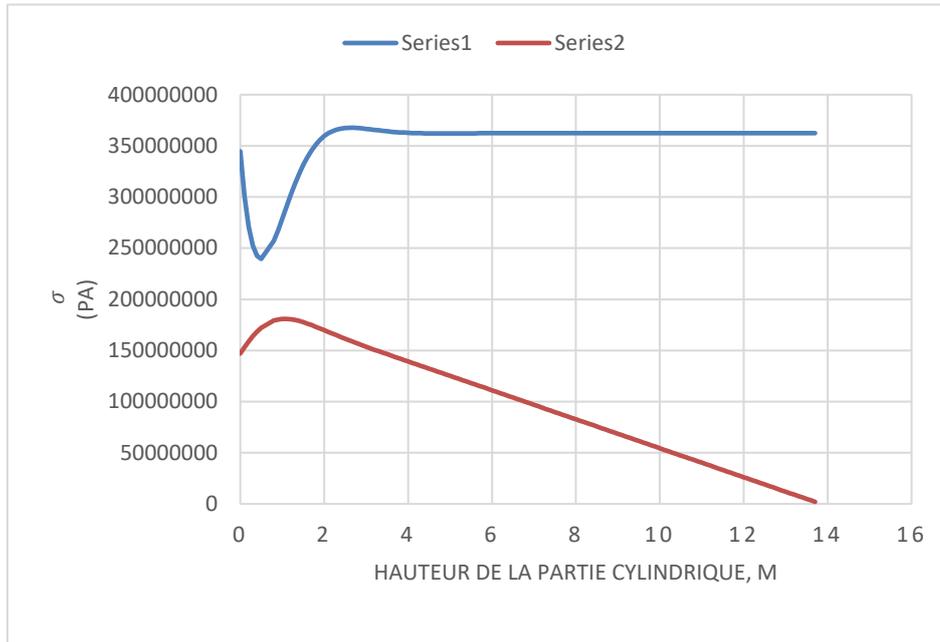


Figure 3.4 Répartition des contraintes σ_c (2) et σ_L (1) dans la paroi du réservoir avec une épaisseur de paroi uniforme ($t_1=0.0228$ m)

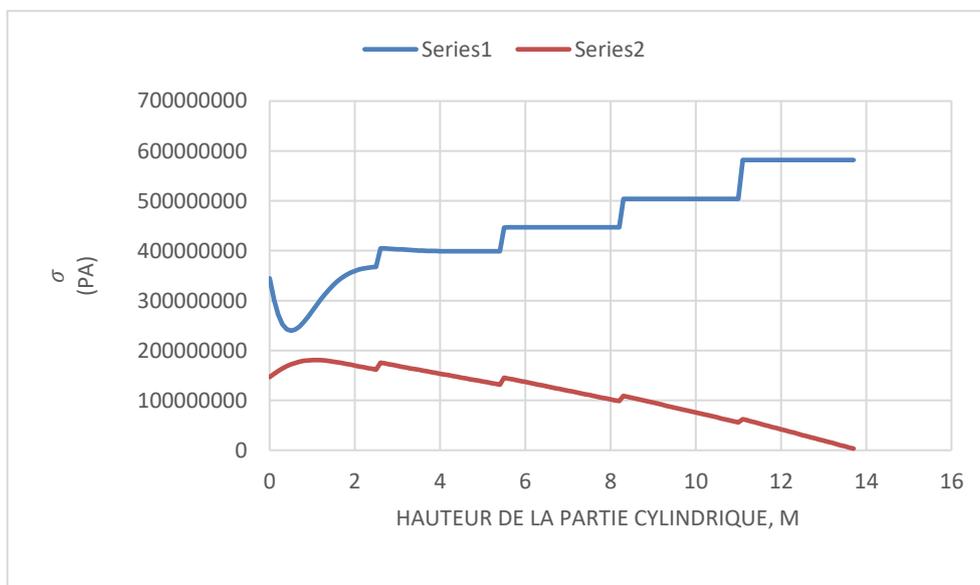


Figure 3.5 Répartition des contraintes σ_c (2) et σ_L (1) dans la paroi du réservoir avec une épaisseur de paroi différente.

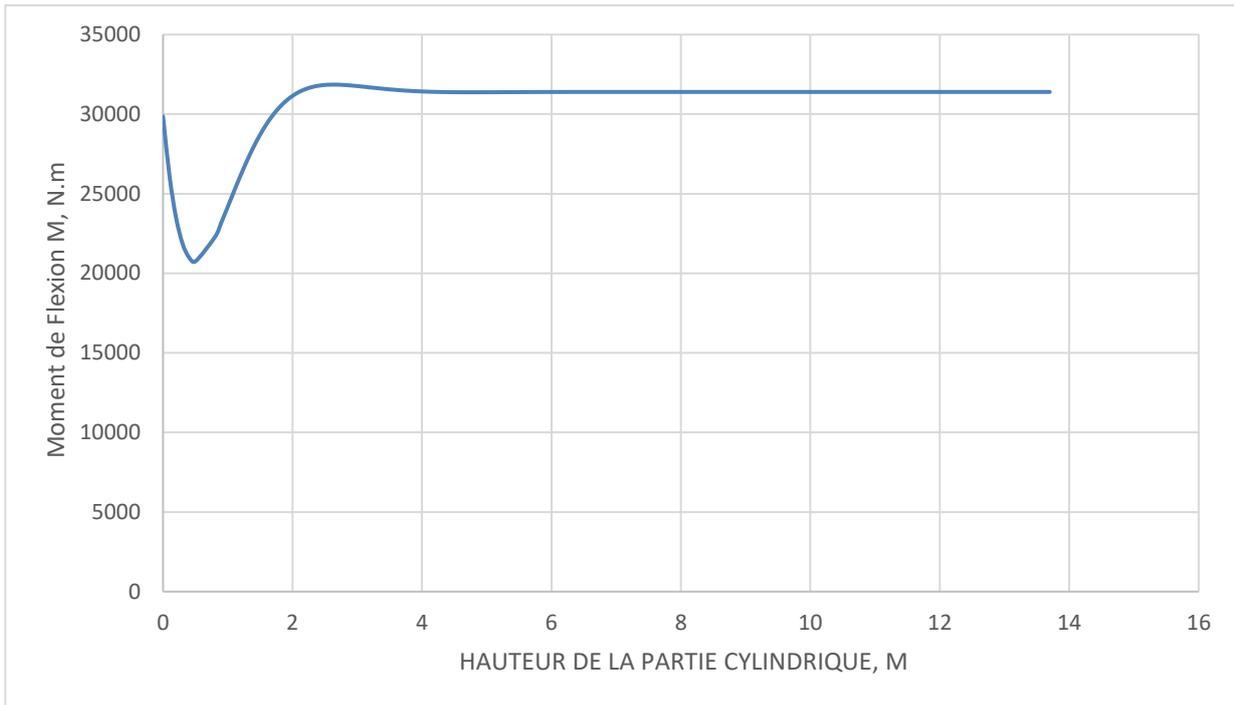


Figure 3.7 Diagramme du moment de flexion

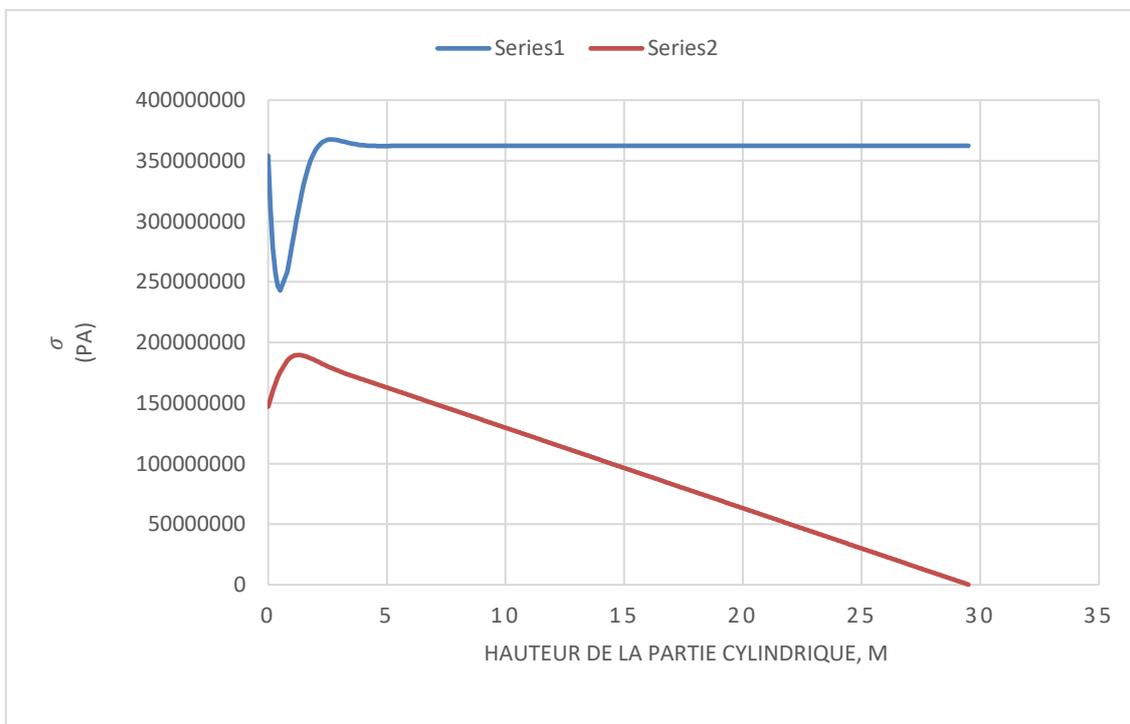


Figure 3.6 Répartition du σ_c (2) et σ_L (1) contraintes dans la paroi latérale du réservoir de stockage de GNL. ($T = -163^\circ\text{C}$)

- **Interprétations**

- Toutes les viroles du bac de stockage présentent des contraintes circonférentielles inférieures à la contrainte admissible lors des essais à l'eau. Cette constatation indique que la structure du bac testé est capable de supporter des charges supérieures à celles auxquelles il est soumis lors de cet essai hydraulique, ce qui suggère une marge de sécurité accrue.
- La contrainte admissible pendant les essais hydrostatiques, conformément à l'appendice Q du code API 620, est égale à 42 000 Psi, soit 289,6 MPa.
- Le réservoir de stockage du GNL a également été analysé. Les calculs ont montré que les contraintes circonférentielles maximales $\sigma_c=181\text{MPa}$ et elle est toujours inférieure à la contrainte admissible.
- En comparant les contraintes circonférentielles et axiales dans les modèles à épaisseur de paroi constante et étagée, il apparaît que l'épaisseur de paroi affecte significativement les contraintes axiales parce que ces dernières dépendent du rapport m/t^2 bien que la valeur du moment fléchissant se stabilise (Voir figure 3.7) mais le dernier rapport augmente d'une façon importante quand l'épaisseur diminue. Par contre les contraintes circonférentielles dépendantes beaucoup plus de la pression, diminuent avec la diminution de l'épaisseur en hauteur ainsi que la pression.
- Dans le cas d'une épaisseur supposée constante la contrainte axiale se stabilise après 2m de hauteur ou le moment fléchissant devient constant. Mais la contrainte circonférentielle diminue d'une façon significative après 2 m de hauteur de la paroi.

3.6 Conclusions

Les calculs effectués confirment que le réservoir de stockage de GNL est conforme aux normes de résistance et assure une sécurité adéquate pour le stockage de ce gaz. Il est important de souligner que la surveillance continue du réservoir, en utilisant des techniques de contrôle et de suivi appropriées, est essentielle pour garantir sa performance à long terme et prévenir tout dysfonctionnement éventuel. Surtout le choix de la partie du fond de bac pour le calcul de la résistance du réservoir aux différentes contraintes engendrées par les différentes charges sans et en présence d'une fissure étudiée dans le chapitre 4.

CHAPITRE 4 : Etude de la fissuration du bac de stockage

4 Etude de la fissuration du bac de stockage

4.1 Introduction

Lorsqu'un réservoir de stockage se rompt, les conséquences peuvent être dévastatrices, avec des impacts sur l'environnement, la santé publique et l'économie. La rupture d'un réservoir peut libérer des substances dangereuses dans l'environnement, telles que des produits chimiques, des hydrocarbures ou des matières toxiques, provoquant ainsi une pollution des sols, des eaux souterraines et des cours d'eau à proximité.

Les causes de ces ruptures peuvent être variées, allant de la corrosion et de l'usure naturelle à des erreurs de conception, des défauts de fabrication ou des dommages causés par des événements externes tels que des tremblements de terre ou des accidents. La vétusté des infrastructures, le manque d'entretien et les défaillances de surveillance peuvent également contribuer à augmenter le risque de rupture.

Dans le cadre de chapitre on va étudier la résistance du réservoir en présence d'une fissure dans sa paroi latérale qui peut se produire dans la direction axiale de la première couche de la coque, où les contraintes circonférentielles les plus importantes se manifestent. Une analyse par le diagramme d'analyse des défaillances FAD a été effectuée dans le but d'obtenir les dimensions critiques de la fissure. Puis après une simulation par éléments finis par Ansys a été réalisée. [13]

4.2 La mécanique de la rupture

L'objectif de la mécanique de la rupture est de définir le comportement de fissuration des structures à l'aide de caractéristiques quantifiables au sens de l'ingénieur, telles que le champ de contraintes, la taille des fissures et la résistance des matériaux à la fissuration. Vers 1940, Westergaard a fait les premières avancées théoriques dans l'analyse des champs de déplacement, de déformation et de contrainte dans la zone d'une fissure. Irwin a été le fer de lance de l'expansion de la discipline dans les années 1960. Depuis lors, la mécanique de la rupture a progressé pour inclure des problèmes non linéaires de manière significative. En mécanique de la rupture existe trois modes de ruptures à savoir : [13]

4.2.1 Les trois modes de la rupture

Mode I : un seul déplacement dans la direction de Oy, il s'agit d'un problème plan spécifique. **Le mode I s'appelle le mode d'ouverture.**

Mode II : La rupture est provoquée par un cisaillement dans le plan de la fissure, parallèle à l'axe Ox. **Il est appelé le mode de cisaillement.**

Mode III : Elle est causée par un cisaillement anti plan parallèle à l'axe Oz dans le plan de la fissure Ox z. **Il s'agit du mode de déchirement.**

Le dernier mode est résolu à l'aide d'une représentation 3D anti-plan, tandis que les deux premiers sont résolus à l'aide d'une analyse de contrainte ou de déformation plane 2D.

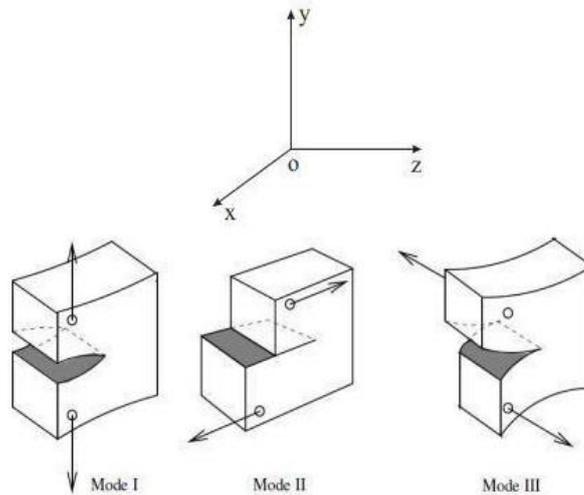


Figure 4.1 Les trois modes de rupture

4.2.2 Modélisation de la fissure du bac

L'un des facteurs déterminant la rupture fragile de la paroi du réservoir est la température. Les basses températures environnementales ont un impact sur la résistance du métal. Il est connu que lorsqu'un métal sans incisions ni fissures est testé à basse température, sa résistance ne diminue pas, et lorsque le métal est testé avec un concentrateur de contraintes à basse température, il peut être fragile et cassant. Mais comme le montre la pratique de l'exploitation des réservoirs, la basse température et la probabilité accrue de fracture fragile ne sont pas des conditions préalables à l'effondrement de la structure.

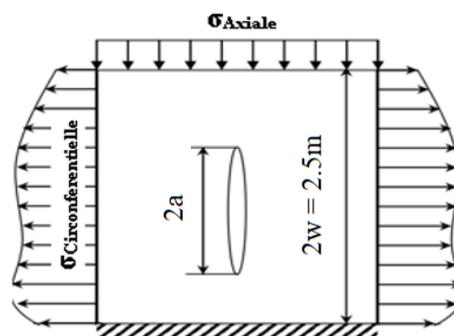


Figure 4.2 Modèle de plaque avec fissure

La surface latérale du réservoir présente un faisceau à grande courbure tels que ($R=32.9$ m, $t=22.8$ mm), une fine bande présentant la fissure a été découpée dans la surface du cylindre et modélisée comme plaque pour simplifier le modelé utilisé pour la simulation.[12]

4.3 La méthode FAD (Failure Assessment Diagram)

Cette méthode utilise le diagramme d'analyse des défaillances ou le diagramme FAD (Failure Assessment Diagram) pour sa construction nécessite :[13]

4.3.1 Les paramètres de rupture

Ce diagramme nécessite le calcul de deux paramètres correspondants, respectivement : au risque de rupture fragile K_r (axe des ordonnées) et au risque de ruine plastique S_r (axe des abscisses), pour chaque défaut ces deux paramètres sont calculés comme suit :

$$\text{Rupture fragile : } K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} \quad (4.1)$$

$$\text{Ruine plastique : } S_r = \frac{\sigma_n}{\sigma_y} \quad (4.2)$$

Avec k_I , k_{IC} , σ_n , σ_y qui sont respectivement : le facteur d'intensité des contraintes, ténacité du matériau autour du défaut, la contrainte nominale et la contrainte moyenne d'écoulement, tel que :

$$K_I = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2w}} \cdot \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (4.3)$$

Où a est la moitié de la longueur de la fissure, $2w$ est la longueur de la plaque, dans ce cas elle coïncide, σ_c est la valeur maximale de la contrainte circonférentielle uniforme.

Où K_{IC} est la ténacité à la rupture.

$$K_{IC} = 150 \text{ MPA}\sqrt{m}$$

La contrainte d'écoulement

$$\sigma_y = \frac{\sigma_e + \sigma_U}{2} \quad (4.4)$$

La contrainte de référence est une grandeur unique qui caractérise la géométrie et le chargement de la section. La contrainte de référence pour un panneau fissuré au centre peut être calculée.

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_c}{1-a/w} \quad (4.5)$$

A proximité de l'effondrement du plastique L_r peut être calculé :

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \quad (4.6)$$

4.3.2 Niveaux d'investigation

En fonction des données disponibles, on distingue trois types de courbes $K_r = f(S_r)$ relatives à trois niveaux d'analyse. Plus le niveau d'investigation est élevé plus la confiance dans le résultat est grande et plus les facteurs de sécurité nécessaires sont faibles. Un défaut est alors dit acceptable si le couple (K_r, S_r) calculé pour ce dernier est situé sous la courbe $K_r = f(S_r)$ dans le FAD.

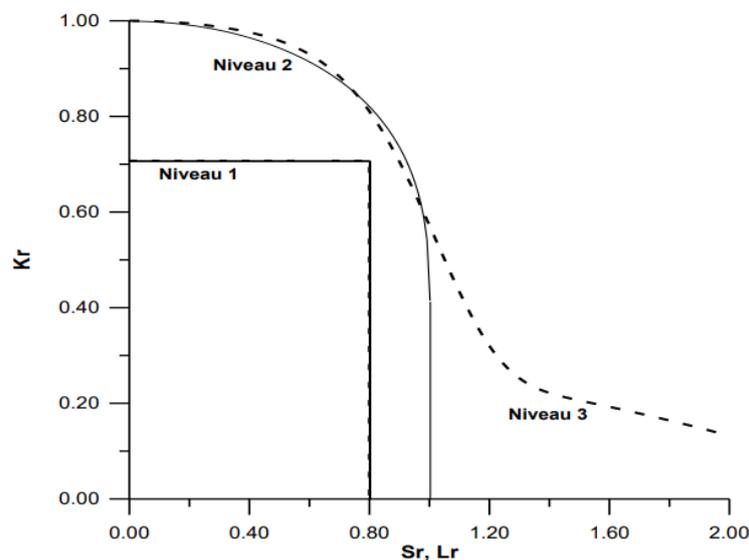


Figure 4.3 FAD pour les trois niveaux d'investigation possibles

- Niveau 1 : Le plus basique, il est applicable dans le cadre de la rupture fragile (mécanique élastique linéaire de la rupture), où les données en comportement contrainte-déformation du matériau ne sont pas disponibles, l'investigation est rapide.

- Niveau 2 : Il est utilisé quand les données nécessaires sur les matériaux sont disponibles.

- Niveau 3 : peut être utilisé quand la ruine est précédée d'une forte déformation plastique.

Les équations définissant l'enveloppe d'acceptabilité pour chaque niveau, sont données dans les équations ci-dessous.

$$\text{Niveau 1 : } K_r < \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ et } S_r < 0.8 \tag{4.7}$$

$$\text{Niveau 2 : } K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \left(\frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{2} S_r \right)} \right) \right] \tag{4.8}$$

$$\text{Niveau 3 : } K_r = \left[\frac{E \ln(1+\epsilon)}{\sigma(1+\epsilon)} + \frac{\sigma^3 (1+\epsilon)^3}{2\sigma_e^2 E \ln(1+\epsilon)} \right] \tag{4.9}$$

On donne aussi K_r , pour le niveau 3 par une équation plus simple à utiliser :

$$K_r = [1 - 0.14L_r^2][0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)] \tag{4.10}$$

Tableau 4-1 les résultats du calcul

a (m)	Ki (Pa m ^{0.5})	σ _{ref} (Pa)	σ _y (Pa)	L _r	K _r
0.05	71807106.5	188541666.7	508500000	0.370780072	0.478714
0.06	78694965.9	190126050.4	508500000	0.373895871	0.5246331
0.07	85044010.9	191737288.1	508500000	0.37706448	0.5669601
0.08	90969886.9	193376068.4	508500000	0.380287253	0.6064659
0.09	96553162.4	195043103.4	508500000	0.383565592	0.6436877
0.1	101852705	196739130.4	508500000	0.386900945	0.679018
0.11	106913137	198464912.3	508500000	0.390294813	0.7127542
0.12	111769283	200221238.9	508500000	0.393748749	0.7451286
0.13	116448987	202008928.6	508500000	0.397264363	0.7763266
0.14	120974958	203828828.8	508500000	0.400843321	0.8064997
0.15	125366034	205681818.2	508500000	0.404487351	0.8357736
0.16	129638078	207568807.3	508500000	0.408198245	0.8642539
0.17	133804619	209490740.7	508500000	0.411977858	0.8920308
0.18	137877327	211448598.1	508500000	0.415828118	0.9191822
0.19	141866373	213443396.2	508500000	0.419751025	0.9457758
0.2	145780707	215476190.5	508500000	0.423748654	0.9718714

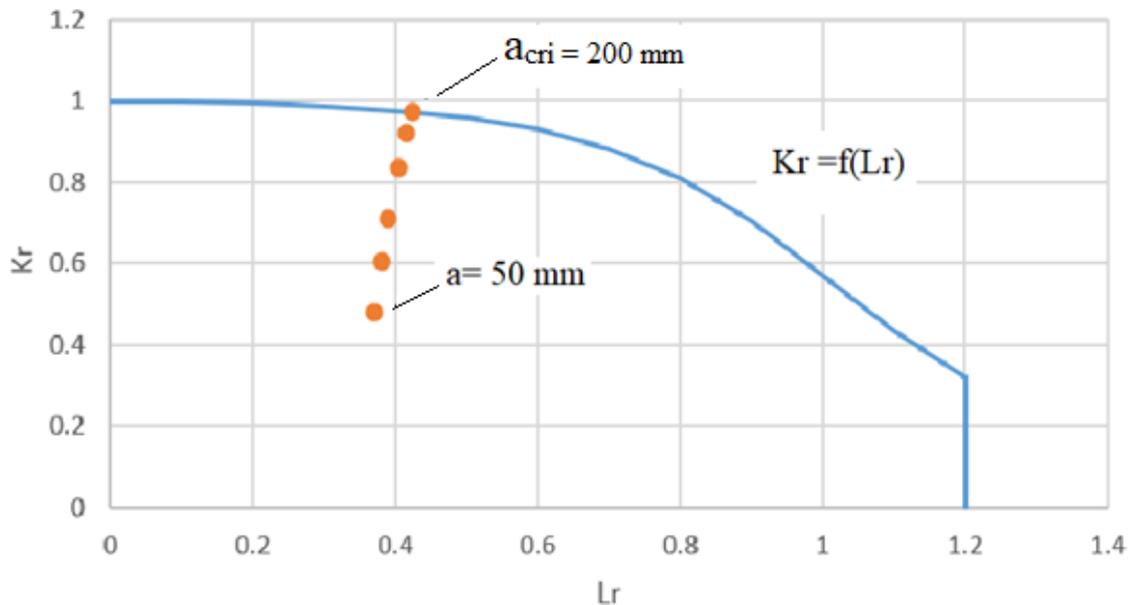


Figure 4.4 Détermination de la taille critique de la fissure-FAD

4.3.3 Interprétation des résultats du diagramme FAD

La Figure (4.4) présente les résultats du diagramme FAD pour la détermination de la longueur critique de la fissure. Il est clair que la longueur de la fissure critique est de ($a=200\text{mm}$ donc $2a=400\text{mm}$). L'évolution des résultats vers le paramètre de la rupture fragile K_r , montre que la défaillance a tendance de se manifester par rupture fragile. Quand la longueur de la fissure dépasse la longueur critique, elle se propagera d'une manière rapide et catastrophique qui entraîne des fuites ou des défaillances non contrôlables.

Les résultats obtenus illustrés dans la Figure (4.4), montre que les autres longueurs de fissures inférieures à 400mm sont dans la zone de fonctionnement acceptable qui ne nécessitent pas de réparations du bac et doivent être contrôlées régulièrement lors des activités de contrôles par CND afin d'éviter des problèmes structurels graves.

4.4 Calcul par éléments finis - simulation par ANSYS

Cette partie est consacrée au calcul numérique par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel Ansys pour simuler d'abord le test hydrostatique du réservoir et étudier sa résistance aux différentes contraintes engendrées par le test, puis l'étude de sa résistance en présence d'une fissure traversante axiale dans la partie de la coque la plus sollicitée et critique.

4.4.1 Simulation du test hydrostatique

➤ Les étapes à suivre durant la simulation

Pour effectuer cette simulation, on suit les étapes suivantes :

✓ 1 ère 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".

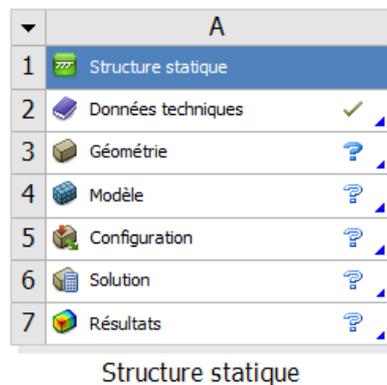


Figure 4.5 Liste des données

✓ 2 -ème 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 créée à l'aide de l'outil "DESIGN MODELER".

Design Modeler est un module 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 étudié est supposé avoir une épaisseur constante ($t=0.0228$ m)

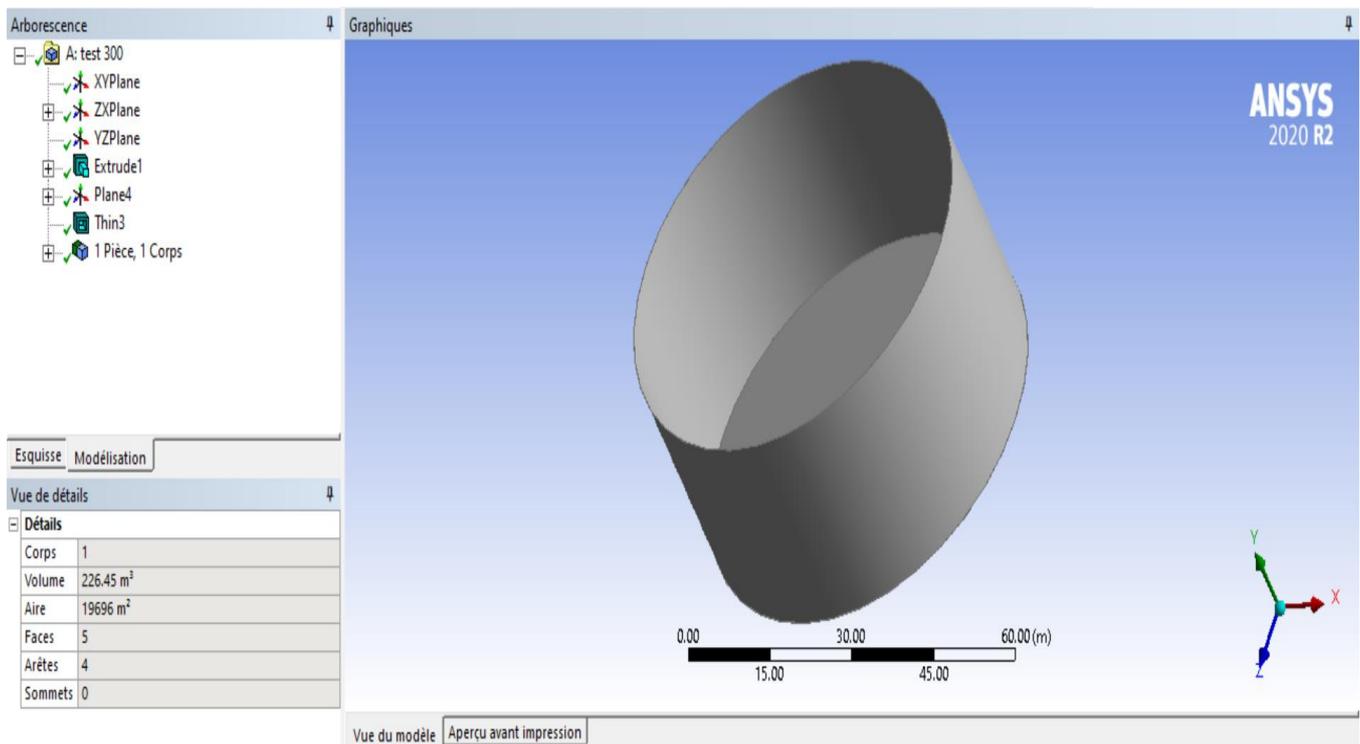


Figure 4.6 Modélisation du bac de stockage

✓ **3-ème 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.

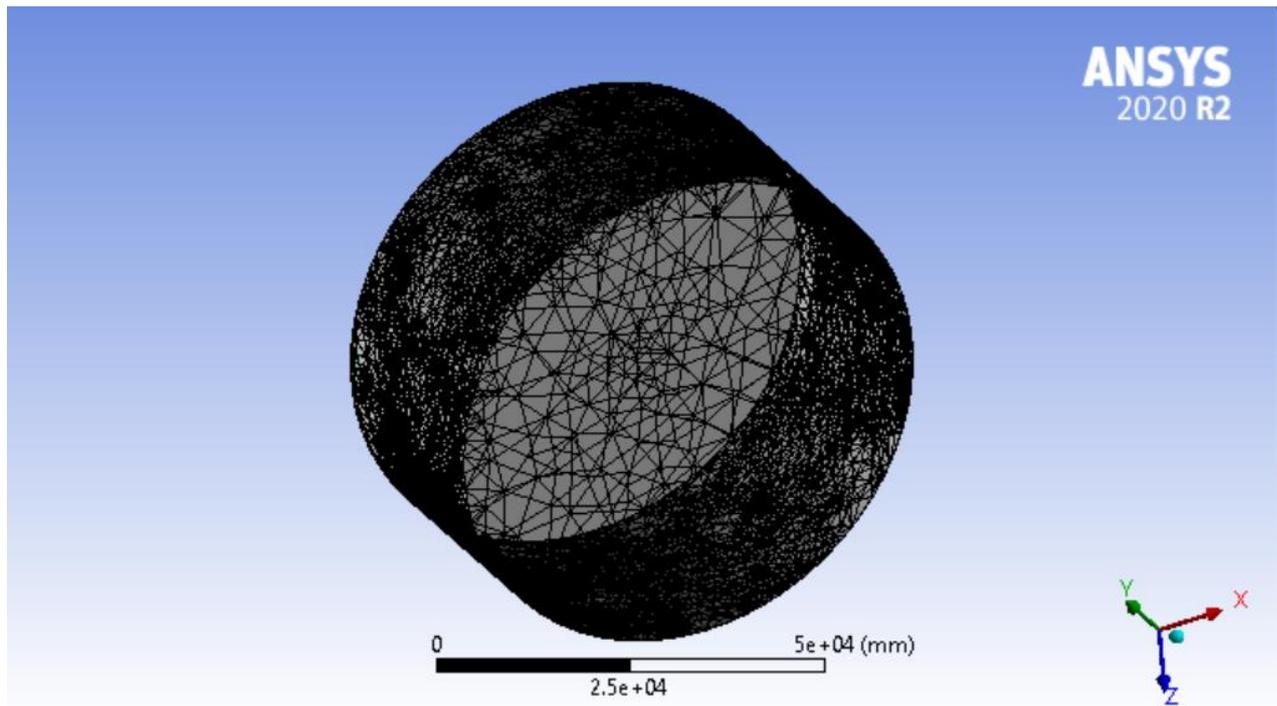


Figure 4.7 Le maillage du bac

- ✓ **4-ème étape** : Définition du chargement et configuration des paramètres d'analyse.

-Application d'une pression hydrostatique uniforme à l'intérieur du bac avec une valeur et une direction spécifiée. Selon la spécification du constructeur la hauteur du niveau de l'eau pendant les essais hydrauliques est 13,845 m.

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

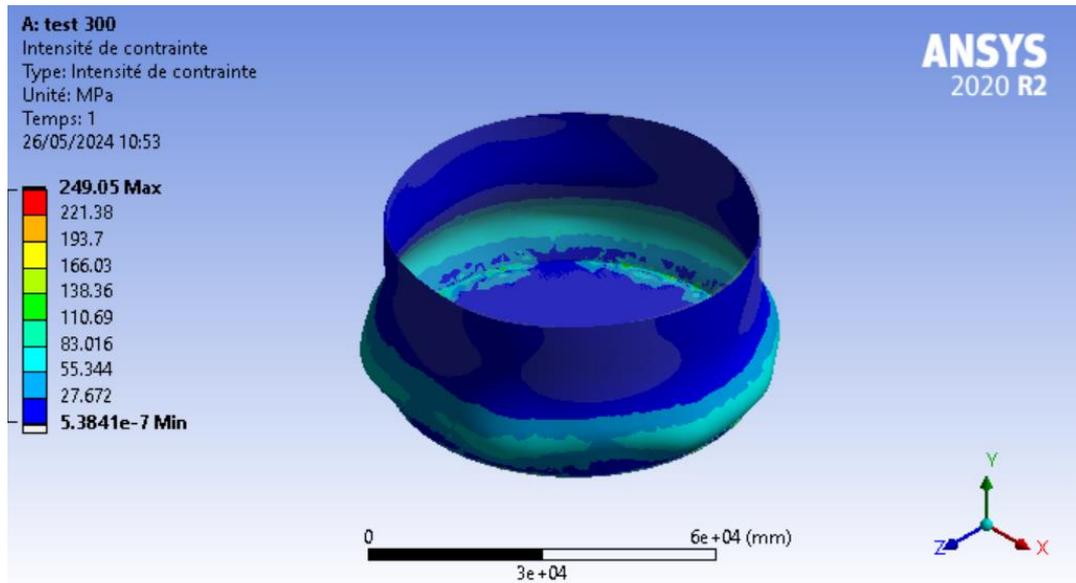


Figure 4.8 La variation de l'intensité de contrainte

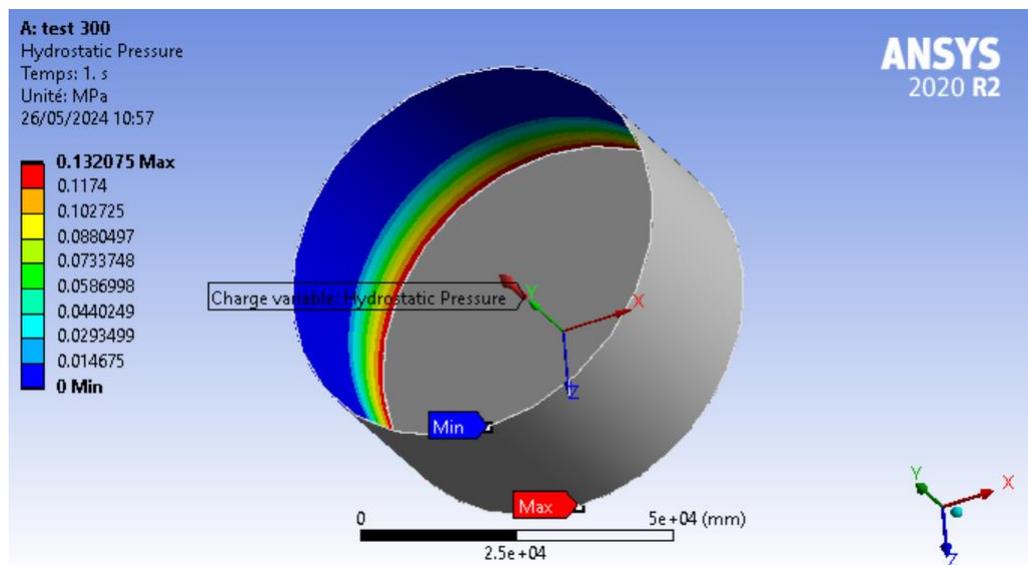


Figure 4.9 Introduction de la force hydrostatique

- **Résultats de la simulation**

On remarque durant cet essai hydrostatique, la contrainte au fond du réservoir de stockage est la plus élevée, l'intensité de la contrainte maximale est de 249.05 MPa (figure 4.8) et la contrainte équivalente de Von Mises maximale est de 218.64 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.

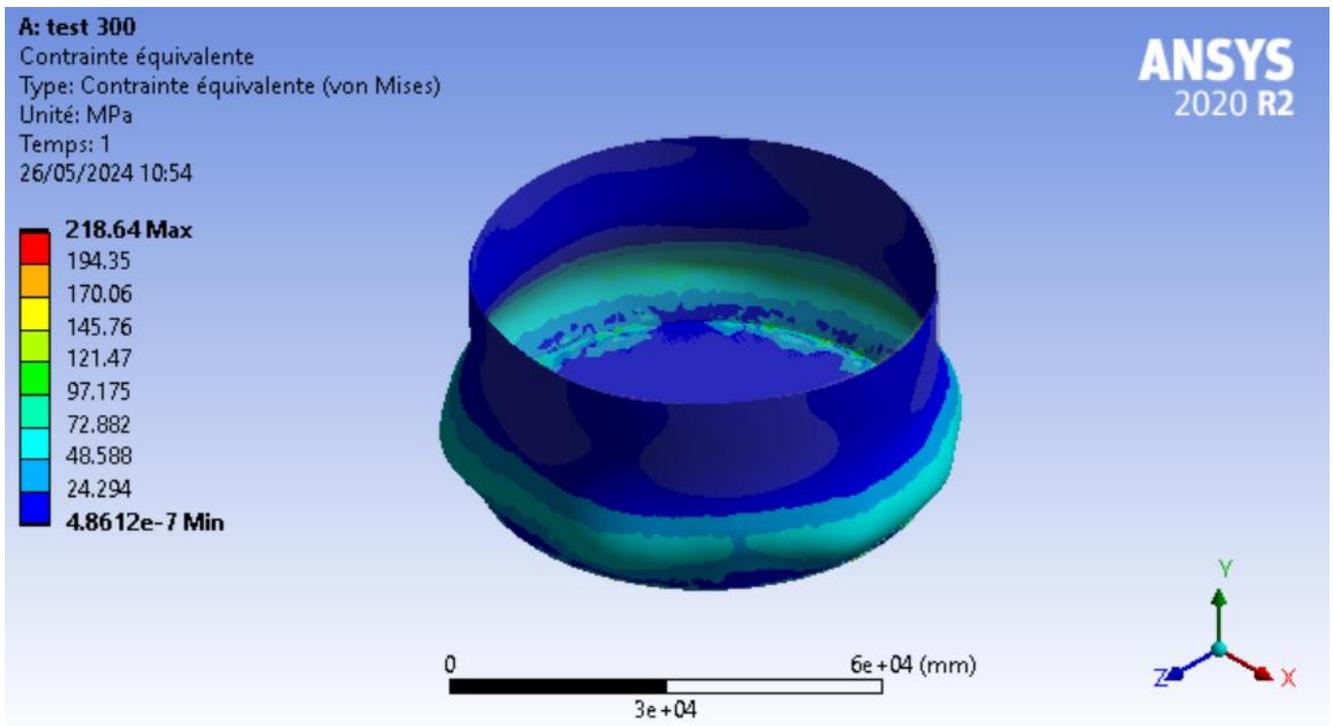


Figure 4.10 Variation de la contrainte équivalente de Von Mises

4.4.2 Etude de la résistance du réservoir en présence d'une fissure

Cette partie est consacrée à l'étude de la résistance du réservoir en présence d'une fissure de type traversante. Vu les grandes dimensions du bac de stockage, on s'est focalisé sur l'étude juste la plaque fissurée de la partie basse de la robe où les contraintes sont importantes, ces dernières calculées dans l'essai hydrostatique ont été appliquées au niveau de la plaque.

a) Modélisation de la plaque fissurée

Nous avons suivi plusieurs étapes clés pour mener à bien cette simulation. A partir de la liste des types d'analyses on choisit Structure Statique, il apparait une liste des données (Figure 4.11) on suit les étapes suivantes :

1. Engineering Data : Rassemblez les données d'ingénierie pertinentes telles que les propriétés des matériaux, les dimensions et les conditions aux limites requises pour la simulation.

2. Géométrie : Développez un modèle 3D d'une plaque au niveau du bac de stockage pour représenter la structure physique ou le système qu'on souhaite simuler. La plaque a des dimensions de Hauteur de 2.5 m, la largeur de 1.5 m et épaisseur de 22.8 mm.

3. Maillage : Générez un maillage en divisant la géométrie en petits éléments pour discrétiser le domaine de simulation. Le maillage est raffiné beaucoup plus au niveau de la fissure pour prendre en considération les différentes concentrations de contraintes au niveau du front de la fissure et la pointe. En même temps pour tenir compte des singularités des contraintes.

4. L'application des charges : Les contraintes circonférentielles calculées précédemment sont appliquées sur les faces supérieure et inférieure de la plaque. Dans le but de simuler les conditions réelles de la fissuration et propagation en mode 1.

5. Résultats : Après exécution de la simulation plusieurs résultats sont obtenus, comme les contraintes de Von Mises et les coefficients d'intensités de contraintes K_I .

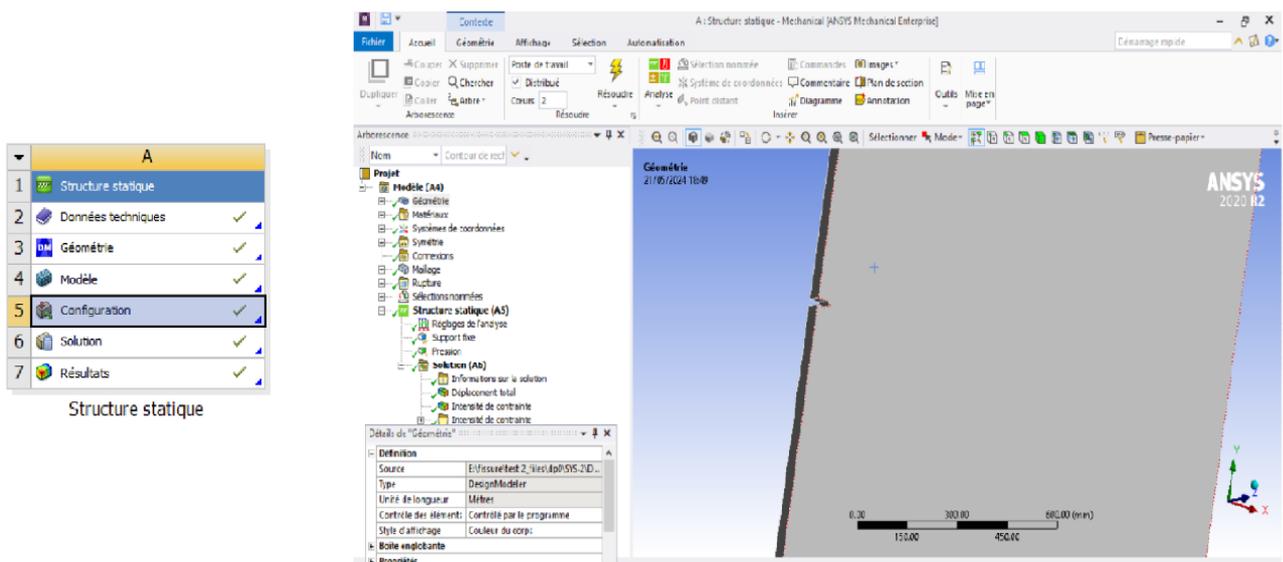


Figure 4.11 Liste des données et Géométrie

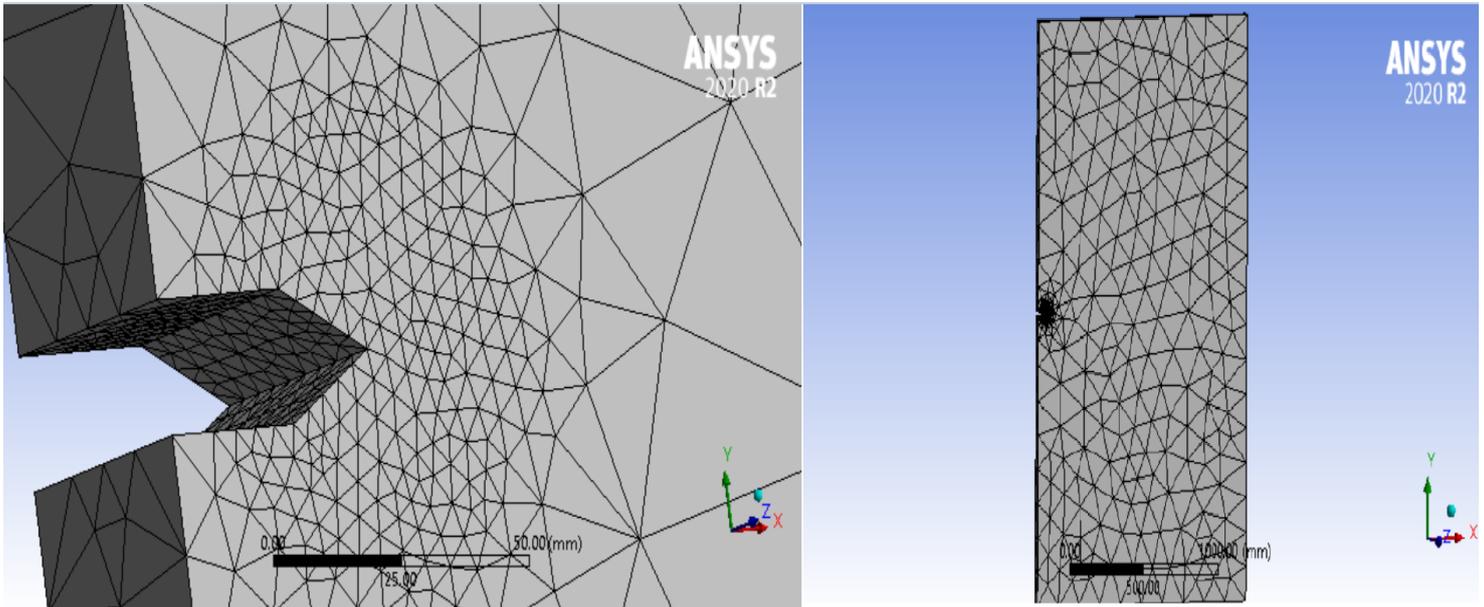


Figure 4.12 Le maillage de la plaque et raffinement du maillage au niveau de la fissure

b) Création de la fissure dans la plaque

Pour ajouter une fissure dans la plaque, suivez ces étapes :

1. Sélectionnez l'emplacement de la fissure en insérant un système de coordonnées. Allez dans **Insérer** → **Système de coordonnées** et choisissez **Coordonnées globales**. Dans la section Paramètres, sélectionnez "Manuel" et cliquez sur la surface où se situera la fissure. Ajustez les axes selon vos besoins et appliquez les changements.

2. Cliquez avec le bouton droit de la souris sur l'onglet "**Modèle**" et sélectionnez "**Insérer Fracture**" dans le menu déroulant. Cela créera un nouveau dossier pour la fissure.

3. Cliquez avec le bouton droit de la souris sur le dossier de la fissure nouvellement caractéristiques de la fissure

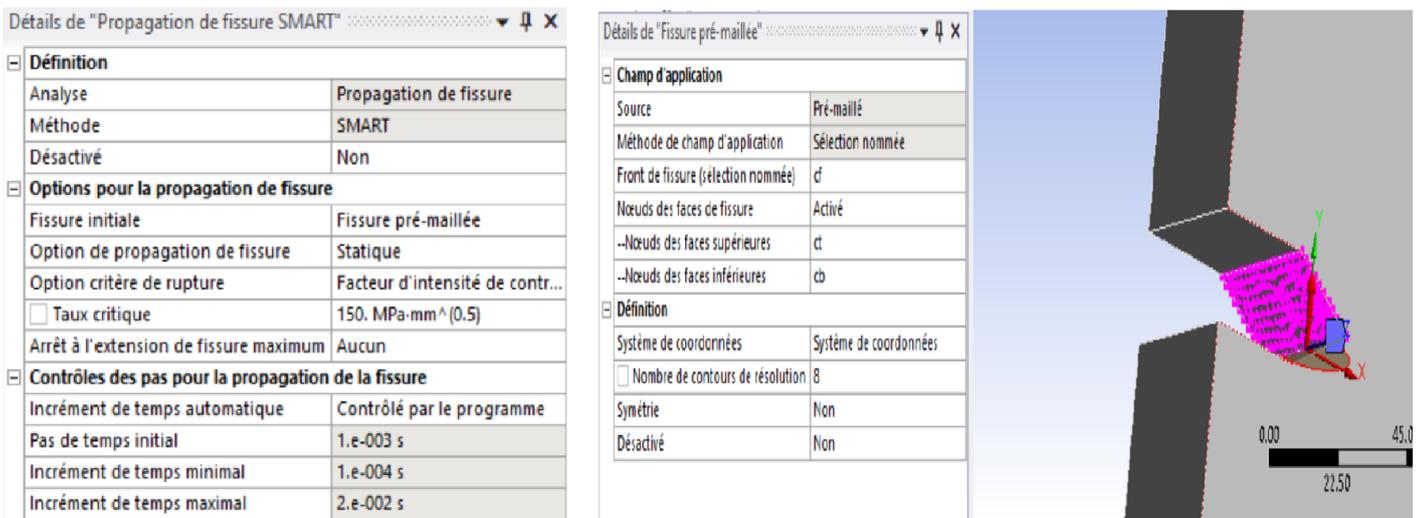


Figure 4.13 Paramètres de la fissure

Avant d'exécuter la simulation, ajouter les solutions comme la contrainte équivalente de Von Mises et les outils de fissure.

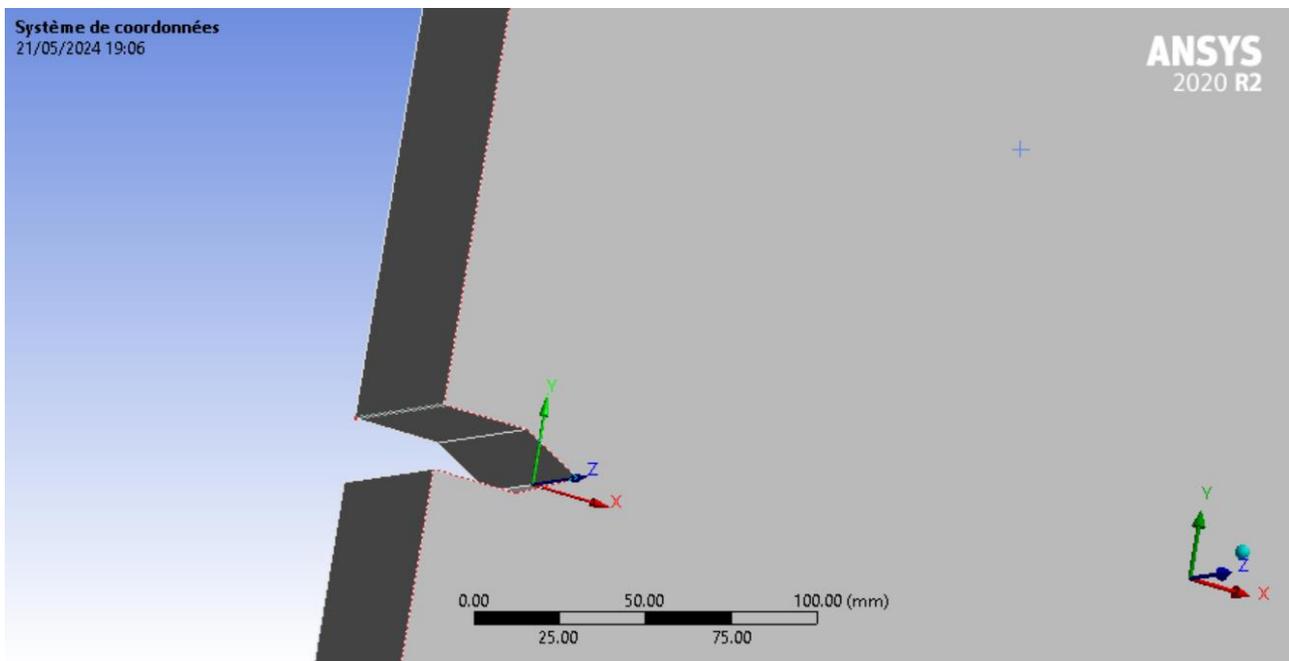


Figure 4.14 Système de coordonnées

c) Les résultats d'analyse

Dans cette partie on va représenter les différents résultats des contraintes équivalentes de Von Mises à l'extrémité des fissures ainsi que les facteurs d'intensité de contrainte du premier mode de rupture K_I (FIC) pour les différentes dimensions de fissures suivantes :

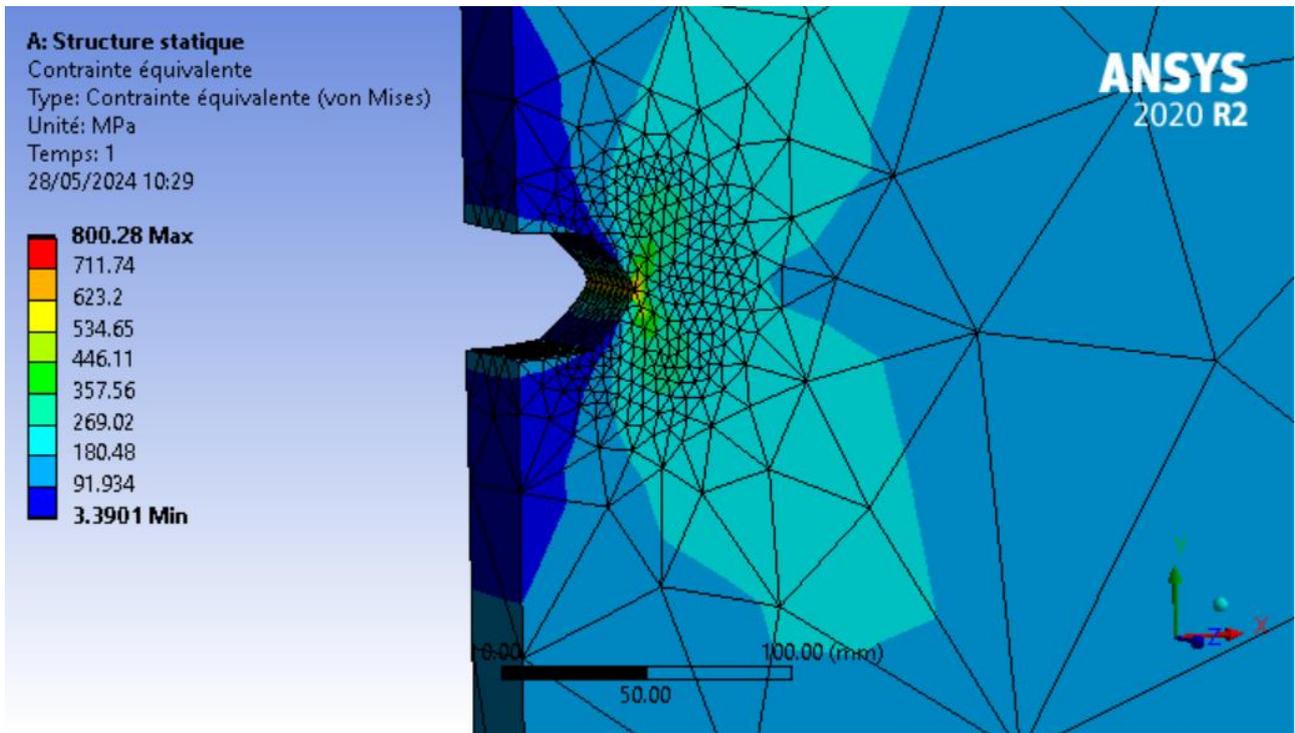
Tableau 4-2 Différentes dimensions de fissures

Fissure	Longueur a (mm)
A	50
B	100
C	150
D	200

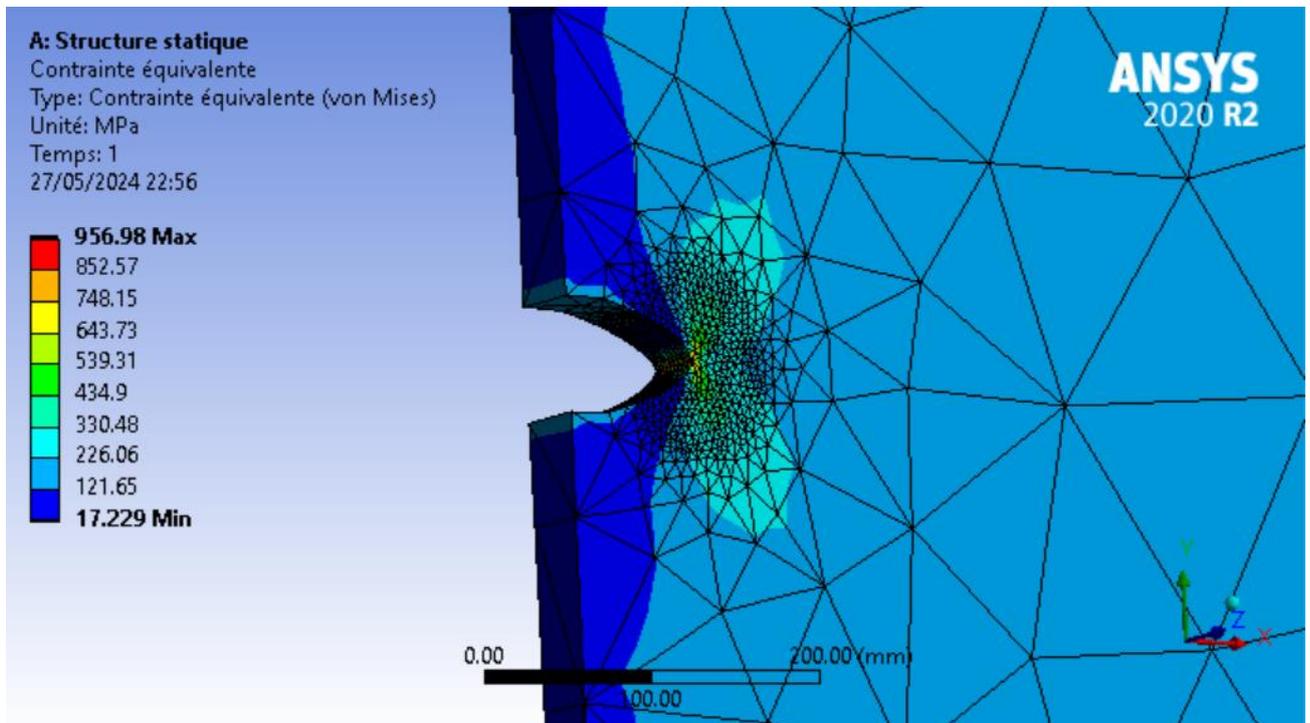
➤ Contraintes équivalentes de Von Mises

Les différents résultats des contraintes équivalentes de Von Mises sont représentés dans les figures A, B, C et D. pour les différentes longueurs de fissures. On remarque une forte concentration de contraintes au niveau du front de fissures. Cette contrainte augmente avec l'augmentation de la longueur a. Bien sûr au niveau de la pointe de fissure la contrainte admissible est dépassée, par contre plus loin du front de la fissure cette contrainte reste plus petite à la contrainte admissible de résistance.

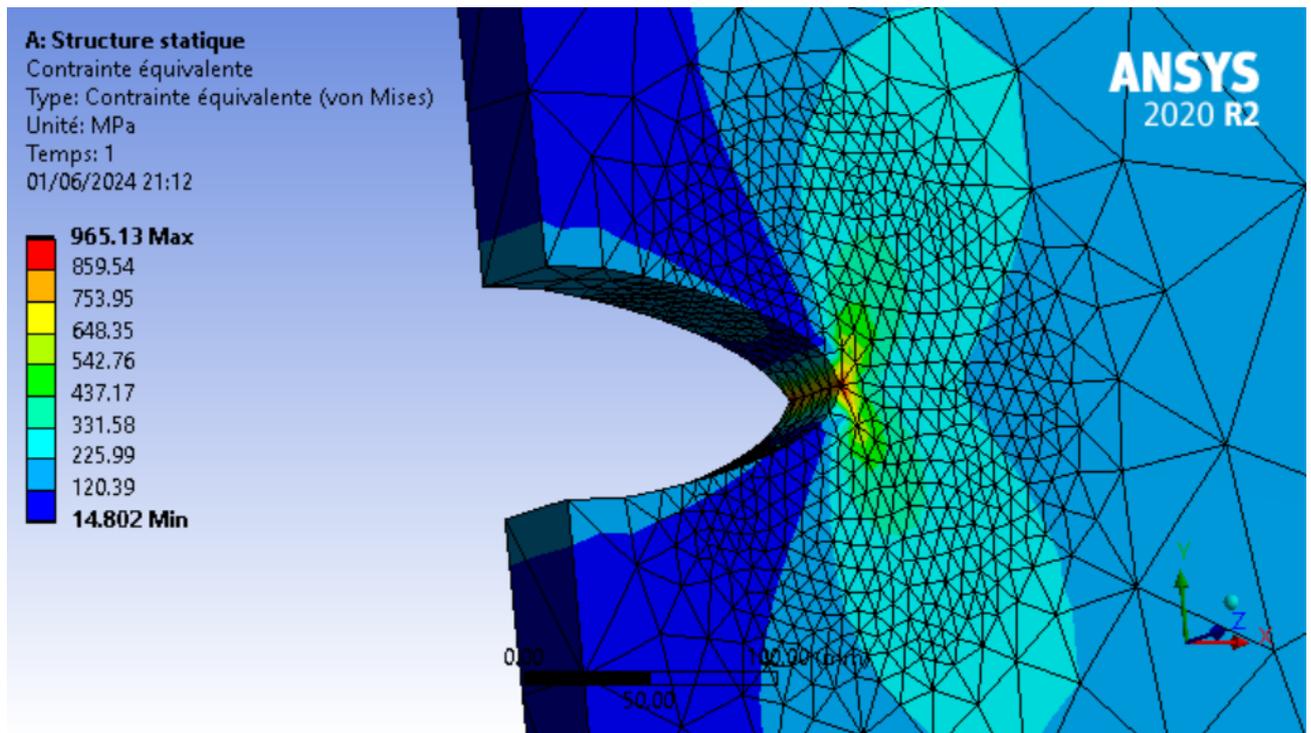
Fissure A



Fissure B



Fissure C



Fissure D

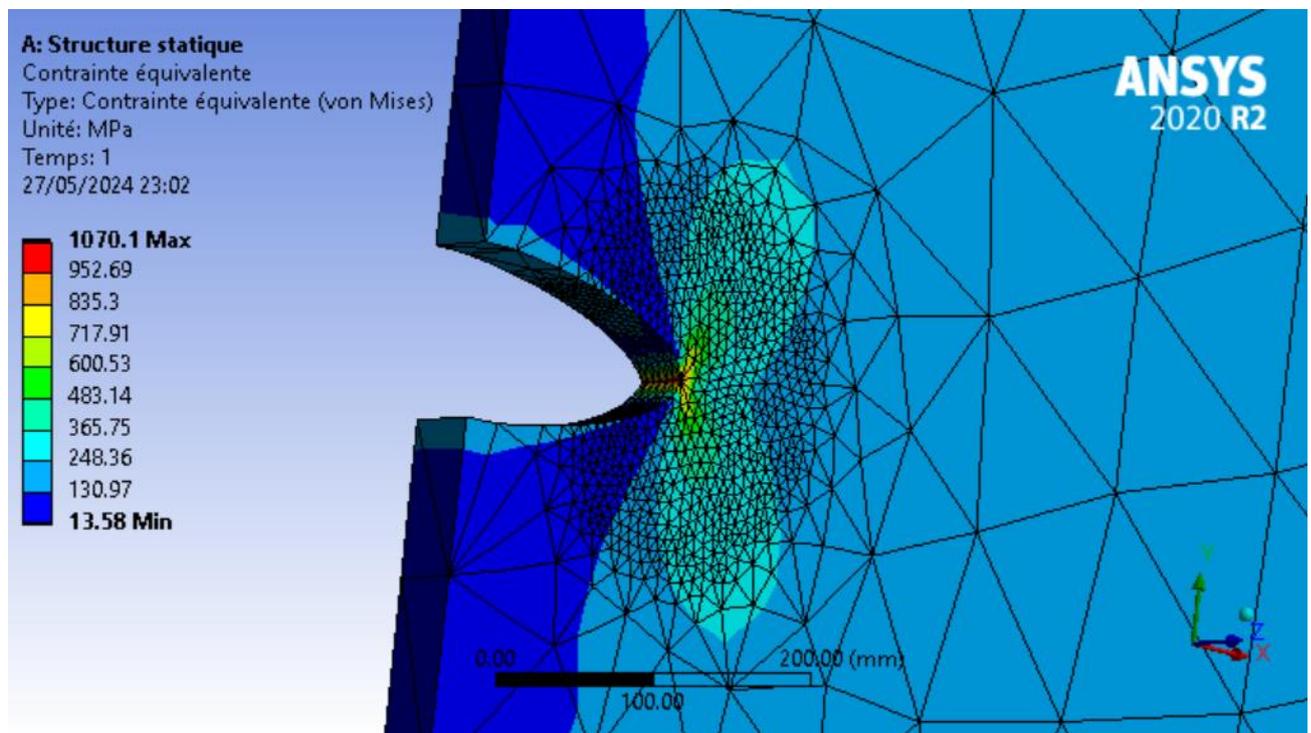
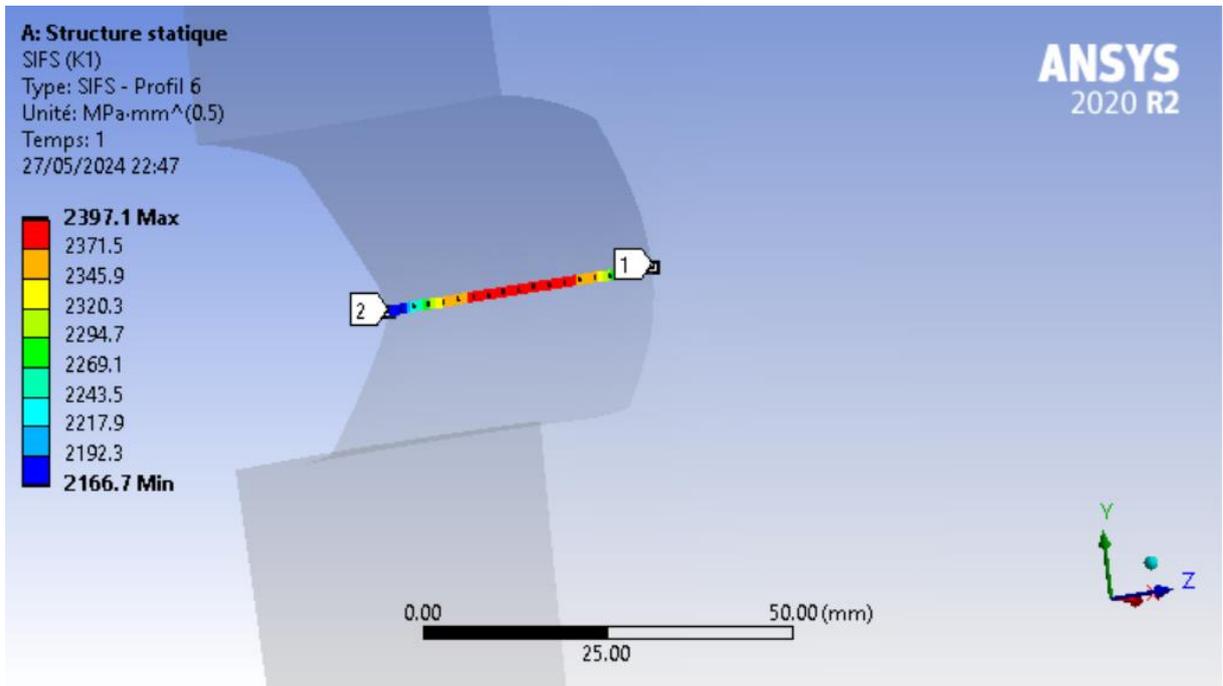


Figure 4.15 Contraintes équivalentes de Von Mises

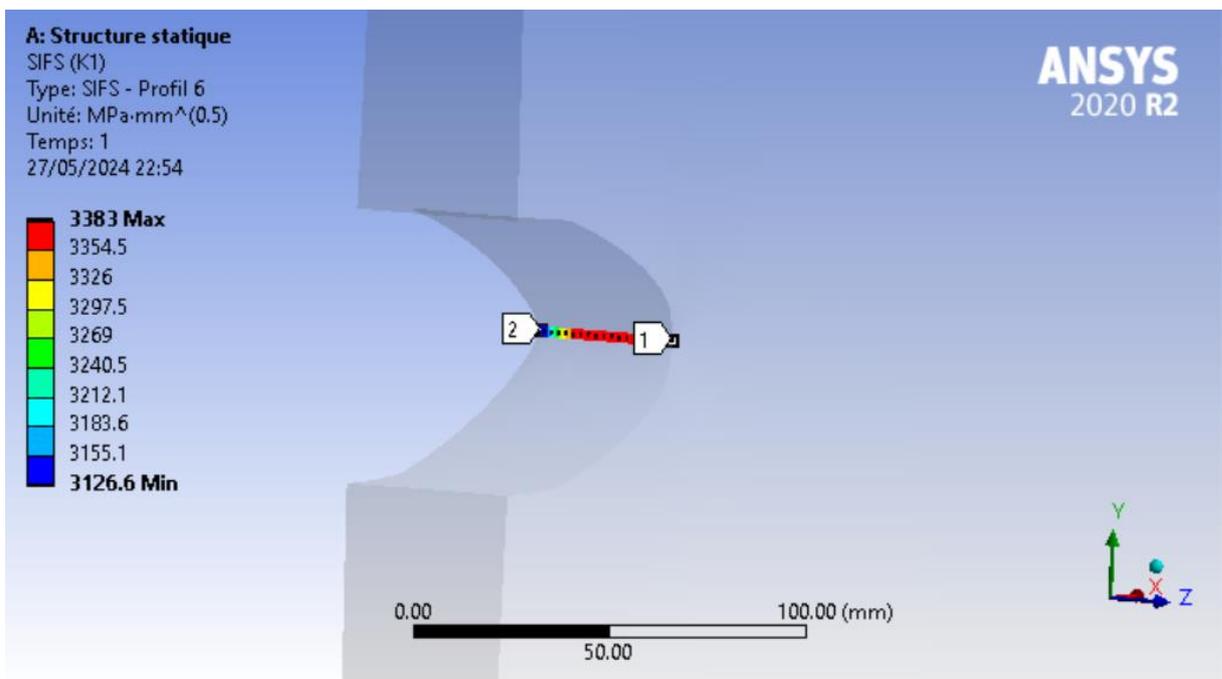
➤ Facteurs d'intensités des contraintes K_I

Dans cette étude on se contente de discuter les résultats des facteurs d'intensités des contraintes K_I les plus importants du mode I. Les figures données ci-dessous représentent les distributions des facteurs d'intensités au front des fissures A, B, C, D

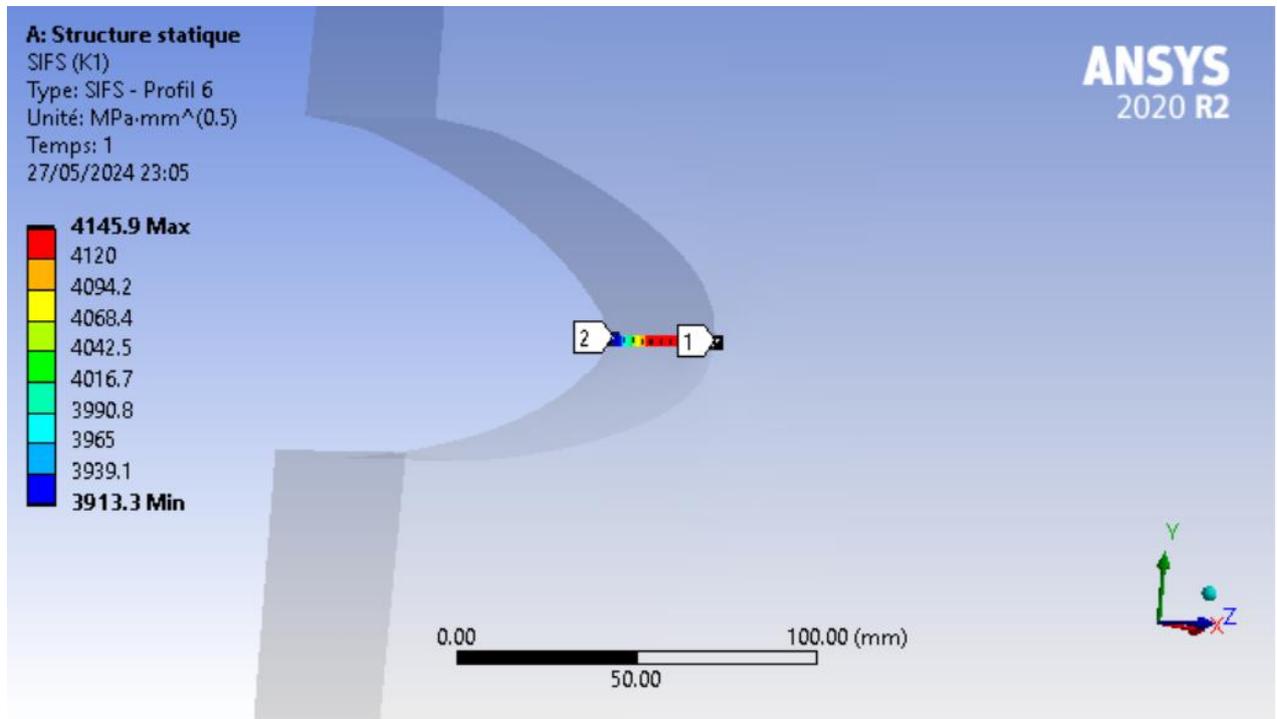
Fissure A



Fissure B



Fissure C



Fissure D

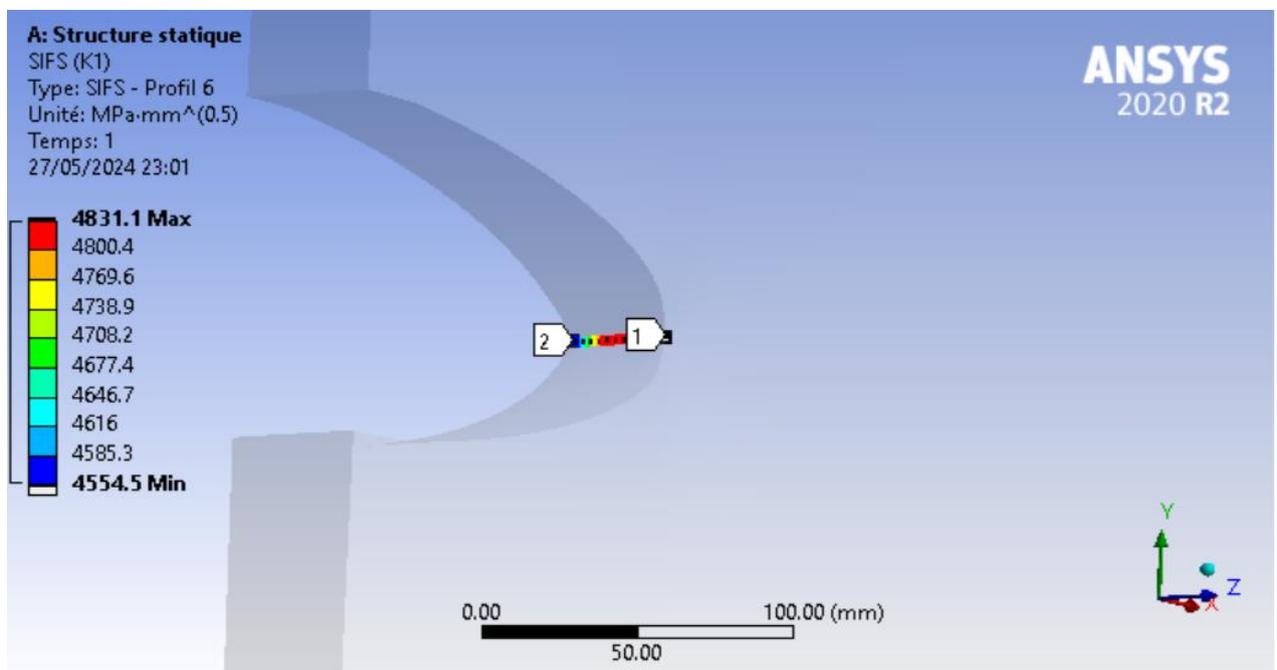


Figure 4.16 Distribution de K_1 au front des fissures

Dans ces figures on peut remarquer que le facteur d'intensité de contraintes augmente avec l'augmentation des dimensions de la fissure à savoir la longueur a . On remarque que la valeur critique du facteur d'intensité de contraintes K_{IC} est dépassée pour une longueur de fissure $a = 200$ mm. Pour donner plus de détails, une comparaison des résultats analytiques et numériques par Ansys est donnée dans la Figure 4.17 et pour illustrer ces résultats on représente la variation du facteur K_I en fonction de la longueur de la fissure a dans le but de calculer la longueur critique de la fissure.

Tableau 4-3 Comparaison des résultats analytiques et numériques par Ansys de K_I

a (mm)	Analytique K_I (MPa m ^{0.5})	Calcul par Ansys K_I (MPa m ^{0.5})	Δk_I (MPa m ^{0.5})
50	71.80710653	75.8029578	3.995851268
100	101.8527053	106.979853	5.127147721
150	125.366034	131.10487	5.738835978
200	145.7807069	152.772796	6.992089114

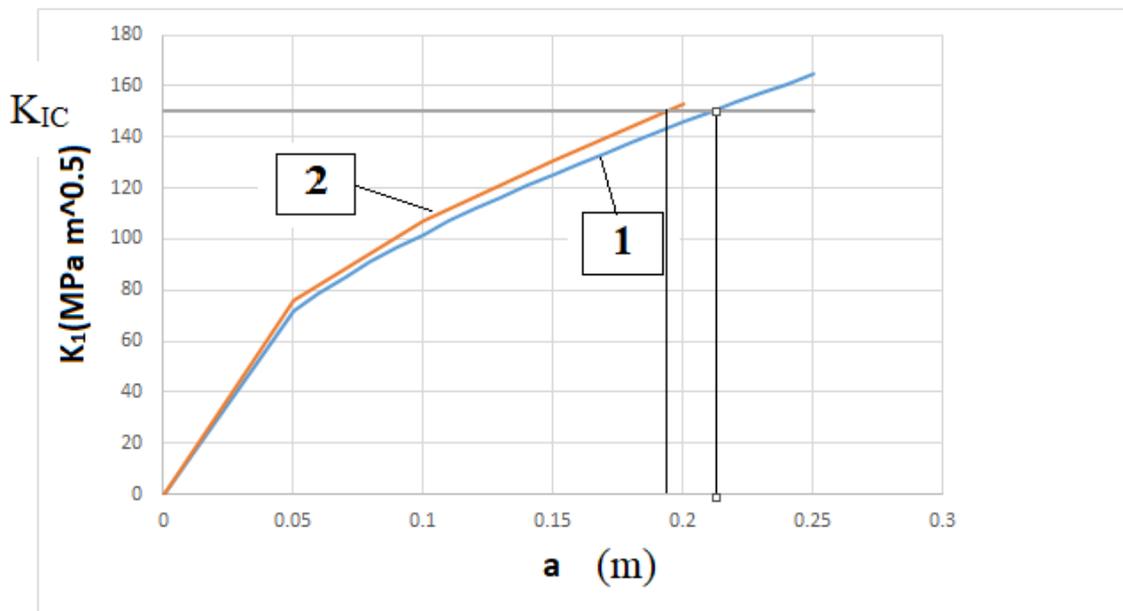


Figure 4.17 Comparaison des résultats analytique (1) et par Ansys (2)

En comparant les résultats du calcul des coefficient de contraintes K_I analytique et numérique par Ansys, on remarque que les résultats sont très proches l'un à l'autre (tableau (4-3)). La longueur de la fissure critique a_{cr} pour le cas analytique est de 190 mm et par le calcul par éléments finis est 210 mm qui est proche du calcul analytique (Voir figure (4.17)). Il n'y a pas une grande différence entre les deux courbes pour les longueurs de fissures calculées. Bien qu'on remarque que plus a augmenté plus l'écart entre les deux courbes augmente. Ça reste utile d'utiliser les deux méthodes pour chercher les dimensions critiques des fissures à éviter.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé par l'étude de la résistance du réservoir de stockage de GNL en présence de fissure en appliquant les contraintes critiques trouvées dans le chapitre précédent. L'analyse de la résistance du réservoir a été faite d'abord par le diagramme FAD où les deux paramètres de défaillance plastique et par rupture fragile ont été calculés. On a remarqué que la défaillance dans notre réservoir, que le paramètre de rupture fragile est plus déterminant. Puis après une analyse de la fissuration a été faite pour différentes tailles de fissures par ANSYS par éléments finis. On a remarqué que plus la fissure est profonde plus devient critique et risque de devenir instable, donc il faut intervenir pour la traiter et réparer à temps. Ces derniers résultats ont été comparés aux résultats du calcul analytique, où on remarque une bonne concordance entre les différents résultats pour ce type de fissure traversante.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Vu l'importance des réservoirs de stockage dans la chaîne pétrolière et le bon fonctionnement des différents sites pétroliers en commençant des sites de productions vers les sites de consommation locale et d'exportation des différents produits pétroliers. Une étude de résistance mécanique de ces réservoirs est nécessaire dans le but de chercher une procédure de calcul de résistance surtout à la fissuration qui est généralement dangereuse pour ces réservoirs. C'est ce qui a fait l'objet principal de notre mémoire de fin d'études en choisissant un bac de stockage de GNL à toit fixe du site pétrolier GL1Z d'Arzew, le lieu de notre stage.

A travers les différents chapitres proposés dans le cadre de cet MFE, on s'est familiarisé avec les divers aspects concernant la sécurité, les performances et l'efficacité de ces bacs. En étudiant les éventuelles défaillances, en réalisant des calculs de résistance mécanique par des méthodes analytiques et simulations numériques. Notons que ce projet nous a donné l'opportunité d'approfondir nos connaissances sur le stockage du GNL et de les renforcer dans le domaine pour la compréhension des défis et des enjeux qui y sont liés. La procédure suivie pour l'étude et les résultats obtenus dans notre cas d'étude sont significatifs pour la conception et surtout la sécurité du réservoir de GNL étudié. C'est dans cette perspective d'améliorer la conception de ces conteneurs, et d'assurer la sécurité des opérations et d'exploitation, il est nécessaire de donner une importance aux différentes études et projets liés au secteur du stockage des hydrocarbures en particulier le GNL.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. FEKHART « Calcul de la résistance du réservoir de stockage de GNL du complexe GL1Z à Arzew », (MAUP18) MFE UMBB 2023.
- [2] Document stockage des produits pétroliers PDF, responsable : K. Ed. ROUIBET
- [3] Manuel formation ENSPM référence PP STT_01362_A_F - Rév. 3 / IFP Training-France (2008)
- [4] "Sonatrach.com," 2023. [Online]. Available : <https://sonatrach.com/liquefaction-et-separation>.
- [5] "off-shore Technology, LNG terminal profile: Arzew GL1Z LNG Liquefaction Terminal, Algeria," 2023. [Online]. Available : <https://www.offshoretechnology.com/marketdata/arzew-gl1z-lng-liquefaction-terminal>
- [6] A. Nassim, "Evaluation Numérique et Analytique du Boil-off dans les Bacs " 2020.
- [7] D. 94, « Guide d’inspection et de maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux, » Décembre 2015.
- [8] R. C. Pessier, " Failure scenarios for cryogenic tanks Cryogenics," 2009.
- [9] V. T. & D. V. T. Nguyen, "Failure modes and effects analysis for LNG storage tanks," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019.
- [10] Manuel du Bac de stockage GL1Z. TOYO KANETSU K.K
- [11] Réservoirs en acier soudés pour le stockage du pétrole. API 650.
- [12] V. Leišis, A. Sudintas, A. Žiliukas ; Prediction of the strength and fracture of the fuel storage tank. MECHANIKA. 4(72), 2008.
- [13] M. Bettayeb, « Contribution à l’étude de la fiabilité en présence de défauts de joints de soudures et de corrosion, dans les canalisations de transport d’hydrocarbures » Thèse de Doctorat, UMBB 2016.