

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département Génie Mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Energétique  
Thème

**Analyse de rupture d'une plaque fissurée sous  
chargement thermomécanique (cas d'un bac de  
stockage GNL) et réhabilitation**

Présenté Par :

1) Mr. Bouzouina Houari Mounir

Devant le jury composé de :

Dr. Belhamiani Mohammed	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Bahram kadour	UAT.B.B (Ain Temouchent )	Examineur
Dr. Oudad Wahid	UAT.B.B (Ain Temouchent )	Encadrant

*Année universitaire 2020/2021*

## Remerciement

*Louange à Dieu et grâce à Lui, en premier lieu, qui nous a donné la force et nous a inspiré avec patience et détermination pour mener à bien cet humble travail.*

*Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadrant de mémoire Pr. Oudad wahid , professeur de mécanique énergétique à l'université d'Ain Temouchent, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*je remercie aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.*

*je tene à remercier mes chers parents pour leurs soutiens au long de mes études.*

*je remercie mme. Bouzitouna W.Nesrine pour l'aide qu'elle m'a apportée dans ce travail*

*Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université d'Ain Temouchent.*

*Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitudes et respects.*

## Résumé

### Résumé :

Les réservoirs sont nécessaires à l'exploitation des champs pétroliers car ils contribuent à assurer la continuité de la production. Le service d'inspection de la Suna Truck Company se charge de l'entretien des réservoirs pour la fonction la plus à long terme. Dans ce travail, nous avons présenté les différents mécanismes de dégradation et de défaillance auxquels ce réservoir est confronté au cours de l'exploitation, pour prédire la durée de vie restante.

Nous avons calculé sur la base de l'American Petroleum Institute et d'autres formules pour les réservoirs, et l'objectif principal de ce calcul est de distinguer les différentes détériorations, notamment la corrosion et la fissuration et son impact sur la durée de vie des réservoirs. Mots clés Stockage, inspection, détérioration, corrosion, prévision.

### ملخص :

الخرانات ضرورية لاشتغال حقول البترول لأنها تساعد على ضمان استمرارية الإنتاج . خدمة التفتيش في شركة صونا تراك يأخذ على عاتقه مسؤولية الحفاظ على الصهاريج لأكثر وظيفة على المدى البعيد . في هذا العمل قدمنا مختلف آليات التدهور و الفشل التي يواجهها هذا الخزان أثناء الاستغلال , للتنبؤ بالحياة المتبقية .

قمنا بحساب على أساس المعهد الأمريكي للبترول و صيغ اخرى ، للصحاريج و الهدف الأساسي من هذا الحساب تمييز مختلف التدهورات خاصة التآكل و تشقق و تأثيره على حياة الخزانات . كلمات مفتاح . التخزين , التفتيش , التدهور , التآكل , التنبؤ .

## Sommaire

Résumé :.....	ii
Sommaire .....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
I. Introduction générale.....	IX
Chapitre 01 .....	2
Stockage d'un bac GNL .....	2
• I .1.Introduction .....	3
• I .2.Historique .....	3
• I .2.1.Réserve d'eau .....	3
• I .2.2.Stockage d'huile .....	5
• I .3.Définitions .....	6
• I .3.1.Les bacs de stockage à terre .....	6
• I .3.2.Les bacs à toit fixe.....	7
• I .4.Equations et méthode de résolution .....	12
• I .5.Stockage du GNL.....	12
• I .6.Rôle de stockage .....	13
• I .7.Les différents types de réservoirs.....	14
• I .8.Le toit flottant .....	14
• I .8.1.Toit à flotteur unique (simple ponton).....	14
• I .8.2.Toit à double flotteur (double ponton).....	15
• I .9.Accessoires .....	15
• I.9.1.Bague de renforcement .....	15
• I .9.2.Plate-forme supérieure.....	16
• I.9.3. Clapet d'aération automatique .....	16
• I .9.4.Systèmes de joint.....	16
• I .9.5.Joint mécanique.....	16
• I .9.6.Béquille.....	17
• I .9.7.Déversoir d'injection de la mousse .....	17
• I 9.8.Réservoirs sous pression.....	18
• I .9.9.Les réservoirs horizontaux .....	19

# Sommaire

---

• I .9.10.Réservoirs atmosphériques .....	19
• I .10.Stockage du GNL.....	20
• I .10.1But De l'unité de Stockage .....	20
• I.10.2.La sécurité passive.....	20
• I.10.3. Interne.....	20
• I.10.4.Externe.....	20
• I.10.5.La sécurité active.....	20
• I .11.Caractéristiques Générales Des Réservoirs .....	20
• I .11.1.les réservoirs aériens a pression atmosphériques .....	21
• I .11.2.a-réservoirs à simple intégrité ou à confinement simple.....	21
• I .11.3.Un réservoir simple intégrité est composé .....	21
• I .11.4.une cuve externe remplissant trois fonctions.....	22
• I .12.réservoir aérien a double intégrité ou confinement double .....	22
• I .12.1.Les réservoirs à double intégrité sont composés de :.....	22
• I .13.Réservoir aérien à intégrité totale.....	23
• I .14.Réservoirs enterrés et semi-enterrés.....	25
• I .15.Principe de fonctionnement le stockage du GNL.....	26
• I .16. Les avantages et les inconvénients .....	26
• Références .....	28
Chapitre 02 .....	29
• 1. Introduction.....	30
• 2-Généralité sur les fissures.....	30
• 2 .1- Définition.....	30
• 2. 3- Types des fissures.....	30
• 3-Risques des fissures .....	31
• 4-objectif.....	31
• 5-Réparation du réservoir .....	32
• 5.1-Les étapes de réparation d'un réservoir .....	32
• 5.2- Procédure de réparation .....	32
A.1. Description des travaux de revêtement - Fond du réservoir : .....	35
• A.1.1 Préparation de surface.....	36
• A.1.2 Protection des surfaces sablées .....	36
• A.1.3 Traitement des points particuliers .....	37
• A.1.4. Application du revêtement .....	37

# Sommaire

---

• A.1.5 Contrôle de revêtement .....	38
• A.1.6. Les retouches et les réparations après séchage .....	38
• 5.3- Contrôles et essais .....	38
• Références .....	41
Chapitre 3 .....	42
Modélisation numérique de la réparation par patch composite d'une plaque fissurée .....	42
I. Introduction.....	43
II. Présentation du logiciel ABAQUS/CAE .....	43
a) Le module Part .....	44
b) Le module Property .....	45
c) Lemodule Assembly .....	46
d) Le module Step.....	46
e) Le module Interaction.....	46
f) Le module Load .....	47
g) Le module Mesh.....	48
h) Module Job.....	48
i) Module Visualisation .....	48
j) Modèle géométrique .....	49
III. Résultats et interprétations .....	49
1. Effet de la géométrie de la fissure .....	49
2. Effet de la réparation par Composite : .....	53
IV. Conclusion .....	55
Conclusion générale .....	58

## Liste des figures

Figure 1 : Une eau plus basse inhabituelle courtoisie AF Chicago Bridge & Iron. Company (CB & I) [1].....	4
Figure 2 : Réservoir d'eau en béton bobiné Cauftesy AF Prelaad Inc [1] .....	4
Figure 3: Un réservoir d'eau de 45 m de diamètre Conseil de Whessoe [1] .....	5
Figure 4: Fûts en bois al Vacuum Oils Millwall Works : avec l'aimable autorisation d'Amadeus Press Ltd [1] .....	6
Figure 5: Bacs de stockage [2] .....	7
Figure 6: Exemple de fondation de bac [2] .....	7
Figure 7: Robe d'un bac [2] .....	8
Figure 8: Bacs à toit fixe [2].....	9
Figure 9 : schéma Bacs à toit fixe [2] .....	10
Figure 10: Bacs à toit flottant [2].....	11
Figure 11: Exemple de bac à toit flottant, type ponton annulaire [2].....	11
Figure 12: Schéma général d'un bac de stockage [3].....	12
Figure 13: Parc de stockage de la raffinerie MiRO à Karlsruhe, en Allemagne, avec des réservoirs de forme différente pour les produits pétroliers gazeux (gaz de pétrole liquéfié), liquides (essence ou fioul) et solides (coke de pétrole).[4] .....	13
Figure 14: Réservoirs à toit flottant [5].....	14
Figure 15: Toit à flotteur unique (simple ponton) : [5] .....	15
Figure 16: Toit à double flotteur (double ponton) : [5].....	15
Figure 17 : Bague de renforcement : [5] .....	15
Figure 18 : Plate-forme supérieure: [5].....	16
Figure 19: Système d'évacuation des eaux de pluie: [5].....	17
Figure 20: Les béquilles réglables. [5] .....	17
Figure 21: Déversoir d'injection de la mousse. [5].....	18
Figure 22: Les sphères. [5] .....	18
Figure 23: Les réservoirs horizontaux. [5] .....	19
Figure 24 : Réservoirs atmosphériques. [5].....	19
Figure 25: Les réservoirs à simple intégrité – Couve Point aux USA. [5] .....	21
Figure 26 : Les réservoirs à double intégrité. [5].....	22
Figure 27: Les réservoirs à intégrité totale. [5].....	24
Figure 28: Les réservoirs à membrane-pyeong taek en corée. [5] .....	24
Figure 29: les Réservoirs enterrés et semi-enterrés. [5] .....	25
Figure 30: schéma réservoir enterré. [5] .....	26

## Liste des figures

---

Figure 31: Montage du toit flottant [5] .....	34
Figure 32 : Drainage des eaux pluviales [5] .....	34
Figure 33 Le joint de toit [5] .....	35
Figure 34 : Revêtement par la résine [5] .....	38
Figure 35: la ventouse [5].....	39
Figure 36: Etapes à suivre pour la programmation [6].....	44
Figure 37: Le modèle géométrique de la plaque réparée.....	45
Figure 38: Assemblage des structures.....	46
Figure 39: Déclaration du front de la fissure .....	47
Figure 40 : déclaration des conditions aux limites.....	47
Figure 41:le maillage du modèle géométrique .....	48
Figure 42: Le model géométrique étudié. ....	49
Figure 43 : (a) variation des facteurs d'intensité de contrainte le long du front de fissures pour des rapport c/t, (b) variation des facteurs d'intensité de contrainte pour 10% du front de fissures .....	50
Figure 44: géométrie de l'interaction des fissures .....	50
Figure 45 : distribution du facteur d'intensité de contrainte en mode I le long du front de la fissure pour X=0.6 mm (c/t=50%). ....	51
Figure 46: (A)distribution du facteur d'intensité de contrainte en mode I le long du front de la fissure 2 (c/t=50%), (B) variation du FIC K1pour X*. ....	51
Figure 47: distribution du facteur d'intensité de contrainte le long du front de la fissure 1 avec et sans la présence de la fissure 2 pour (c/t=50%). ....	52
Figure 48: distribution du FIC le long du front de la fissure 1 (A) et la fissure2(B). ....	53
Figure 49: variation des FICs le long du front de la fissure elliptique pour une plaque avec et sans réparation (c/t=50%) .....	54
Figure 50: Distribution des FICs le long du front de la fissure 1 et 2 pour une plaque avec et sans réparation (X=1.8 mm , c/t=50%).....	54
Figure 51: Distribution des FICs le long du front de la fissure 1 et 2 pour une plaque avec et sans réparation (Y=1.8 mm , c/t=50%).....	55



## Liste des tableaux

Tableau 1: Propriétés mécaniques des différents matériaux ..... 45

## **I. Introduction générale**

### Introduction générale

Les réservoirs horizontaux cylindriques sont susceptibles de stocker sous pression des produits sous phase liquide tels que le propane, le butane...etc. La majorité de ces réservoirs présente un diamètre de 1,5 m à 3 m, pour une longueur d'une dizaine de mètres, ce qui correspond à un volume compris entre 100 à 2 000 m<sup>3</sup>. Les plus longs réservoirs peuvent mesurer quelques dizaines de mètres. Les réservoirs horizontaux sont, dans le cas général, posés sur des berceaux. Il est possible de rencontrer des cas où ils sont ceinturés sur les berceaux.

Lorsque ces réservoirs présentent une fissure ou des zones corrodées, ce qui peut altérer leurs performances voire entraîner de graves conséquences environnementales s'ils ne sont pas assez tôt détectés. Un contrôle continu de suivi de sa propagation est important pour éviter d'atteindre le cas de danger.

Afin de récupérer leur performance initiale, il existe plusieurs méthodes de renforcement ou de réparation parmi lesquelles la réparation par patch en composite pour des raisons économiques et techniques, cette solution est plus utilisable.

Le but de ce projet est d'étudier le comportement en rupture d'une plaque comportant une fissure semi-elliptique sollicitée en flexion se plaçant dans le cas des supports du réservoir. Une réparation par un patch en composite est ensuite appliquée sur cette plaque pour enfin évaluer l'efficacité de cette réparation pour différentes configurations avec la méthode des éléments finis utilisant le code de calcul Abaqus/CAE 6.14.

Ce mémoire contient trois chapitres à savoir, le premier chapitre où nous allons mentionner quelques notions concernant les réservoirs de stockage des hydrocarbures. Dans le second chapitre nous allons exprimer les différentes techniques et méthodes de réparation des fissures. Enfin le troisième chapitre sera consacré aux résultats de l'étude paramétrique simulation numérique.

# **Chapitre 01**

## **Stockage d'un bac GNL**

- **I .1.Introduction**

Le processus d'évaporation du gaz naturel liquéfié (GNL) dans les bacs de stockage aériens est étroitement lié aux infiltrations thermiques à travers les parois. Celles-ci varient au cours du temps sous l'effet de divers facteurs : la température atmosphérique, la pression de stockage, le niveau de liquide (le bac n'est jamais totalement rempli) et l'ensoleillement du bac. La maîtrise de ce phénomène revêt une importance particulière car il cause une perte sensible de quantité et de qualité du produit et peut avoir une incidence sur la sécurité du stockage. [3]

La plupart des études conduites dans le domaine portent sur l'influence de la structure des réservoirs et des conditions de stockage sur le taux d'évaporation .Un aspect important du problème consiste à modéliser les échanges de chaleur à travers la couche de gaz qui se situe en haut du réservoir. Ce volume de vapeur est essentiellement constitué de méthane, à environ 150 K, et son épaisseur varie suivant la quantité de GNL stocké. Neil et al. Ont abordé ce problème en utilisant un modèle de propagation monodimensionnel pour calculer le profil vertical de température le long de la surface interne et estimer le taux d'évaporation.

- **I .2.Historique**

- **I .2.1.Réserve d'eau**

Le besoin de stockage de l'eau pour des raisons domestiques et autres a joué un rôle relativement mineur dans le développement de réservoirs de stockage modernes.L'eau est facilement stockée dans des réservoirs en utilisant au mieux des caractéristiques géographiques, des fouilles recouvertes d'argile ou même des éléments souterrains accessibles par des puits.Réservoirs de stockage d'eau conçus pour fournir une pression appropriée pour les systèmes de distribution locaux ne sont pas rares. Au Royaume-Uni, ces prennent souvent la forme de réservoirs en béton sur des structures de support surélevées situées au point le plus élevé que le paysage local permettra. Celles-ci sont généralement relativement modestes Capacité. Les réservoirs en acier rectangulaires surélevés du type Brathwaite sont également une vue commune dans les milieux industriels et les aéroports, encore une fois dans le but de fournir une hauteur d'eau appropriée aux USA et en particulier dans les paysages plats du Midwest. Des châteaux d'eau ont été utilisés pour annoncer les produits pour laquelle la ville particulière est la plus connue. D'où les watertowers Sous forme de canettes de bière, d'ananas et d'autres articles improbables peut souvent être vu [1]

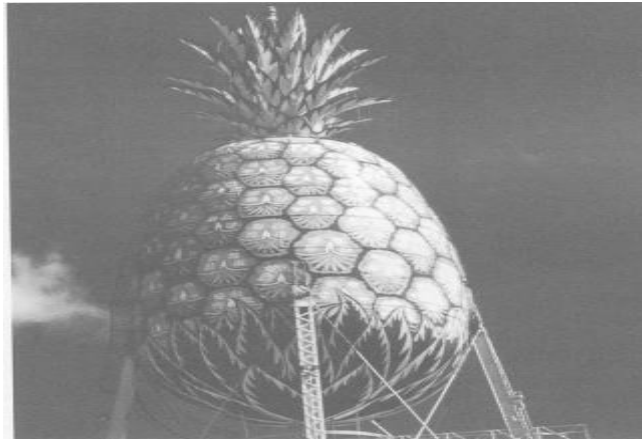


Figure 1 : Une eau plus basse inhabituelle courtoisie AF Chicago Bridge & Iron. Company  
(CB & I) [1]

Les États-Unis sont également le foyer principal du réservoir d'eau en béton précontraint. Habituellement, ceux-ci sont du type de fil de pré charge dont la figure 2.2 montre un tel réservoir.

Le stockage de l'eau à usage industriel est courant, en particulier au pouvoir Mais en dépit de cela, les vraies raisons de l'augmentation rapide [1]



Figure 2 : Réservoir d'eau en béton bobiné Cauftesy AF Prelaad Inc [1]

Dans le nombre et la taille des réservoirs de stockage est ailleurs. Chiffre 2.3 montre un réservoir d'eau de 45 m de diamètre à Peterhead Station de power en Ecosse



Figure 3: Un réservoir d'eau de 45 m de diamètre Conseil de Whessoe [1]

### • I .2.2.Stockage d'huile

Les premiers puits de pétrole réussis aux États-Unis ont généralement été forés à Titusville, Pennsylvanie en 1859. En Russie et en Roumanie, les premiers puits ont été forés en 1860 et dans les Indes néerlandaises en 1865. Produits à base de pétrole avant le forage des puits provenaient de diverses sources et étaient utilisés en quantités modestes. Outre les sources animales et végétales, la distillation d'huile minérale naturelle, souvent sous forme de schistes bitumineux, et les goudrons résiduels des usines à gaz, ont été le point de départ des produits pétroliers plus légers nécessaires à l'éclairage domestique, entre autres utilisations. Le forage des premiers puits aux États-Unis a été motivé par les besoins de sources moins chères de produits à base de pétrole, en particulier le kérosène, ou la paraffine comme ii est connue au Royaume-Uni. L'expansion spectaculaire de l'industrie pétrolière aux États-Unis suite au forage des premiers puits est bien enregistrée. La formation de Standard Oil par John Rockefeller en 1870 a conduit cette société à dominer l'industrie de la tête de puits, en passant par le processus de raffinage jusqu'à la distribution et la commercialisation des produits finis. Il n'est donc pas surprenant que la Standard Oil ait finalement enfreint les lois antitrust américaines et a été divisée en 1911 en 34 sociétés distinctes et indépendantes. Beaucoup de ces entreprises continuent d'exister à ce jour sous la forme de noms connus tels qu'Exxon, Mobil, Chevron, Texaco pour n'en citer que quelques-uns. Le pétrole des premiers puits aux États-Unis était placé dans des barils de whisky, qui constituaient à l'époque un récipient facilement disponible. Les tonneaux en bois n'étaient pas entièrement adaptés au stockage du pétrole. Ils ont été conçus à l'origine pour le stockage de fluides aqueux qui ont fait gonfler les bâtons de bois et devenir progressivement plus étanches. L'huile n'avait pas un effet similaire et malgré les efforts pour enduire l'intérieur des fûts de colle, les fuites causées par le manque d'étanchéité et les dommages mécaniques étaient toujours un problème. Un rapport de

l'époque rapporte que dans les usines de Wordsworth de Vacuum Oil au Royaume-Uni, les barils étaient stockés dans un champ et pendant l'été, ils se desséchaient et fuyaient. Finalement, le sol est devenu gorgée de pétrole et des fosses ont dû être creusées pour récupérer le pétrole qui avait fui. La figure 2.4 montre les piles de tonneaux en bois aux usines de Vacuum Oil's Millwall.[1]



Figure 4: Fûts en bois al Vacuum Oils Millwall Works : avec l'aimable autorisation d'Amadeus Press Ltd [1]

- **I .3.Définitions**

- **I .3.1.Les bacs de stockage à terre**

Les réservoirs, généralement de forme cylindrique, sont de deux types : les réservoirs à toit fixe et les réservoirs à toit flottant. Sur ces derniers, le toit flotte, monte et baisse au gré de la montée ou de la descente du produit contenu dans le bac. [2]





Figure 5: Bacs de stockage [2]

- **I.3.2. Les bacs à toit fixe**

Les bacs à toits fixes sont prévus pour le stockage d'hydrocarbures peu volatiles du type brut dégazé, fuel ou bitumes qui génèrent de faibles émissions à l'atmosphère (pression interne en marche normale est quasi nulle).

De conception, ils ont une construction simple, un toit légèrement conique ou hémisphérique autoportant ou sur poteaux avec ou sans charpente. Ils sont le plus économiques à installer.

Le fond du bac est construit en plaque de tôles se recouvrant et soudées entre elles. Il est conçu pour permettre une vidange aussi complète que possible. La pente vers le drain, au centre ou en périphérie, est alors de 1 à 2 %. [2]

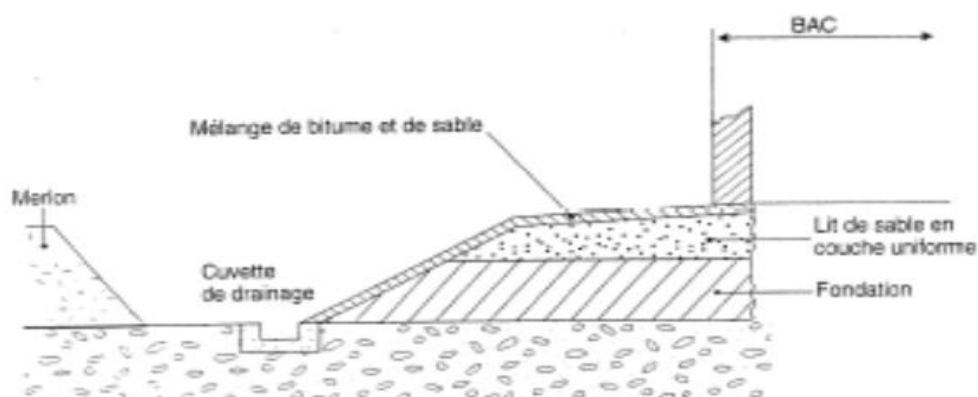


Figure 6: Exemple de fondation de bac [2]

La robe du bac est constituée d'un empilage vertical de bandes de tôles soudées. Elle est calculée pour résister à la pression latérale (bac plein d'eau) et résister au vent et tremblements de terre. [2]

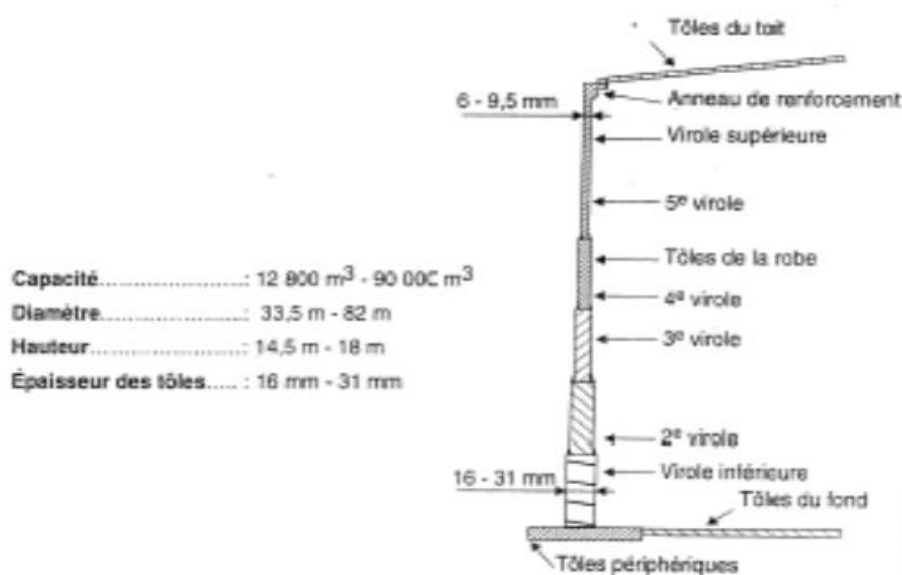


Figure 7: Robe d'un bac [2]

Le bac est également ceinturé pour maintenir la forme cylindrique de celui-ci. Sur le toit du bac, un certain nombre d'équipements va contribuer aux différents contrôles de l'opérateur et assurer la sécurité de l'installation.

- Événements
- Soupapes de respiration avec pare flammes
- Puits de jauge
- Tubes de prises d'échantillon
- Passerelles d'accès
- Parafoudre [2]



Figure 8: Bacs à toit fixe [2]

De même sur la robe du bac, afin de faciliter l'accès au toit, un escalier ou un échelle sera installé ainsi que le matériel de suivi du niveau ou de lutte incendie.

- Tubulures d'exploitation et de purge
- Réseaux incendie mousse vers l'intérieur
- Réseau eau pour refroidissement robe
- Instrumentation (niveaux, alarmes, température interface...)
- Matériel d'homogénéisation, agitateurs ou buses de circulation
- Connexions des réseaux de réchauffage
- Mises à la terre
- Trous d'homme [2]

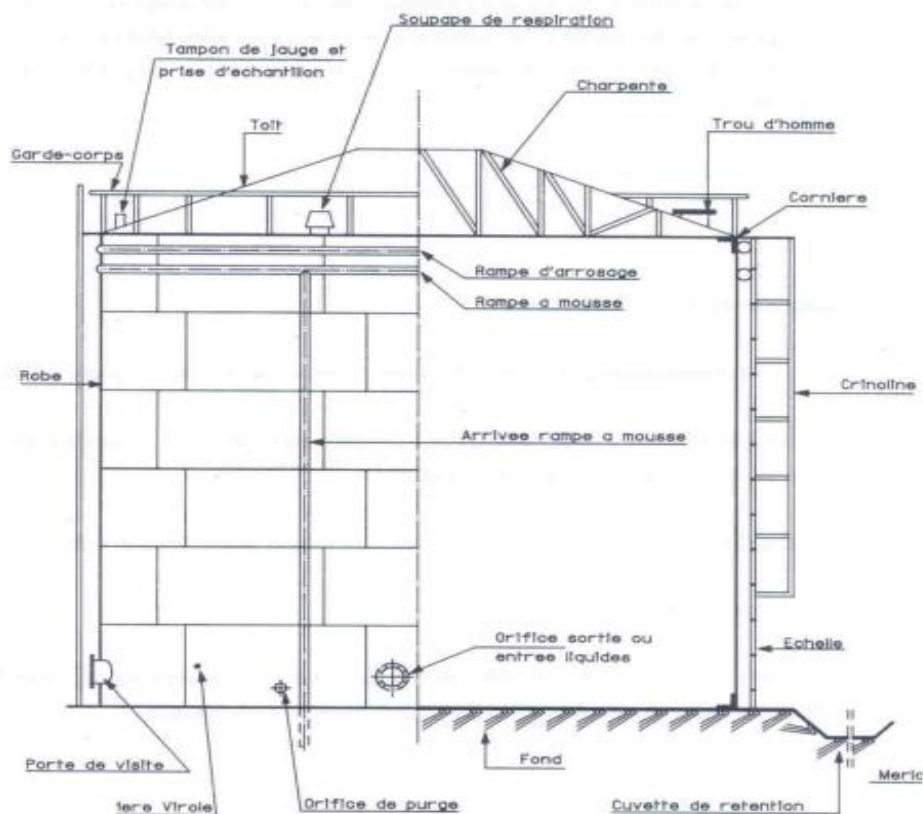


Figure 9 : schéma Bacs à toit fixe [2]

Les bacs à toit flottant Les bacs à toit flottant sont destinés au stockage des hydrocarbures les plus volatiles. Le produit stocké doit être préalablement dégazé.

Dans le bac sans toit fixe est placée une structure qui flotte à la surface du liquide pour éviter la formation d'un ciel gazeux. De ce fait, l'espace vapeur en surface est éliminé, ce qui a pour but de réduire les pertes par évaporation, diminuer les risques incendie et diminuer la pollution atmosphérique.

Enfin, le volume très important de ces bacs pourra aller jusqu'à 1 million de barils. [2]



Figure 10: Bacs à toit flottant [2]

De même que les bacs à toit fixe, les bacs à toit flottant ont un équipement spécifique dû à leur technologie. Des béquilles ou pieds de supports pour recevoir le toit quand le bac est vide, une échelle de toit et des trous d'homme pour accéder aux caissons de flottaison, des tubes de jauges et prises d'échantillons.

Les toits seront équipés de soupapes automatiques casse vide et de barrage à la mousse pour éviter un collapse de la robe et prévenir les feu à l'intérieur du bac. Des joints d'étanchéité assureront l'étanchéité entre le toit et la robe du bac.

Deux types de drains assureront l'évacuation des eaux de pluie, le drain principal du toit plus un drain de secours [2]

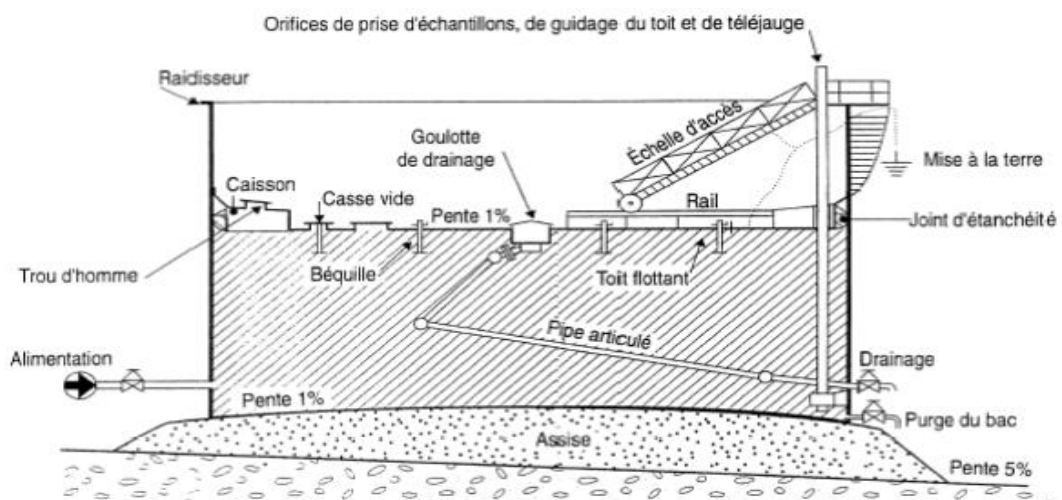


Figure 11: Exemple de bac à toit flottant, type ponton annulaire [2]

### • I.4. Equations et méthode de résolution

Nous considérons une représentation en vrai grandeur du réservoir (figure 1). Notre modèle est fondé sur l'hypothèse que la couche de gaz (volume de gaz évaporé au-dessus du liquide) est le siège d'une stratification thermique stable (gaz chaud en haut, gaz froid en bas) et que le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par conduction, sauf au niveau des couches limites le long des parois verticales. [3]

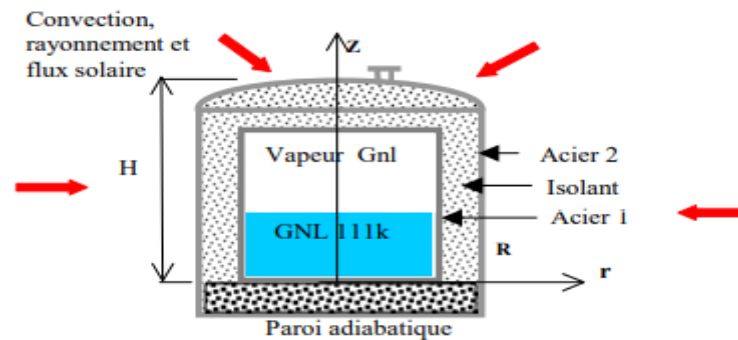


Figure 12: Schéma général d'un bac de stockage [3]

### • I.5. Stockage du GNL

Le volume total du stockage au terminal méthanier correspond au volume physique des cuves de stockage de GNL au terminal méthanier. [2]

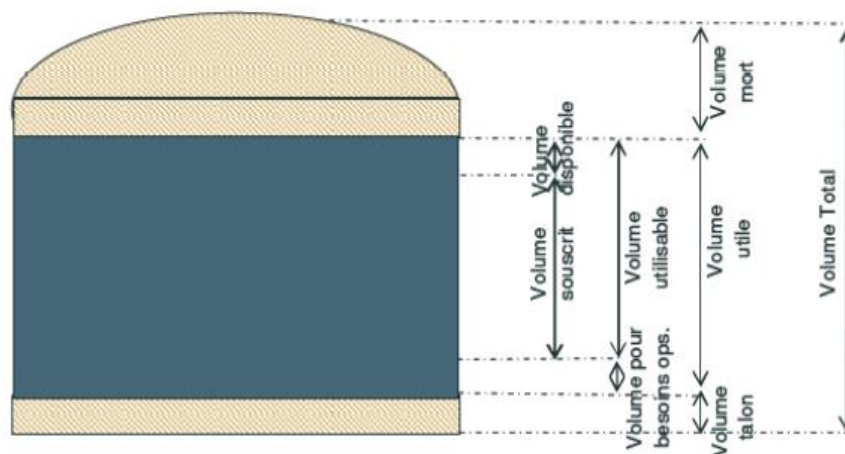


Figure I.13: Stockage GNL [2]

Le volume utile du stockage au terminal méthanier est obtenu par la différence entre le volume total et, le volume du talon (volume qui ne peut être extrait dans des conditions d'exploitation normales) et, le volume mort qui ne peut être rempli dans des conditions d'exploitation normales (volume au-dessus des niveaux d'alarme et volume ne pouvant être

rempli afin de conserver la possibilité de circulation de GNL entre les différentes cuves de stockage de GNL).

Le volume utilisable du stockage au terminal méthanier est obtenu par la différence entre le volume utile du stockage et, le volume du stockage pour besoins opérationnels.

Le volume disponible à un moment donné est la partie du volume utilisable non allouée et encore disponible pour les utilisateurs du terminal méthanier. [2]

### • I .6.Rôle de stockage

Le stockage des ressources énergétiques est non seulement nécessaire pour compenser les fluctuations d'approvisionnement dues à toutes sortes d'aléas lors de la production, du transport et du raffinage, ou les variations de la consommation, qui dépendent notamment des conditions météorologiques. Il est aussi stratégique pour assurer un minimum d'autonomie énergétique du pays consommateur.

Le stockage doit être assuré aux différentes étapes du cheminement du pétrole, depuis le puits de production jusqu'aux lieux de consommation.

Les dépôts pétroliers importants se trouvent essentiellement sur les lieux de production du pétrole brut, aux extrémités des oléoducs, dans les terminaux de chargement et de déchargement du pétrole, à proximité des raffineries. Ces stockages concernent le pétrole brut, les charges, les coupes intermédiaires et les produits finis avant expédition. [4]



Figure 13: Parc de stockage de la raffinerie MiRO à Karlsruhe, en Allemagne, avec des réservoirs de forme différente pour les produits pétroliers gazeux (gaz de pétrole liquéfié), liquides (essence ou fioul) et solides (coke de pétrole).[4]

- **I .7.Les différents types de réservoirs**

Réservoirs à toit flottant : Ils sont utilisés pour le stockage des produits volatils (pétrole brut, condensat, carburants auto...etc.) ils ressemblent au réservoir à toit fixe sauf dans la conception du toit. Le toit dans ce cas repose directement sur le liquide et flotte au dessus de celui-ci grâce à des double fonds constituant des poches d'air indépendantes réduisant ainsi le poids spécifique de l'ensemble du toit par rapport à celui du liquide. La circonférence du toit est rendue étanche par des bandes en caoutchouc glissant sur la paroi interne de la robe du réservoir, ce qui réduit les pertes par évaporation du produit. Ce dispositif étanche permet le déplacement du toit. Lorsque le toit repose sur le fond du réservoir, il repose sur des supports spéciaux (béquilles). [5]



Figure 14: Réservoirs à toit flottant [5]

- **I .8.Le toit flottant**

Peut-être de deux types :

- à flotteur unique
- à double flotteur

- **I .8.1.Toit à flotteur unique (simple ponton)**

Il est constitué par une surface centrale de plaques avec une couronne circulaire soudée sur sa périphérie composée de caissons «tanches flottants voir figure) [5]



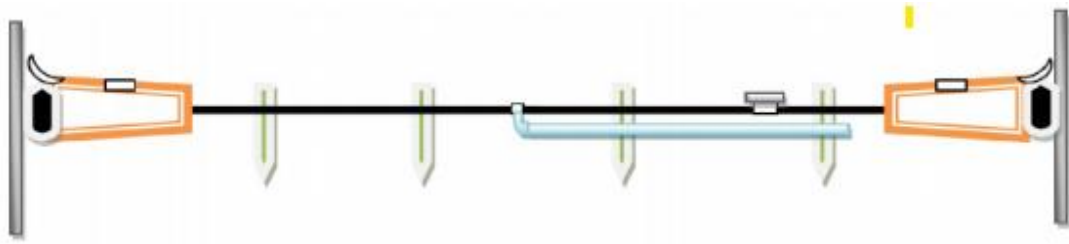


Figure 15: Toit à flotteur unique (simple ponton) : [5]

- **I.8.2.Toit à double flotteur (double ponton)**

Il est constitué par deux surfaces de tôles circulaires. L'une recouvre l'autre et séparées l'une de l'autre par des cloisons ou des charpentes de façon à créer un matelas d'air entre le produit stocké et l'atmosphère. [5]

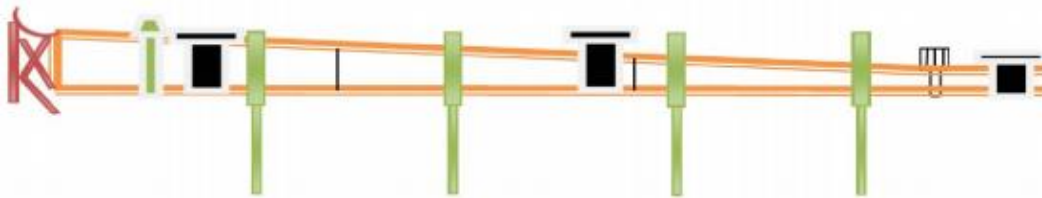


Figure 16: Toit à double flotteur (double ponton) : [5]

- **I.9.Accessoires**

En plus de quelques accessoires identiques à ceux dans un réservoir à toit flottant on trouve

- **I.9.1.Bague de renforcement**

Au dessus de la robe avec une main courante qui a deux rôles : augmenter la rigidité de la partie supérieure de la robe et permettre l'accès autour du toit. [5]

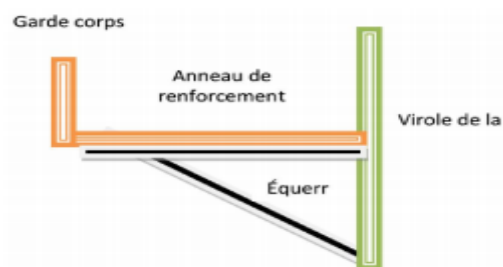


Figure 17 : Bague de renforcement : [5]

- **I.9.2. Plate-forme supérieure**

Elle se trouve au dessus de la bague de renforcement et à laquelle est fixée une échelle coulissante sur des glissières fixées sur le toit flottant.

Event pour la zone périphérique pour permettre aux gaz excédentaires qui ont été formés de s'échapper [5].

- **I.9.3. Clapet d'aération automatique**

Il s'ouvre lorsque le toit repose sur le fond. Il a les mêmes fonctions que celles des événements décrites pour les événements dans les réservoirs à toit fixe.

- **I.9.4. Systèmes de joint**

L'étanchéité entre le toit flottante et la robe du bac est assurée par des joints qui peuvent être réalisés de différentes manières.

- **I.9.5. Joint mécanique**

Des patins d'acier viennent racler la paroi. L'étanchéité est réalisée par un joint élastomère flexible situé au-dessus du liquide et ne subissant pas de contrainte. Le joint est maintenu appliqué contre la paroi par un contre poids.

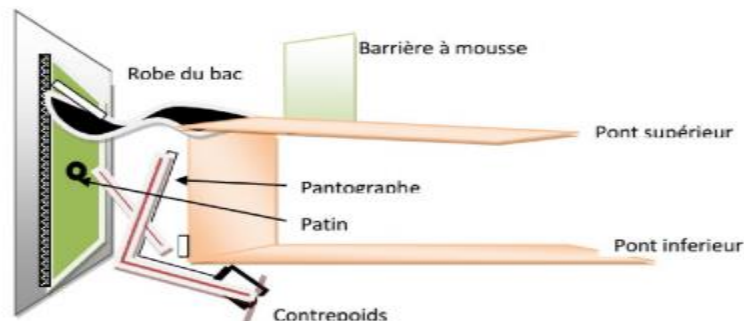


Figure 18 : Plate-forme supérieure: [5]

Joint liquide : L'étanchéité entre la robe et le toit est maintenue par un "boudin" rempli de kérosène ou de gazole. [5]

Système d'évacuation des eaux de pluie : La pluie s'accumule au centre du toit et est évacuée à l'aide d'un tube articulé placé dans le réservoir pour être évacué par une prise de soutirage se trouvant dans le fond de la robe. De plus, en cas de bouchage de ce système, un drain de sécurité permet à l'eau de s'écouler dans le produit afin d'éviter que le toit coule [5]

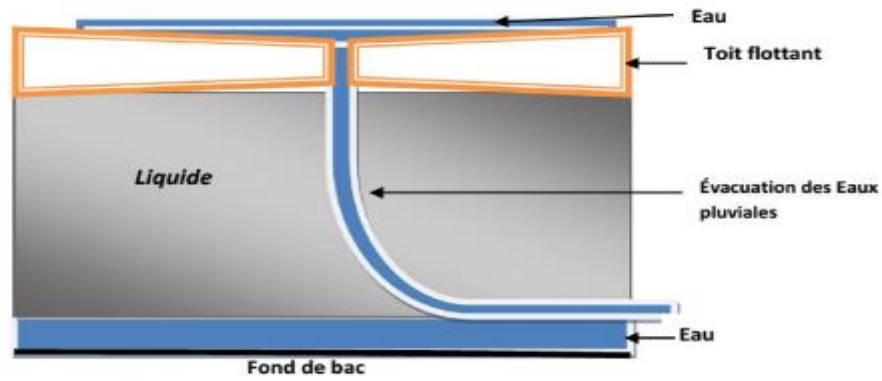


Figure 19: Système d'évacuation des eaux de pluie: [5]

- **I.9.6. Béquille**

- Lorsque la hauteur du liquide ne permet plus de maintenir le toit en flottaison, son support est assuré par des béquilles. Les bacs peuvent comporter deux types de béquilles (on à citer un type):
- Les béquilles réglables (la hauteur de réglage est fonction des consignes d'exploitation)

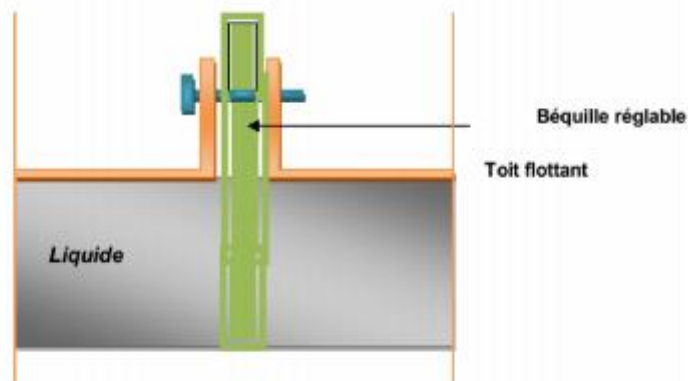


Figure 20: Les béquilles réglables. [5]

- **I.9.7. Déversoir d'injection de la mousse**

Injection à l'extérieur d'un bac  $\phi$  toit flottant, sur le joint d'étanchéité. Une couronne métallique soudée sur le toit permet de retenir la mousse sur la périphérie afin de recouvrir le joint [5]

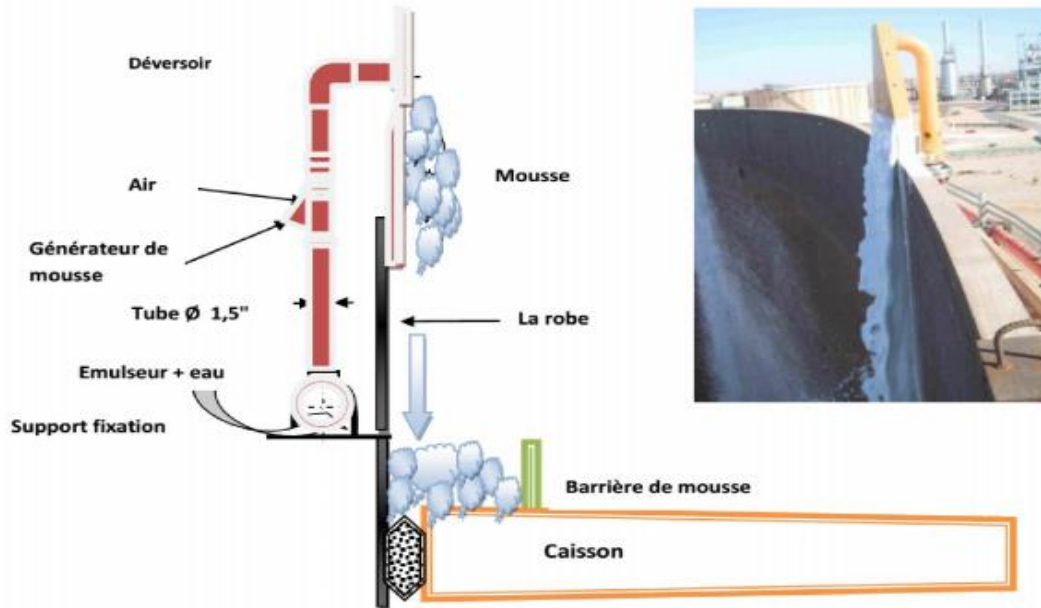


Figure 21: Déversoir d'injection de la mousse. [5]

- **I 9.8. Réservoirs sous pression**

- **Les sphères**

Dans ce type de réservoir, et pour ce qui concerne les raffineries, sont stockés sous pression des produits sous phase liquide tels que le propane, le butane, ...

Leur rayon est compris entre 5 et 10 m, pour un volume de 500 à 4500 m<sup>3</sup>. La masse stockée varie selon la densité de la phase de liquide de produit stocké. Pour une sphère de 1000 m<sup>3</sup>, la masse varie de 400 t (propane) à 700 t (oxyde d'éthylène). L'épaisseur de la paroi est toujours supérieure à 10 mm. Ce réservoir doit résister à des pressions internes de 8-9 bars pour le butane jusqu'à 25 bars pour le propane. [5]



Figure 22: Les sphères. [5]

- **I.9.9. Les réservoirs horizontaux**

Ce type de réservoirs cylindriques est susceptible de stocker les mêmes produits que les sphères dont il vient d'être question. La majorité de ces réservoirs présente un diamètre de 1,5 m à 3 m, pour une longueur d'une dizaine de mètres, ce qui correspond à un volume compris entre 100 à 2 000 m<sup>3</sup>. Les plus longs réservoirs peuvent mesurer quelques dizaines de mètres. Les réservoirs horizontaux sont, dans le cas général, posés sur des berceaux. Il est possible de rencontrer des cas où ils sont ceinturés sur les berceaux. [5]



Figure 23: Les réservoirs horizontaux. [5]

- **I.9.10. Réservoirs atmosphériques**

Les réservoirs atmosphériques représentent la très grande majorité du parc de réservoirs de grande capacité contenant des liquides inflammables. Ils présentent classiquement un grand diamètre et donc par voie de conséquence un « lancement faible. Ils sont constitués d'une unique enveloppe ou d'une double enveloppe métallique. Ces réservoirs sont le plus souvent,

**Métalliques:** leurs fonds, leurs robes et leurs toits sont en acier

**Verticaux :** leur axe de symétrie est vertical [5]



Figure 24 : Réservoirs atmosphériques. [5]

- **I .10.Stockage du GNL**

- **I .10.1But De l'unité de Stockage**

Le but de l'unité de stockage et expédition est d'assurer le bon stockage de GNL produit par le train de liquéfaction dans les bacs de stockages. En moyenne, un GNL a une masse volumique de l'ordre de 480 kg/m<sup>3</sup> et un pouvoir calorifique de 25 GJ. La grande volatilité représente un danger potentiel très important. La conception des réservoirs et de leur environnement est donc dominée par le problème de la sécurité. Celui-ci s'analyse en plusieurs aspects :

- **I.10.2.La sécurité passive**

Consiste à concevoir le réservoir de stockage de manière à minimiser la probabilité des incidents et leurs conséquences. Ces incidents peuvent être de nature interne ou externe.

- **I.10.3. Interne**

Risque de fuite, de choc thermique, de surpression, d'évaporation anormale et brutale, etc.

- **I.10.4.Externe**

Incendie à l'extérieur du réservoir, séisme, chute d'objets volants, sabotage par arme distance, sabotage par charge portative.

- **I.10.5.La sécurité active**

Consiste à disposer de moyens de lutte contre les conséquences incidents: cuvettes de rétention en cas de fuite, dispositifs de lutte contre l'incendie, etc. [5]

- **I .11.Caractéristiques Générales Des Réservoirs**

Un réservoir de stockage est déterminé par sa forme, ses dimensions géométriques qui déterminent notamment le volume contenu, sa pression et la température du produit stocké d'ailleurs liée à sa pression par la loi de vapeur saturante. La forme sphérique est la mieux adaptée à l'isolation, mais pour des capacités dépassant 15 à 20 000 m<sup>3</sup> , on a toujours recours à la forme cylindrique. Si l'on suppose (hypothèse grossière) que les «changes thermiques ont même intensité au m<sup>2</sup> sur la surface latérale, le fond et le toit, on démontre que la forme la plus favorable d'un réservoir cylindrique vérifie l'égalité : Hauteur=Diamètre En fait, il est quelquefois difficile de réaliser cette condition, pour des raisons d'environnement ; il est fréquent que le rapport diamètre/hauteur soit supérieur à 1. La pression est toujours légèrement supérieure à la pression atmosphérique, de manière à éviter les rentrées d'air qui, avec la vapeur du GNL, provoqueraient des mélanges explosifs ; la

surpression est de l'ordre de quelques dizaines de millibars. La température interne est celle correspondant à l'ébullition du produit ; elle est de l'ordre de  $-160^{\circ}\text{C}$ . Un réservoir est donc toujours constitué de deux enveloppes séparées par une épaisseur importante de calorifuge. Malgré cette isolation, les apports calorifiques inévitables, en provenance de l'extérieur, se traduisent par une évaporation du produit, à température constante. La qualité de l'isolation se traduit donc par le taux d'évaporation, exprimé généralement en pourcentage par jour. Les réservoirs doivent satisfaire  $\phi$  des conditions de nature mécanique et de nature thermique ; ces deux types de conditions sont énumérés séparément ci-dessous, dans un but de clarification, mais en fait les problèmes mécanique et thermique sont intimement liés [5]

- **I .11.1.les réservoirs aériens a pression atmosphériques**

Avec cuve interne "autoportante" (c'est-à-dire capable de contenir la charge hydrostatique du GNL) et avec cuve externe métallique ou d'autre nature se type est répartie en trois :

- **I .11.2.a-réservoirs à simple intégrité ou à confinement simple**

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

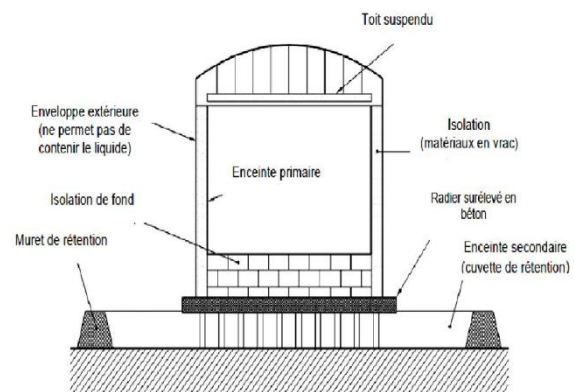


Figure 25: Les réservoirs à simple intégrité – Couve Point aux USA. [5]

- **I .11.3.Un réservoir simple intégrité est composé**

**I.11.3.1.une cuve interne autoportante :** qui contient directement le GNL, réalisée en matériau ductile basse température (aluminium, acier, inoxydable, ou acier à 9% de nickel).

**I.11.3.une isolation permettant de contrôler l'évaporation :** du contenu liquide de la cuve interne réalisée en :

- matériau pulvérulent pour les parois latérales (nom commercial "perlite", fabriquée sur place

- Par expansion de sable de silice)
- perlite ou laine de verre pour l'isolation haute,
- bloc de verre cellulaire (foam glass),
- **I .11.4.une cuve externe remplissant trois fonctions**
  - empêcher la pénétration d'eau provenant de l'extérieur vers la cuve interne,
  - contenir l'isolation,
  - être étanche au gaz d'évaporation produit par le liquide stocké.
- **I .12.réservoir aérien a double intégrité ou confinement double**

L'objectif de cette seconde technologie de réservoir était de diminuer les surfaces au sol de ces zones de stockage

(Directement par les cuvettes de rétention et indirectement par les distances d'effets consécutives à un accident majeur) tout en améliorant les conditions de sécurité (limiter les risques d'épandage de GNL suite à des agressions externes, diminuer les zones d'effets thermiques autour des réservoirs)... [5]

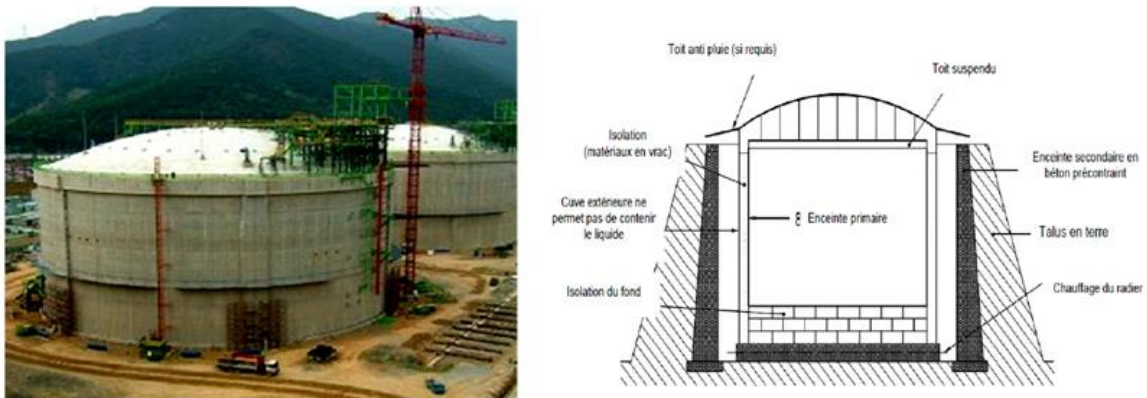


Figure 26 : Les réservoirs à double intégrité. [5]

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

- I .12.1.Les réservoirs à double intégrité sont composés de :
  - **Une enceinte primaire Autoporteuse en acier spécial:** (cryogénique– 9% Nickel) capable de contenir le liquide réfrigéré en conditions normales de fonctionnement (cf. réservoir à simple intégrité décrit dans le paragraphe ci-dessus) et comprenant une cuve interne, une isolation et une enveloppe



externe,

- **Une enceinte secondaire**(structure supplémentaire) autour de ce réservoir constituée d'un talus ou d'une cuve en matériaux résistants aux conditions cryogéniques (béton, acier cryogénique), conçue pour retenir tout le liquide contenu dans la cuve primaire, en cas de fuites, et placée à proche distance de la cuve primaire.

La cuve secondaire est du type à toit ouvert et ne peut donc nullement retenir les vapeurs émises par le produit. L'espace compris entre les cuves primaire et secondaire peut être couvert par « un écran anti-pluie » assurant la protection contre les intempéries (pluie, neige), l'infiltration d'impuretés, etc. Il est à noter que les réservoirs à double intégrité ne possèdent pas de cuvette de rétention supplémentaire autour de la cuve extérieure car cette fonction est assurée par l'enceinte secondaire. Ainsi, la zone d'effets thermiques se trouve considérablement réduite. [5]

### • **I .13.Réservoir aérien à intégrité totale**

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

La principale évolution du réservoir à intégrité totale réside dans l'intégration d'une enceinte en béton armé précontraint, directement liée et construite sur la base du réservoir couronnée d'un dôme d'acier et de béton armé. Ces réservoirs sont composés de:[5]

- une enceinte primaire autoporteuse en acier spécial (cryogénique – 9% Nickel) capable de contenir le liquide réfrigéré en conditions normales de fonctionnement,
- une isolation identique aux technologies précédentes,
- une enceinte secondaire autoporteuse en béton armé précontraint pourvue d'un dôme hémisphérique capable d'assurer les fonctions suivantes :
- En service normal :
- contenir les vapeurs émises du réservoir et maintenir l'isolation de la cuve primaire,
- éviter la perte de capacité de confinement à la suite d'un scénario

accidentel résultant d'une agression extérieure (impact, feu...).

- En fonctionnement dégradé (cas de fuite de l'enceinte primaire) :
- Contenir la totalité du liquide réfrigéré,
- Contrôler l'évacuation de la vapeur provenant de cette fuite et ce sans que la capacité structurelle contenant la vapeur ne soit affectée. La mise à l'air libre des vapeurs est autorisée mais elle doit être contrôlée (système de décharge). [5]

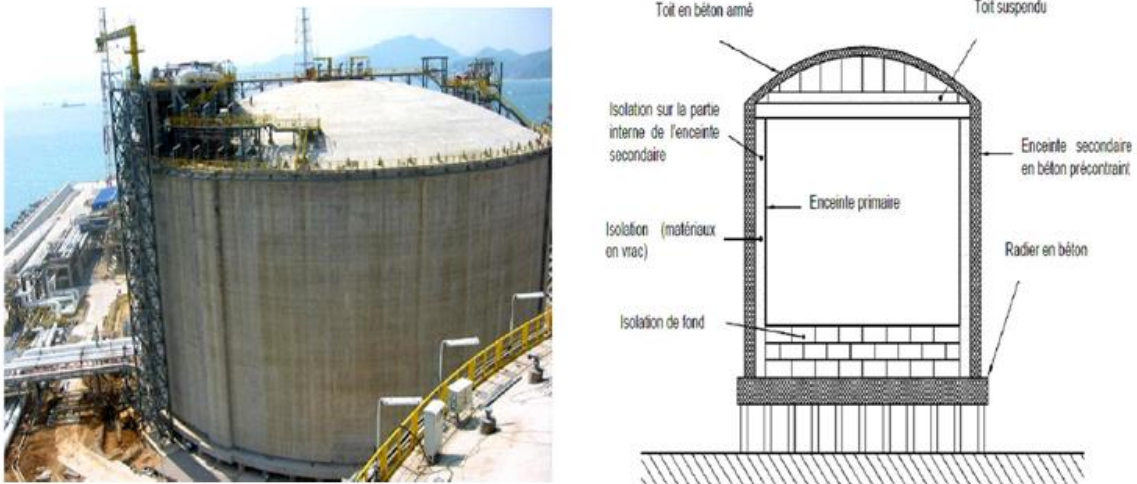


Figure 27: Les réservoirs à intégrité totale. [5]

Réservoirs aériens dits à "membrane": où sont appliquées les techniques de cuves des navires méthaniers. La cuve interne est soit métallique en tôle mince, soit en matière plastique mince et elle ne joue qu'un rôle d'étanchéité, la charge hydrostatique du liquide étant reportée, par l'intermédiaire de l'isolation, sur la cuve externe construite en béton précontraint [5]

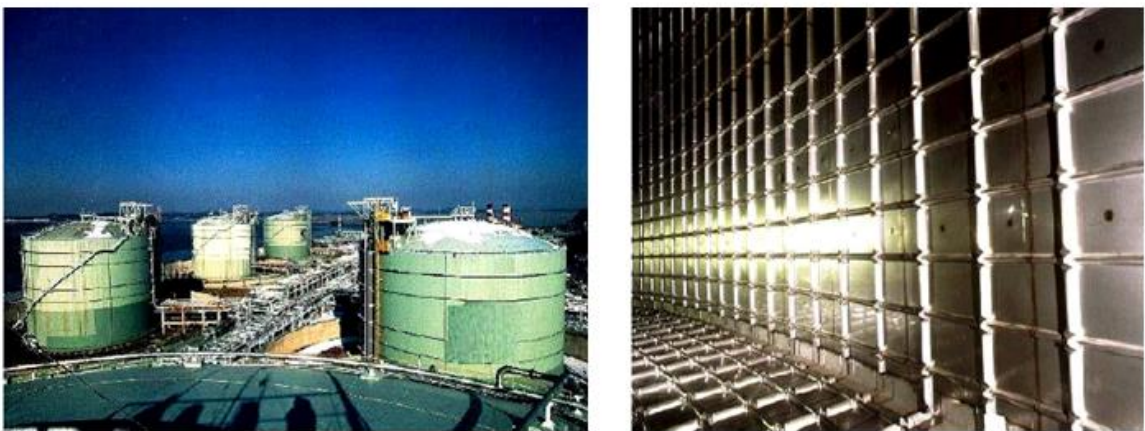


Figure 28: Les réservoirs à membrane-pyeong taek en corée. [5]

- I.14. Réservoirs enterrés et semi-enterrés

Cette conception a été développée, pour les réservoirs enterrés, au Japon par Tokyo Gaz Engineering (TGE) au début des années 1970 puis reprise par la suite par d'autres industries gazières japonaises. Elle combine deux techniques : la membrane (basée sur un développement de la technologie TECHNIGAZ) et la technique d'une cuve en béton semi-enterrée. Les trois principales raisons associées à cette dominance de technologie de réservoir sont liées à l'environnement industriel présent sur le pays :

- L'exiguïté des surfaces disponibles,
- La proximité des villes par rapport aux sites industriels,
- Le risque de tremblement de terre. [5]



Réservoir semi-enterré



Réservoir enterré

Figure 29: les Réservoirs enterrés et semi-enterrés. [5]

Le système de confinement est très similaire à celui décrit précédemment :

- Une membrane en acier inoxydable en tôles ondulées soudées entre elles. La principale différence est l'épaisseur de la membrane légèrement supérieure par rapport à celle de la technologie TECHNIGAZ,
- Des panneaux d'isolation du type mousse de polyuréthane,
- Un toit suspendu à la coupole en acier carbone,
- Une structure en béton,[5]

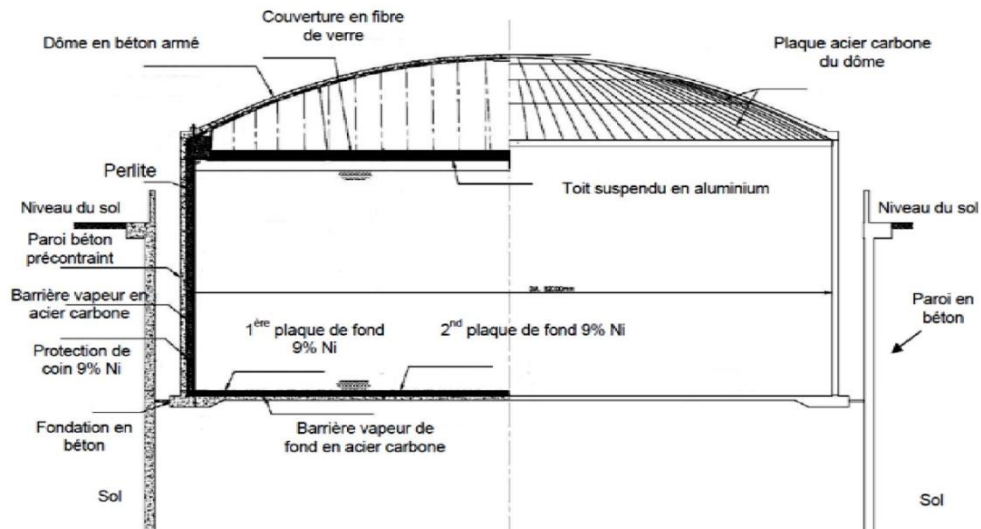


Figure 30: schéma réservoir enterré. [5]

### • I.15.Principe de fonctionnement le stockage du GNL

Le **stockage du GNL** est particulier de par la nature même du produit qui doit être conservé. Il s'agit en effet de "transformer" le gaz naturel en un élément liquide, en le faisant passer dans une unité de liquéfaction, qui va lui faire subir quatre traitements successifs

- l'**épuration**, qui consiste à extraire le dioxyde de carbone du gaz naturel ;
- la **déshydratation**, afin d'éviter la formation d'hydrates de méthane ;
- le **pré-refroidissement**, à  $-30\text{ °C}$  ;
- la **liquéfaction** dans des colonnes frigorifiques, une étape à l'issue de laquelle le gaz est entièrement liquide à pression atmosphérique et atteint une température de  $-161\text{ °C}$ .

Liquéfié, le gaz naturel prend beaucoup moins de place qu'à l'état naturel :  $1\text{ m}^3$  de GNL correspond en effet à environ  $600\text{ m}^3$  de gaz naturel ! De fait, les **réservoirs de GNL** sont installés près des terminaux méthaniers - afin de réceptionner et de **stocker le GNL** acheminé par navires - ou près des unités de liquéfaction. Il s'agit de grands réservoirs cylindriques verticaux, qui disposent d'une double paroi et d'une puissante isolation thermique, dans le but de maintenir le gaz à l'état liquide.

### • I.16. Les avantages et les inconvénients

Le premier avantage du stockage du GNL est le plus évident : puisqu'il s'agit d'un stockage aérien, l'endroit d'implantation ne dépend pas des conditions géologiques du site, contrairement, par exemple, au stockage en cavités salines ou minées. Comme l'ensemble du

dispositif de stockage est "artificiel", sa maintenance est plus aisée : en cas de dysfonctionnement, il est plus facile de trouver d'où vient la panne ! Reste quelques inconvénients, souvent liés aux matériaux choisis pour isoler l'unité de stockage (encrassement, faible durabilité...). Une question financière, enfin : l'investissement initial pour la création d'un **site de stockage de GNL** est important.

- **Références**

[1] Guide to storage tanks & equipment bob long and bob garner

[2] LES EQUIPEMENTS STOCKAGE ET TERMINAUX SUPPORT DE FORMATION  
COURS EXP-PR-EQ220 Révision 0.1 total

[3] Rafika HARITI(1), Abderrahmane BENBRIK(1), Denis LEMONNIER(2), Khaled KHALDI(1) (1) Laboratoire de Génie Physique des Hydrocarbures,

[4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage\\_du\\_p%C3%A9trole\\_et\\_du\\_gaz#R%C3%A9f%C3%A9rences](https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_du_p%C3%A9trole_et_du_gaz#R%C3%A9f%C3%A9rences)

[5] M. KARDACHE & A .LOUNIS, Stockage des hydrocarbures, 1 ère Partie, Département Mécanique Pétrolière et Transport des HC, Ecole d'Arzew, IAP, février 2015 I.KARA, PFE Master TDH-DpT G.Transports, Université constantine1, 2016 hydrocarbures, 2016-2017

[6] Etude de la propagation d'une fissure sous chargement thermique cyclique induisant un gradient de température dans l'épaisseur Présentée par : Hoai Nam LE Soutenue le 12 Mai 2009

# **Chapitre 02**

## Techniques de réparation des fissures

- **1. Introduction**

Au cours de ce chapitre, nous étudierons les différentes fissures et ruptures auxquelles les réservoirs de gaz naturel liquéfié peuvent être exposés et les risques qui en découlent, et nous proposerons également quelques techniques de réparation des fractures.

- **2-Généralité sur les fissures**

- **2.1- Définition**

La fissuration est le résultat de l'endommagement local des plans cristallographiques provoqué, généralement, par une sollicitation mécanique répétée. Malgré le fait que la contrainte maximale ne dépasse pas la contrainte d'écoulement du matériau, il se crée au niveau microscopique des déformations plastiques permanentes. Ces dernières se traduisent par une cisssion des plans cristallographiques menant à une décohésion du grain. Suite à cette décohésion, des vallées sont produites d'où peuvent s'amorcer les fissures (Forsyth, P.J.E., 1957; Wood, 1958).

Lorsqu'une fissure est amorcée, deux options sont envisageables. Soit elle progresse ou elle cesse d'avancer. Si les conditions de chargements nécessaires à l'amorçage sont maintenues, certaines fissures vont se propager à un rythme croissant jusqu'à ce que la longueur du défaut atteigne la valeur critique, menant à la rupture de la pièce. Dans le cas d'un chargement de type déplacement imposé, il est possible que la fissure arrête sa progression puisque l'augmentation de l'énergie potentielle du corps ne suffit plus à surpasser l'énergie de rupture. [1]

- **2. 3- Types des fissures**

**1) Fissures longitudinales :** Elles sont formées dans le sens de l'extraction de l'acier. La présence de ces défauts entraîne le rejet de l'acier.

**2) Fissures transversales :** Ces fissures apparaissent généralement en raison des tensions dans la direction longitudinale du brin. Les fissures transversales sont généralement broyées dans les limites admissibles à condition qu'elles ne soient pas profondes.

**3) Fissures en étoile:** Ces fissures sont très fines et causées par la nature fragile du fil à haute température. Ils ne sont visibles que sur une surface sans écailles. La surface est généralement moulue localement pour éliminer le défaut. Un refroidissement local intense et la présence de cuivre à la limite des grains austénitiques provoquent des fissures en étoile [2].



### • 3-Risques des fissures

La sécurité, thème de plus en plus porteur dans l'opinion publique, désigne généralement dans notre langage courant l'ensemble des mesures visant à limiter les risques d'accidents pouvant affecter notre état de santé. Ces risques présentent dans la société et plus largement dans l'environnement dans lequel nous vivons ont des origines très variées. On parlera ainsi, sans que la liste soit exhaustive, des risques naturels, des risques domestiques, des risques technologiques ou encore des risques politiques. Les risques technologiques désignent l'ensemble des dangers ou situations dangereuses (pour l'homme mais aussi pour l'environnement) pouvant être provoqués par des installations techniques créées par l'homme et appartenant dans la plupart des cas au secteur industriel. Concernant le domaine des risques technologiques, on parlera donc également de risques industriels. Les dangers générés par l'activité industrielle sont généralement liés à la production, à l'utilisation, à la manipulation, au transport ou au stockage de produits dangereux car toxiques, inflammables, radioactifs, polluants, ....etc.

Suivant les types de produits ou les types de procédés rencontrés, on distinguera donc :

- Le risque chimique,
- Le risque pétrolier,
- Le risque gazier,....etc.

Tous ces risques ou accidents majeurs ont de plus un point commun : ils sont perçus comme inacceptables. Ce constat est fondamental car il va être déterminant dans les choix fait par les Etats et les industriels dans le domaine de la maîtrise de ces risques, la démarche réglementaire suivie par les membres de l'Union Européenne en est un exemple. La prévention ou la maîtrise d'un risque, quel qu'il soit, nécessite avant toute chose sa connaissance et son évaluation préalable. [3]

### • 4-objectif

- Protéger de façon durable son environnement : population, milieu naturel, installations voisines, .....etc.
- Protéger le personnel du site, les équipements de l'installation, l'image de marque de l'industriel.
- Permettre le développement éventuel des activités de l'industriel [3]

- **5-Réparation du réservoir**

- **5.1-Les étapes de réparation d'un réservoir**

Cette réparation se fait chaque trois an (visite triennale).

Les étapes essentielles pour une réparation d'un bac sont les suivants :

- Préparation de bourbier destiné à recevoir les sloops.
- du matériel nécessaire : (flexibles, pompes à boues, les brouettes, et ensemble D'éclairage).
- Isolement du réservoir (vidange complète, injection d'eau, isolement électrique, interdiction de monter sur le toit.).
- Protection du personnel : (casque, masque, combinaison, bottes.).
- Matériels de sécurité incendie : (camion incendie, canon à mousse, lance à eau, et à mousse autour du bac extincteur).
- Avant de procéder à la réparation du bac il faut d'abord nettoyer, Cette opération se fait par Une ventilation continue, test périodique de présence du gaz, arrêt de nettoyage En cas d'augmentation de concentration des gaz dépassant 50%). [4]
- Après réparation et avant la mise en exploitation du réservoir on procède à :
  1. L'essai de celui-ci (contrôle radiographique des cordons de soudure et contrôle à la ventouse).
  2. Réétalonnage du bac (nouveau tirage).
  3. Recevoir l'agrément de la direction de l'énergie

- **5.2- Procédure de réparation**

- **5.2.1- Reconstruction du toit flottant double Deck de réservoir**

Le toit à rénover est constitué de :

- Une ossature métallique, préfabriquée, assemblée et habillée de tôles noires de nuance A283

Gr C d'épaisseur 5 mm formant un caisson circulaire compartimenté et étanche d'une hauteur moyennes de 700 mm

- L'ensemble supporté par des béquilles en tube diamètre 3m est positionné à environ

1, 80 m de hauteur par rapport au fond du réservoir (toit en position basse réservoir vide).

- **5.2.1.1 -Découpage (Démontage) du ancien toit flottant :**

Après la déconnection de l'échelle mobile, l'opération de découpage du toit flottant doit être

Réalisée par oxycoupage (chalumeaux) et à l'arc air.

**5.2.1.2- Préfabrication :**

- Découpe périphérique des tôles suivant le diamètre du toit flottant.
- Les accessoires seront découpés, formés et soudés au maximum à l'atelier de l'entrepreneur.

**5.2.1.3-Montage du toit :**

- Afin d'assurer les travaux dans les meilleures conditions de qualité et de sécurité, les travaux de réfection du toit doivent être effectués dans la position la plus basse possible par rapport au fond du réservoir.
- Mise en place de calages (picots, ou autres....) pour constituer le plan de référence du voile.
- Mise en place et disposition des tôles entières préalablement découpées aux dimensions du

Deck inférieur et assemblage par soudage suivant dispositions indiquées par le plan y compris toute réservation pour fourreaux de béquilles, trous d'homme, purge d'eau de Pluie....etc.

- Mise en place des tôles du Deck supérieur par symétrie au Deck inférieur et assemblage par soudage y compris découpe et ajustement des réservations pour trous d'homme, caissons, soupapes ..., en évitant les retentions d'eau de pluie sur le toit.
- Positionnement et mise en place de tous les accessoires tels que les fourreaux et béquilles, les fourreaux guides de jauges, la cuvette centrale pour purge, événements, fixation des joints...
- Positionnement et mise en place, sur Deck supérieur, du chemin de roulement de L'échelle roulante, barrage à mousse et guide de jauge du réservoir.

- Elimination des équipements internes qui gêneraient la repose du toit.
- Relevage du toit par flottaison sur 3 m de hauteur par remplissage en eau.
- Mise en place des béquilles.
- Vidange du réservoir et repose du toit sur les béquilles.
- Enlèvement du calage (picots...)
- Installation des éléments constituant le système d'évacuation des eaux pluviales conformément aux indications portées sur les plans. [4]



Figure 31: Montage du toit flottant [5]

#### 5.2.1.4- Drain du toit :

L'entrepreneur procédera au montage du circuit de drainage des eaux de pluie.



Figure 32 : Drainage des eaux pluviales [5]

#### 5.2.2- Changement des vannes :

Procéder au changement des vannes de purge (fond et toit) répondant aux spécifications techniques à savoir :

- Démontage, fourniture et installation vanne de purge à opercule.

#### 5.2.3-Système du joint du toit :

- Les joints d'étanchéité toit/robe seront réalisés par un joint primaire et un joint secondaire
- La mise en place de la cornière sur le toit pour la fixation du joint annulaire.
- L'entrepreneur procède au montage du joint complet (primaire et secondaire) à tôles de compression en inox (doubles lèvres) ainsi que ses accessoires de fixation en néoprène conformément à la notice d'exécution du fabricant.
- Le système de joints doit assurer une bonne liaison de potentiel.



Figure 33 Le joint de toit [5]

#### 5.2.4- Réparation du fond de réservoir :

Si au cours de l'inspection, la dégradation du fond n'est pas importante et qu'elle ne nécessite pas une grande réparation totale du fond, on exécute la réparation qui consiste à :

- à la reprise des soudures défectueuses contrôlés au préalable à la ventouse,
- la réparation des fuites ponctuelles par la mise en place de rustines de dimensions normalisées et/ou la mise recouvrement par la mise en place et soudure des tôles neuves de nuance A 283 Gr C et épaisseur 6.76 mm

Maintenant si le fond est fortement endommagé (supérieur à 30%), que la corrosion est uniforme et atteint à certains endroit 5mm et que de nombreuses fissures sont décelées on exécute la grande réparation qui est la rénovation complète du fond. [4]

##### 5.2.4.1. Revêtement du fond

###### A. Traitement de la surface

###### A.1. Description des travaux de revêtement - Fond du réservoir :

Une fois les opérations de nettoyage et de dégazage achevées du fond de réservoir, le revêtement du fond de réservoir doit être appliqué conformément à la procédure suivante :

- **A.1.1 Préparation de surface**

La préparation de surface est une phase très importante qui doit être particulièrement soignée. La qualité du décapage et du dépoussiérage influence considérablement les performances L'adhérence des revêtements :

- **Sablage d'inspection**

Sablage d'inspection avec du sable non siliceux (rugueux) du fond et sur une hauteur de 1.20 m de la première virole y compris test d'épaisseur des tôles suspectes à l'ultrason.

- **Nettoyage du dessous du toit**

Élimination des contaminants par soufflage à l'air comprimé ou mieux, balayage à l'abrasif des parties accessibles dans le cas de toit flottant, Ces travaux sont à exécuter au début de la préparation de surface.

- **Sablage du revêtement du fond**

Cette opération consiste à la réalisation d'un sablage par grenailage de toute la surface du fond, la robe sur une hauteur de 1,20 mètre y compris les couvercles des trous d'homme, porte de visite suivie d'un dépoussiérage soigné.

Le résultat du sablage doit être tel que, la surface soit exempte de toute trace d'huile, de graisse et de saleté

- **Dépoussiérage :**

Après sablage, l'entrepreneur procédera à un dépoussiérage très soigné avec des aspirateurs puissants.

Le dépoussiérage est une opération à renouveler avant chaque application.

- **Meulage :**

Les affleurements métalliques à la surface et de saleté sont autant de points d'amorçage de la Corrosion, qui doit être éliminé.

- **A.1.2 Protection des surfaces sablées**

La protection des surfaces sablées doit être impérativement assurée, afin de les maintenir dans un parfait état de conservation, avant l'application du revêtement définitif dans un délai de recouvrement, fonction des conditions ambiantes, mais ne pouvant excéder 8heures, les surfaces décapées seront revêtues d'une couche de protection temporaire.

• **A.1.3 Traitement des points particuliers**

Les points particuliers concernent toutes les zones soumises à des contraintes de diverses natures, nécessitant un traitement de renforcement.

On distingue :

- Les zones de poinçonnement et de friction provenant de tous les supports reposant sur fond (béquilles).
- Les zones délicates à revêtir, telles que :

1. la liaison robe/fond.
2. les lignes de rivets.
3. les cordons de soudure.

• **A.1.4. Application du revêtement**

Le planning d'exécution des différents travaux de revêtement tiendra compte des temps mini et max entre les différentes couches.

Lorsque les conditions ambiantes sont particulièrement défavorables il peut s'avérer nécessaire de conditionner l'air à l'intérieur du réservoir, dès le démarrage de la préparation de surface, et jusqu'à la fin de la polymérisation.

Les produits (bi-composants sans solvant) utilisés pour le revêtement doivent être des produits sans C.M.R. (cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques).

En conséquence, ils doivent être homologués par un laboratoire indépendant et de renommé internationale agréé au préalable par Sonatrach ou à défaut par l'office national d'homologations et de garantie des peintures industrielles. [4]

On distingue :

- Revêtement stratifié : (Protection du fond neuf –face interne) Résine époxy pure, sans solvant, renforcée par (01) mat de verre.



Figure 34 : Revêtement par la résine [5]

- **A.1.5 Contrôle de revêtement**
  - La mesure de l'épaisseur ;
  - La mesure de la porosité par balai électrique ;
  - La mesure de l'adhérence (test d'arrachement).
- **A.1.6. Les retouches et les réparations après séchage**
  - Mesure d'épaisseur
  - Détection des porosités

- **5.3- Contrôles et essais**

- **5.3.1- Contrôle visuel et dimensionnels :**

Le control visuel s'effectue pendant toutes les phases de montage du réservoir. Cela consiste à

Contrôler :

- L'aspect des joints de soudures ;
- La verticalité du réservoir pendant les différentes étapes du montage ;
- Des dimensions de réservoir (diamètre, hauteur) ;
- L'alignement des joints verticaux et horizontaux avant et après soudage

- **5.3.2- Contrôle sous vide :**

Le fond et le toit de réservoir devront être exécutés par une boîte sous vide, il se fera conformément au code API 653.





Figure 35: la ventouse [5]

Une fois tous les contrôles terminent, on procédera à la signature de réception provisoire du Réservoir.

#### **5.3.3- Contrôle par kérosène :**

Il se base sur la pénétration rapide du kérosène à travers les microfissures du joint, il se fera conformément au code API 653. S'il y a des microfissures on aura des taches de kérosène sur la couche de craie.

#### **5.3.4- Contrôle radiographique :**

C'est un examen efficace, il se fera conformément au code API 653. Il permet de détecter tous les défauts que ne peuvent être vue à l'œil. On utilise les rayons X .cette méthode est appliquée sur les joints de la robe.

#### **5.3.5- Contrôle de la verticalité du réservoir :**

L'opération consiste à vérifier la verticalité par l'intermédiaire soit par un fil à plomb ou d'un Appareil à niveau (théodolite).

La verticalité de la robe ne doit pas dépasser la tolérance requise.

#### **5.3.6- Essais hydrostatique :**

Les essais hydrostatiques sont effectués en vue de contrôler le tassement des fondations du réservoir, l'étanchéité des soudures du pied de la robe, ainsi que la résistance de la structure. Le contrôle de nivellement des fondations se fait dans le réservoir vide. Ensuite, on remplit le réservoir avec de l'eau épurée des corps étrangers et dérivées de pétrole jusqu'à la hauteur 2 pouces au dessus de la cornière supérieure. Les réservoirs ayant une capacité inférieure à 10000 m<sup>3</sup> ne nécessitent pas un remplissage

## **Chapitre II : Techniques de réparation des fissures**

---

par paliers .A l'achèvement du remplissage ils doivent être tenus au moins (24heures) jusqu'à l'obtention de trois valeurs identiques consécutives de nivellement prises toutes les 12heures. [4]

### • Références

- [1] : mémoire master sous le thème : COMPORTEMENT DES FISSURES DE FATIGUE DANS UN CHAMP DE CONTRAINTES RÉSIDUELLES DE TENSION, réalisé par HELLAL djazila et BOUSBA khadidja ,2015/2016
- [2] : <http://ispatguru.com/metallurgical-processes-and-defects-in-steel-products/>
- [3] : Chafik Guerzi , mémoire : Scénarii d’Incendie - Explosion au niveau du complexe pétrochimique de Skikda ,09/01/2011
- [4] : guide la réparation générale du réservoir A106 raffinerie d’Alger (RA1/G)
- [5] : S. MEDJDOUBa, B. BACHIR BOUADJRAb, A. HOCINEa, A. BENHAMOUa , mémoire : ETUDE DES OPERATIONS D’INSPECTION ET DE RENOVATION D’UN BAC DE STOCKAGE A TOIT FLOTTANT : CAS DES BACS A301-A106 SIDI ARCINE ALGER, 27au30 Aout 2013
- [6] : Moustabchir H. El-hakimi A. Hariri S. Hadj-meliani M. Azari Z., Etude sous pression de tuyaux de transport de gaz, en présence de défauts de type entaille, 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 aout 2007.
- [7] : Ainsworth R., The assessment of defects in structures of strain hardening materials, Engineering Fracture Mechanic, 19, 633-642,1984
- [8]: Etude de la réparation des fissures par patch dans les réservoirs de stockage sous pression interne , S. MEDJDOUBa, B. BACHIR BOUADJRAb, A. HOCINEa, A. BENHAMOUa , 30 Aout 2013.
- [9]: Alexder C. Francini R., State of the art assessment of composite systems used to repair transmission pipelines, The 16th international pipeline conference, Calgary, Canada, September 25-29, 2006.
- [10] : Pluvinage G. Sapunov V T., Fuite et Rupture des tubes endommagés, CEPT, France, 2004

## **Chapitre 3**

**Modélisation numérique de la réparation par patch composite d'une plaque fissurée.**

## I. Introduction

Le secteur industriel doit faire face au remplacement des structures ou des composants présentant des signes de rupture, des fissures ou des anomalies diverses. En raison des contraintes de sécurité qui amènent à utiliser les structures dans de bonnes conditions de fiabilité, maîtrisées aussi longtemps que possible, des inspections sont périodiquement programmées pour détecter les défauts ou les dommages. En générale les structures métalliques sont soumises en service à des sollicitations mécaniques donnant lieu à des états de contraintes généralement multiaxiaux et à amplitude variable, ce qui provoque un phénomène d'endommagement par fatigue. Une alternative à la réparation de ces structures consiste à les renforcer préventivement, avant que la fissure n'apparaisse. Ce renforcement de structures par patchs composites retarde l'apparition de ces fissures. Par conséquent l'utilisation du patch composite pour réparer des structures endommagées est très largement utilisée aujourd'hui [28,29]. Cependant, les études concernant le renforcement préventif restent peu nombreuses et l'apport bénéfique de la réparation par patch en composites en termes de durée de vie des structures est donc à exploiter et à optimiser.

Notre étude se place dans ce contexte, elle porte sur une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnelle, de la réparation par composite d'une plaque fissurée. Une approche locale de la mécanique linéaire de la rupture fondée sur le facteur d'intensité de contrainte est utilisée pour décrire le comportement d'une fissure réparée et sollicitée en mode de cisaillement. On se place exactement dans le cas de la zone de support des réservoirs de stockages.

## II. Présentation du logiciel ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE<sup>TM</sup> est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également des résultats (post-traitement). ABAQUS/CAE<sup>TM</sup> est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaires, des problèmes thermiques etc...

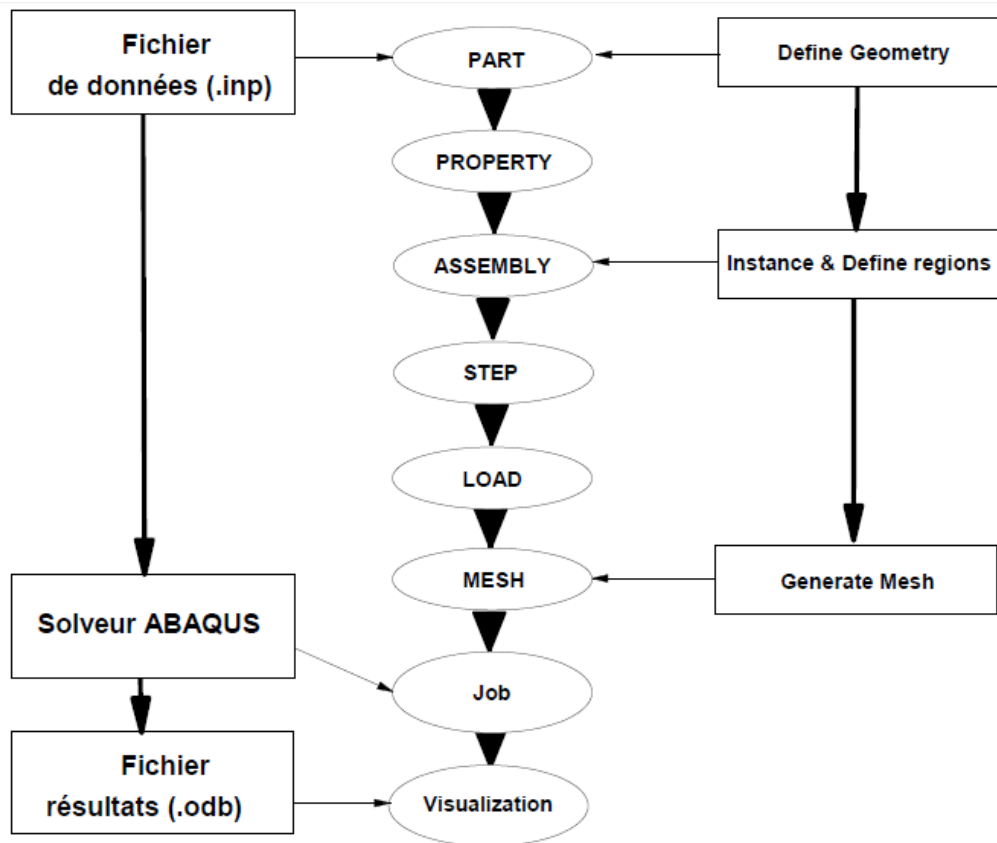


Figure 36: Etapes à suivre pour la programmation [6]

Comme le présente Figure 36 ABAQUS/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelés modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

#### a) Le module Part

Le module part nous permet de créer tous les objets géométriques rentrant dans le cadre de notre modèle soit en les dessinant dans ABAQUS CAE soit en les important d'un logiciel de dessin (CAO). Dans notre cas il s'agit de la conception du pipeline, de l'adhésif et du patch.

Dans cette simulation, nous avons essayé de travailler sur un modèle complet, mais en raison du grand nombre d'éléments et du temps pris par le calcul avec une station de 40Gb de RAM, nous avons dû utiliser que le quart du modèle puisque on a symétrie par rapport aux plans (XZ) et (XY).

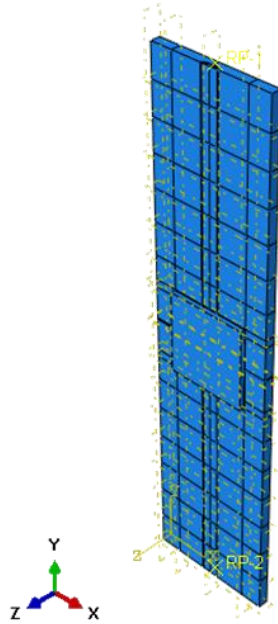


Figure 37: Le modèle géométrique de la plaque réparée.

### b) Le module Property

Le module property permet de définir les propriétés des différents composants, Les propriétés mécaniques de la plaque de l'adhésif ainsi que du patch sont illustrés dans le Tableau 1 suivant.

Propriété	Matériaux 1	Matériaux 2	Matériaux3
	Aluminium 2024T3	(Patch) boron/ epoxy	Adhésive FM73
$E_1$ (GPa)	210	200	2,21
$E_2$ (GPa)		25	
$E_3$ (GPa)		25	
$G_{12}$ (GPa)		7,2	
$G_{13}$ (GPa)		5,5	
$G_{23}$ (GPa)		5.5	
$\nu_{12}$	0,3	0,21	0,43
$\nu_{13}$		0,21	
$\nu_{23}$		0,21	

Tableau 1: Propriétés mécaniques des différents matériaux

### c) Lemodule Assembly

Le module assembly nous permettra d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère.

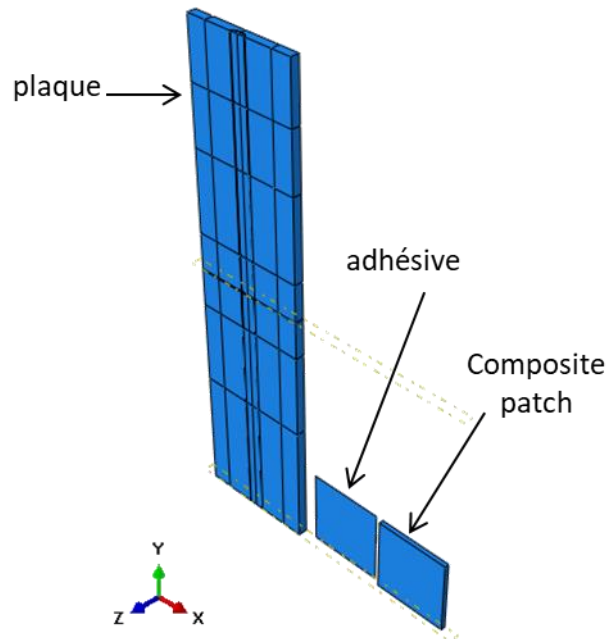


Figure 38: Assemblage des structures.

### d) Le module Step

Ce module permet de définir toutes les étapes pour le post traitement, il est possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

Dans ce module ont définies aussi les ressorties de nos résultats, pour notre étude on demande dans le sou-module 'OUTPUT HISTORY' le calcul du Facteur d'intensité de contrainte avec « Maximum tangential stress », la nature de calcul est statique générale.

### e) Le module Interaction

Le module interaction permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du model, la seule proximité ou contacte entre les points n'étant pas suffisant.

Dans ce module deux interactions sont déclarés à savoir :

- Une interaction de type « TIE » entre la plaque/adhésif et adhésif/patch, tous le paramètres de cette option sont à défaut, a noté que l'adhésif est déclaré toujours comme esclave puisqu'il possède le plus faible module Young.
- Aussi on configure notre fissure dans la plaque avec un front de fissure semi elliptique de direction " Normal to plane"



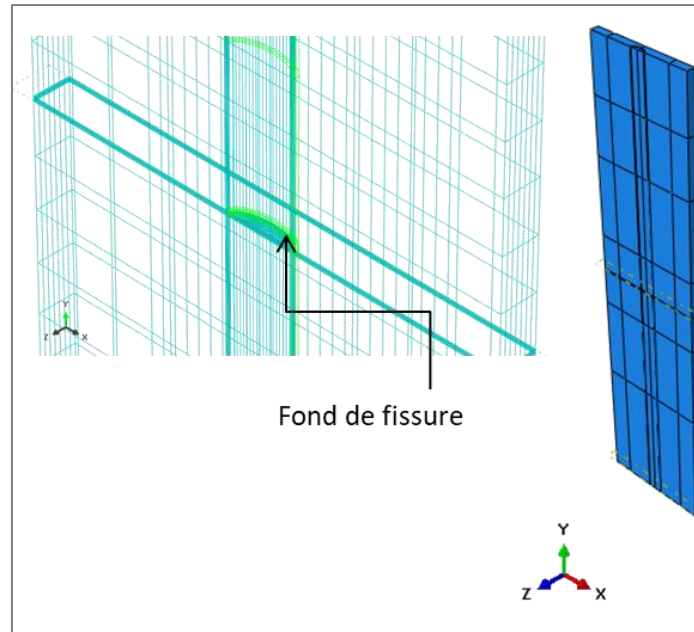


Figure 39: Déclaration du front de la fissure

#### f) Le module Load

Dans le module load on détermine toutes les conditions aux limites, tel que la pression et les encastrements. Dans la présente étude laplaqueest bloquée en haut et en bas suivant  $x=0$  et  $y=0$  et laisser un déplacement imposé de 0.5 mm suivant  $z$ , ensuite elle est bloquée sur  $x,y$  et  $z$  au milieu comme montre la Figure 40.

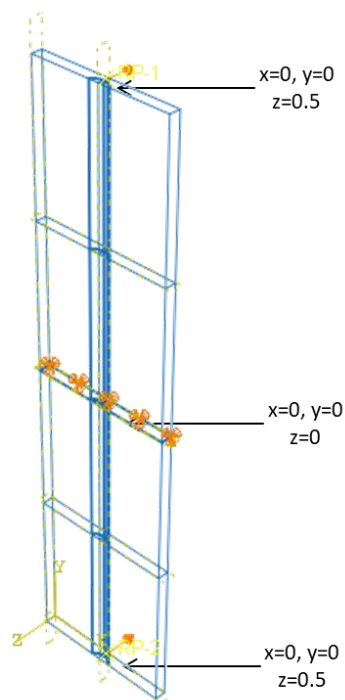


Figure 40 : déclaration des conditions aux limites.

### g) Le module Mesh

Le module mesh nous permettra de générer un maillage en élément fini sur notre assemblage, le maillage est de type quadratique structuré C3D20R.

Le maillage utilisé est représenté par la Figure 41. La forme du patch composite est identifiable sur cette figure. Un maillage régulier est effectué pour toute la structure. Ce maillage reste le même tout au long du calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. A ce niveau précisons que le maillage est de type quadratique (hexaèdres).

Un collage parfait est créé entre la plaque et l'adhésif ainsi que l'adhésif et le patch en discrétisant le modèle par intervalle de 5°.

La fissure dans la plaque entraîne une singularité géométrique provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure ou la taille des éléments au voisinage du front de la fissure est de 0,05mm. Le nombre total d'élément de la structure étant de 24762 c'est-à-dire 24112 éléments pour la plaque, 361 éléments pour l'adhésive et 289 éléments pour le patch.

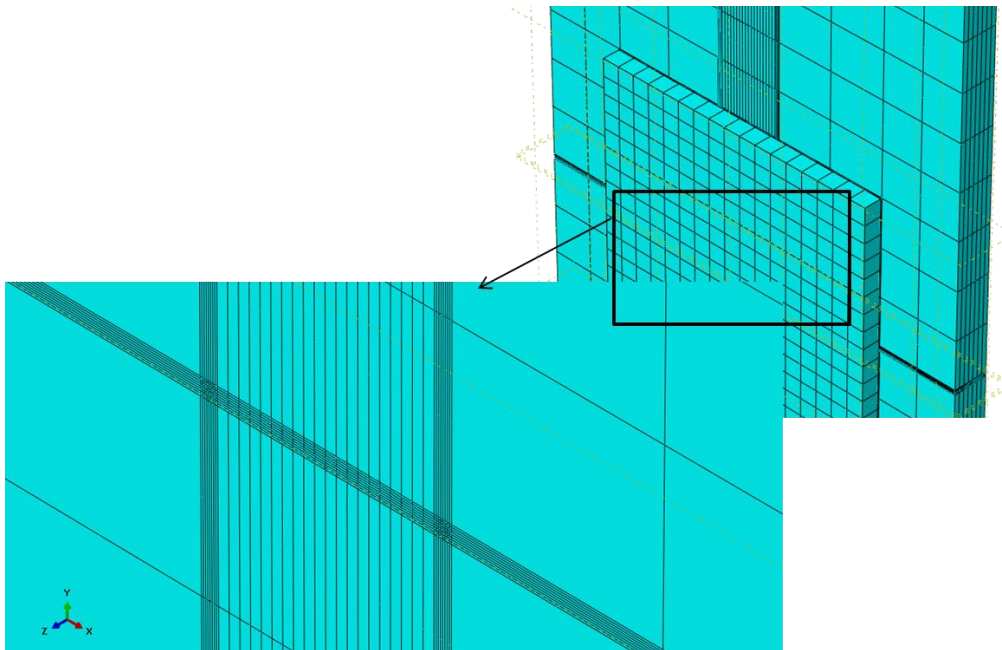


Figure 41: le maillage du modèle géométrique

### h) Module Job

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats dans un fichier *.inp*

### i) Module Visualisation

Comme son nom l'indique, ce module nous permet tend autre de visualiser le model et les résultats obtenus, les concentrations de contrainte ainsi que les déformations.

### j) Modèle géométrique

Le modèle géométrique de la plaque réparée par le patch en composite est représenté sur la Figure 42. La plaque en Aluminium 2024T3 est caractérisée par une longueur  $L_p=160\text{mm}$ ,  $l_p=39\text{mm}$ , une épaisseur  $e_p$ : 3mm. Cette plaque présente une fissure elliptique réparé par un composite en boron epoxy de dimension  $L_{\text{patch}}=25\text{mm}$ ,  $l_{\text{patch}}=25\text{mm}$  et  $e_{\text{patch}}=1.5\text{mm}$ . L'adhésive utilisé est de type FM73 d'épaisseur  $e_{\text{ad}}=0.1\text{mm}$ . La plaque est supposée sollicitée en flexion.

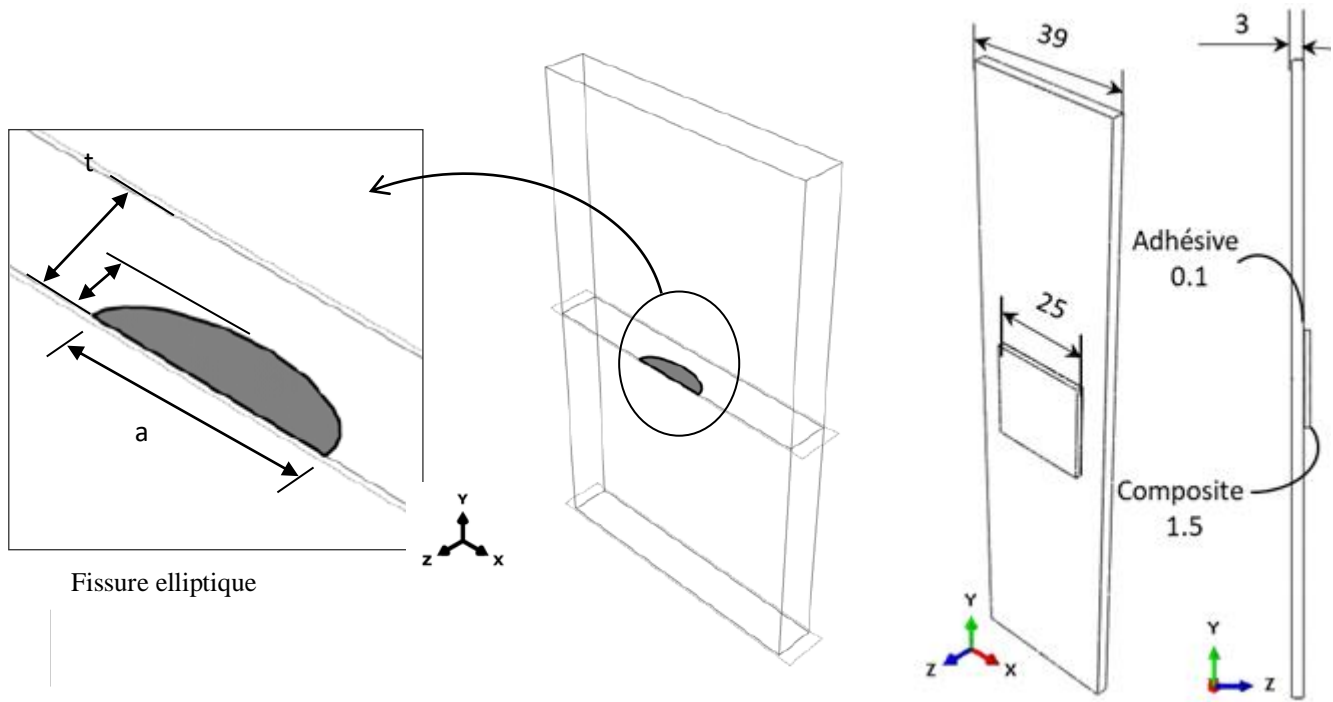


Figure 42: Le model géométrique étudié.

## III. Résultats et interprétations

### 1. Effet de la géométrie de la fissure

La géométrie de la fissure joue un rôle important dans le mécanisme de rupture des plaques, dans cette partie de l'étude on a visé les modes de rupture des fissures par rapport au cas étudié. La Figure 43 (a) présente la variation des facteurs d'intensité de contrainte le long du front de fissures pour différents rapport  $c/t$ , On remarque que le comportement des FICs est non linéaire et qu'il existe deux zones. Une zone où le mode I est maximum sur les bords de la fissure, alors qu'au milieu de la fissure le FIC est minimale est-il y a même des valeurs négatives qui indique la présence du mode II ou le mode II de rupture. Sur la Figure 43 (b) on note que le FIC est max pour  $c/t=50\%$  puis diminue pour  $c/t=70\%$  et  $c/t=80\%$ .

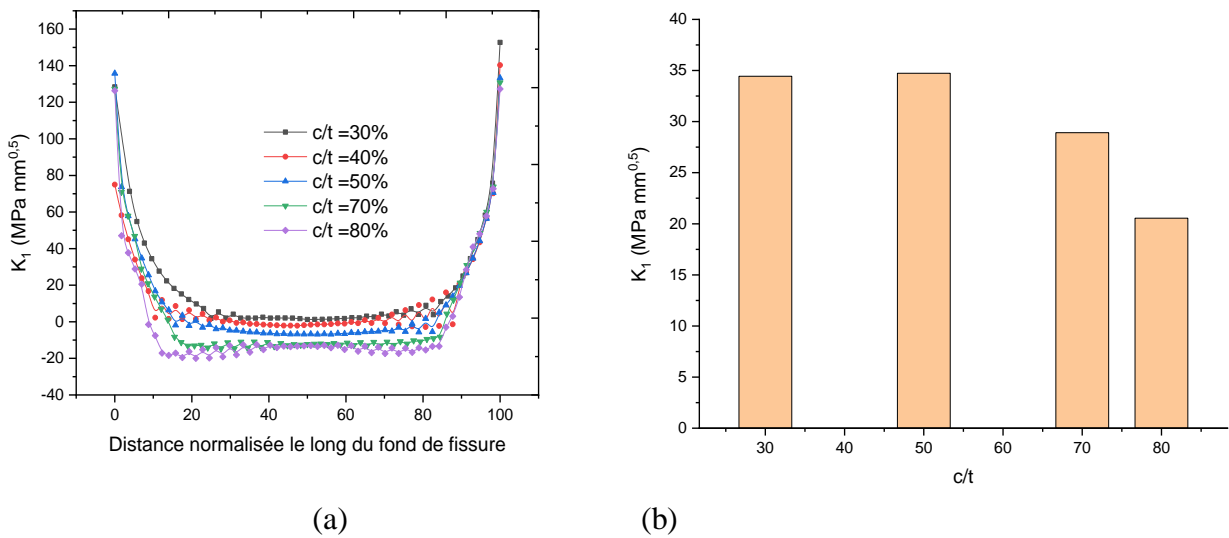


Figure 43 : (a) variation des facteurs d'intensité de contrainte le long du front de fissures pour des rapport  $c/t$ , (b) variation des facteurs d'intensité de contrainte pour 10% du front de fissures

- **Interaction des fissures :**

Dans cette partie nous exploitons l'effet de la coexistence de deux fissures, pour cela nous proposons deux configurations, dans la configuration A une fissure centrale d'une profondeur  $c/t = 50\%$  avec une deuxième fissure de même dimension déplacé sur l'axe X de la fissure. La configuration B propose deux fissures avec un déplacement sur l'axe Y comme le montre la Figure 44.

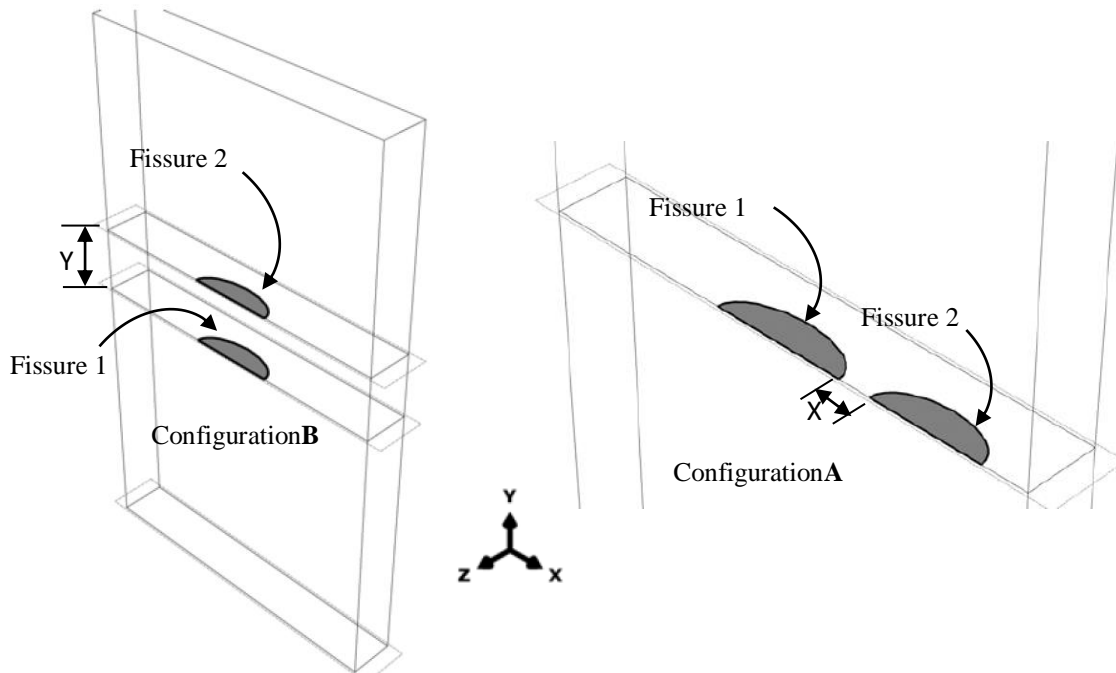


Figure 44: géométrie de l'interaction des fissures

- **Configuration A :**

La Figure 45 représente la distribution du facteur d'intensité de contrainte en mode I le long du front de la fissure pour la plaque considérée. On note que la distribution du FIC pour les deux fissures est similaire alors que l'intensité du FIC pour la fissure 1 est inférieure pour celle de la fissure 2 en fond de la fissure, ceci dit que le comportement en rupture de la plaque est piloté par la fissure 2. Pour montrer l'effet de la coexistence des deux fissures dans la plaque sollicitée on a tracé la Figure 46 (A) qui exprime la distribution du facteur d'intensité de contrainte le long du front de la fissure 2 pour  $c/t=50\%$  et la Figure 46 (B) représente un cas  $X^*$  de la Figure 46.A pour tracer le FIC  $K_{I1}$ .

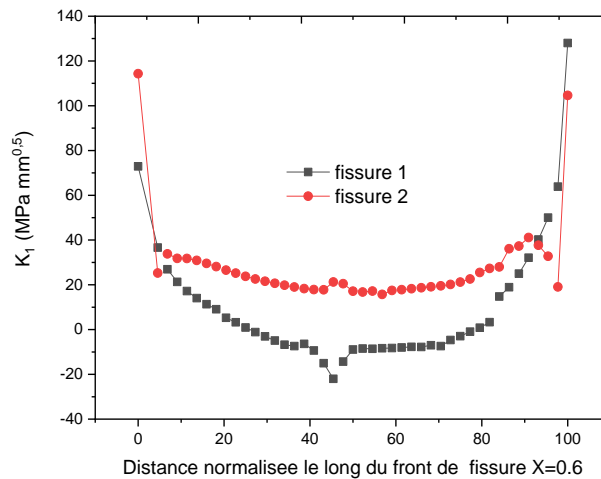


Figure 45 : distribution du facteur d'intensité de contrainte en mode I le long du front de la fissure pour  $X=0.6$  mm ( $c/t=50\%$ ).

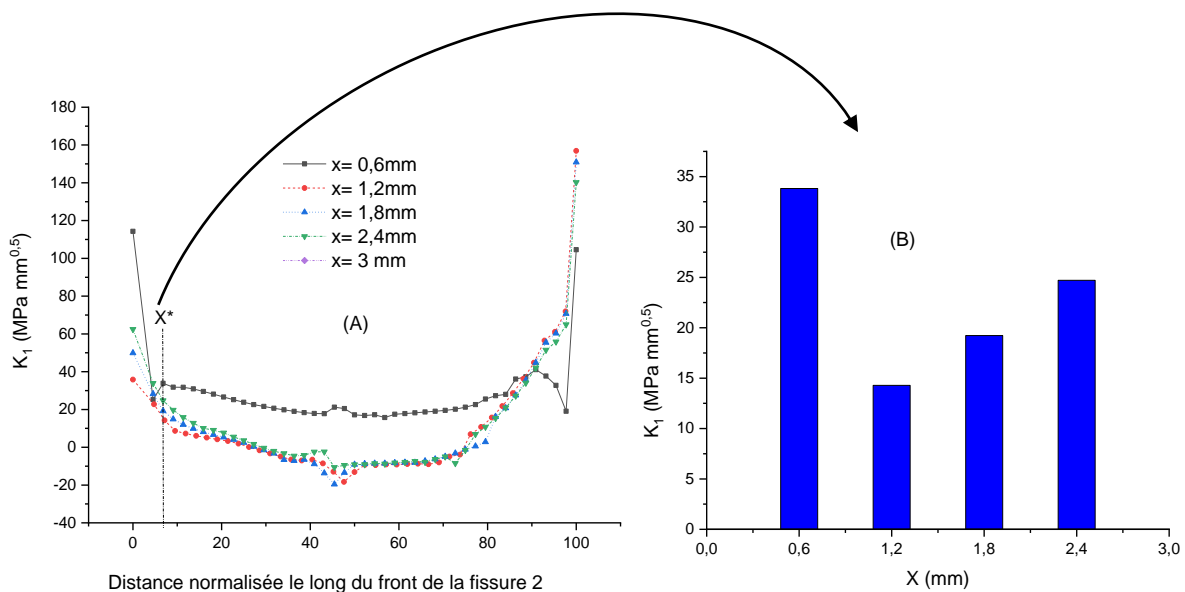


Figure 46: (A) distribution du facteur d'intensité de contrainte en mode I le long du front de la fissure 2 ( $c/t=50\%$ ), (B) variation du FIC  $K_{I1}$  pour  $X^*$ .

La distribution du FIC garde peut son allure et présente une dysmétrie par rapport aux milieux du front de la fissure, ceci est remarquer pour tous les cas proposer. Dans la Figure 46 (B) on peut tirer que la présence de la fissure 2 proche de la fissure 1 engendre une multiplication des contrainte avec des FICs plu élever ou on peut considérer les deux fissures comme une seule. On s'éloignons de la première fissure  $X > 0.6$  le FIC de la fissure 2 diminue et reprend son augmentation en s'approchant du bord libre de la plaque.

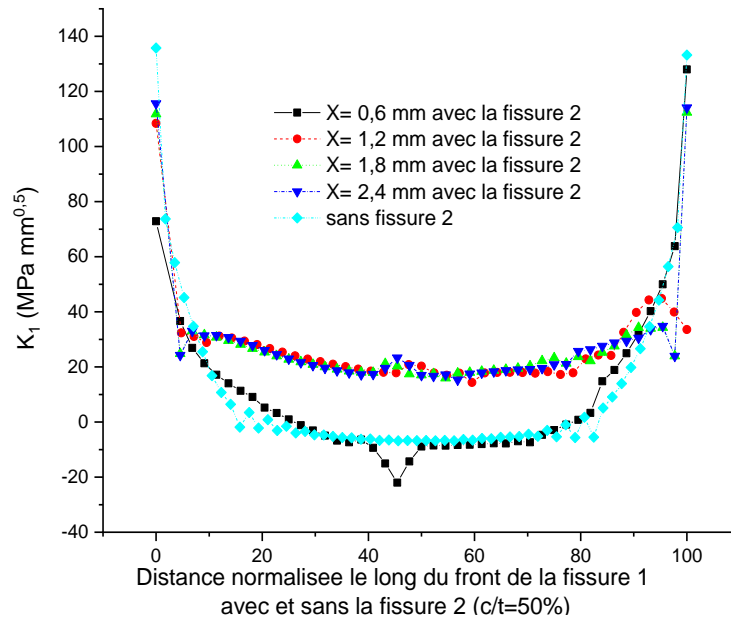


Figure 47: distribution du facteur d'intensité de contrainte le long du front de la fissure 1 avec et sans la présence de la fissure 2 pour ( $c/t=50\%$ ).

La variation du  $K_I$  sur le front de la fissure 1 pour une plaque sollicitée en flexion est exposé sur la Figure 47. Il est visible que la présence d'une deuxième fissure proche  $X < 0.6$ mm amplifie la concentration des contraintes est peut-être considérer comme une seule grande fissure ce qui confirme la remarque de la Figure 45, ou on voie aussi que les distributions du FICs sans la présence de la fissure 2 et avec sa présence pour  $X=0.6$ mm sont pratiquement superposer avec des max différents. Les valeurs du FIC de la fissure 1 sont indépendante de la présence de la fissure 2 a des distances de  $X > 0,6$ mm.

#### - Configuration B:

Dans cette configuration la fissure 2 est en dessus de la fissure 1 a des distances  $Y = 0,6 ; 1,2 ; 1,8 ; 2,4 ; 3$  pour  $c/t = 50\%$ . Pour le FIC  $K_I$  la Figure 48 (A) montre la variation du FIC le long du front de la fissure 1 (A) et (B) pour la fissure 2. On peut clairement distinguer qu'il y a un effet significative de la présence de la fissure 2 sur les valeurs des FICs de la fissure 1, car il est visible sur la Figure 48 (A) que les valeurs sont réduite par rapport à la fissure 1 si elle était seule, mais cette réduction est due au partage des contraintes avec la fissure 2 ou les valeurs des FICs sont équivalent a ceux du front de la fissure 1. La distribution des valeurs du FIC de la fissure 2 présente une faible sensibilité sur l'axe  $Y < 2.4$  mm, alors que pour

Y=3mm les valeurs du FIC diminuent considérablement ce qui s'explique par l'ascendance de la fissure 1 et de la limite de l'interaction des deux fissures.

La configuration A présente un risque d'endommagement plus grand que celui de la configuration B par rapport aux valeurs élevées des FICs enregistrées dans les cas étudiés.

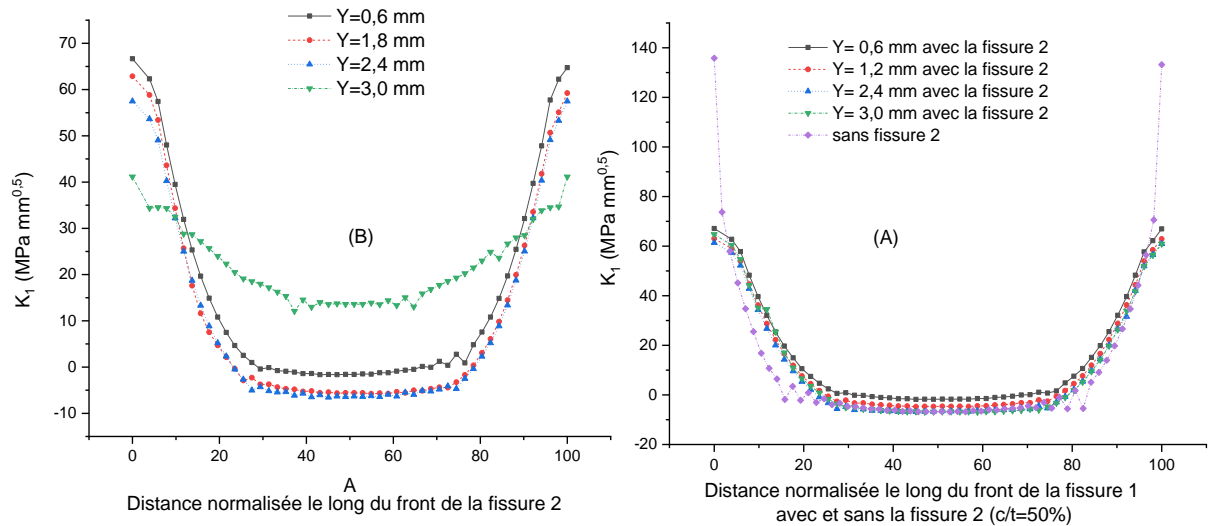


Figure 48: distribution du FIC le long du front de la fissure 1 (A) et la fissure 2 (B).

## 2. Effet de la réparation par Composite :

La réparation par collage d'un patch composite est aujourd'hui employée pour la résolution des problèmes industriels liés aux pipelines et aux réservoirs de stockage. Cette technique de réparation nous semble la plus prometteuse pour résoudre rapidement et à moindre coût les dommages de canalisation.

Les systèmes de réparation en matériaux composites sont, en moyenne moins coûteux que les réparations soudées et que le remplacement complet de la section endommagée de la structure fissurée, les systèmes de réparation en matériaux composites ralentissent également la croissance externe de la corrosion en limitant les dommages de l'environnement tandis que la structure reste en service.

La réparation par composite ne change pas la configuration énoncée par la Figure 43. Dans la Figure 49 on présente la variation des FICs le long du front de fissure pour une plaque réparée et non réparée, en effet le mode I est toujours dominant dans la zone extrême de la fissure mais avec des réductions plus ou moins faibles au milieu de la fissure. On note aussi une nette réduction du FIC K<sub>I</sub> sur le bord de fissure de l'ordre de 45%, cette chute du FIC diminue à mesure que le front touche le fond de la fissure.

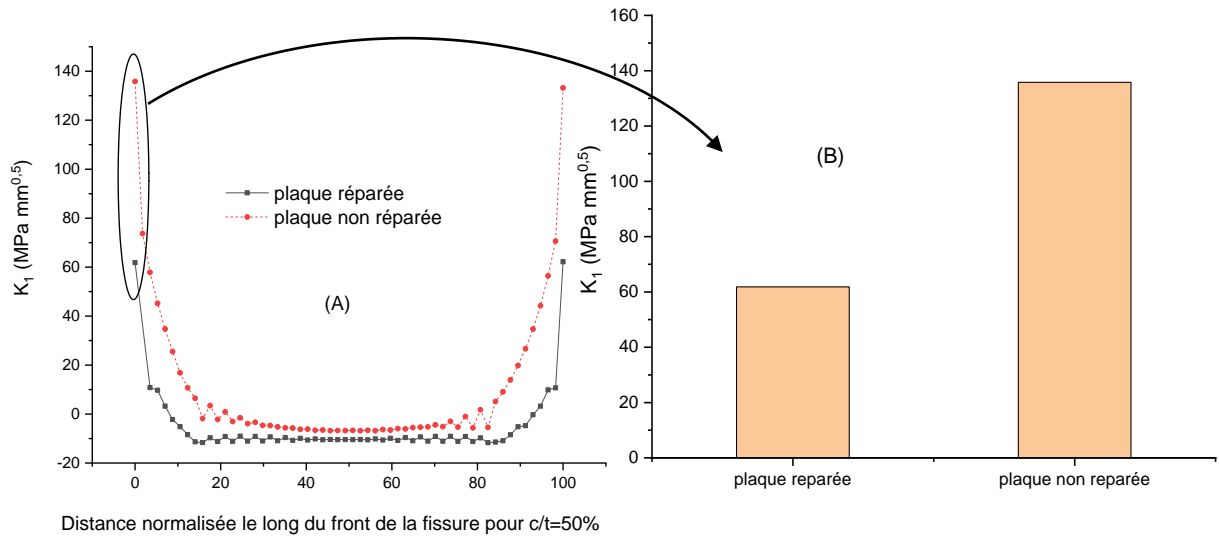


Figure 49: variation des FICs le long du front de la fissure elliptique pour une plaque avec et sans réparation ( $c/t=50\%$ )

Pour la configuration A (Figure 50), il est à noter que la fissure 1 très sensible a la réparation par composite avec une réduction maximale de 40% sur les lèvres externes de la fissure semi elliptique. La fissure 2 reprend sa symétrie avec la réparation par composite avec moins de sensibilité a l'effet de la réparation. Ces remarques se généralise sur tous modèles étudiier  $X=0,6 ; 1,2 ; 1,8 ; 2,4$  et  $3 \text{ mm}$

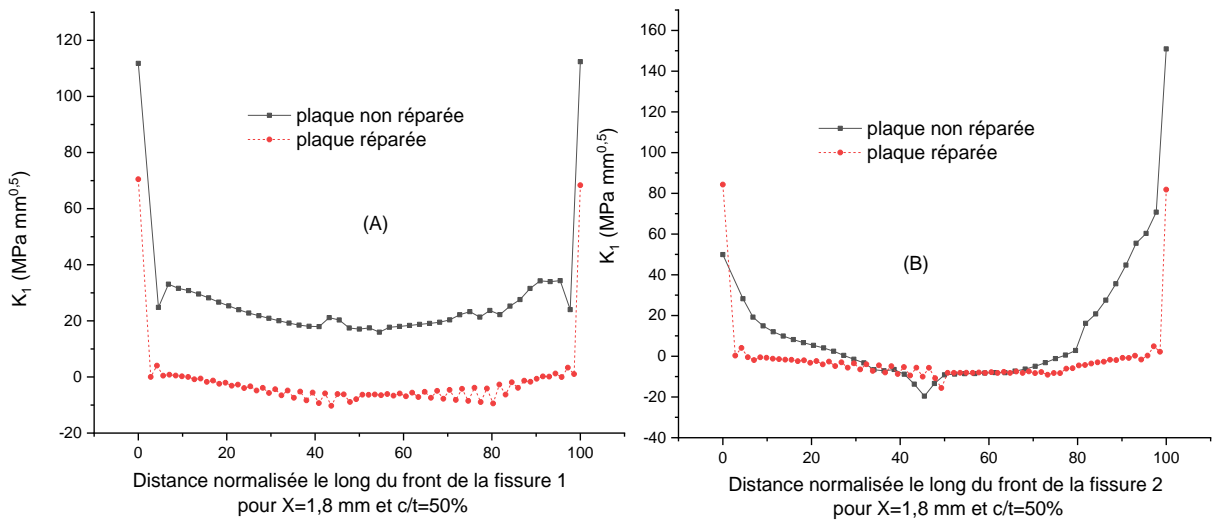


Figure 50: Distribution des FICs le long du front de la fissure 1 et 2 pour une plaque avec et sans réparation ( $X=1.8 \text{ mm}$  ,  $c/t=50\%$ )

Pour la configuration B (Figure 51) la fissure 1 enregistre un taux de réduction de 70% le long du front de la fissure et une réduction de 32% pour la fissure 2, ce qui traduit un effet bénéfique de la réparation par qu'elle que soit la configuration d'endommagement.

La réparation est plus marquer dans configuration B que dans la configuration A avec des taux de réduction indifferents.



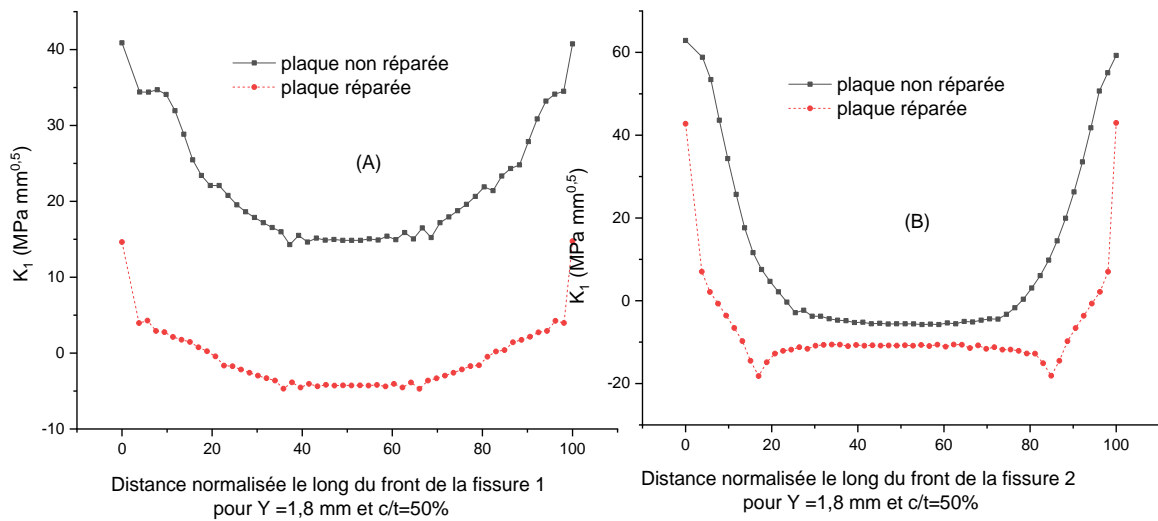


Figure 51: Distribution des FICs le long du front de la fissure 1 et 2 pour une plaque avec et sans réparation ( $Y=1.8$  mm ,  $c/t=50\%$ )

#### IV. Conclusion

Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Le comportement des FICs est non linéaire et qu'il existe deux zones. Une zone où le mode I est maximum sur les bords de la fissure, alors qu'au milieu de la fissure le FIC est minimale
2. Les valeurs négatives indiquent la présence du mode II ou le mode III de rupture dans les cas étudiés.
3. Pour la configuration A, la distribution du FIC pour les deux fissures est similaire alors que l'intensité du FIC pour la fissure 1 est inférieure à celle de la fissure 2 en fond de la fissure, ceci dit que le comportement en rupture de la plaque est piloté par la fissure 2.
4. La distribution du FIC garde peut son allure et présente une dissymétrie par rapport au milieu du front de la fissure
5. La présence de la fissure 2 proche de la fissure 1 engendre une multiplication des contraintes avec des FICs plus élevées ou on peut considérer les deux fissures comme une seule.
6. On s'éloigne de la première fissure  $X > 0.6$  le FIC de la fissure 2 diminue et reprend son augmentation en s'approchant du bord libre de la plaque.
7. Les valeurs du FIC de la fissure 1 sont indépendantes de la présence de la fissure 2 à des distances de  $X > 0,6$  mm.

- 8.** Pour la configuration B enregistre un effet significatif de la présence de la fissure 2 sur les valeurs des FICs de la fissure 1, car il est visible sur la Figure 48 (A) que les valeurs sont réduites par rapport à la fissure 1 comme si elle était seule
- 9.** Cette réduction est due au partage des contraintes avec la fissure 2 ou les valeurs des FICs sont équivalentes à ceux du front de la fissure 1.
- 10.** La configuration A présente un risque d'endommagement plus grand que celui de la configuration B par rapport aux valeurs élevées des FICs enregistré dans les cas étudiés.
- 11.** La réparation par composite ne change pas la configuration énoncée par la Figure 43. On note aussi une nette réduction du FIC KI sur le bord de fissure de l'ordre de 45%, cette chute du FIC diminue à fur et à mesure que le front touche le fond de la fissure.
- 12.** Pour la configuration A, la fissure 1 très sensible à la réparation par composite avec une réduction maximale de 40% sur les lèvres externes de la fissure semi-elliptique. La fissure 2 reprend sa symétrie avec la réparation par composite avec moins de sensibilité à l'effet de la réparation.

En perspective, il est intéressant d'étudier le comportement de la plaque avec sollicitation complexe et avec des chargements thermomécaniques qui faisait partie des objectifs de ce travail mais vu le manque des moyens de calcul et le temps court, on s'est limité de ces résultats.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les résultats obtenus numériquement par la méthode des éléments finis tridimensionnelle nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Le comportement des FICs est non linéaire et qu'il existe deux zones. Une zone où le mode I est maximum sur les bords de la fissure, alors qu'au milieu de la fissure le FIC est minimale
2. Les valeurs négatives indiquent la présence du mode II ou le mode III de rupture dans les cas étudiés.
3. Pour la configuration A, la distribution du FIC pour les deux fissures est similaire alors que l'intensité du FIC pour la fissure 1 est inférieure pour celle de la fissure 2 en fond de la fissure, ceci dit que le comportement en rupture de la plaque est piloté par la fissure 2.
4. La distribution du FIC garde peut son allure et présente une dissymétrie par rapport aux milieux du front de la fissure
5. La présence de la fissure 2 proche de la fissure 1 engendre une multiplication des contraintes avec des FICs plus élevées ou on peut considérer les deux fissures comme une seule.
6. On s'éloigne de la première fissure  $X > 0.6$  le FIC de la fissure 2 diminue et reprend son augmentation en s'approchant du bord libre de la plaque.
7. Les valeurs du FIC de la fissure 1 sont indépendantes de la présence de la fissure 2 à des distances de  $X > 0,6\text{mm}$ .
8. Pour la configuration B on enregistre un effet significatif de la présence de la fissure 2 sur les valeurs des FICs de la fissure 1, car il est visible sur la Figure 48 (A) que les valeurs sont réduites par rapport à la fissure 1 comme si elle était seule
9. Cette réduction est due au partage des contraintes avec la fissure 2 ou les valeurs des FICs sont équivalentes à ceux du front de la fissure 1.
10. La configuration A présente un risque d'endommagement plus grand que celui de la configuration B par rapport aux valeurs élevées des FICs enregistrées dans les cas étudiés.
11. La réparation par composite ne change pas la configuration énoncée par la Figure 43. On note aussi une nette réduction du FIC KI sur le bord de fissure de l'ordre de 45%, cette chute du FIC diminue à mesure que le front touche le fond de la fissure.
12. Pour la configuration A, la fissure 1 est très sensible à la réparation par composite avec une réduction maximale de 40% sur les lèvres externes de la fissure semi-elliptique. La fissure 2 reprend sa symétrie avec la réparation par composite avec moins de sensibilité à l'effet de la réparation.

En perspective, il est intéressant d'étudier le comportement de la plaque avec sollicitation complexe et avec des chargements thermomécaniques qui faisait partie des objectifs de ce travail mais vu le manque des moyens de calcul et le temps court, on s'est limité de ces résultats.