

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 Équipements des Hydrocarbures

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

Master

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Hydrocarbures

Option : Génie mécanique- Transport et distribution des hydrocarbures

Présenté par : **ALI ELEITH**

OUSSAMA HAMZA

THEME

***Procédure d'inspection et de réparation des fonds des bacs
de stockage par les méthodes MFL, UT et pose de rustines***

Devant le jury :

YOUNSI Karim. Examineur
BOUHAFS SmailExamineur
TIKOBAINI Mourad. Examineur
MENAA Abdennour.Examineur
MEZIANE Akila.Encadrant

Boumerdes 2023

Dédicaces

Je dédie ce travail

*A ma douce maman, ma source de tendresse qui m'a toujours
soutenu et donné*

La patience pour que ce travail soit achevé

*A mon cher père pour son encouragement et la confiance qu'il m'a
accordé le long de mon parcours*

*A mes deux chers frères, les mots ne suffisent guère pour
l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour eux*

*A mes chers amis Aziouaz, Faroun, le clan de inh, le
groupe corso, marouu je suis reconnaissant pour leur soutien
quotidien sans vous mon parcours n'aurait pas eu le même
goût*

OUSSAMA HAMZA

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma douce maman, ma source de tendresse qui m'a toujours soutenue et donnée la patience pour que ce travail soit achevé

A mon cher père pour son encouragement et la confiance qu'il m'a accordé le long de mon parcours

A mes deux chers frères Chemseddine et Ahmed Fahd, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je leur porte

A mes chers amis, que je remercie pour leur soutien quotidien, sans vous mon parcours n'aurait pas eu le même goût

ALI ELEITH

Remerciements

Quand un travail de projet de fin d'études est bouclé et que l'heure des bilans est arrivée, des pensées particulières s'adressent à tous ceux qui ont soutenu sa réalisation et sa finalisation.

Ce travail a été réalisé conjointement à la Direction Régional de Bejaïa et la RTO et le Département de Transport des hydrocarbures à la faculté des Hydrocarbures et de la Chimie – Boumerdes -

Nous adressons nos vifs remerciements et notre reconnaissance aux responsables de ces trois établissements pour nous avoir permis de réaliser ce travail dans des conditions favorables.

*C'est pour nous un honneur, un privilège, en même temps un devoir et une dette de reconnaissance méritée à notre encadrante **Mme Akila MEZIANE**, nous le remercions très sincèrement pour avoir dirigé ce mémoire. Ce fut un grand plaisir de travailler avec elle.*

*Nous exprimons aussi notre gratitude à monsieur **Abdeslam HADERBACHE**, **Salim CHAFAI**, **Farouk TAZIBAT** ainsi qu'à **Abdelghani ZEMAICH** pour la qualité de leurs compétences, leurs conseilset leurs qualités humaines qui nous ont permis de mener à bien ce mémoire. Nous les remercions énormément pour leur aide et pour la grande patience dont ils ont fait preuve durant notre période de stage.*

*Nous tenons à adresser particulièrement nos remerciements à **Mr YOUNSI**, **Mr BOUHAFS**, **Mr TIKOBAINI** et **Mr MENAA** pour leur participation en tant que examinateurs de ce travail.*

Nous tenons aussi à associer ce travail à nos familles, à qui nous le dédions. Sans leur présence et leurs encouragements permanents, nous n'aurions jamais atteint nos objectifs.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'inspection par MFL (Magnetic Flux Leakage) et la réparation des fonds des bacs de stockage. Son objectif principal est de déterminer l'intervalle d'inspection optimal, la meilleure méthode d'inspection, l'épaisseur minimale des tôles centrale et annulaire, ainsi que la meilleure méthode de réparation et les matériaux à utiliser.

Il vise à fournir des recommandations précises pour l'inspection et la réparation des fonds des bacs de stockage, contribuant ainsi à améliorer les pratiques de maintenance, la sécurité et la performance des installations de stockage.

Mots clés: bacs de stockage, corrosion, inspection, réparation

ملخص

تركز هذه الرسالة على فحص MFL (تسرب التدفق المغناطيسي) وإصلاح قيعان صهاريج التخزين. هدفها الرئيسي هو تحديد الفاصل الزمني الأمثل للفحص ، وأفضل طريقة للفحص ، والحد الأدنى لسماكة الألواح المركزية والحلقية ، وكذلك أفضل طريقة للإصلاح والمواد المستخدمة. يهدف إلى تقديم توصيات محددة لفحص وإصلاح قيعان صهاريج التخزين ، وبالتالي المساعدة في تحسين ممارسات الصيانة والسلامة والأداء لمنشآت التخزين.

الكلمات المفتاحية: صهاريج التخزين ، التآكل ، التفتيش ، الإصلاح

Summary

This thesis focuses on MFL (Magnetic Flux Leakage) inspection and repair of storage tank bottoms. Its main objective is to determine the optimal inspection interval, the best inspection method, the minimum thickness of the central and annular plates, as well as the best repair method and the materials to be used.

Key words: storage tanks, corrosion, inspection, repair

sommaire

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I :.....	2
GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSERVOIRS	2
I. 1 Introduction :	2
I.2 but du stockage :	2
I. 3 Définition :	2
I. 3. 1 Le pétrole :	2
I. 3. 2 Le gaz du pétrole liquéfié (GPL) :	3
I. 3. 3 Le condensat :	3
I. 4 Les parcs de stockage :	3
I.4.1 Un bac d'hydrocarbures :	4
I.5 Le mode de stockage :	4
I.6 Types de réservoir de stockage :	5
I.6.1 Réservoir cylindrique vertical :	5
I.6.2 Classification des bacs cylindriques verticaux :	6
I.6.3 Principaux éléments constitutif d'un réservoir cylindrique vertical :	6
I.6.3.1 Le fond du bac :	7
I.6.3.2 L'assise :	8
I.6.3.3 La robe :	8
I.6.3.4 La virole :	9
I.6.3.5 La ceinture :	9
I.6.3.6 Le toit :	10
I.6.4 Les accessoires du réservoir cylindrique vertical :	14
I.6.4.1 Accessoire de lutte contre la surpression :	14
I.6.4.3 Accessoires de contrôle:	15
I.6.4.4 Accessoires de sécurité:	17
I.6.5 Autres accessoires :	20
I.6.5.1 Évacuation des eaux pluviales :	20
I.6.5.2 Systèmes de joint :	20
I.6.5.3 Aspiration flottante :	23
I.6.5.4: Matériel d'homogénéisation:	23
I.6.5.5 Accessoires de protection contre la corrosion :	25

<i>I. 6.6 Details:</i>	25
<i>I.6.7 Cuves ouvertes :</i>	27
<i>I.6.8 Réservoir cylindrique horizontal :</i>	27
<i>I.6.9 Réservoirs sphériques :</i>	28
I.9.1 Les équipements des réservoirs sphériques :	28
CHAPITRE II : LES MÉCANISMES DE DÉGRADATION ET DE DÉFAILLANCE DU BAC DE STOCKAGE	29
II.1 INTRODUCTION :	29
II.2 Mécanismes de dégradation et de défaillance du bac de stockage :	29
II.3 La corrosion :	29
II.3.1 Les différents types de corrosion :	29
II.3.2 Le taux de corrosion :	32
II. 3.3 Corrosion des éléments essentiel du bac	32
II.3.3.1 Corrosion de la virole :	32
II.3.3.2 Corrosion du toit:	34
II.3.3.3 Corrosion des accessoires :	35
II.4 Corrosion de fond :	35
II.5 Les dommages et la corrosion dans les fonds des bacs :	38
II.5.1 Tassements du fond du réservoir :	38
II.5.1.1 Tassement du fond :	38
II.5.1.2 Ondulations sur le fond :	39
II.5.1.3 Cloques sur le fond :	39
II.6 Affaissement et problèmes associés :	40
II.7 Défaillance de structure du réservoir et de ses accessoires :	40
II.8 Dégradations liées au fonctionnement cyclique :	41
II.8.1 Dégradation des assises :	41
II.8.2 Fissuration :	42
CHAPITRE III : LES METHODES D'INSPECTION DU FOND DE RESERVOIR DE STOCKAGE D'HYDROCARBURE	43
III.1 Introduction à l'inspection du bac de stockage :	44
III.2 Méthodologie d'inspection et de contrôle :	45
III.2.1. Considérations sur la fréquence des inspections :	47
III.2.2. Intervalles d'inspection :	47
III.3 Méthodes d'inspection communes pour le bac de stockage :	48
III.3.1 Inspection visuelle :	48

III.3.2. Contrôle par ultrasons :	49
III.3.3 Contrôle d'épaisseur par onde guidée :	49
III.3.4 Radiographie :.....	50
III.3.5 Contrôle par courants de Foucault :	51
III.3.6 Thermographie infrarouge :	51
III.3.7 Contrôle par scanner à perte de flux magnétique :	52
III.3.8 Contrôle par magnétoscopie :	53
III.4 Technique de contrôle de l'étanchéité par flux magnétique MFL :.....	53
III.4.1 Principe fondamental:	53
III.4.2. Facteurs d'influence de la sensibilité de la MFL.....	54
III.5 Considérations relatives au choix de la méthode d'inspection :.....	57
III.6. la détermination de l'épaisseur minimale des tôles centrales :	58
III.7. Classes de revêtements :	59
III.8. Considérations relatives au choix du revêtement :	60
III.9. la détermination de l'épaisseur minimale de les tôles annulaires :	61
III.10. Inspection des accessoires et obstacles de fond :	61
Chapitre IV : INSPECTION DU FOND DU BAC 303-TA-22-0 ET DU BAC 818 RTO	
-ETUDE DE CAS-	63
IV.1. Introduction :.....	63
IV.1.1. Pourquoi avoir choisi ces deux bacs ? :.....	63
IV.1.2. Pourquoi deux bacs avec des caractéristiques similaires ? :.....	63
IV.2. Étude du premier bac :.....	64
IV.2.1. Les caractéristiques des tôles de fond :	64
IV.2.2. Vue générale du fond :.....	65
IV.2.3. Identification des défauts de la face supérieure et de la face inférieure :	65
IV.2.4. Identification des défauts à réparer :	66
IV.2.4.1. Tôles centrales :.....	66
IV.2.4.2. Les tôles concernées par la réparation:.....	67
IV.2.4.3. Tôles annulaires :	69
IV.2.5. Épaisseur minimale pour les tôles avant la prochaine inspection :.....	72
IV.2.5.1. Calcul de l'épaisseur minimale moyenne :	73
IV.2.5.2. Calcul de la vitesse de corrosion :	75
IV.2.6. Solutions possibles :	76

IV.3. Etude du deuxième bac :	77
IV.3.1. Les caractéristiques du bac :	78
IV.3.2 Inspection visuelle :	79
IV.3.2.1. Les accessoires du fond :	79
IV.3.2.2. L'inspection par ULTRASON :	81
IV.3.2.3 La surface du fond :	84
IV.3.3. Vue générale du fond :	86
IV.3.4. Identification des défauts à réparer :	89
IV.3.5. Tôles annulaires :	90
IV.3.6. Prédiction de l'épaisseur minimale des tôles avant la prochaine inspection :...	93
IV.3.6.1. l'épaisseur minimale moyenne des tôles :	93
IV.3.6.2. Calcul de l'épaisseur minimale moyenne :	94
IV.3.6.3. l'évaluation de la vitesse de corrosion :	94
IV.3.7. Les solutions possibles:	95
CHAPITRE V : REPARATION DU BAC 303-TA-22-01	96
V.1. les méthodes de réparation :	97
V.1.1. Soudage en fosse (pit welding):	97
V.1.2. Soudage en revêtement (overlay welding) :	97
V.1.3. Application des rustines :	98
V.2. La réparation du fond de bac 303-TA-22-0 par pose des rustines :	99
V.2.1. Les règles et les normes concernant les rustines :	99
V.2.2. L'acier à utiliser :	102
V.2.3. La détermination du poids de l'acier :	102
V.3. Identification de la taille et le poids des rustines :	103
V.3.1. tôles centrales :	103
V.3.2. tôles annulaires :	105
V.3.3. Estimation de perte de métal :	105
V.4. Le soudage des rustines :	106
V.4.1. Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :	106
V.4.2. L'électrode utilisée dans le soudage:	107
V.4.3. Le calcul du taux de consommation de l'électrode :	107
V.4.3.1. Première méthode :	107
V.4.3.2. Deuxième méthode :	108
V.4.3.3. Spécification de la procédure de soudage (WPS) :	108

V.4.3.4. Le calcul du poids de l'électrode :	110
V.5. Calcul du coût total du matériel de soudure :.....	111
V.6. Revêtement du fond :	111
V.6.1. Le procédé de revêtement en fibre de verre :.....	112
V.6.2. La surface à revêtir :	113
Conclusion générale.....	97
Annexe I.....	116
Annexe II	117
BIBLIOGRAPHIE	97

Listes des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Parc de stockage	3
Figure I. 2: Réservoirs de stockage des hydrocarbures	4
Figure I. 3: Schéma définie les modes de stockage.....	4
Figure I.4 : Types des réservoirs	5
Figure I. 5: : réservoirs de stockage cylindrique vertical	6
Figure I. 6: Les éléments entrant dans la structure des bacs.....	7
Figure I. 7: schéma du fond et l'alliage.....	8
Figure I. 8: La structuration de la robe	9
Figure I. 9: La ceinture	9
Figure I. 10: Réservoir à toit Fixe.....	10
Figure I. 11: Réservoir a toit flottant externe	11
Figure I. 12: Réservoir à toit flottant interne.....	12
Figure I. 13: Toit flotteur a simple pont	12
Figure I. 14: Réservoir a toit flottant à ponton annulaire.	13
Figure I. 15: Type double pont, le caisson recouvre toute la surface du réservoir.....	13
Figure I. 16: Réservoir a toit flottant à double-pont.	14
Figure I. 17 : Les événements.	14
Figure I. 18: Le trou d'homme.	15
Figure I. 19: Accessoires d'accès des bacs.	15
Figure I. 20: Béquilles réglable sur toit "double pont ".....	16
Figure I. 21: Les béquilles.	16
Figure I. 22: Accessoires de contrôle des bacs.....	17
Figure I. 23: la cuvette de rétention.....	17
Figure I. 24: Le réseau d'incendie.....	18
Figure I. 25: Injecteur de mousse.	18
Figure I. 26: Injection de mousse au travers d'un flexible.....	19
Figure I. 27: Système d'arrosage de la robe de bac.....	19
Figure I. 28: Système d'évacuation des eaux pluviales.....	20
Figure I. 29: Joints mécanique.....	20
Figure I. 30: Joint liquide	21
Figure I. 31: Système top master et Système delta seal.....	21
Figure I. 32: Le nouveau système d'étanchéité de joint.....	21
Figure I. 33: Joint secondaire	22
Figure I. 34: Aspiration flottante sous un bac a toit flottant.....	23
Figure I. 35: Entraînement par courroie et entraînement direct.	24
Figure I. 36: Système d'ajustage.	24
Figure I. 37: La protection des bacs contre la corrosion.	25
Figure I. 38: Schéma détaillé d'un réservoir de toit flottant externe a double pont.....	25
Figure I. 39: Schéma détaillé du réservoir à toit fixe.	26
Figure I. 40: Schéma détaillé du réservoir à écran flottant interne.....	26
Figure I. 41: réservoir cylindrique horizontale.....	27

Figure I. 42: Bac de stockage sphérique.....	28
----------------------------------------------	----

Chapitre II

Figure II. 1: les cas envisager pour la corrosion électrochimique.....	30
Figure II. 2: le mécanisme de transfert direct en corrosion microbienne des aciers	30
Figure II. 3: Différents types de couches de corrosion.....	31
Figure II. 4: face intérieure corrode d'une virole	33
Figure II. 5: corrosion externe de la virole	34
Figure II. 6: corrosion d'un toit flottant	35
Figure II.7 : la corrosion au niveau des caissons de flottaison, du toit et les béquilles.....	35
Figure II. 8 corrosion par les amines attribues une augmentation de CO2	37
Figure II. 9: Vue rapprochée de la corrosion par la saumure	38
Figure II. 10: Vue à plus fort grossissement des piqûres de corrosion.....	38
Figure II. 11: schéma du fond après un tassement	39
Figure II. 12 : gonflement du fond d'un bac	39
Figure II. 13: schéma montre les cloques dans les fonds	40
Figure II. 14: Processus de fatigue-corrosion à partir d'une piqûre de corrosion	42
Figure II. 15: Photomicrographie montrant une fissuration par amine Grossissement de 6X .	43
Figure II. 16: Fatigue corrosion.....	43

Chapitre III

Figure III. 1: vue intérieure d'un bac de stockage abandonnés.....	44
Figure III.2 : Exemple de maillage de point pour le contrôle d'épaisseur du fond.....	45
Scanning ou Maillage UT ou MFL (le long de génératrices rayonnantes (Fig III.2) et des tôles de la zone critique).....	46
Mesures d'épaisseur UT ou MFL le long de génératrices rayonnantes (Fig III.2) (minimum 1 point par tôle)	46
Figure III. 3: piqûre visibles à l'œil nu et corrosion généralisée au niveau du support.....	48
Figure III. 4 : un drone utilisé pour l'inspection visuelle.....	48
Figure III. 5: transducteur ultrasonique	49
Figure III. 6: schéma du principe d'onde guidée	49
Figure III. 7: schéma du principe de la radiographie.....	50
Figure III. 8: scanner de radiographie	50
Figure III. 9: principe de fonctionnement de courant de foucault.....	51
Figure III. 10: scanner ECT de fond et : capteur de courant de Foucault	51
Figure III. 11: image du profil thermique de bac et caméra Infrarouge	52
Figure III. 12: MFL surface scanner.....	52
Figure III. 13: sonde de magnétoscopie	53
Figure III. 14: schéma détaille le principe du MFL.....	53
Figure III. 15: exemple d'inspection d'une perte d'épaisseur de 70%.....	54
Figure III.16 : image réelle de perte d'épaisseur dans les surfaces supérieure et inférieure de la tôle	55

Figure III.17: l'épaisseur minimale de tôle centrale du fond.....	59
Figure III. 18 Les class de revêtement.....	59
Figure III. 19: l'épaisseur minimale de tôle annulaire du fond.....	61
Figure III. 20 : purge et pipe.....	62
Figure III. 21: support du toit flottant et rustine.....	62

Chapitre IV

Figure IV.1: tableau statistique du bac 303-TA-22-01.....	64
Figure IV.2 : vue générale du fond de Bac 303-TA-22-01	65
Figure IV.3 : la répartition des défauts entre la face supérieure et la face inférieure.....	66
Figure IV.4: schéma de couleur de discontinuité	68
Figure IV. 5 : Rangée 2 Tôle 5	68
Figure IV. 6 : Rangée 3 Tôle 17	68
Figure IV. 7: Rangée 4 Tôle 7	68
Figure IV. 8: Rangée 5 Tôle 27	69
Figure IV. 9 : Rangée 7 Tôle 9	69
Figure IV.10 : Norme de l'épaisseur minimale de la tôle annulaire	70
Figure IV.11 : tôle annulaire 2	70
Figure IV.12 : tôle annulaire 7	71
Figure IV.13 : tôle annulaire 9	71
Figure IV.14 : tôle annulaire 20	71
Figure IV.15 : tôle annulaire 24	71
Figure IV.16 : tôle annulaire 26	72
Figure IV.17 : tôle annulaire 30	72
Figure IV.18 : les pertes maximales de metal pour chaque tôle.....	74
Figure IV.19 : l'épaisseur minimale moyenne du côté supérieur	75
Figure IV.20 : Bac 818 RTO	78
Figure IV.21 : tableau statistique du bac 818 RTO	78
Figure IV. 22: flotteur et Pipe.....	79
Figure IV. 23 : défaut détecte par œil dans les Supports.....	79
Figure IV. 24 : détection des défauts par vision des Purges.....	80
Figure IV. 25 : l'accumulation de saleté dans le de drainage du	80
Figure IV. 26: Defaut detecte par l'inspection visuelle dans la surface de bac	84
Figure IV. 27: Corosion généralisée vue clair par oeil.....	85
Figure IV.28 : Défauts dans les joints de soudure.....	85
Figure IV. 29: Vue générale montrant des défauts de 80 à 100 % de perte de métal.....	86
Figure IV. 30 : les défauts de 50%-59% de perte de métal	87
Figure IV. 31: 60%-69% de perte de métal	88
Figure IV. 32 : les défauts de 70% - 79 % de perte de métal	88
Figure IV. 33: Rangée 12 tôle 8	89
Figure IV. 34: Rangée 13 tôle 5	89
Figure IV. 35: Rangée 14 tôle 5	89
Figure IV. 36: Rangée 14 tôle 8	90
Figure IV. 37: Rangée 27 tôle	90

Figure IV. 38: l'épaisseur minimale de tôle annulaire de fond.....	91
Figure IV. 39: tole annulaire 8	92
Figure IV. 40: tole annulaire 25	92
Figure IV. 41: tole annulaire 30	93
Figure IV. 42: l'épaisseur minimale moyenne du coté inférieure.....	94

Chapitre V

Figure V.1 : Soudage en fosse	97
Figure V.2 : Soudage en revêtement	98
Figure V.3 : rustine soudée.....	98
Figure V.4 : l'épaisseur minimale des rustines	99
Figure V.5 : les dimensions minimales des rustines couvrant un joint de soudure.....	99
Figure V.6 : les dimensions minimales des rustines loin d'un joint de soudure.....	100
Figure V.7 : les dimensions minimales des rustines couvrant un joint à triple soudure	100
Figure V.8 : l'épaisseur maximale des rustines dans la zone critique	101
Figure V.9 : la forme et la longueur des rustines dans la zone critique.....	101
Figure V.10 : les rustines othorisées dans la zone critique.....	102
Figure V.11 : électrode utilisée dans le procédé SMAW	106
Figure V.12 : électrode E7018.....	107
Figure V.13 : les fibres de verre couchées à l'aide d'un rouleau.....	113

Listes des tableaux

Chapitre III

Tableau III. 1: les niveaux d'inspection pour contrôler l'épaisseur des tôles du fond	46
Tableau III. 2: les niveaux d'inspection pour le contrôle des soudures	46
Tableau III. 3 : l'incertitude du MFL	56
Tableau III. 4 : le degré d'efficacité de chaque méthode d'inspection pour différents défauts	57

Chapitre IV

Tableau IV.1 : les défauts à réparer	67
Les tôles concernées sont portées dans le tableau IV.2	70
Tableau IV.2 : les tôles annulaires à réparer	70
Tableau IV.3 : Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R3P4	81
Tableau IV.4 : Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R11P2	81
Tableau IV. 5: Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R18/P5	82
Tableau IV. 6: Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R21/P5	83
Tableau IV. 7: Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R27/P6	83
Tableau IV. 8: les tôles ont été réparées d'une façon préventive	91
Tableau IV. 9: les résultats de l'inspection UT	92
Tableau IV. 10 : les défauts trouvés dans le fond du bac 818	117

Tableau V.1 : le poids et les dimensions minimales des rustines nécessaires à la réparation des tôles centrales	103
Tableau V.2 : le poids et les dimensions minimales des rustines nécessaires à la réparation des tôles annulaires	105
Tableau V.3 : l'estimation du métal supplémentaire pour la réparation	106
Le tableau V.4 présente le taux de dépôt de la soudure par le procédé de soudage (SMAW). Ce tableau fournit une estimation du taux de dépôt de la soudure en prenant en considération la valeur de l'ampérage de soudage.	108
Tableau V.4 : formules pour calculer le taux de dépôt de E7018	108
Tableau V.5 : WPS pour le soudage SMAW de A283 GR.C avec E7018.....	109
Tableau V.6 : taux de dépôt et de consommation calculés pour chaque couche de soudure ..	110
Tableau V.7 : poids de l'électrode calculé pour chaque couche de soudure.....	110
Tableau V.8 : une estimation du coût du matériel de soudage	111
Tableau V.9 : le revêtement en fibre de verre du bac 818 RTO.....	112
Tableau V.10 : Estimation du coût de revêtement en fibre de verre	114

Abréviations

m = poids de l'électrode (kg).

T = la durée estimée du soudage, fonction de la vitesse de soudage et périmètre des rustines.

τ = Taux de consommation en kg/min.

Dr = Le taux de dépôt en lbs/h, calculé à partir du tableau V.4.

E = Facteur d'efficacité de l'électrode.

A = Courant de soudage (en ampères A)

v = Tension de soudage (en volts V)

D = Diamètre de l'électrode (en millimètres mm)

E = Facteur d'efficacité de l'électrode.

m = Poids de l'acier (kg)

t = Épaisseur de l'acier (mm)

l = Largeur de l'acier (m)

w = Longueur de l'acier (m)

T_{nominal} = l'épaisseur nominale de la tôle en mm

h = pertes de métal du côté supérieur en mm

MTR = Épaisseur minimale restante à la fin de l'intervalle O_r .

O_r = Intervalle d'année pour la prochaine inspection.

RT_{bc} = épaisseur minimum mesurée pour la partie inférieure.

RT_{ip} = épaisseur minimum mesurée du côté supérieur.

$S_t P_r$ = vitesse de corrosion du côté supérieur du fond.

P = Possible

M = Moyenne

TB = Très Bonne

NA = Non applicable

BSR : bactéries sulfato-réductrices

API : application programming interface

MFL : Magnetic flux leakage

UT : ultrasonic testing

CND : control non destructive

ECT : Eddy courant testing

MRT : minimum remaining thickness

AMP : AMPERAGE

Pr : périmètre

INTRODUCTION GENERALE

Le stockage des produits liquides, tels que les produits pétroliers, chimiques ou alimentaires, est un enjeu crucial dans de nombreux secteurs industriels. Les bacs de stockage sont des équipements essentiels pour assurer la conservation et la sécurité de ces produits. Cependant, au fil du temps, ces bacs peuvent subir des dégradations et des défaillances qui compromettent leur intégrité et leur fonctionnalité.

Ce mémoire a pour but de déterminer l'intervalle d'inspection optimal, la meilleure méthode d'inspection et l'épaisseur minimale des tôles centrale et annulaire des bacs de stockage pour assurer l'intégrité de bacs de stockage. De plus, il vise à calculer l'épaisseur requise avant la prochaine inspection afin d'établir un programme de maintenance préventive efficace. En outre, ce mémoire se propose de déterminer la meilleure méthode de réparation et les matériaux à utiliser pour assurer une réparation fiable et durable.

Le mémoire est divisé en plusieurs chapitres qui couvrent différents aspects de cette problématique. Le chapitre 1 présente les généralités sur les réservoirs de stockage, en mettant en évidence leur importance dans les industries concernées et les principaux types de bacs utilisés.

Dans le chapitre 2, les mécanismes de dégradation et de défaillance des bacs sont examinés en détail. Il est essentiel de comprendre les causes potentielles de ces problèmes pour développer des stratégies d'inspection et de réparation efficaces.

Le chapitre 3 est consacré aux différentes méthodes d'inspection utilisées pour évaluer l'état des bacs de stockage. Une analyse comparative des différentes méthodes est réalisée afin de déterminer la meilleure méthode d'inspection.

Dans le chapitre 4, une étude approfondie est menée pour déterminer l'épaisseur minimale requise pour les tôles centrale et annulaire des bacs de stockage. Des critères de sécurité et des normes industrielles sont pris en compte pour établir ces valeurs, le chapitre propose un calcul de l'épaisseur requise avant la prochaine inspection, en tenant compte des taux de dégradation et de l'intervalle d'inspection recommandé. Cette analyse permet de planifier efficacement les futures inspections et de prévenir les défaillances potentielles.

Enfin, le dernier chapitre aborde la question cruciale de la réparation des fonds des bacs de stockage. Différentes méthodes de réparation sont étudiées et évaluées pour déterminer la meilleure méthode et les matériaux à utiliser, en garantissant une réparation fiable et durable.

Ce mémoire vise à fournir des recommandations précises pour la détermination de l'intervalle d'inspection, la meilleure méthode d'inspection, l'épaisseur minimale des tôles centrale et annulaire, ainsi que la meilleure méthode de réparation et les matériaux à utiliser pour les bacs de stockage. Les résultats de cette étude contribueront à améliorer les pratiques de maintenance et à garantir la sécurité, la durabilité et la performance des installations de stockage.

Chapitre I :

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSERVOIRS



I. 1 Introduction :

Le stockage des hydrocarbures est un processus critique dans l'industrie pétrolière et gazière qui permet de stocker temporairement ou de manière permanente les hydrocarbures extraits avant leur distribution ou leur utilisation. Parmi ces hydrocarbures le pétrole brut, le gaz naturel, l'essence le diesel et le fioul.

Les réservoirs de stockage d'hydrocarbures sont utilisés pour stocker ces substances qui peuvent être stockées sous différentes formes notamment liquides gaz ou solides. Les réservoirs de stockage sont généralement construits en acier en béton ou en fibres de verre et peuvent être situés en surface ou souterrains ils sont conçus pour résister aux conditions environnementales et aux pressions exercées par les hydrocarbures stockés.

Les réservoirs de stockage peuvent être de différentes tailles et formes selon les besoins de stockage, certains réservoirs sont utilisés pour le stockage de courte durée tandis que d'autres sont utilisés pour le stockage de longue durée ou même permanent. Les réservoirs peuvent également être utilisés pour stocker des hydrocarbures en vrac ou pour stocker des produits raffinés dans des réservoirs de distribution. Le stockage des hydrocarbures dans les réservoirs peut présenter des risques pour la santé et la sécurité ainsi que pour l'environnement en cas de fuites ou de déversements, par conséquent, les réservoirs de stockage sont soumis à des réglementations strictes pour garantir leur sécurité et leur conformité environnementale. Les mesures de sécurité telles que les barrières de confinement, les systèmes de détection de fuites et les systèmes de suppression d'incendie sont également installés pour minimiser les risques en somme. Le stockage des hydrocarbures dans les réservoirs est une partie essentielle de l'industrie pétrolière et gazière qui nécessite une attention particulière pour garantir la sécurité des travailleurs, la protection de l'environnement et le respect des réglementations en vigueur.

I.2 But du stockage :

- Le stockage temporaire du pétrole et du gaz implique la mise en immobilisation de certaines quantités de ces produits dans des équipements de stockage spécifiques, tels que les appareils à pression ou les réservoirs, en fonction de si le produit stocké est sous pression ou non.
- Assure la poursuite de la production et de l'exploitation de manière ininterrompue.
- Permet de surveiller la qualité des produits expédiés.
- Facilite l'élimination naturelle des gaz indésirables par le biais du dégazage.

I. 3 Définition :

I. 3. 1 Le pétrole :

Le naphte, également connu sous le nom de pétrole depuis l'Antiquité, est une huile minérale d'origine naturelle constituée d'un mélange complexe de composés organiques, principalement des hydrocarbures, qui se trouve piégé dans des formations géologiques spécifiques.

I. 3. 2 Le gaz du pétrole liquéfié (GPL) :

Le GPL (gaz de pétrole liquéfié) est constitué d'un mélange d'hydrocarbures, en particulier d'isomères de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}). La composition du GPL peut varier considérablement selon l'utilisation prévue, la saison, le pays, ainsi que les propriétés du brut/gaz utilisé et les procédés de raffinage.

I. 3. 3 Le condensat :

Le condensat est un mélange d'hydrocarbures avec des atomes de carbone compris entre C5 et C8. Il s'agit d'un produit volatil, léger, inflammable et instable. Sa pression de vapeur saturante est intermédiaire entre celle d'un condensat de gaz naturel et celle du gaz de pétrole liquéfié. Les gisements peuvent contenir une fraction liquide légère, appelée "condensats", qui contiennent des hydrocarbures allant du pentane (C_5H_{12}) à l'heptane (C_7H_{16}) ou à l'octane (C_8H_{18}), en fonction du poids moléculaire.

I. 4 Les parcs de stockage :

Le parc de stockage est un vaste espace comprenant généralement plusieurs réservoirs de stockage, ayant des capacités variées. Ces réservoirs sont reliés par une canalisation d'entrée et de sortie, et peuvent être connectés les uns aux autres. Les réservoirs peuvent être divisés en trois groupes, en fonction de leur état :

- Le premier groupe est en phase de remplissage.
- Le deuxième groupe est en phase de décantation.
- Le troisième groupe est en phase de vidange.



Figure I.1 : Parc de stockage

I.4.1 Un bac d'hydrocarbures :

Un bac de stockage des hydrocarbures est un réservoir de grande capacité utilisé pour stocker des produits pétroliers tels que le pétrole brut, le diesel, l'essence, le kérosène, le fioul, etc. Ces bacs sont souvent utilisés par les entreprises pétrolières et les raffineries pour stocker les hydrocarbures avant leur distribution.

Les bacs de stockage des hydrocarbures sont généralement construits en acier et sont équipés par des mesures de sécurité et de prévention des fuites pour minimiser les risques de fuites ou de déversements. Des procédures strictes de gestion des risques et des protocoles de sécurité sont en place pour garantir que les opérations de stockage des hydrocarbures sont effectuées en toute sécurité, cependant, les bacs de stockage des hydrocarbures présentent des risques environnementaux en cas de fuite ou de déversement accidentel. Les entreprises pétrolières et les raffineries doivent donc prendre des mesures pour prévenir ces incidents et être préparées à y faire face en cas de besoin.



Figure I. 2: Réservoirs de stockage des hydrocarbures

I.5 Le mode de stockage :

- Aérien ou atmosphérique
- Semi-enterré
- Totalement enterré



Figure I. 3: Schéma définie les modes de stockage

I.6 Types de réservoir de stockage :

Les constructeurs utilisent des réservoirs de différentes formes et conceptions pour stocker les produits liquides industriels, en fonction de leurs caractéristiques spécifiques. L'objectif est de :

- Protéger le produit en limitant ou en inhibant l'évaporation et la résistance structurelle à la pression interne générée par le produit.
- Maintenez le niveau pour faciliter l'utilisation.

La forme cylindrique est la plus courante car elle est facile à mettre en œuvre et résiste bien à la pression interne. Cependant, lorsque la pression interne est élevée, il est préférable d'utiliser une forme sphérique, qui est plus adaptée qu'une forme cylindrique et permet une diminution de l'épaisseur de paroi.

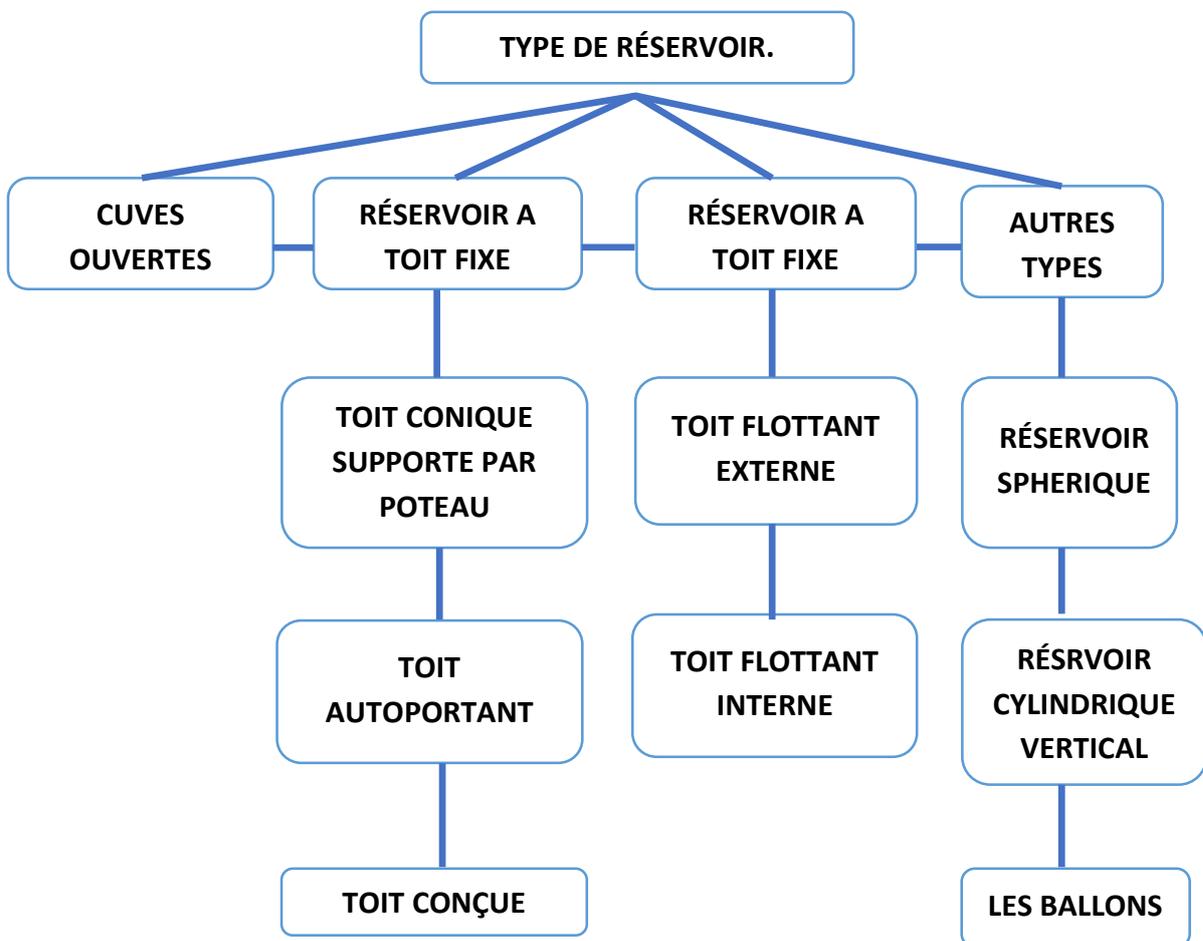


Figure I.4 : Types des réservoirs

I.6.1 Réservoir cylindrique vertical :

Les réservoirs, également appelés baignoires, sont généralement posés directement sur le sol ou utilisent une fondation plate. Ils sont équipés d'un sommet fixe conique ou sphérique, ou d'un sommet flottant, qui repose sur le liquide et coulisse sur un piston formé par l'enveloppe du réservoir.

Si le réservoir doit supporter une légère pression, son toit est généralement sphérique et son fond périphérique peut être ancré sur une fondation circulaire en béton. Toutefois, pour éviter l'utilisation d'ancrages et de fondations, le fond plat peut être remplacé par un fond sphérique concave qui équilibre les effets de la pression sur le toit.



Figure I. 5: : réservoirs de stockage cylindrique vertical

I.6.2 Classification des bacs cylindriques verticaux :

Les bacs utilisés sont classés selon trois critères :

- La nature du toit du réservoir.
- La nature du produit stocké
- Les capacités des réservoirs.

I.6.3 Principaux éléments constitutif d'un réservoir cylindrique vertical :

- Un fond
- Une robe
- Un toit
- La cuvette
- La ceinture
- L'assise
- **Équipement d'accès** : escaliers, gardes de corps et les échelles.
- **Équipement de visite** : trous d'homme.
- **Équipement de mesure de niveau de produit** : jaugeage est une technique de détermination de la hauteur du produit dans un réservoir (manuel ou automatique).
 - **Équipement de sécurité** : les soupapes, les couronnes d'eau et de mousse, les Paratonnerres.

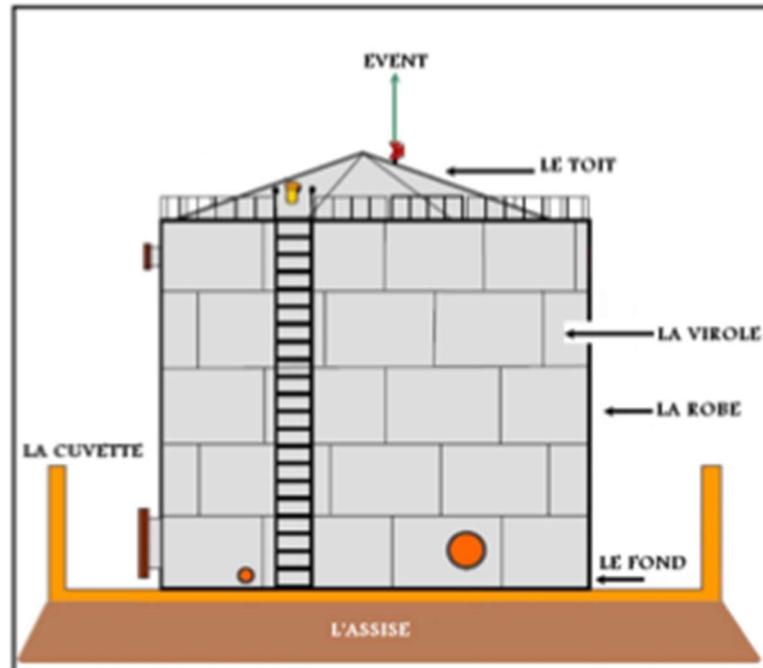


Figure I. 6: Les éléments entrant dans la structure des bacs.

I.6.3.1 Le fond du bac :

Le fond de la cuve est fabriqué à partir de plaques de tôle qui se chevauchent aux extrémités et sont soudées ensemble. Ces plaques reposent généralement sur une couche de gravier ou de sable recouverte d'une couche d'étanchéité enrobée de bitume, ce qui permet une étanchéité et une adaptation au contact des plaques de fond assemblées. Le design du fond doit permettre une vidange complète, ainsi que l'élimination des dépôts et de l'eau par des purges appropriées.

Il a une fonction principale d'étanchéité et assure le transfert de la charge verticale, produite par le liquide stocké, sur la fondation. La partie centrale du fond n'est donc pas soumise à des contraintes mécaniques de tension. Par contre, la bordure périphérique, placée sous la robe et soudée à celle-ci, est fortement sollicitée par la pression hydrostatique horizontale qui agit au bas de la robe. Le fond peut être plat ou légèrement conique avec une pente au moins égale

À 0,2 % orientée vers le haut ou vers le bas. Cette pente facilite l'élimination des dépôts en fond de bac, qui s'effectue par l'intermédiaire d'une tuyauterie traversant la robe et débouchant dans une cuvette installée au point bas du fond. Lorsqu'un tassement des fondations est attendu, la pente du fond est orientée vers le haut pour compenser les mouvements du terrain. Le fond est réalisé à partir de tôles rectangulaires de 6 à 6,5 mm d'épaisseur minimale, soudées par recouvrement sur leur face supérieure

En fonction des critères fixés par les codes de construction, une tôle annulaire de bordure peut être nécessaire sous la robe. Elle est constituée de segments de tôles rayonnants, soudés bout à bout, en général plus épais que le reste du fond

- **L'anneau de tôle annulaire :**

C'est un élément essentiel utilisé dans la construction de réservoirs et de cuves. Il s'agit d'un anneau circulaire qui est installé à la base du réservoir, formant une liaison entre la paroi verticale du réservoir et le fond. Sa fonction principale est de fournir une résistance structurelle

et de répartir les charges de manière uniforme. L'anneau de plateau annulaire contribue à renforcer la paroi du réservoir et à résister aux forces générées par la pression interne du contenu du réservoir. Son épaisseur est déterminée en fonction des exigences de résistance, du poids du contenu du réservoir, des charges sismiques et d'autres facteurs pertinents, conformément aux normes et spécifications de l'industrie. En résumé, l'anneau de plateau annulaire est un composant crucial pour assurer la stabilité et la sécurité des réservoirs et des cuves.

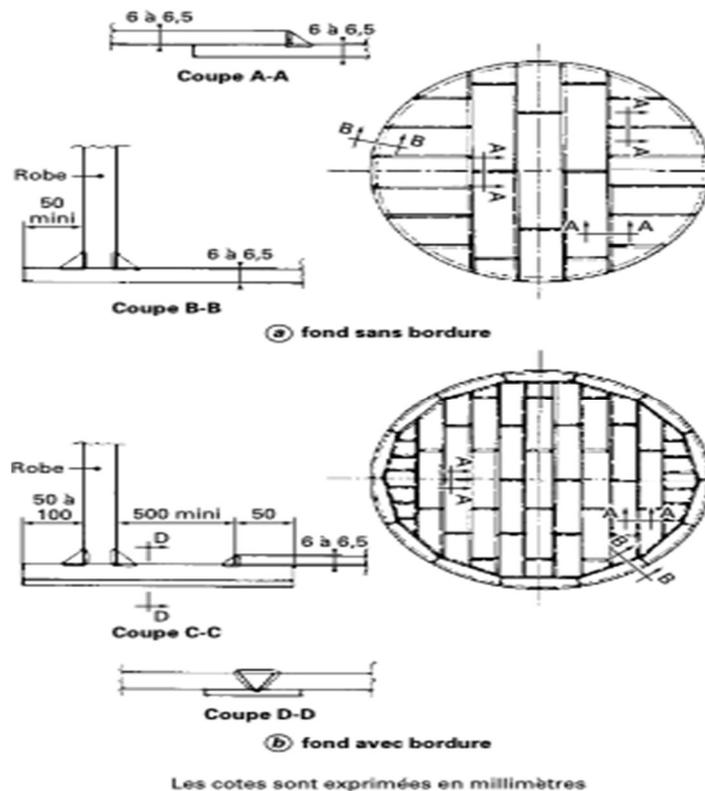


Figure I. 7: schéma du fond et l'alliage

I.6.3.2 L'assise :

C'est la fondation sur laquelle repose le réservoir.

I.6.3.3 La robe :

La robe d'un réservoir de stockage fait référence à sa structure verticale formée par l'empilage de bandes de tôle soudées bout à bout. Cette structure constitue la paroi du réservoir et est essentielle pour soutenir le poids du liquide stocké et résister aux pressions internes exercées par celui-ci. La robe est généralement conçue pour être solide, durable et étanche afin de prévenir toute fuite de liquide.

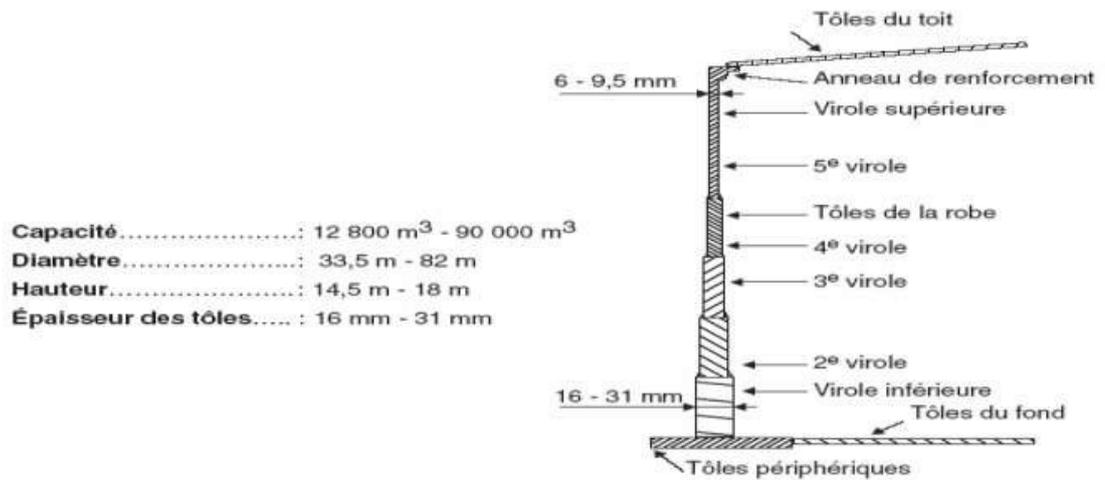


Figure I. 8: La structuration de la robe

I.6.3.4 La virole :

La virole d'un réservoir de stockage est une bande de tôle qui est enroulée en cercle et soudée bout à bout pour former un anneau. Les viroles sont utilisées pour construire la robe du réservoir en empilant les anneaux les uns sur les autres. Les viroles peuvent être de différentes largeurs et épaisseurs, en fonction des exigences de la conception du réservoir. Elles sont généralement renforcées pour assurer une résistance optimale aux pressions exercées par le liquide stocké et pour empêcher toute déformation de la structure du réservoir.

I.6.3.5 La ceinture :

Pour maintenir leur forme cylindrique lorsqu'ils sont soumis à des vents violents. Tous les réservoirs ont besoin de ceintures de renforcement. La fonction de ces ceintures est d'empêcher toute déformation des parois.

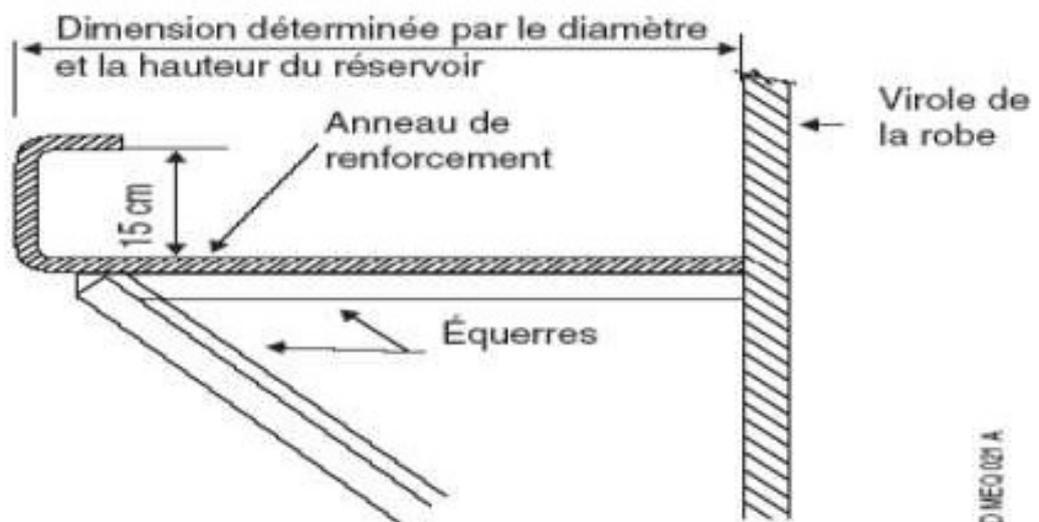


Figure I. 9: La ceinture

I.6.3.6 Le toit :

Pour un réservoir de stockage d'hydrocarbures cylindrique vertical, le toit peut se référer à la structure supérieure qui recouvre le réservoir et empêche les émissions de gaz et de vapeurs d'hydrocarbures dans l'atmosphère. Les réservoirs cylindriques verticaux peuvent avoir différents types de toits en fonction de leur taille, de leur usage et des réglementations en vigueur.

- **Les types de toits :**

a) Toit fixe : Les produits peu volatils et à faible tension de vapeur, ayant une pression inférieure à 1 bar, sont stockés dans des réservoirs équipés d'un toit fixe. Cette mesure de précaution empêche la contamination de ces produits par des éléments extérieurs tels que la pluie ou la poussière. Les réservoirs à toit fixe sont divisés en deux catégories :

- Les réservoirs à toit supporté
- Les réservoirs à toit autoportant.

Le toit fixe assure une rigidité suffisante au sommet du réservoir, évitant ainsi la nécessité d'installer un raidisseur. Ces toits sont composés d'une charpente soutenue par un ou plusieurs poteaux (dans le cas de diamètres supérieurs à 25 mètres), qui reposent sur le fond du réservoir. Les toits autoportants peuvent être de forme conique ou sphérique.



Figure I. 10: Réservoir à toit Fixe.

Il existe différentes formes de toit fixe :

a.1) Toit plat : Le toit plat est conçu pour les réservoirs de stockage de faible diamètre qui ne nécessitent aucun support.

a.2) Toit conique autoportant : bien que le toit ait une forme conique, il est capable de se soutenir par lui-même grâce à la rigidité conférée par sa forme.

a.3) Toit conique soutenu au centre : les réservoirs de taille moyenne ont généralement un toit conique qui est maintenu en place par un support central.

a.4) Toit conique supporté : le toit est soutenu en plusieurs points en fonction des exigences, afin de supporter le poids du toit ainsi que les autres charges statiques et mobiles qui sont anticipées.

a.5) Toit conique supporté extérieurement : dans ce type de toit, le support est assuré par des colonnes externes à la coque du réservoir.

b) Toit flottant : ces réservoirs sont destinés au stockage de produits volatils tels que le pétrole brut, le condensat ou les carburants pour automobiles. Leur conception est similaire à celle des réservoirs à toit fixe, à l'exception du toit qui est dans ce cas, le toit flotte directement sur le liquide stocké grâce à des double-fonds créant des poches d'air indépendantes. Cette conception réduit le poids spécifique du toit par rapport à celui du liquide. Pour garantir l'étanchéité du toit, des bandes en caoutchouc sont utilisées pour sceller la circonférence du toit sur la paroi interne du réservoir, réduisant ainsi les pertes par évaporation du produit. Cette étanchéité permet également le déplacement du toit. Lorsque le toit repose sur le fond du réservoir, il est maintenu par des supports spéciaux appelés "béquilles".

Il existe deux types de toit flottant :

- **Les réservoirs à toit flottant externe :** Ont un toit installé à l'air libre, avec la face inférieure complètement immergée dans le liquide stocké, ce qui élimine pratiquement tout espace de vapeur. Cette conception permet de réduire considérablement les pertes par évaporation et les risques d'incendie.

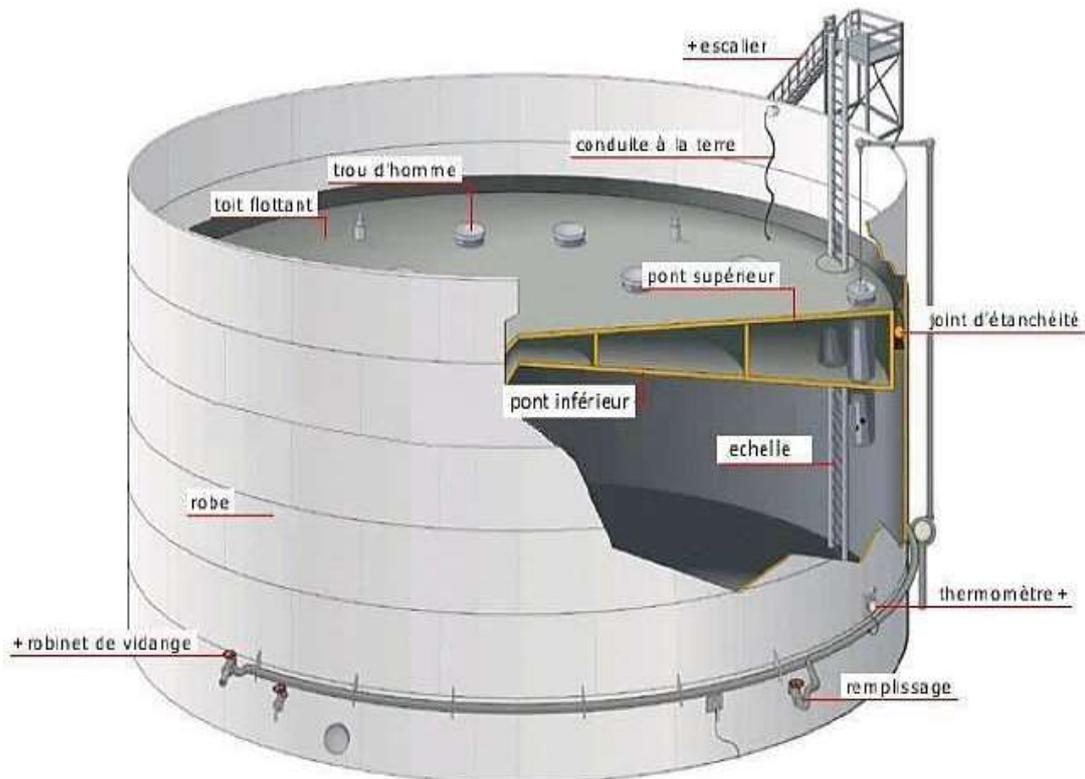


Figure I. 11: Réservoir a toit flottant externe

- **Les réservoirs à toit flottant interne :** Sont des réservoirs à toit fixe avec un toit flottant simplifié, également connu sous le nom d'écran flottant, installé à l'intérieur. Le toit fixe peut être de type supporté, avec des poteaux verticaux à l'intérieur du réservoir, ou de type autoportant sans poteaux. Si la structure comporte des poteaux, ceux-ci traversent le toit flottant par des puits équipés de joints d'étanchéité des puits. Ces réservoirs sont particulièrement adaptés pour stocker des produits volatils qui nécessitent une conservation ou une pureté accrue, ou pour limiter les émissions de vapeurs dans l'atmosphère. Le toit flottant peut être soit à flotteur unique, soit à double flotteur.

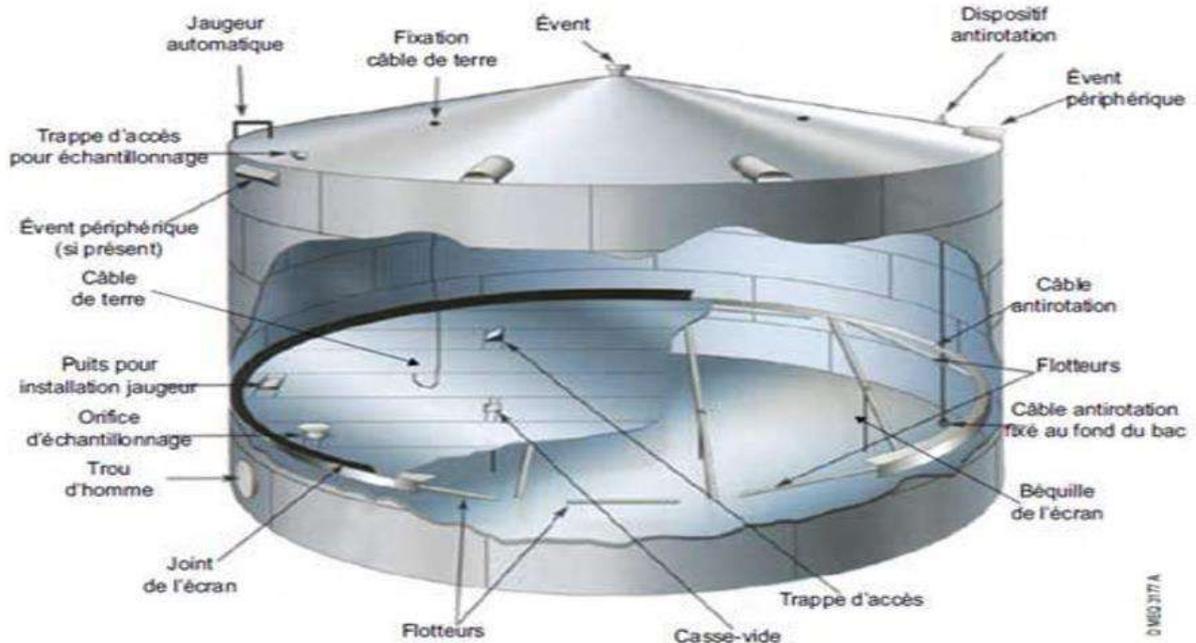


Figure I. 12: Réservoir à toit flottant interne.

b.1) Le toit flottant à simple pont : Également appelé ponton annulaire, est constitué d'un anneau de pontons compartimentés, à l'intérieur duquel se trouve une surface métallique étanche. Le rapport entre la surface des pontons et la surface totale du toit dépend de la taille du réservoir et de la portance offerte par le liquide stocké. La portance ou la force de poussée d'Archimède, dépend du poids du volume déplacé par le toit, qui lui-même dépend de la densité du liquide stocké.

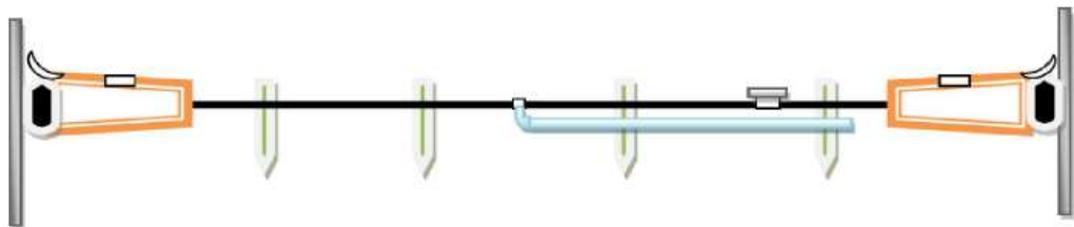


Figure I. 13: Toit flotteur a simple pont

Les caissons du ponton créent un coussin d'air qui empêche une élévation excessive de la température du liquide due aux rayons solaires. Le centre du toit, constitué d'une seule couche

de tôles, peut se gonfler pour libérer de l'espace pour les vapeurs qui se forment. Les vapeurs piégées sous la partie centrale du toit agissent comme une couverture isolante et se condensent lorsque la température diminue. Les pontons sont divisés en compartiments par des cloisons radiales, ce qui permet au toit de flotter même si deux compartiments ou moins sont endommagés. Il est important de drainer les eaux de pluie qui tombent sur le toit flottant pour éviter de diminuer sa flottabilité et augmenter la corrosion. Un tuyau flexible est utilisé pour évacuer ces eaux hors du réservoir.

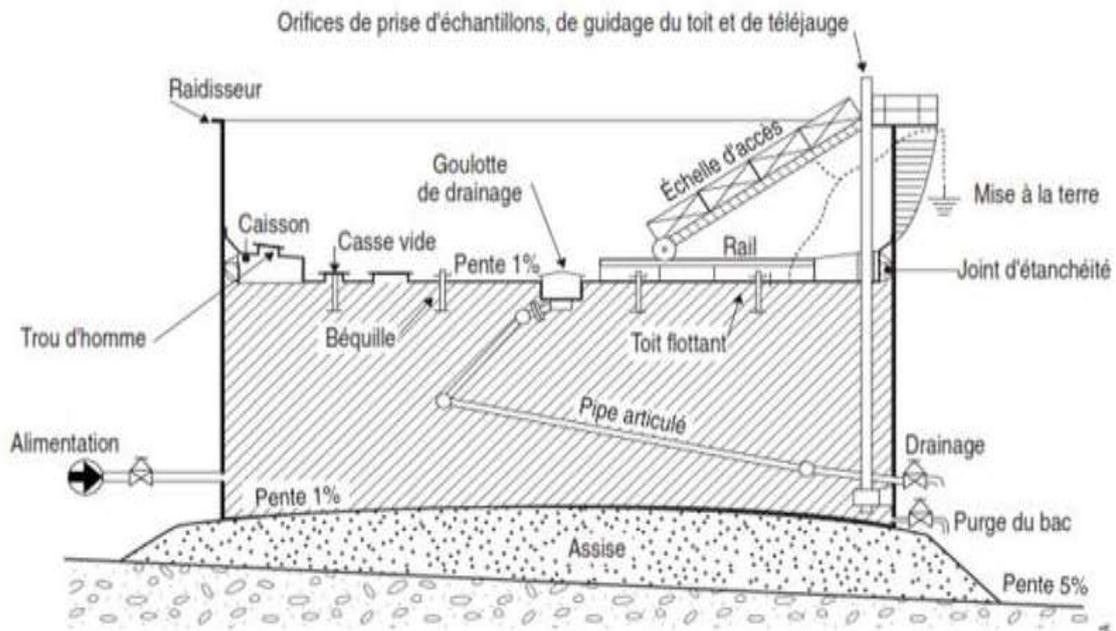


Figure I. 14: Réservoir à toit flottant à ponton annulaire.

b.2) Toit à double pont : le toit à double pont est constitué par 2 couches de tôle d'acier, séparées par un espace vide d'environ 40 cm compartimenté en caissons indépendants renforçant la structure du toit.



Figure I. 15: Type double pont, le caisson recouvre toute la surface du réservoir.

Le choix de ce type de toit est souvent privilégié pour les réservoirs de grande taille en raison des avantages suivants :

- Meilleure capacité de flottaison en cas de surcharge due à des conditions météorologiques telles que la neige ou la pluie.
- Meilleure évacuation des eaux de pluie, réduisant ainsi les risques de corrosion et de détérioration de la flottabilité.
- Moindre vulnérabilité aux vents forts qui peuvent compromettre la sécurité du réservoir.
- Meilleure isolation thermique en été, permettant de limiter l'évaporation des produits stockés.

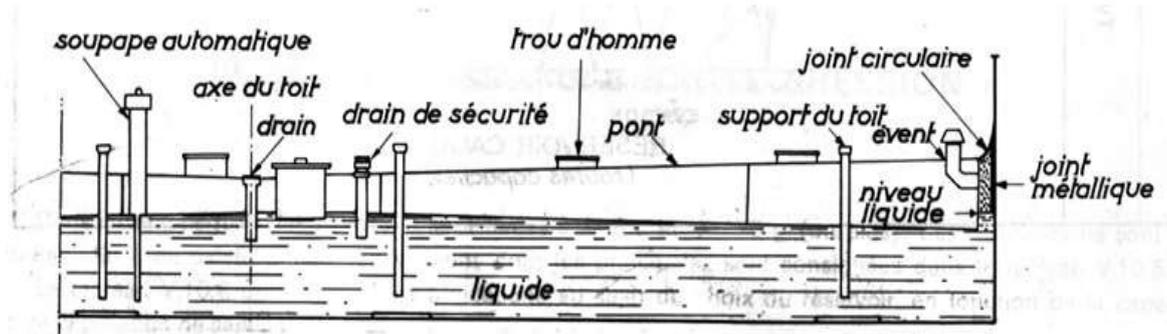


Figure I. 16: Réservoir a toit flottant à double-pont.

I.6.4 Les accessoires du réservoir cylindrique vertical :

I.6.4.1 Accessoire de lutte contre la surpression :

- **Les soupapes** : Ce sont des mécanismes automatiques qui permettent la libération de l'excès de vapeur lorsque la pression de la phase gazeuse à l'intérieur du réservoir atteint une valeur limite ou critique. Cette pression est connue sous le nom ' pression de tarage'.
- **Les évents** : Ce sont des orifices permanents placés dans la partie supérieure du réservoir qui permettent d'évacuer l'excès de vapeur d'hydrocarbure pendant les périodes chaudes.



Figure I. 17 : Les évents.

I.6.4.2 Accessoires d'accès et nettoyage :

- **Trous d'homme** : Il est obligatoire de prévoir au moins un trou d'homme sur le réservoir. Ce dernier est utilisé pour permettre les travaux à l'intérieur du réservoir, tels que l'acheminement des équipements nécessaires, l'accès pour les opérations d'entretien et de nettoyage.



Figure I. 18: Le trou d'homme.

- **Un escalier et une échelle** : un escalier en spirale ou vertical est prévu pour les opérations de vérification, de contrôle, de réparation et de nettoyage. L'escalier doit être conçu pour s'adapter aux mouvements du toit flottant s'il y en a un.

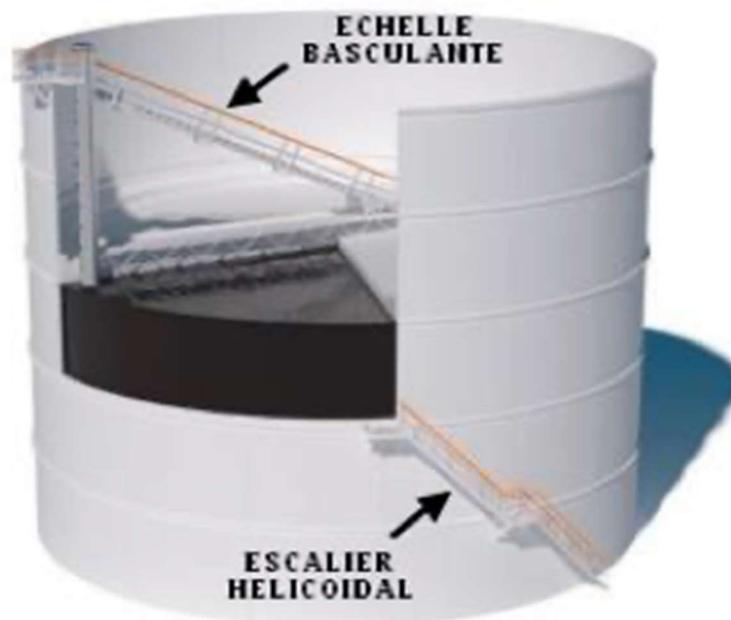


Figure I. 19: Accessoires d'accès des bacs.

I.6.4.3 Accessoires de contrôle:

- **Le manomètre** : Le manomètre permet de surveiller la pression à l'intérieur du réservoir, de sorte que la pression d'épreuve reste constante.
- **Le dispositif de prise d'échantillon** : Cet outil est utilisé pour prélever des échantillons, évaluer la qualité du produit et mesurer la température.

- **Le dispositif de purge :** Cet équipement est conçu pour éliminer les impuretés qui se trouvent au fond du réservoir et qui sont mélangées au produit. Le liquide drainé est dirigé vers les réseaux d'huiles puis vers un séparateur.

- **L'indicateur de niveau :** Cet outil sert à mesurer le niveau du liquide dans le réservoir et de calculer le volume du produit lors du remplissage ou de la vidange. Les indicateurs de niveau à flotteur sont utilisés pour déterminer le niveau du produit dans le réservoir, en suivant le niveau du liquide. Si le réservoir ne dispose pas de flotteur, le niveau du produit est mesuré à l'aide d'une jauge manuelle.

- **Béquilles :** ce sont des béquilles à réglage fixe c.à.d. une fois que le niveau de liquide ne permet plus de maintenir le toit en flottaison, il est soutenu par des béquilles. Il existe deux types de béquilles pour les réservoirs :

1. **Les béquilles réglables :** dont la hauteur peut être ajustée en fonction des consignes d'exploitation

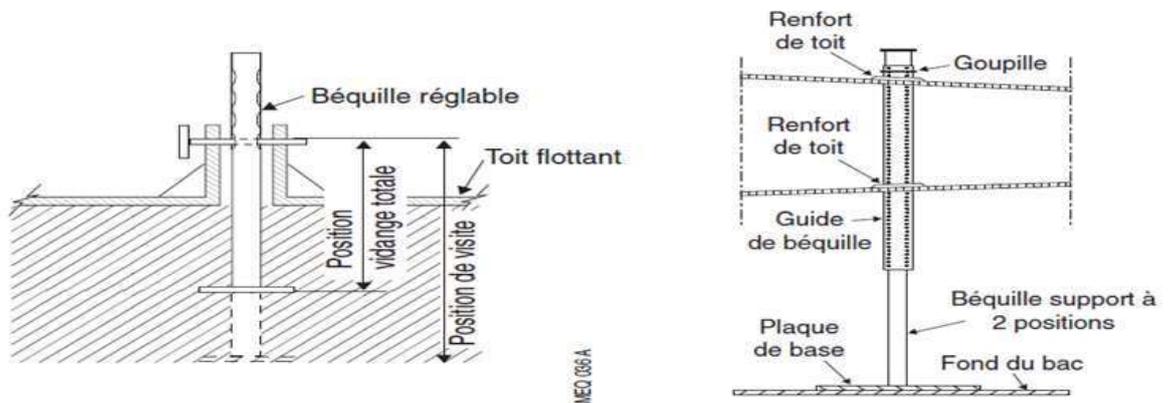


Figure I. 20: Béquilles réglable sur toit "double pont ".

2. **Les béquilles cassent vide :**

Lorsque le toit est supporté par les béquilles, le réservoir fonctionne comme s'il avait un toit fixe. Les évènements automatiques permettent au réservoir de "respirer" lorsque le toit est en position basse. La hauteur de réglage des évènements est déterminée par la hauteur des béquilles fixes.

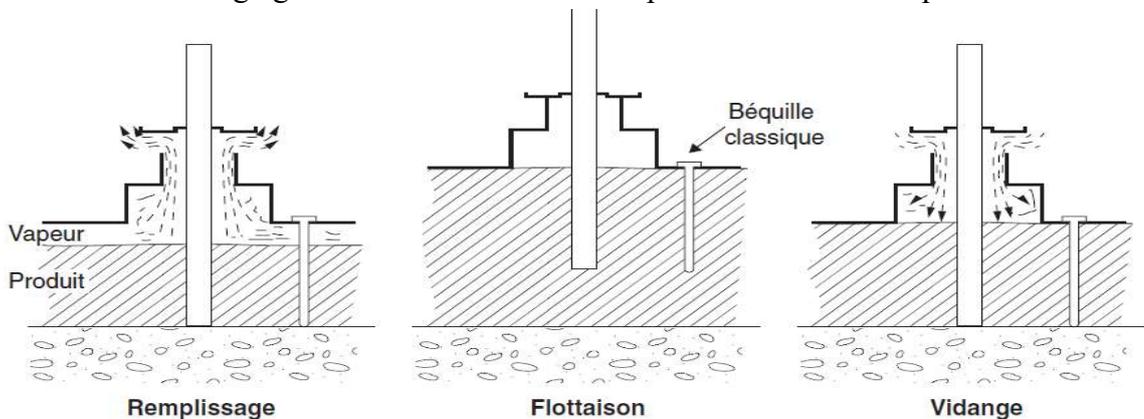


Figure I. 21: Les béquilles.

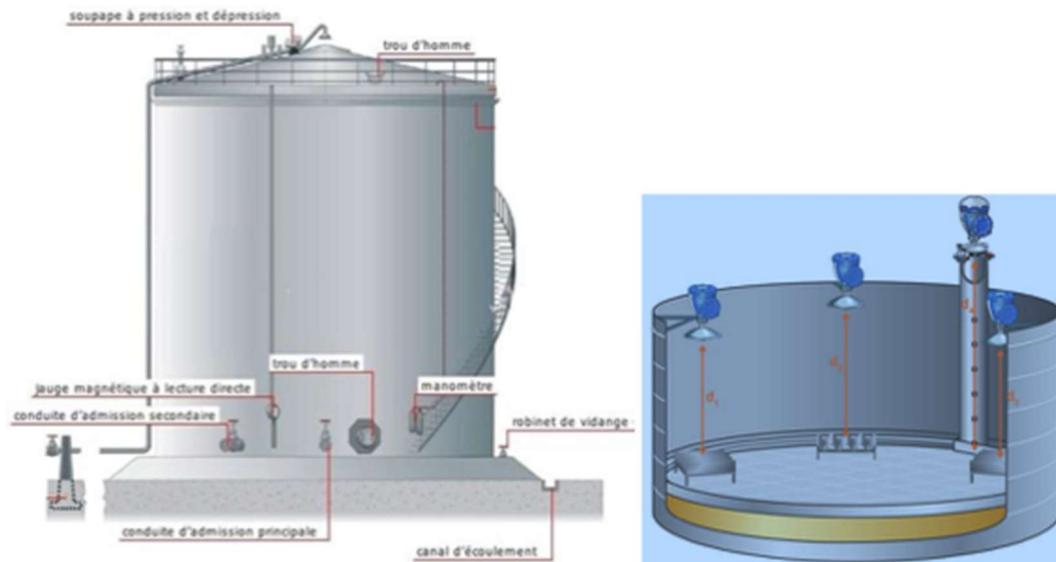


Figure I. 22: Accessoires de contrôle des bacs

I.6.4.4 Accessoires de sécurité:

- **Les vannes de sécurité** : Ces vannes sont installées pour prévenir les surpressions et les dépressions qui pourraient endommager le réservoir. Elles sont au nombre de deux : la vanne de sécurité pour la zone annulaire, placée entre le toit flottant et la robe, et la vanne de décharge automatique.
- **Les dispositifs d'alarme NH et NB** : Les détecteurs sonores se déclenchent lorsque le produit atteint son niveau haut (NH) ou son niveau bas (NB), émettant ainsi un signal sonore.
- **La cuvette de rétention** : La cuvette est conçue pour recueillir 75% du contenu du réservoir en cas de fuite. Si elle contient plusieurs réservoirs, elle doit être divisée en compartiments, dont le nombre dépend de la capacité totale des réservoirs.



Figure I. 23: la cuvette de rétention.

- **Le réseau d'incendie :**
- **Dispositif d'injection de mousse :** Ce dispositif dispose de canalisations d'eau et de mousse qui sont projetées sous pression à l'aide d'un système de pompes.



Figure I. 24: Le réseau d'incendie.

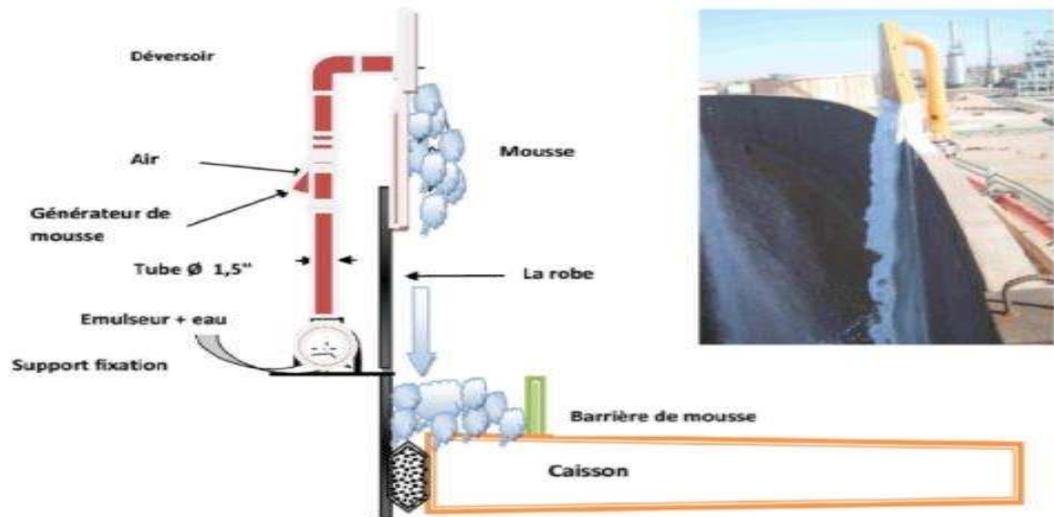


Figure I. 25: Injecteur de mousse.

- **Injection de mousse par flexible :** Afin d'optimiser l'accès à l'anneau d'étanchéité, une solution consiste à envisager l'injection de mousse à travers un tuyau flexible positionné depuis le réservoir. Ce tuyau flexible est connecté à un manchon situé sur le toit, qui à son tour est relié au collecteur de distribution de mousse. Des tubes sont utilisés pour transporter la mousse jusqu'à la zone d'étanchéité de l'anneau.

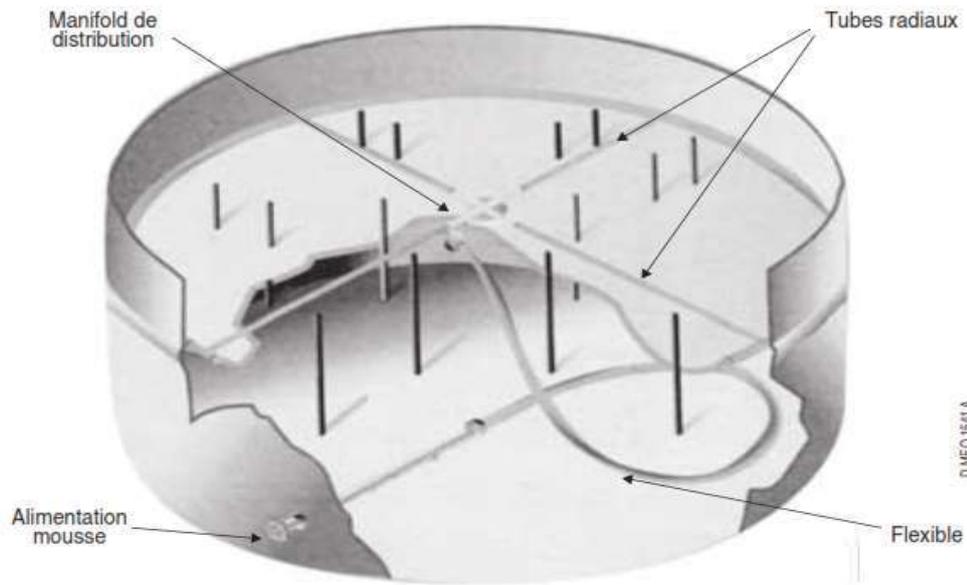


Figure I. 26: Injection de mousse au travers d'un flexible.

- **Dispositif d'arrosage des bacs :** Pour protéger les bacs voisins d'un bac en feu, on peut arroser systématiquement la robe

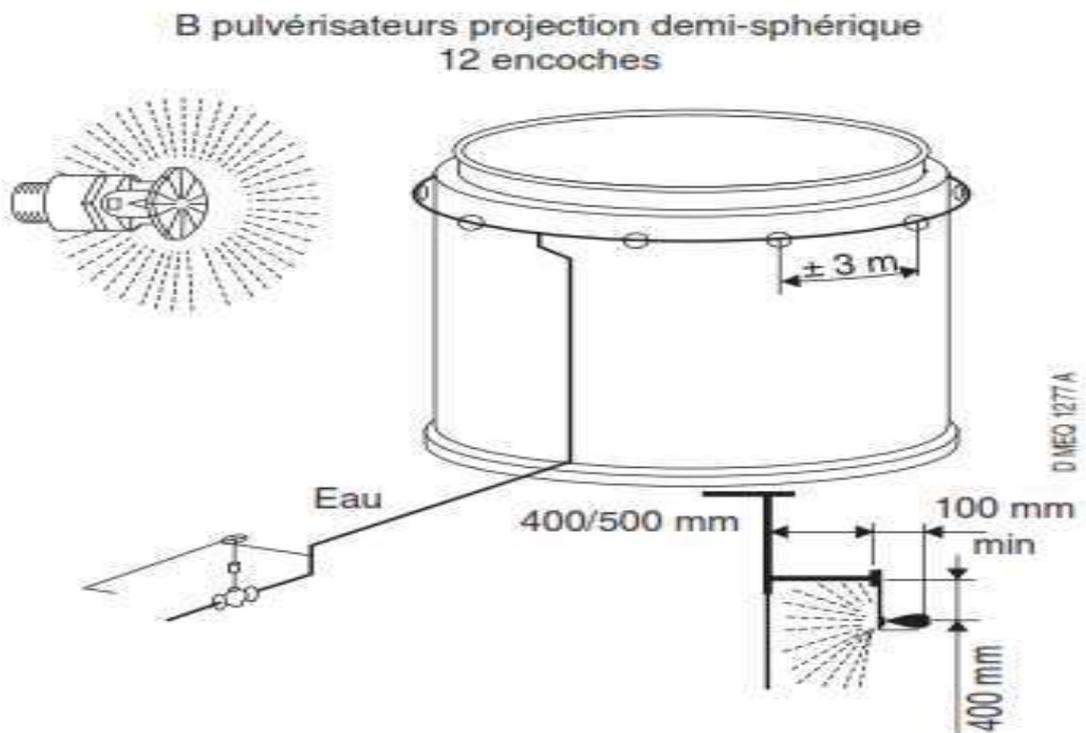


Figure I. 27: Système d'arrosage de la robe de bac.

I.6.5 Autres accessoires :

I.6.5.1 Évacuation des eaux pluviales :

La connexion est réalisée à l'aide de flexibles, de tubes télescopiques ou articulés. De plus, en cas d'obstruction de ce système, un dispositif de drainage de sécurité est prévu pour permettre à l'eau de s'écouler dans le produit, évitant ainsi une fuite du toit.

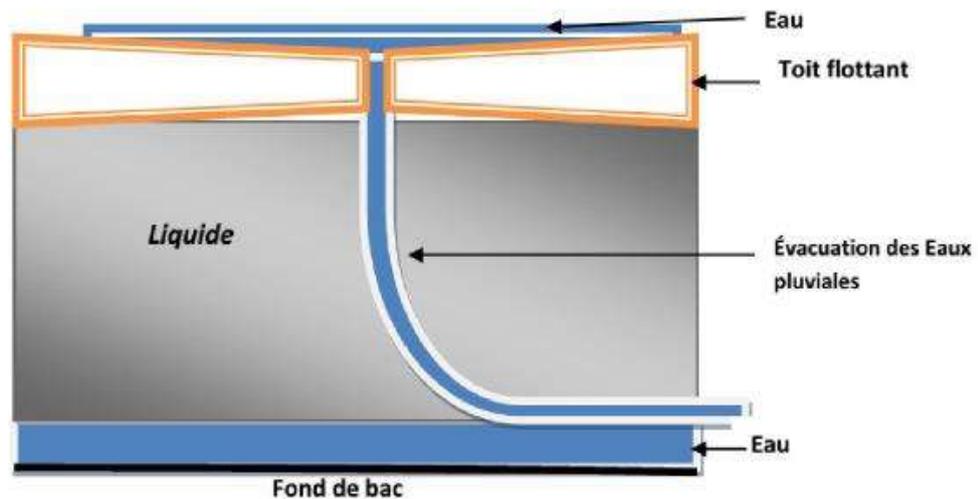


Figure I. 28: Système d'évacuation des eaux pluviales

I.6.5.2 Systèmes de joint :

L'étanchéité entre le toit plat et la paroi du réservoir est assurée par des joints qui peuvent être réalisés de diverses façons

1. Joints mécaniques :

Des patins en acier sont utilisés pour gratter la paroi du réservoir. L'étanchéité est assurée par un joint élastomère flexible positionné au-dessus du niveau du liquide et qui n'est pas soumis à des contraintes. Ce joint est maintenu en contact avec la paroi grâce à un contrepois.

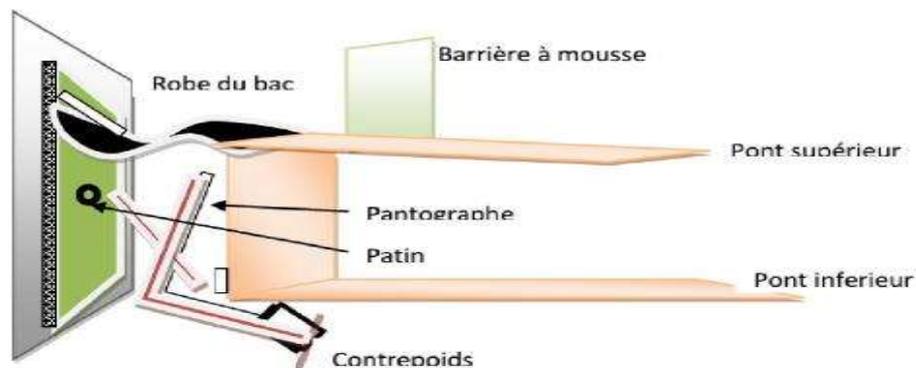


Figure I. 29: Joints mécanique

2. Joint liquide (ou tube seal) :

L'étanchéité entre la robe et le toit est maintenue par un « boudin » rempli de kérosène ou de Gazole.

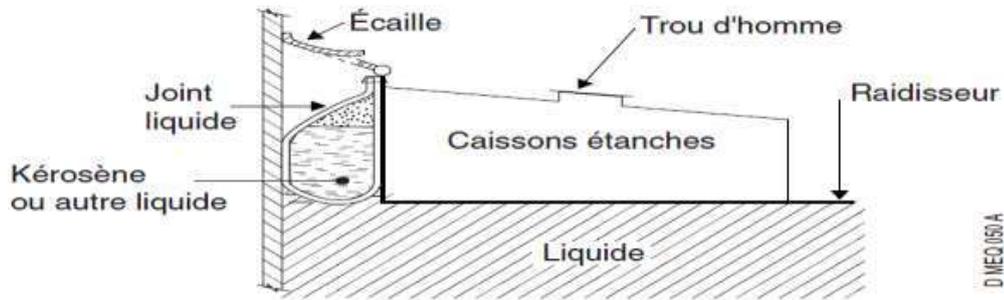


Figure I. 30: Joint liquide

3. Joints secs :

Ces systèmes de joints sont les derniers nés des systèmes d'étanchéité, leur mise en œuvre et leur réparation présentent une grande simplicité. La protection des joints contre les intempéries est assurée par un protecteur atmosphérique.

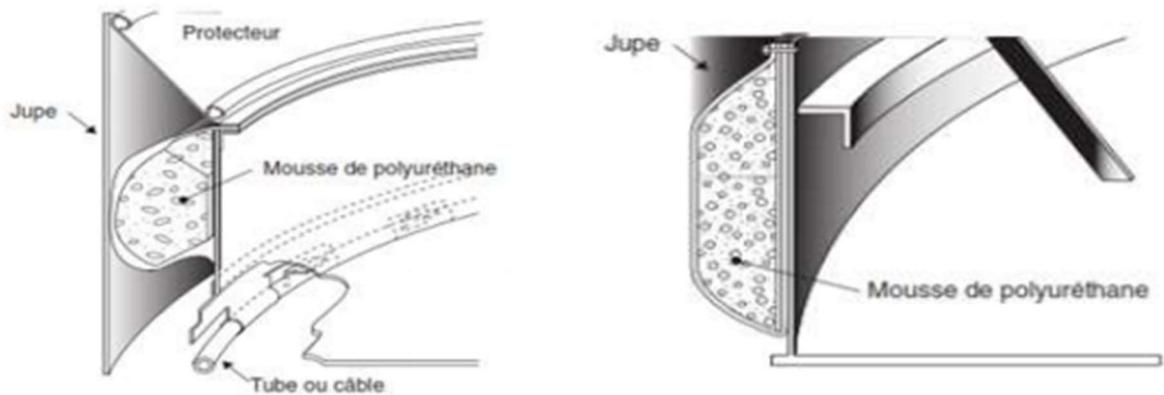


Figure I. 31: Système top master et Système delta seal

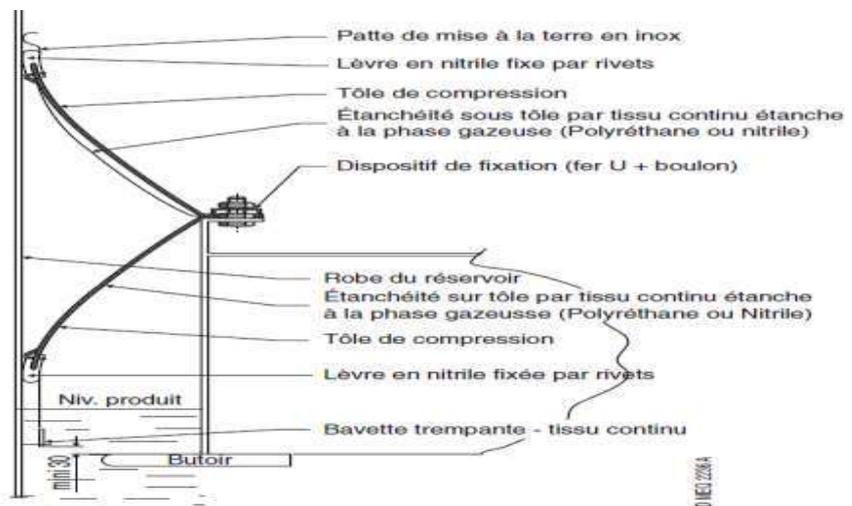


Figure I. 32: Le nouveau système d'étanchéité de joint.

- **Choix du type de joint :**

Le choix approprié du type de joint pour un réservoir dépend principalement du type de produit stocké et de la conception du toit. De plus, il est important de prendre en compte les défauts de verticalité de la paroi, car dans de tels cas, l'utilisation d'un joint métallique est déconseillée.

Pour notre réservoir, nous avons opté pour un système d'étanchéité comprenant un joint primaire unique. Cette étanchéité principale peut être complétée, afin de réduire davantage les pertes de produit, par un joint secondaire plus simple qui est positionné au-dessus. La mise en place de ce joint secondaire s'est généralisée en raison des réglementations actuelles visant à limiter la pollution atmosphérique.

- 1. Joint primaire :**

Le joint primaire est principalement constitué de mousse d'uréthane élastique comprimée, qui, grâce à son expansion, assure un contact étanche entre la paroi du réservoir et le toit. Cette mousse est enveloppée dans un tissu en caoutchouc. Il est essentiel que la surface interne de la paroi du réservoir soit lisse et exempte d'aspérités tranchantes susceptibles de perforer l'enveloppe du joint.

Ce type de joint peut être utilisé pour des produits pétroliers bruts non paraffinés et des produits pétroliers raffinés, que ce soit en phase liquide ou en phase gazeuse. Sa conception permet une installation et un retrait faciles depuis le dessus de la paroi du réservoir.

- 2. Joint secondaire :**

Ce joint joue le rôle d'une barrière entre l'air ambiant et la phase vapeur du produit qui circule entre le joint principal et la paroi du réservoir. Il s'agit d'un joint flexible à lèvres, constitué d'une simple barrette en caoutchouc synthétique avec une armature métallique interne. Ce joint est positionné au-dessus du joint primaire et au-dessus de la bordure du toit flottant. La lèvre du joint est continuellement pressée contre la paroi grâce à sa flexibilité, assurant ainsi une étanchéité le long de la paroi du réservoir.



Figure I. 33: Joint secondaire

I.6.5.3 Aspiration flottante :

L'aspiration flottante vise à extraire le produit d'un réservoir à partir de la couche supérieure de liquide, afin d'éviter d'aspirer les impuretés qui peuvent se déposer au fond du réservoir, notamment l'eau.

Les avantages de cette méthode sont les suivants :

- Réduction du travail de filtration requis pour les systèmes de filtration.
- Réduction du temps de décantation avant l'extraction du produit.
- Obtention d'un produit plus propre.

Les systèmes d'aspiration flottante sont équipés de joints rotatifs et peuvent également permettre la réalisation de prélèvements d'échantillons le long de l'aspiration, par exemple au tiers et aux deux tiers du niveau de produit.

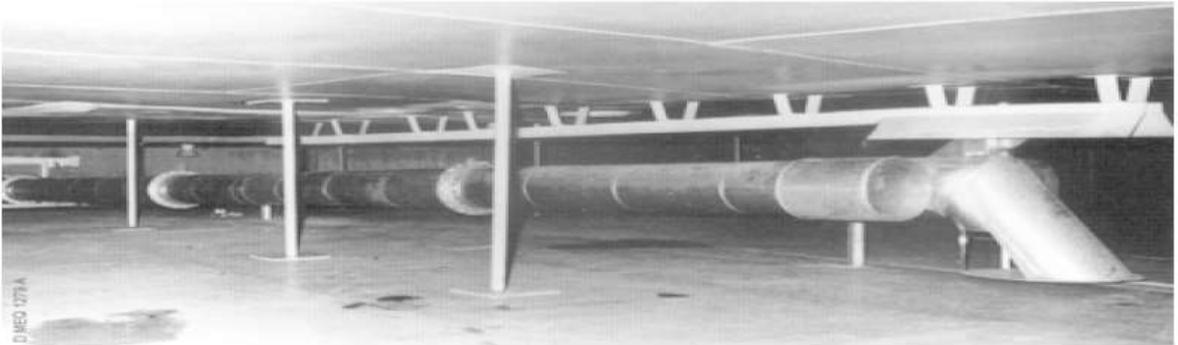


Figure I. 34: Aspiration flottante sous un bac à toit flottant

I.6.5.4: Matériel d'homogénéisation:

• Objectif de l'homogénéisation :

Dans les opérations de stockage, il est souvent nécessaire d'homogénéiser le contenu d'un réservoir afin d'obtenir une qualité constante du produit qu'il renferme. En effet, on observe fréquemment la formation de stratifications lorsque différents produits sont injectés dans un réservoir, ce qui s'accompagne également de variations de température à l'intérieur du réservoir.

De plus, cette hétérogénéité peut être naturelle dans le cas de produits non miscibles à l'état liquide, tels que les mélanges d'eau et d'hydrocarbures, ou si des particules solides sont présentes.

1. Malaxage par hélicoagitateur :

Un hélicoagitateur est composé des éléments suivants :

Une hélice qui a pour fonction de mettre le liquide en mouvement, ainsi que son arbre.

Un moteur électrique pour l'entraînement de l'agitateur.

Un mécanisme de liaison entre le moteur et l'arbre, réalisé à l'aide d'une courroie ou d'un engrenage.

L'ensemble de l'hélicoagitateur est fixé sur le réservoir à l'aide d'une bride, et l'étanchéité est assurée soit par une garniture mécanique, soit par une garniture à tresses.

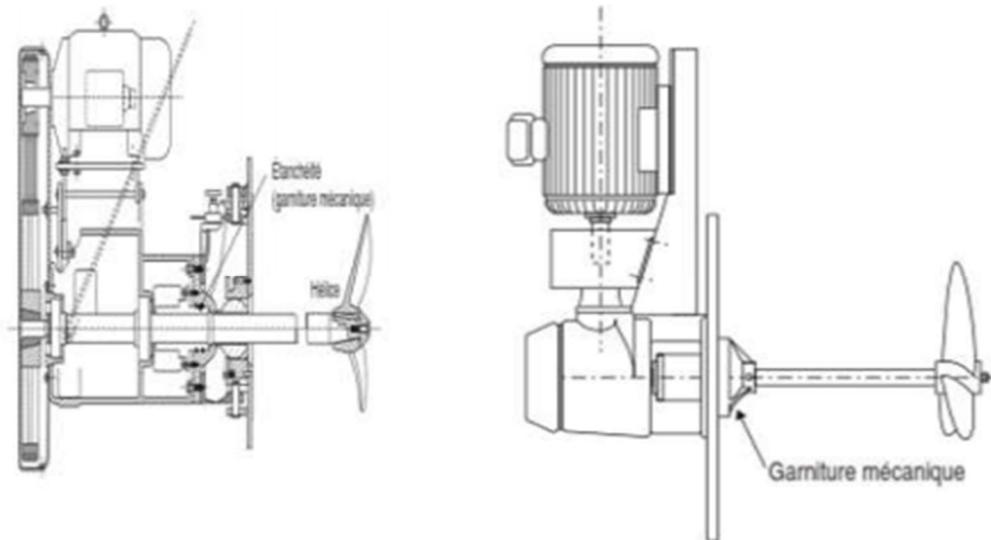


Figure I. 35: Entraînement par courroie et entraînement direct.

Les bacs de très grande capacité sont équipés de plusieurs hélico-agitateurs à orientation variable.

2. Recirculation par pompe :

Le liquide contenu dans le réservoir est aspiré par une pompe à haut débit et réinjecté, soit directement, soit à travers un dispositif de convergence appelé "jet nozzle". Le liquide recirculé traverse ensuite la masse liquide à une grande vitesse, ce qui génère des mouvements de brassage très énergiques.

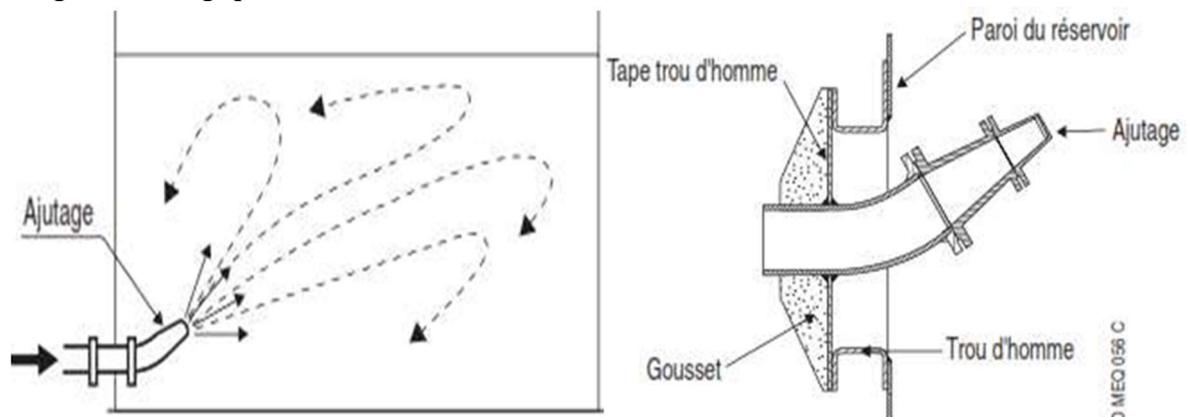


Figure I. 36: Système d'ajutage.

I.6.5 Accessoires de protection contre la corrosion :

Pour assurer la protection passive du réservoir, on applique une couche de peinture et on met en place une protection cathodique grâce à une anode.

La protection externe du réservoir est obtenue en utilisant le courant de soutirage. La surface intérieure du fond du réservoir n'est pas protégée par cathode, mais on prévoit plutôt l'application d'une couche de résine époxy pour prévenir la corrosion interne causée par la composition chimique du produit stocké, telle que la présence de sels et de soufre.

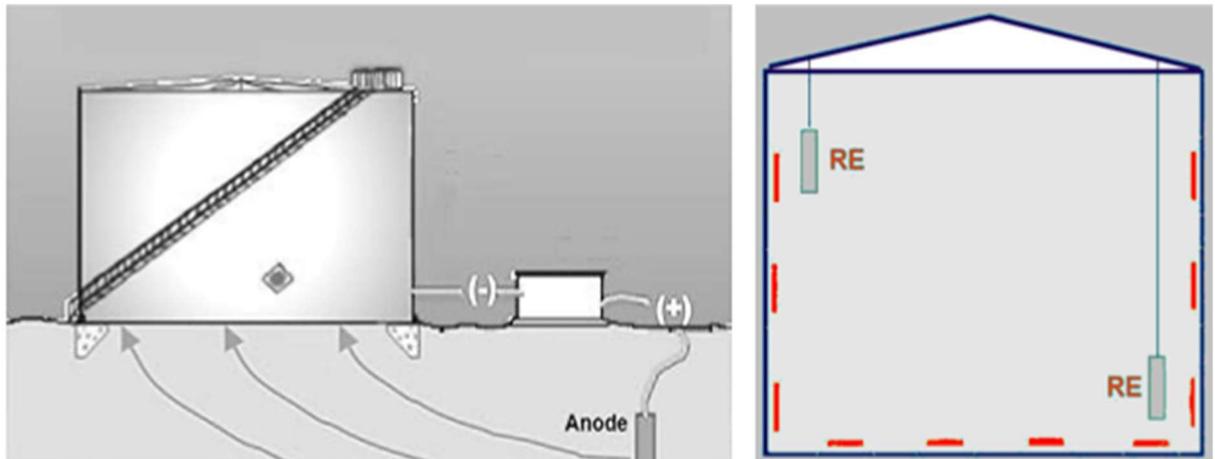


Figure I. 37: La protection des bacs contre la corrosion.

I. 6.6 Details:

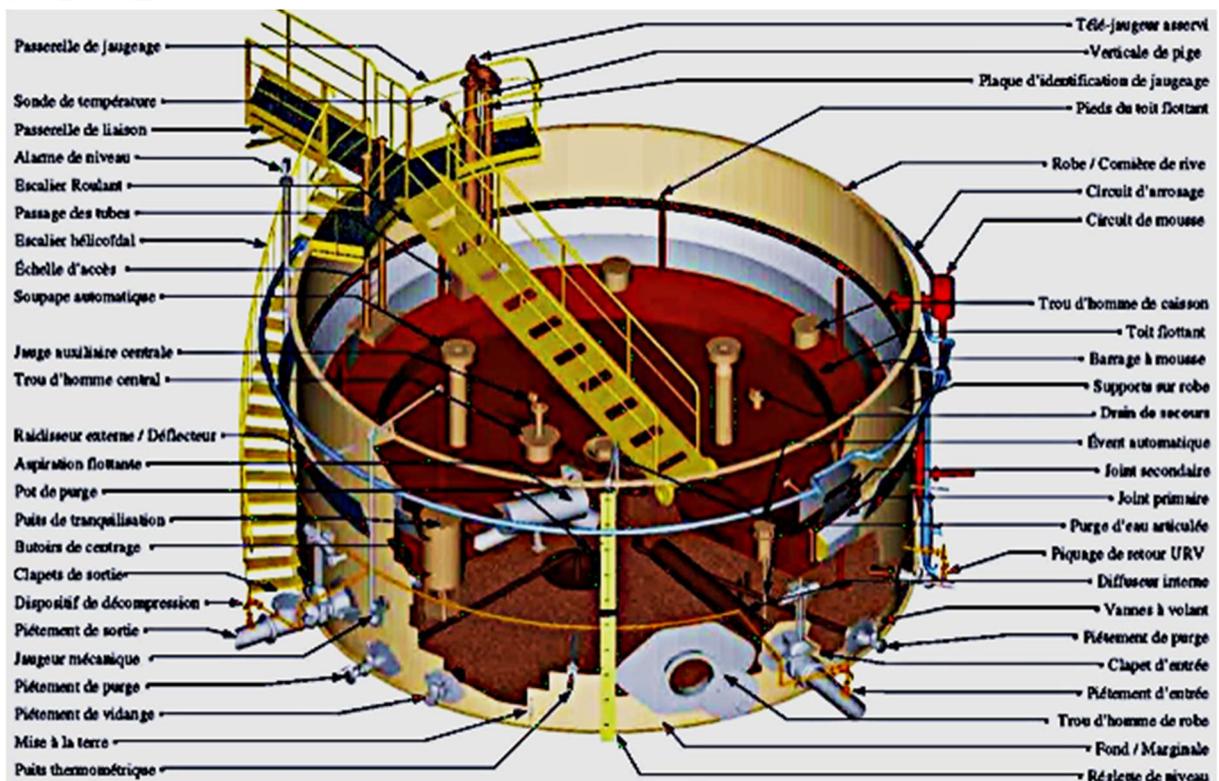


Figure I. 38: Schéma détaillé d'un réservoir de toit flottant externe a double pont.

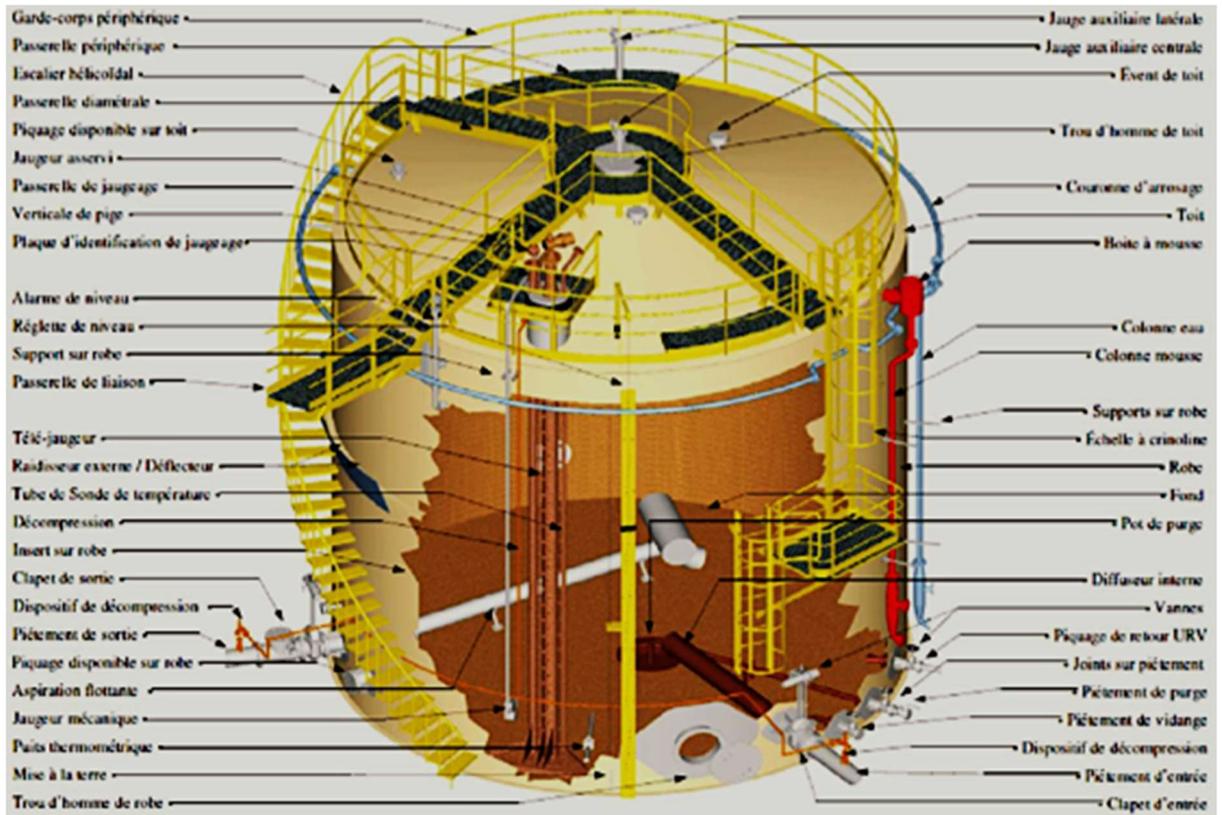


Figure I. 39: Schéma détaillé du réservoir à toit fixe.

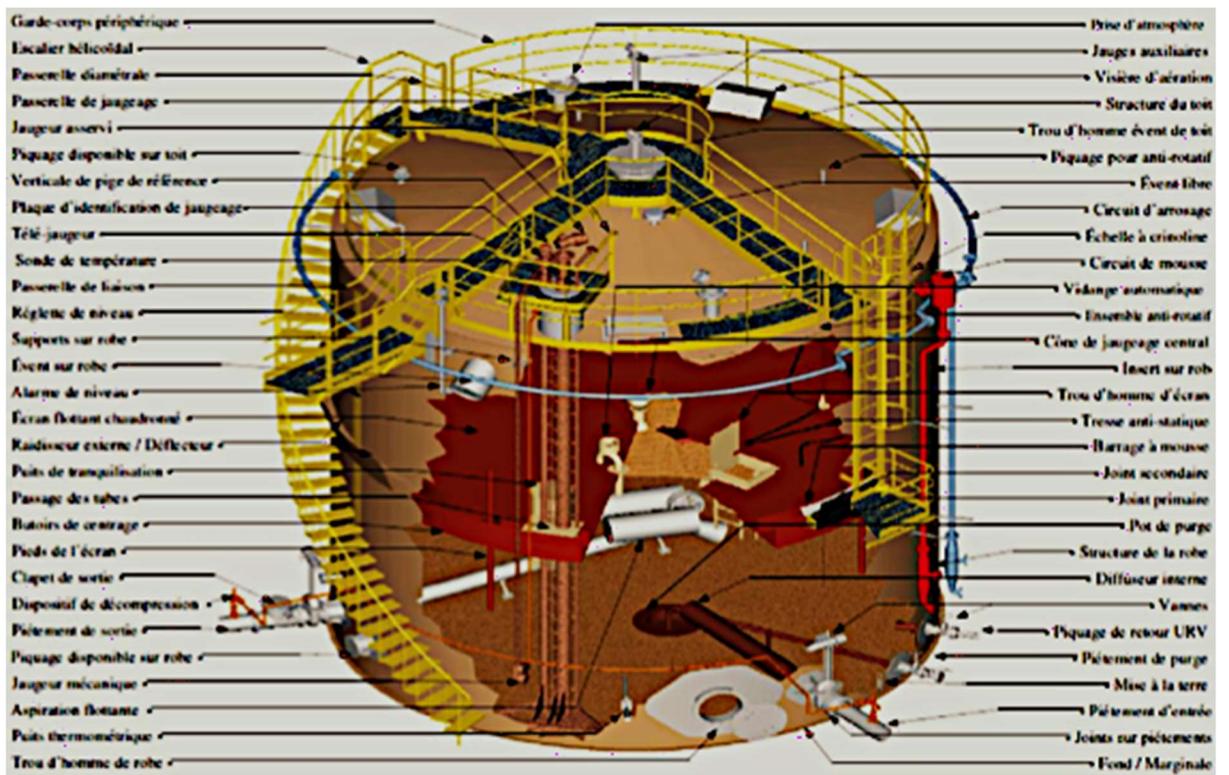


Figure I. 40: Schéma détaillé du réservoir à écran flottant interne.

I.6.7 Cuves ouvertes :

Cet individu ne possède pas de couvercle et sa fonction est restreinte à contenir des liquides pouvant être exposés à l'air sans danger pour leur qualité ou l'environnement. Ces réservoirs sont principalement utilisés pour stocker de l'eau à des fins industrielles ou pour la lutte contre les incendies. Ils se composent principalement d'un fond, d'une structure et d'une poutre de renforcement située au sommet de la structure. Ces réservoirs ouverts sont des réservoirs aériens. En l'absence de couvercle, la partie supérieure de la structure doit être renforcée par une poutre pour maintenir sa forme ronde face aux vents. Cette poutre est généralement positionnée à environ un mètre du sommet. Lorsqu'elle est suffisamment large, elle peut également servir de passerelle permettant de circuler autour du réservoir.

I.6.8 Réservoir cylindrique horizontal :

Fréquemment, ces réservoirs sont montés en hauteur sur des supports en forme de berceaux. Leurs extrémités sont munies de fonds emboutis en forme d'hémisphères ou d'ellipses. Ces récipients sont conçus pour des stockages à haute pression, mais ils sont généralement utilisés pour des capacités relativement faibles. Les réservoirs horizontaux sont principalement utilisés lorsque la consommation de liquide est faible et que le poids spécifique du fluide en question est également faible.

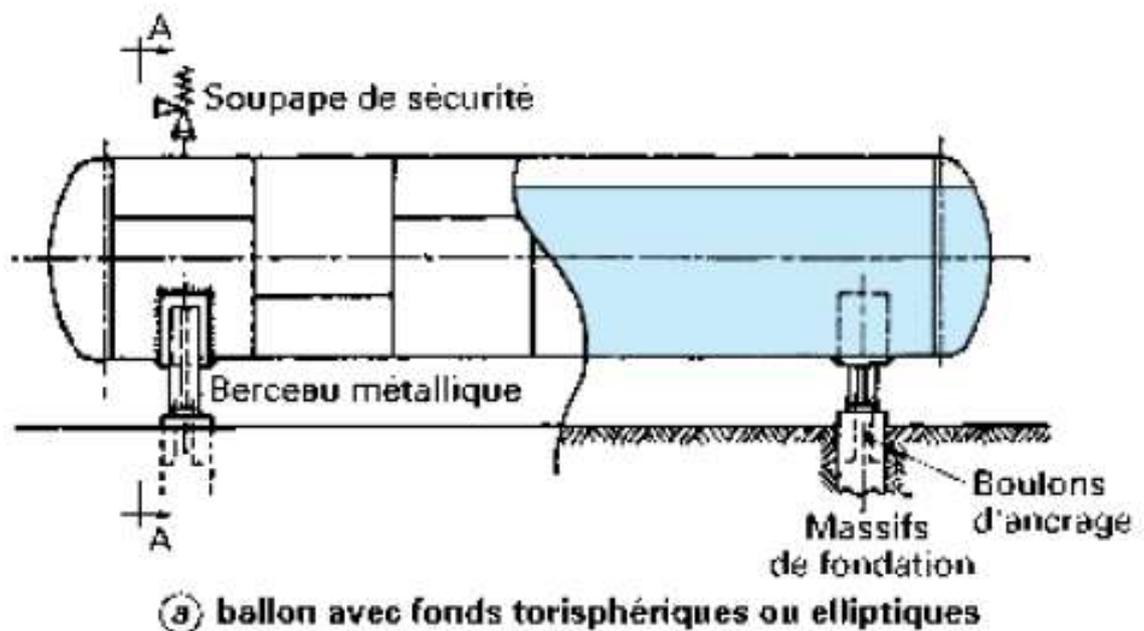


Figure I. 41: réservoir cylindrique horizontale.

I.6.9 Réservoirs sphériques :

Ce type de réservoir est spécifiquement conçu pour le stockage sous pression de produits liquides tels que le propane, le butane, etc. Leur capacité individuelle varie généralement entre 200 m^3 et 5000 m^3 , mais des installations de plus grande capacité allant jusqu'à $10\,000 \text{ m}^3$ peuvent également être réalisées. La quantité de matière stockée dépend de la densité du liquide contenu. Par exemple, pour une sphère de 1000 m^3 , la quantité de matière stockée varie de 400 tonnes (pour les propanes) à 700 tonnes (pour les oxydes d'éthylène).

L'épaisseur de la paroi de ces réservoirs dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille de l'ouvrage, la température maximale à laquelle le produit est exposé, les propriétés mécaniques des aciers utilisés, ainsi que les codes et réglementations locales qui définissent les exigences de conception. Ces réservoirs doivent être capables de résister à des pressions internes allant de 8 à 9 bars pour le butane, jusqu'à 25 bars pour le propane.

I. 9. 1 Les équipements des réservoirs sphériques :

- 1) Équipement d'accès : escaliers, gardes de corps et échèles.
- 2) Équipements de visite : trous d'homme.
- 3) Équipement de mesure de niveau de produit : télé jauge (sphères équipées de télé jauges).
- 4) Équipement de sécurité : les soupapes, les couronnes d'eau et de mousse, les paratonnerres.

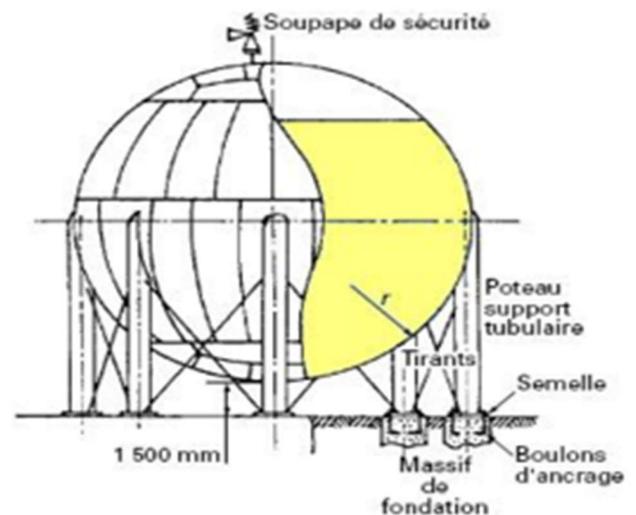


Figure I. 42: Bac de stockage sphérique.

CHAPITRE II :

LES MÉCANISMES DE DÉGRADATION ET DE DÉFAILLANCE DU BAC DE STOCKAGE



II.1 INTRODUCTION :

Les réservoirs de stockage face des différents obstacles diminuent son bon fonctionnement et son maximal capacité de service qu'on va présenter dans ce chapitre-là sous les problèmes de mécanismes de dégradation et de défaillance en concentrant sur la corrosion et ces causes ou La corrosion est un phénomène naturel qui peut avoir un impact important sur les réservoirs de stockage d'hydrocarbures. Ces réservoirs de stockage jouent un rôle vital dans l'industrie pétrolière et gazière, stockant en toute sécurité de grandes quantités de produits pétroliers et de gaz naturel. Cependant, la corrosion peut compromettre leur intégrité structurelle, entraînant des fuites, des dommages et des coûts de maintenance élevée.

Certains des problèmes connus rencontrés dans les réservoirs de stockage d'hydrocarbures comprennent la corrosion par piqûres, la corrosion sous la coupelle, la corrosion galvanique et la corrosion cavernueuse. Chacun de ces mécanismes de corrosion présente des caractéristiques spécifiques qui nécessitent des mesures de prévention et de protection appropriées.

II.2 Mécanismes de dégradation et de défaillance du bac 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.

II.3 La corrosion :

La corrosion est l'une des principales formes de détérioration des réservoirs de stockage, et elle peut prendre différentes formes, telles que la corrosion électrochimique et bactérienne, affectant tous les composants du réservoir, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. De plus, la corrosion peut être localisée ou généralisée.

La corrosion généralisée, associée à la corrosion par piqûres, peut se produire à l'intérieur ou à l'extérieur du réservoir. Alors que des piqûres isolées peuvent entraîner de petites fuites, une concentration élevée de piqûres ou une zone de corrosion localisée peuvent provoquer une fuite majeure.

II.3.1 Les différents types de corrosion :

Les différentes formes de corrosion qui affectent les réservoirs de stockage sont exclusivement d'origine :

- **Électrochimique** : ce qui signifie qu'elles nécessitent la présence d'eau liquide en contact avec la paroi en acier.

La présence d'une espèce "oxydante" est également nécessaire pour alimenter les réactions de corrosion. Cette espèce oxydante peut être soit l'ion H^+ , ce qui entraînerait une corrosion

"acide", soit l'oxygène dissous dans l'eau. Cela s'applique également à la corrosion d'intérieur des réservoirs, où l'eau liquide peut s'accumuler et entrer en contact avec l'acier

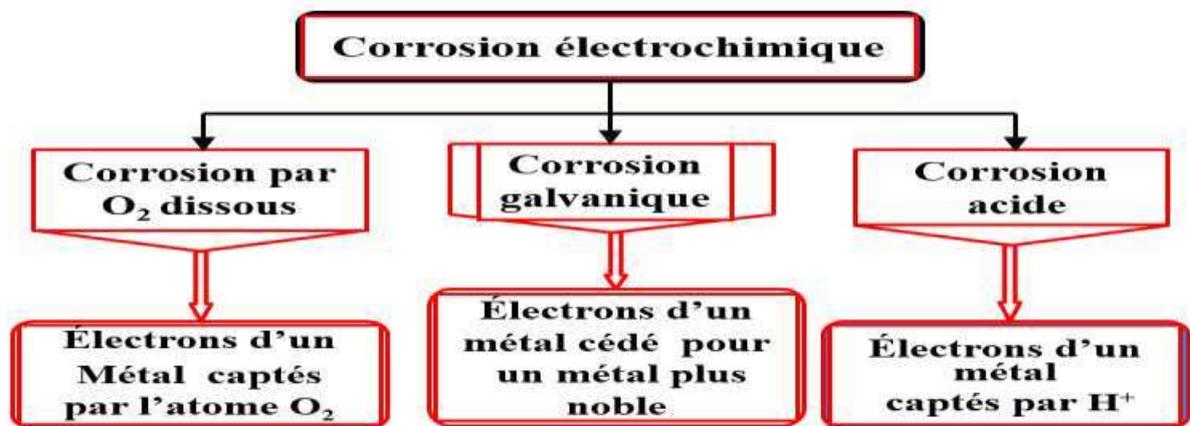


Figure II. 1: les cas envisager pour la corrosion électrochimique.

- **La corrosion bactérienne** : souvent caractérisée par des cratères, se produit lorsque des colonies de bactéries sulfato-réductrices (BSR) prospèrent dans des zones où les conditions physico-chimiques sont propices. Ces conditions incluent une absence totale d'oxygène dissous, la présence de sources de carbone et la présence d'ions sulfates qu'elles utilisent pour réduire en sulfure, généralement sous forme de H₂S, ainsi qu'un pH et une température modérés. Les points clés de la corrosion bactérienne sont des taux de corrosion plus élevés que les mécanismes de corrosion "normaux" et des niveaux élevés de réparation.

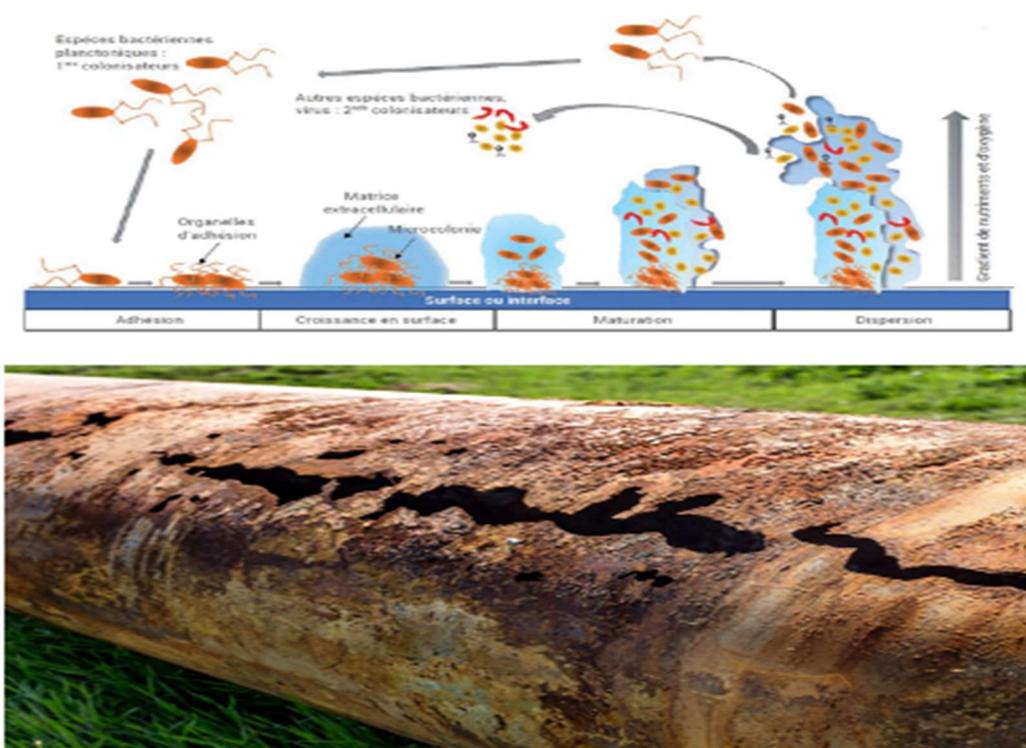


Figure II. 2: le mécanisme de transfert direct en corrosion microbienne des aciers

Nous distinguerons en première approximation deux grandes familles de corrosion :

- **Corrosion sèche (généralement une attaque de gaz sur le métal) :**

Elle est généralement associée à une température élevée ($T > 260^{\circ}\text{C}$) et est une Chimie redox entre réactifs métalliques et non métalliques :



Où X : est un produit de corrosion majoritairement solide.

Les principaux gaz corrosifs sont donc l'oxygène, les gaz oxygénés tels que CO_2 , CO ou H_2O , les composés soufrés (H_2S , SO et SO_2) et les halogènes (chlore et ses dérivés, fluor et composés organofluorés). Forme des composés (oxydes, chlorures, sulfures, fluorures) dans les milieux gazeux. La vitesse de réaction (et donc la consommation de métal) dépend de :

1. **Température :** la vitesse augmente lorsque la température est élevée.
2. **L'enthalpie de la réaction :** qui doit être négative pour qu'une réaction se produise Spontanément plus sa valeur absolue est forte, plus la réaction est rapide
Les ions (métal et/ou oxydant) et électrons doivent en effet diffuser à travers cette couche pour assurer la poursuite de la réaction

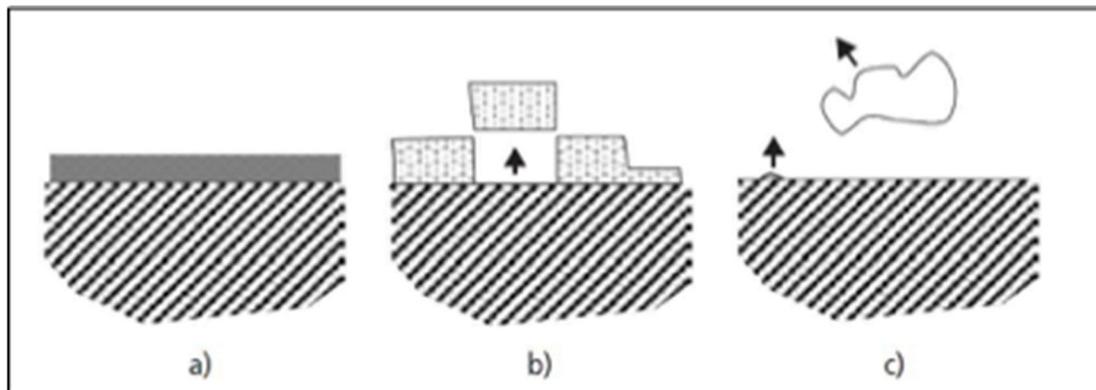


Figure II. 3: Différents types de couches de corrosion

a) Couche passive (oxyde d'aluminium ou de chrome, nitrure de fer) : vitesse de croissance nulle après une phase de croissance rapide.

b) Couche poreuse et/ou faiblement adhérente (oxyde de fer) : croissance parabolique ou linéaire en fonction du temps.

c) Composé volatil (oxyde de tungstène) : consommation permanente du métal, à vitesse constante

- **Corrosion humide (en milieu aqueux) :**

La corrosion humide est le résultat d'une réaction électrochimique, (la réaction est Échange de particules - gain ou perte), où les particules proviennent d'une électrode métallique et d'un électrolyte, qui réagissent lorsqu'ils entrent en contact l'un avec l'autre. Ces réactions se produisent à l'interface de la phase métallique et de la phase aqueuse et impliquent les électrons du métal et certains éléments chimiques neutres ou ionisés contenus dans la solution

Cela se produit lorsqu'il y a hétérogénéité dans les métaux ou les réactifs. La présence de ces hétérogénéités détermine la formation d'empilements, le courant circule entre l'anode et la cathode et entre les zones qui constituent l'anode attaquée, il est important de noter que les produits finaux de corrosion se développent généralement à une certaine distance de la zone de corrosion, dans les zones où se trouvent les produits de corrosion anodiques et cathodiques essentiels.

Nous allons concentrer notre étude principalement sur la corrosion humide, qui affecte particulièrement les installations de production et de stockage des produits pétroliers et gaziers en raison des conditions dans lesquelles elles sont utilisées.

II.3.2 Le 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.

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.

II. 3.3 Corrosion des éléments essentiel du bac

II.3.3.1 Corrosion de la virole :

La corrosion de la virole peut prendre des formes et des degrés de gravité différents. Elle peut être uniforme sur l'ensemble de la virole ou ne concerner que des secteurs.

- **Face intérieure :**

La première virole (en partant du fond) peut subir des problèmes du même ordre que le fond en cas de décantation d'eau. Pour le reste, les problèmes de corrosion se limitent en général aux réservoirs de produits pétroliers de densité inférieure à 50° API soit environ une masse volumique de 780 kg/m³ à toit flottant en présence d'eau. Lorsque les produits pétroliers ont une densité supérieure à 50° API, la corrosion de la robe dans l'espace liquide est rarement un problème. La corrosion dans l'espace vapeur dépend des conditions climatiques, de l'efficacité du revêtement protecteur éventuel et du programme de remplissage et de vidange

Du réservoir. Il y a eu dans le passé des accidents dus à ce type de corrosion, qui touche essentiellement la mi-hauteur. L'inspection de ces zones révèle souvent des épaisseurs d'oxydes de fer pouvant dépasser 5 mm. L'origine de cette corrosion peut s'expliquer par :

- La teneur en eau dissoute dans le carburant ;
- La teneur en oxygène dissous dans le carburant ;
- La teneur en H₂S dissous, si supérieure à 0,5% ;

- L'apport en oxygène de l'atmosphère au travers du joint d'étanchéité du toit flottant (solubilité de l'oxygène dans les carburants de l'ordre de 150 ppm) ;
- L'effet mécanique accélérateur des mouvements du toit flottant (rupture et raclage des écailles de rouille), qui sont statistiquement plus fréquents à mi-hauteur.

Les produits blancs sont concernés car la solubilité en oxygène dissous est plus élevée et ils ne constituent pas de pellicule grasse à la surface de l'acier.

La corrosion préférentielle au niveau des soudures est à surveiller. La corrosion préférentielle sur les soudures verticales, compte tenu des contraintes, peut-être plus importante que sur les soudures horizontales.

La corrosion de la robe n'est généralement pas un problème pour les réservoirs à toits flottants utilisés pour le stockage de brut, particulièrement quand ils sont revêtus d'une couche protectrice ; des piqûres de corrosion et une corrosion générale ont cependant parfois pu être mises en évidence sur les tôles de la robe dans une zone située à moins de 500 mm du fond.

La partie basse de la première virole est sujette au même problème que le fond.

Pour les autres viroles, celles correspondant à l'espace vapeur sont plus particulièrement concernées notamment la virole haute ainsi que celles correspondant à la zone dite de « marnage » au droit du niveau de stockage du produit.

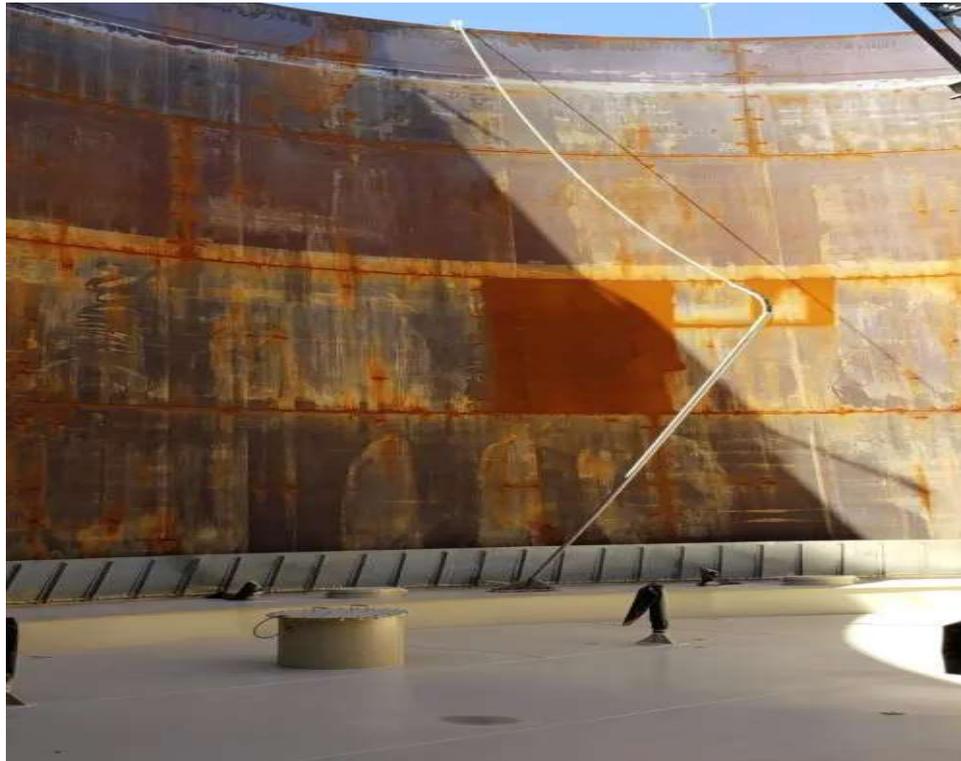


Figure II. 4: face intérieure corrodée d'une virole

- **Face extérieure :**

La vitesse de corrosion des parois nues est généralement modérée et dépend des conditions ambiantes (atmosphère industrielle, saline, pollution...).

La vitesse de corrosion de l'acier nu dépend de l'agressivité des conditions ambiantes (atmosphères rurales, industrielles, maritimes, tropicales ...), fonction de l'humidité relative, de

la teneur en chlorures ou en espèces chimiques provenant de la pollution (SO₂ en particulier), de la température, du vent, des pluies.

Les points de stagnation d'eau notamment au niveau du toit ou des raidisseurs peuvent, toutefois, être particulièrement affectés du fait de la rétention créée par le retrait du soudage. Les percements ou fenêtres réalisés lors de la construction ne doivent pas être obstrués.

La corrosion externe peut se manifester au niveau du pied de la robe dans les zones où des tassements ont pu créer des zones d'accumulation d'eau en pied de virole.

Par ailleurs, de la corrosion sous couche dans le cas des solins revêtus est possible



Figure II. 5: corrosion externe de la virole

II.3.3.2 Corrosion du toit:

- **Toits flottants :**

La corrosion du dessous des toits flottants est rare mais peut parfois se rencontrer en cas de non-étanchéités locales (pièges d'air et d'humidité) dans le cas des produits ayant une forte tension de vapeur.

Les toits flottants sont généralement construits avec des plaques d'acier de 5 ou 6 mm d'épaisseur. Un drainage inadéquat du toit peut conduire à une accumulation d'eau au centre qui, combinée avec les dépôts apportés sur le toit par le vent, peut endommager la couche de peinture protectrice et causer de la corrosion.

La corrosion peut à son tour augmenter la possibilité de dégradation des soudures des tôles de toit ,elle peut aussi se produire autour des supports de pieds et en périphérie du toit au niveau des soudures des pontons ainsi que sur béquilles. De plus, des phénomènes de corrosion peuvent se produire au niveau des caissons de flottaison soit sur les faces externes pour les mêmes causes que précédemment soit sur les faces internes du fait de la condensation d'eau en cas de non-étanchéité.



Figure II. 6: corrosion d'un toit flottant

II.3.3.3 Corrosion des accessoires :

La face extérieure de la robe d'un réservoir est, sauf exception, recouverte d'une protection par peinture qui permet notamment de contrôler plus facilement les zones corrodées. Rarement en pleine tôle, la corrosion extérieure de la robe se porte essentiellement sur toute pièce rapportée sur la robe :

- Attache des marches
- Échelles à crinoline ;
- Supports de canalisations ;
- Supports des systèmes de niveau ;
- Raidisseurs et poutres ;
- Goussets.



Figure II.7 : la corrosion au niveau des caissons de flottaison, du toit et les béquilles

II.4 Corrosion de fond :

- Corrosion interne

Ce type de corrosion concerne essentiellement les produits stockés susceptibles de contenir de l'eau chargée en produits corrosifs. Cette corrosion affecte principalement les points bas (notamment dus aux tassements des fondations) où l'eau peut s'accumuler. Les zones de soudure sont des points sensibles du fait de leur hétérogénéité géométrique et électrochimique. Le risque augmente en cas de développement de bactéries sulfatées réductrices (sous les dépôts, en absence d'oxygène, avec présence d'ions sulfates, de préférence à températures de 30 à 60°C).

Ce type de corrosion est une des principales causes de fuites de réservoirs, l'eau provenant :

- De l'hydrocarbure stocké : eaux de gisement et de ballastage pour les produits approvisionnés par bateau, eaux provenant de procédés de raffinage pour produits intermédiaires ou finis ;
- De la respiration des réservoirs par variations de température, conduisant à la condensation de l'humidité de l'air (réservoirs à toit fixe) ;
- De la corrosion / érosion des réservoirs de bruts agités (sédiments + chlorure + eau).

Par ailleurs, ce type de corrosion peut se manifester soit de façon apparente sur le métal nu soit en corrosion sous couche dans le cas de réservoirs possédant un revêtement interne. La corrosion sous couche peut conduire à des vitesses de corrosion élevées de même ordre de grandeur que la corrosion bactérienne et n'est pas toujours aisée à détecter, de ce fait elle doit faire l'objet d'une attention particulière lors des inspections.

- **Corrosion externe :**

La corrosion extérieure du fond peut résulter notamment d'une médiocre qualité des fondations en contact avec le réservoir (présence de contaminants par exemple) ou de l'effet des eaux pluviales stagnantes. Le stockage de produits chauds peut aussi avoir un effet négatif sur cette corrosion. La vitesse de corrosion de l'acier nu dépend de l'agressivité du terrain (naturel ou rapporté) à son contact, celle-ci étant fonction d'un grand nombre de facteurs dont les plus importants sont la résistivité (liée à la teneur en eau et en sels), le pH, l'aération, le niveau d'activité bactérienne, l'hétérogénéité (formation de piles géologiques), la présence éventuelle de courants vagabonds, l'entrée d'eau en périphérie. De façon pratique, les causes d'une corrosion sur les parties extérieures des tôles de fond peuvent être :

- La nature et/ou la granulométrie des matériaux de la galette en contact avec le fond métallique. Lorsque des matériaux de granulométrie supérieure à 20 mm ont été utilisés, il peut se produire des risques de corrosion par aération différentielle. L'emploi de matériaux à base de laitiers peut également être une cause de corrosion ;
- L'accumulation d'eau autour du fond et/ou son infiltration sous celui-ci, notamment pour la partie située au vent dominant ;
- Les déformations des périphéries externes des tôles marginales occasionnées par le poinçonnement de la robe et créant des rétentions d'eau ;
- Dans les réservoirs destinés à stocker des produits chauds, il existe des différences de potentiel Electrochimique à l'interface fond - sol. Cela peut engendrer la formation aléatoire de piqûres

Profondes. Il est souvent constaté une corrosion périphérique plus importante ;

- Défaut de la protection cathodique ;
- Courants vagabonds

III.4.1 Des exemples de corrosion des fonds :

- **Amine Corrosion :**

La corrosion par les amines est généralement une corrosion localisée qui se produit principalement sur l'acier au carbone dans les processus de traitement aux amines. La corrosion n'est pas causée par l'amine elle-même, mais résulte des gaz acides dissous (CO_2 et H_2S), des sels d'amines thermiquement stables, des produits de dégradation des amines (par exemple, des sels de bicarbonate, d'oxalate et de formate) et d'autres contaminants.



Figure II. 8 corrosion par les amines attribues une augmentation de CO_2

- **Corrosion par le chlorure d'ammonium et l'hydrochlorure d'amines :**

Corrosion localisée, souvent sous forme de piqûres, se produisant normalement sous des dépôts de chlorure d'ammonium ou de sels d'amines, souvent en l'absence d'une phase d'eau libre.

- **Corrosion par la saumure :**

Piqûres généralisées ou localisées se produisant à la surface d'équipements exposés à des solutions aqueuses de sels dissous, généralement un sel de chlorure ou d'autres halogénures. Ce mécanisme est souvent présent en conjonction avec d'autres mécanismes tels que la corrosion par l'oxygène, la corrosion galvanique et la corrosion influencée microbiologiquement. Dans la corrosion par les saumures chlorées des aciers inoxydables, les piqûres sont initiées là où les chlorures dégradent la couche passive. Une fois que la piqûre est initiée, les chlorures migrent à l'intérieur de la piqûre, s'hydrolysent en une espèce acide, diminuent le pH dans la piqûre et accélèrent davantage la corrosion par ce processus autocatalytique. Un processus similaire se produit dans les interstices. De plus, d'autres anions tels que les nitrates et les sulfates s'hydrolysent à l'intérieur des piqûres et des interstices pour abaisser le pH, mais ils sont moins mobiles que les chlorures, donc leur effet est moins significatif.



Figure II. 9: Vue rapprochée de la corrosion par la saumure

- **La corrosion par le CO₂ :**

La corrosion par le CO₂ se produit lorsque le CO₂ se dissout dans l'eau pour former de l'acide carbonique (H₂CO₃). L'acide peut abaisser le pH et, en quantités suffisantes, favoriser la corrosion générale et/ou la corrosion par piqûres de l'acier au carbone.

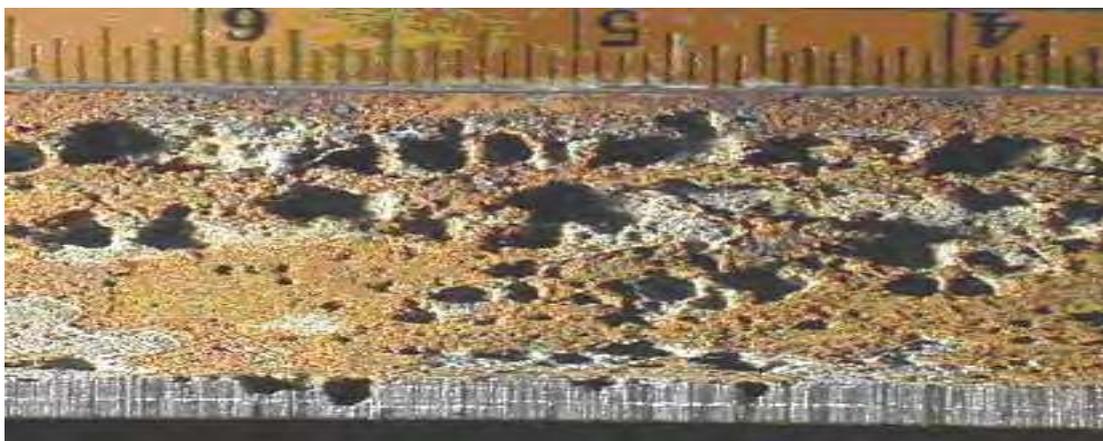


Figure II. 10: Vue à plus fort grossissement des piqûres de corrosion.

II.5 Les dommages et la corrosion dans les fonds des bacs :

II.5.1 Tassements du fond du réservoir :

II.5.1.1 Tassement du fond :

Lorsque le tassement au centre du fond d'un réservoir diffère significativement de celui de la périphérie, cela entraîne des contraintes qui tirent la jonction entre la paroi du réservoir et le

fond vers l'intérieur, créant ainsi une contrainte de compression susceptible de provoquer des déformations. La courbure initiale du fond, qu'elle soit convexe ou concave, n'est plus maintenue dans de telles conditions.

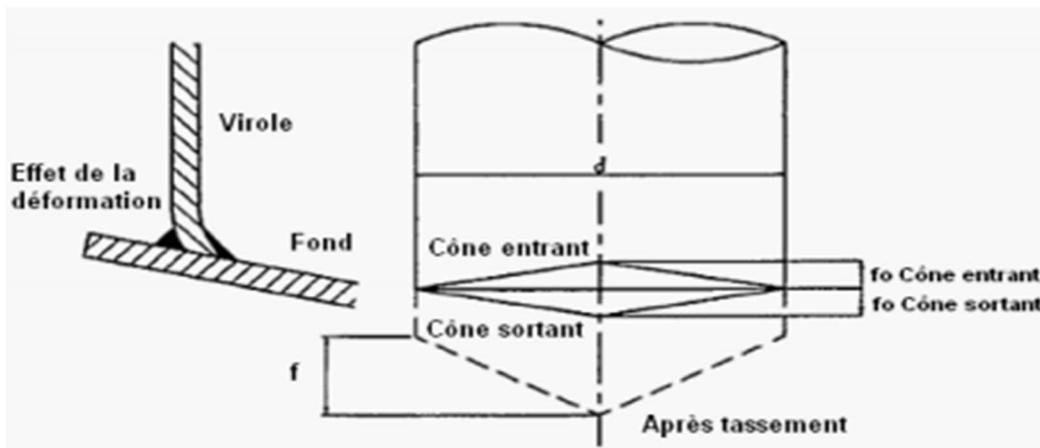


Figure II. 11: schéma du fond après un tassement

II.5.1.2 Ondulations sur le fond :

Lorsque le réservoir est composé d'un fond conique convexe le tassement entre le centre du fond et sa bordure périphérique tend à aplanir la forme du fond, générant un excès de longueur de tôles sur le diamètre. Cette matière en excès entraîne la formation d'ondulations sur les tôles centrales.

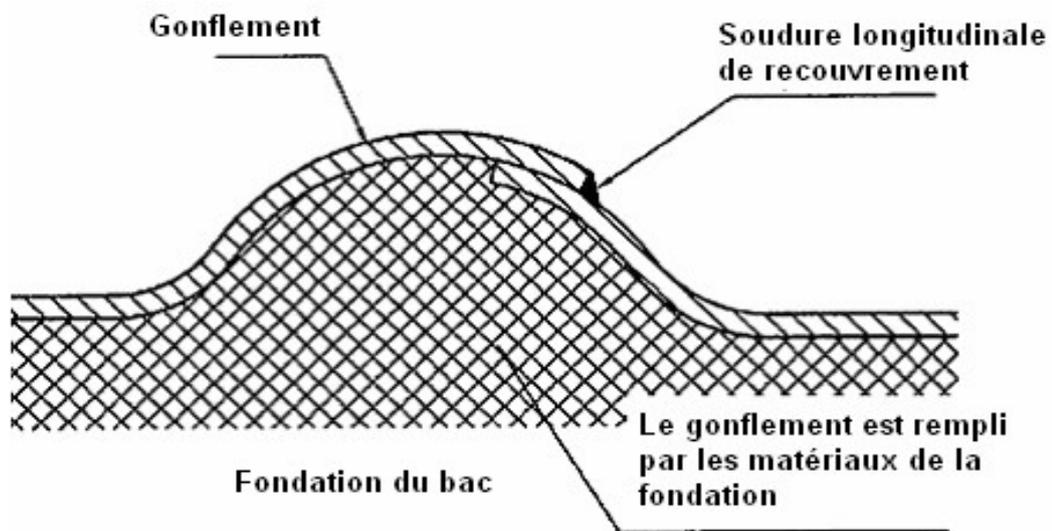


Figure II. 12 : gonflement du fond d'un bac

Des ondulations peuvent se former sur les lignes de soudures à clin dans le sens longitudinal. Il est important que ces ondulations ne forment pas de plis sévères (arêtes). Il faudra s'assurer de l'absence de fissuration locale de ces soudures

II.5.1.3 Cloques sur le fond :

Le cloquage inférieur fait référence à la formation de bulles de gaz ou de poches d'air sous la surface inférieure d'un matériau ou d'une structure. Ces cloques peuvent se former dans

différents environnements tels que les sols, la peinture, les membranes d'étanchéité ou les composites

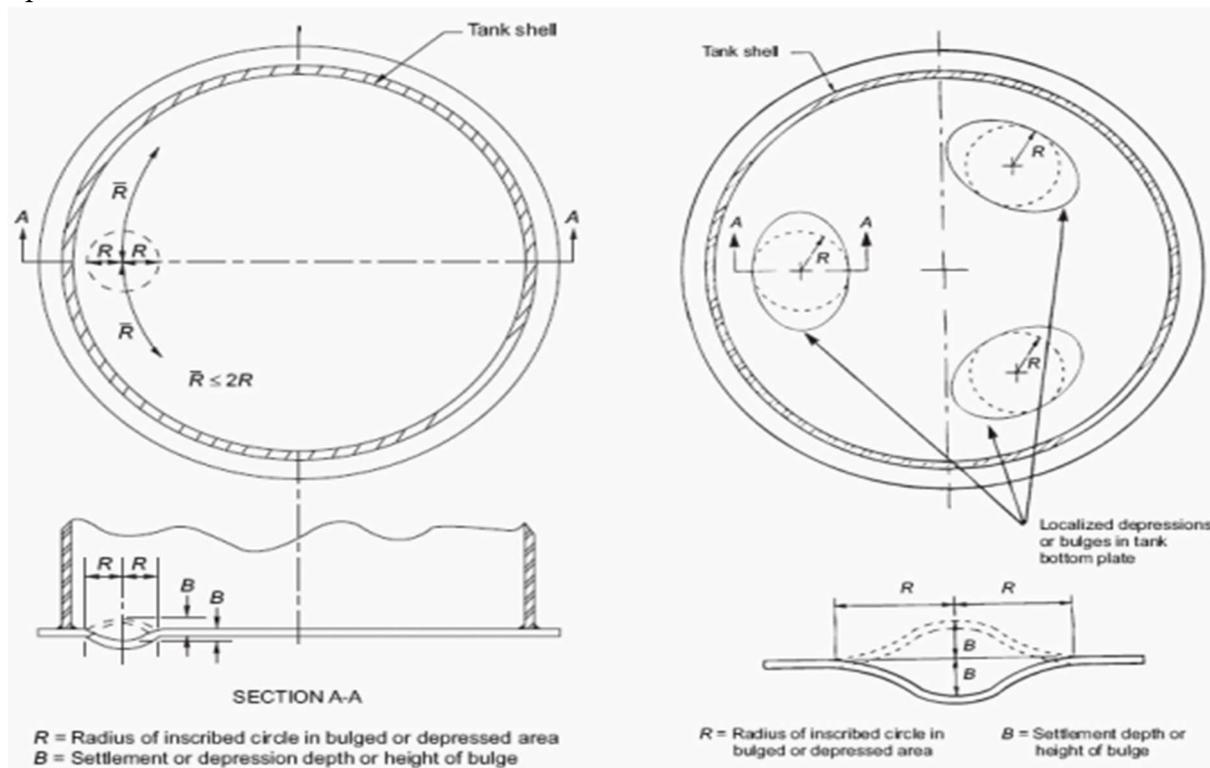


Figure II. 13: schéma montre les cloques dans les fonds

II.6 Affaissement et problèmes associés :

Les tassements des fondations d'un réservoir peuvent entraîner différents effets, seuls ou combinés :

1. Tassement général : il peut rendre le réservoir instable.
2. Blocage du toit flottant ou de l'écran flottant : les tassements peuvent affecter le fonctionnement de ces éléments.
3. Création de contraintes : les tassements peuvent générer des contraintes au niveau du réservoir et des tuyauteries adjacentes.

En général, le réservoir suit les tassements du sol sur lequel il est construit. Il est important de vérifier si ces tassements sont uniformes ou non uniformes.

II.7 Défaillance de structure du réservoir et de ses accessoires :

- Flambage des réservoirs de stockage avec écrans internes en raison d'un support inadéquat, d'un vide ou d'un blocage au niveau du joint.
- Flambage du toit flottant en raison d'un support inadéquat par les béquilles et/ou d'un blocage au niveau du joint de toit.
- Perte de flottabilité de l'écran interne ou du toit flottant en raison de la présence de produit sur l'écran ou le toit, ou dans les pontons des toits flottants.
- Blocage du drain articulé.

- Déraillement de l'échelle sur les réservoirs à toit flottant.
- Blocage de l'écran interne ou du toit flottant.
- Défaut de verticalité des poteaux de support de la charpente.
- La combinaison de plusieurs de ces causes augmente le risque de flambage de la robe du réservoir. Ce type de défaillance est principalement observé dans les parties supérieures de la robe où les viroles sont minces.
- L'ajout d'un raidisseur supplémentaire peut résoudre le problème de flambage. Ce type de flambage est généralement observé dans les réservoirs à toits flottants de grand diamètre et dans les réservoirs présentant des problèmes de rotondité.

II.8 Dégradations liées au fonctionnement cyclique :

Lors des cycles de vidange et de remplissage avec de grandes amplitudes, la robe du réservoir subit des forces transversales qui entraînent une déformation élastique. Cependant, le fond du réservoir ne se déforme pas de la même manière que la robe, ce qui génère des contraintes au niveau de la zone critique.

Cependant, le nombre de cycles d'un réservoir de stockage est généralement faible pour entraîner des problèmes de fatigue métallurgique. Même dans le cas d'un stockage quotidien avec un cycle par jour et une durée de vie de 100 ans, le nombre total de cycles ne dépasse pas $3,6 \times 10^4$. Dans le cas d'un stockage en dépôt, le nombre de cycles est réduit d'au moins un facteur de 10, soit inférieur à 3×10^3 .

Pour un tel nombre de cycles, la fatigue ne pourrait se manifester que si les contraintes sont proches de la résistance à la rupture. Cependant, les codes de construction limitent généralement les contraintes à environ 40% de la résistance à la rupture et 66% de la limite élastique.

Une autre manifestation possible des contraintes cycliques est la "fatigue/corrosion". Il s'agit d'une perte d'épaisseur due à une corrosion accélérée par les contraintes répétées qui érodent et fragilisent la zone attaquée. Ce phénomène peut éventuellement se manifester sous le talon du réservoir, à l'extérieur après environ un millier de cycles. Cette dégradation est détectable par une perte anormale d'épaisseur. Bien que ce phénomène porte le nom de fatigue, il est assimilé à de la corrosion.

II.8.1 Dégradation des assises :

Les principales causes de détérioration des assises du réservoir sont les suivantes :

- Tassement des assises.
- Érosion.
- Dégradation du béton due à la calcination, l'attaque par l'eau souterraine, l'attaque par le gel, l'attaque chimique et la présence de végétation non contrôlée.
- Les fissures résultant de la dégradation du béton peuvent créer des points d'entrée pour l'eau, contribuant ainsi à des phénomènes de corrosion au niveau de la tôle annulaire voire du fond du réservoir.

De plus, selon que la détérioration des assises soit uniforme ou non, elle peut entraîner des phénomènes similaires à ceux mentionnés précédemment, tels que :

- Tassements différentiels.
- Déformation du fond en raison des contraintes générées.

II.8.2 Fissuration :

Les fissurations peuvent se produire en raison de la composition des produits utilisés et des propriétés métallurgiques du réservoir. Elles se manifestent principalement dans les zones où les contraintes sont élevées.

- **Fissuration par corrosion :**

Il est fréquent d'observer que la corrosion aqueuse affecte les métaux de manière localisée, voire uniforme, ce qui peut entraîner une défaillance plus rapide d'une pièce par rapport aux taux de corrosion moyens prévus.



Figure II. 14: Processus de fatigue-corrosion à partir d'une piqûre de corrosion

Lorsque la contrainte et la corrosion agissent simultanément, cela peut être extrêmement dommageable, entraînant la formation de fissures qui se propagent rapidement et de manière imprévisible. Deux types courants de fissuration corrosive sont responsables de dommages imprévus. Ces types de fissuration sont :

- **Fissuration par corrosion sous contrainte :**

La fissuration intergranulaire ou transgranulaire du métal, qui se présente souvent sous forme de ramification, survient lorsque le matériau est soumis simultanément à des contraintes et à un milieu corrosif.

- **Exemple :**

- **Amine Stress Corrosion Cracking :**

La fissuration par amine (ou amine cracking) désigne la fissuration des aciers sous l'action combinée d'une contrainte de traction et d'une solution aqueuse d'alkanolamine utilisée pour éliminer le H₂S et/ou

le CO₂, ainsi que leurs mélanges, provenant de divers flux de gaz et d'hydrocarbures liquides. La fissuration par amine est une forme de fissuration par corrosion sous contrainte alcaline

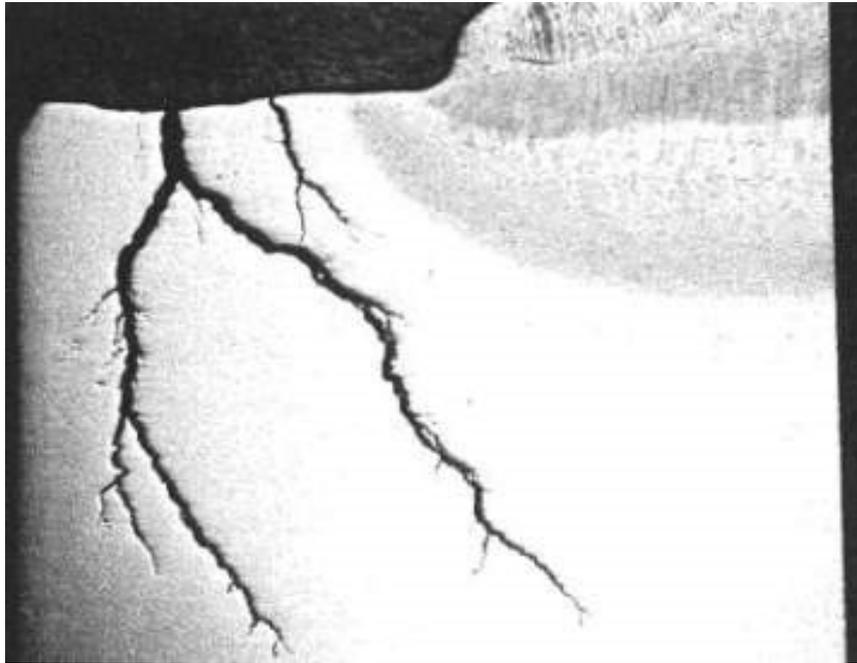


Figure II. 15: Photomicrographie montrant une fissuration par amine Grossissement de 6X

- **Fatigue-corrosion :**

La fatigue représente la tendance du métal à se fracturer sous l'action répétée d'un cycle de Contraintes. La fissuration apparaît normalement au-dessous de la limite élastique. La "corrosion Sous fatigue" est une réduction de la résistance à la fatigue due à la présence d'un milieu corrosif



Figure II. 16: Fatigue corrosion

CHAPITRE III :
LES METHODES D'INSPECTION
DU FOND DES BACS DE
STOCKAGE D'HYDROCARBURE



III.1 Introduction à l'inspection du bac de stockage :

L'inspection des réservoirs de pétrole est un processus crucial qui garantit le fonctionnement sûr et fiable des réservoirs de stockage de pétrole utilisés dans diverses industries telles que le pétrole, le gaz, la chimie et l'industrie manufacturière. Ces réservoirs sont conçus pour stocker du pétrole et d'autres produits pétroliers et doivent être régulièrement inspectés pour s'assurer qu'ils sont en bon état et exempts de tout dommage susceptible de provoquer des fuites ou des déversements.

Les méthodes de contrôle non destructif (CND), telles que l'analyse des flux magnétiques (MFL), sont couramment utilisées pour l'inspection des réservoirs de pétrole. Le MFL consiste à utiliser un dispositif de balayage qui passe sur la surface du réservoir et mesure le champ magnétique. Toute modification du champ magnétique causée par des défauts tels que la corrosion ou les fissures peut être détectée et analysée afin de déterminer l'étendue des dommages.

La fréquence des inspections et les méthodes utilisées peuvent varier en fonction du type de bac, de son contenu et des conditions environnementales. Toutefois, il est généralement recommandé d'inspecter régulièrement les bacs au moins une fois par an, afin de s'assurer que le bac est en bon état et ne présente aucun dommage ou défaut susceptible de compromettre sa fiabilité.

En plus de l'inspection régulière, il est essentiel d'effectuer un entretien adéquat et des réparations si nécessaire. Tout défaut ou dommage détecté lors des inspections doit être traité rapidement afin d'éviter les fuites ou les déversements, qui peuvent avoir de graves conséquences environnementales et économiques.

Dans l'ensemble, l'inspection des réservoirs de pétrole est un processus critique qui garantit le fonctionnement sûr et fiable des réservoirs de stockage. Elle est essentielle à la protection de l'environnement et à la sécurité publique, et permet d'éviter des temps d'arrêt et des réparations coûteuses.



Figure III. 1: vue intérieure d'un bac de stockage abandonné

III.2 Méthodologie d'inspection et de contrôle :

L'inspection visuelle détaillée intéresse tous les éléments visibles et accessibles, c'est-à-dire tous les éléments inspectables sur la structure, les accès et les accessoires du réservoir.

Cette inspection visuelle est complétée par des contrôles non destructifs (voir tableaux ci-dessous). A noter que cette liste de contrôle n'est pas exhaustive et doit être complétée ou adaptée si nécessaire, notamment en cas de situation atypique. Les techniques et les étendues des contrôles mentionnées peuvent être remplacées par d'autres aux performances équivalentes (ex : la magnétoscopie peut être remplacée par les ultra-sons).

Trois niveaux de contrôles, en termes d'étendue et de méthode, sont proposés :

- Niveau A : niveau le plus élevé
- Niveau B : niveau intermédiaire
- Niveau C : niveau le moins élevé

Le niveau, pour chaque élément du réservoir, est déterminé et adapté par l'inspecteur en fonction :

- Des mécanismes de dégradation identifiée
- Des conclusions de l'analyse de criticité
- Du facteur de confiance recherché
- De la date prévue de la prochaine inspection

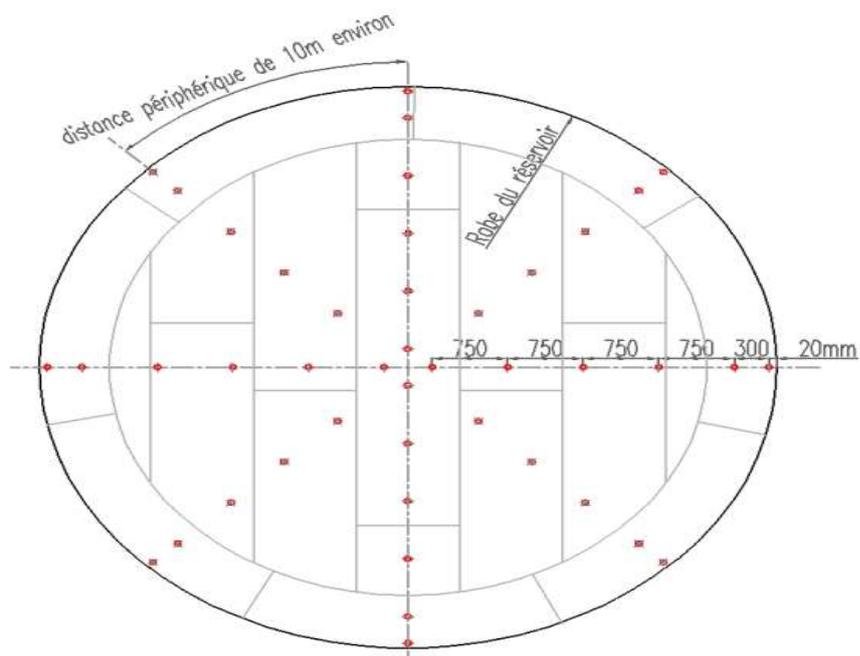


Figure III.2 : Exemple de maillage de point pour le contrôle d'épaisseur du fond

Tableau III. 1: les niveaux d'inspection pour contrôler l'épaisseur des tôles du fond

Contrôles d'épaisseur du fond			
Éléments du fond	Niveau A	Niveau B	Niveau C
Tout le fond	Visuel interne 100% : Recherche des corrosions internes, puis évaluation des zones de corrosion		
Épaisseur des tôles centrales et marginales	Scanner automatique de toutes les zones accessibles + Scanner manuel dans les zones inaccessible	Scanning ou Maillage UT ou MFL (le long de génératrices rayonnantes (Fig III.3) et des tôles de la zone critique)	Mesures d'épaisseur UT ou MFL le long de génératrices rayonnantes (Fig III.4) (minimum 1 point par tôle)
Port de purge	Maillage UT		
Dépassée externe des tôles marginales	Visuel externe + Recherche de l'épaisseur résiduelle marginale sous robe avec une méthode adaptée	Visuel externe + Mesures de l'épaisseur résiduelle marginale sous robe avec une méthode adaptée dans les zones sensibles (exposition aux vents dominants, zone de rétention d'eaux)	Visuel externe + Mesures de l'épaisseur résiduelle marginale sous robe avec une méthode adaptée si présence de corrosion

Tableau III. 2: les niveaux d'inspection pour le contrôle des soudures

Contrôles des soudures du fond			
Éléments du bac	Niveau A	Niveau B	Niveau C
Soudures des tôles de fond non revêtu	100% Visuel + CND recherche de défauts par méthode adaptée au mode de dommage sur 100% des revêtements + 10% soudures fond	100% recherche visuelle de défauts par méthode adaptée dans les zones présentant des ondulations ou des enfoncements	
Soudure d'angle Robe-fond + soudures zone critique	100% visuel + 100% CND recherche de défauts par méthode adaptée	100% visuel + 20% CND recherche de défauts par méthode adaptée	100% visuel

III.2.1. Considérations sur la fréquence des inspections :

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour déterminer les intervalles d'inspection des réservoirs de stockage. Ces facteurs sont notamment les suivants :

1. La nature du produit stocké.
2. Les résultats des contrôles visuels d'entretien.
3. Les tolérances et les taux de corrosion.
4. Les systèmes de prévention de la corrosion.
5. État des inspections précédentes.
6. Les méthodes et les matériaux de construction et de réparation.
7. Le risque de pollution de l'air ou de l'eau.
8. Changement du mode de fonctionnement (par exemple : fréquence des cycles de remplissage, mise à la terre fréquente des pieds de support du toit flottant).
9. Exigences juridictionnelles.
10. Changements dans le service (y compris les changements dans le fond de l'eau).

L'intervalle entre les inspections interne et externe d'un bac devrait être déterminée par son historique de service, à moins que des raisons particulières n'indiquent qu'une inspection plus précoce doit être effectuée. Il convient de disposer d'un historique du service d'un réservoir donné ou d'un réservoir en service similaire (de préférence sur le même site) afin de pouvoir programmer des inspections complètes à une fréquence proportionnelle à la vitesse de corrosion du réservoir. Les méthodes d'inspection non destructives en cours d'exploitation doivent être prises en compte lors de l'établissement des fréquences d'inspection.

Dans certains cas, les réglementations juridictionnelles contrôlent la fréquence et l'intervalle des inspections. Ces réglementations peuvent porter sur les exigences en matière de perte de vapeur, l'état des joints, les fuites et les procédures de réparation. La connaissance de ces réglementations est nécessaire pour garantir le respect des exigences en matière de programmation de la date de l'inspection.

III.2.2. Intervalles d'inspection :

Les intervalles entre les inspections internes sont déterminés par les taux de corrosion mesurés lors des inspections précédentes, ou anticipés sur la base de l'expérience acquise avec des réservoirs en service similaire. Normalement, les taux de corrosion du fond sont contrôlés et l'intervalle d'inspection est régi par les taux de corrosion mesurés ou anticipés ainsi que les calculs de l'épaisseur minimale requise des fonds des bacs. L'intervalle d'inspection réel doit être fixé de manière que les épaisseurs minimales de la tôle de fond lors de l'inspection suivante ne soient pas inférieures aux valeurs autorisées, toutefois, l'intervalle d'inspection interne ne doit en aucun cas dépasser 20 ans.

Lorsque les taux de corrosion ne sont pas connus et que l'on ne dispose pas d'une expérience de service similaire pour déterminer l'épaisseur minimale de la tôle de fond lors de la prochaine inspection, l'épaisseur réelle du fond doit être déterminée par une ou plusieurs inspections au cours des dix prochaines années d'exploitation du réservoir afin d'établir les taux de corrosion.

III.3 Méthodes d'inspection communes pour le bac de stockage :

Les méthodes d'inspection sont nombreuses, chacune a son domaine d'application, et dans de nombreux cas elles peuvent être complémentaires, les facteurs déterminant le choix d'une méthode sont cités dans **Tableau III-4** nous présenterons ci-dessous les méthodes les plus utilisés.

III.3.1 Inspection visuelle :

Cette méthode implique une évaluation visuelle de l'extérieur et de l'intérieur du réservoir afin de déceler des signes de dommages, de corrosion ou de fuites.

Elle peut être réalisée à l'œil nu ou à l'aide d'outils spécialisés tels que des lampes de poche, des endoscopes ou des caméras.

Il s'agit d'une méthode rentable et non destructive qui peut donner un aperçu général de l'état du bac. Elle permet de détecter l'état d'éventuels revêtements anticorrosion et des déformations.



Figure III. 5: piqûre visibles à l'œil nu et corrosion généralisée au niveau du support

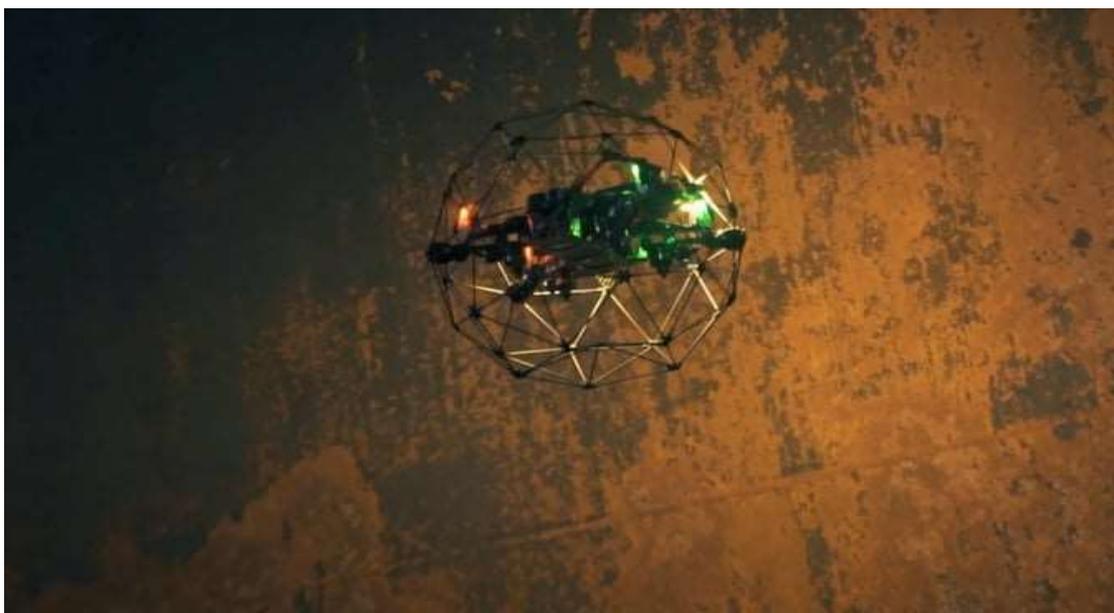


Figure III. 6 : un drone utilisé pour l'inspection visuelle

III.3.2. Contrôle par ultrasons :

Le contrôle par ultrasons est un examen échographique pour la mesure d'épaisseur des matériaux. L'appareil génère une onde ultrasonore qui traverse la tôle ; le temps mis par l'onde pour rebondir sur l'autre face de la tôle permet de déduire son épaisseur.

L'UT peut détecter des défauts internes tels que la corrosion, les piqûres et les fissures qui peuvent ne pas être visibles de l'extérieur. Cette méthode peut être réalisée sans vider le réservoir, elle peut fournir des informations sur des parties difficiles à atteindre comme les tôles annulaires, Supports du toit.....



Figure III. 7: transducteur ultrasonique

III.3.3 Contrôle d'épaisseur par onde guidée :

Ce contrôle utilise la technologie des ondes de Lambs, basée sur la technologie UT, il permet d'inspecter une tôle non accessible à partir d'une zone accessible, par exemple le contrôle des tôles de fond en périphérie du réservoir à partir de la dépassée de marginale.

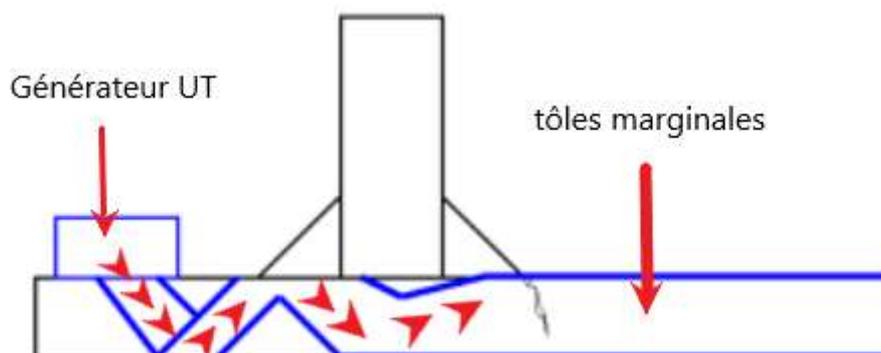


Figure III. 8: schéma du principe d'onde guidée

III.3.4 Radiographie :

Ce contrôle consiste à traverser le métal avec des rayons X ou gamma. Un film placé derrière le métal met en évidence les contrastes liés principalement à sa densité. Les rayons gamma nécessitent une source radioactive, ils sont cependant, facilement transportables.

Les rayons X sont généralement des équipements lourds dédiés aux laboratoires, ils ne contiennent pas de sources radioactives et donc n'émettent aucune onde lorsqu'ils sont éteints. Ce contrôle impliquant des risques particuliers lors des tirs sur sites industriels et du transport des sources radioactives, il est de plus en plus remplacé par les contrôles ultrason.

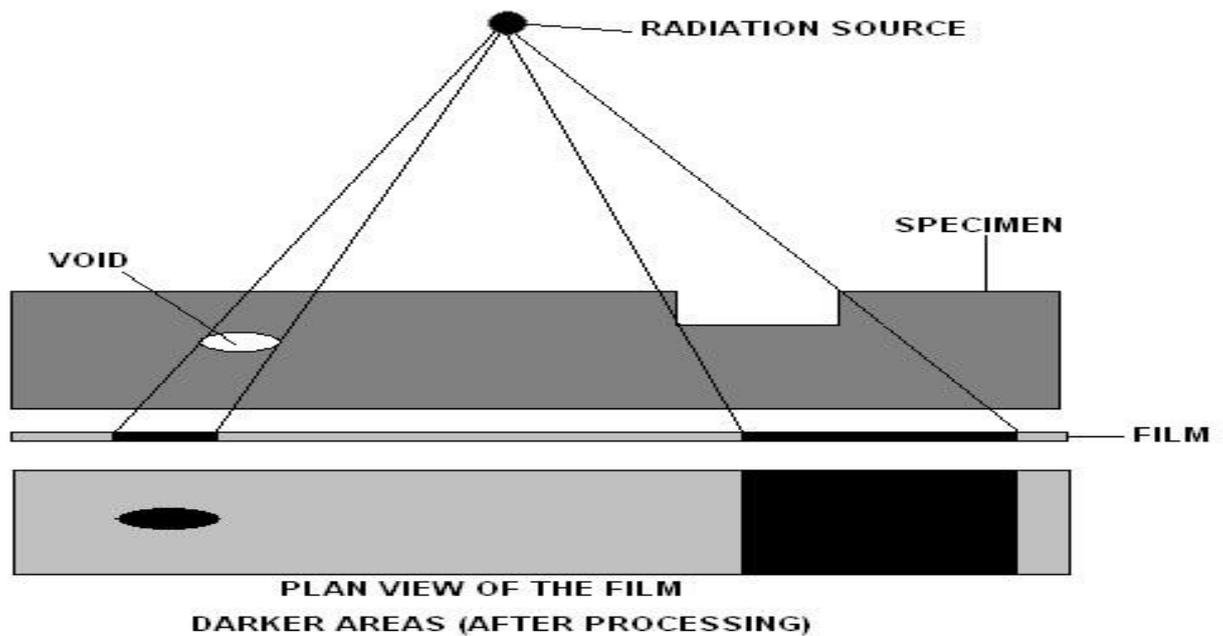


Figure III. 9: schéma du principe de la radiographie



Figure III. 10: scanner de radiographie

III.3.5 Contrôle par courants de Foucault :

Cette méthode utilise des champs électromagnétiques pour détecter les défauts dans le métal, elle fonctionne à haute fréquence et souvent alimenté en 220V.

Une bobine, placée près de la surface du métal, est traversée par un courant alternatif, créant un champ magnétique qui induit des courants de Foucault dans le métal. Ces courants créent leurs propres champs magnétiques, qui peuvent être détectés et analysés pour identifier d'éventuels défauts ou anomalies. Après saturation magnétique d'une tôle, un capteur mesure la perte de flux magnétique et y associe une perte d'épaisseur.

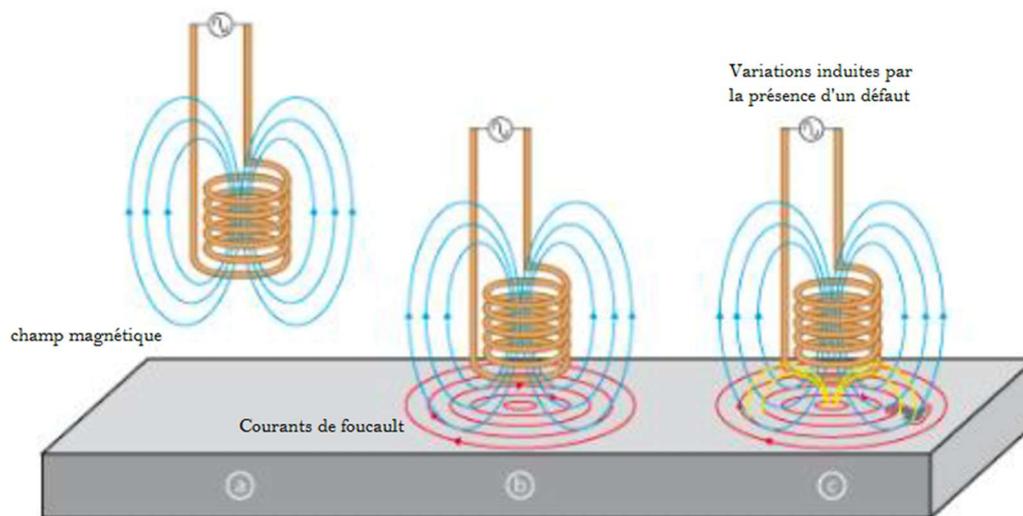


Figure III. 11: principe de fonctionnement de courant de foucault



Figure III. 12: scanner ECT de fond et : capteur de courant de Foucault

III.3.6 Thermographie infrarouge :

Cette méthode consiste à mesurer des contrastes de température grâce aux rayons infrarouges. L'image obtenue peut être archivée par photographie ou par enregistrement vidéo. La gradation des couleurs est modulée pour faciliter l'interprétation.

Les valeurs absolues des températures ne sont obtenues que par étalonnage préalable d'un point ou d'une zone de référence, les valeurs relatives sont interprétables directement. Cette méthode permet de suivre en particulier l'efficacité des calorifuges ou des frigorifuges

La surface du bac est scannée à l'aide d'une caméra infrarouge afin d'en créer un profil thermique. Toute zone du réservoir dont la température est différente de celle de la zone environnante peut indiquer une fuite ou tout autre problème au niveau de l'isolation ou du revêtement du réservoir.

La thermographie infrarouge peut être réalisée sans vider le réservoir.

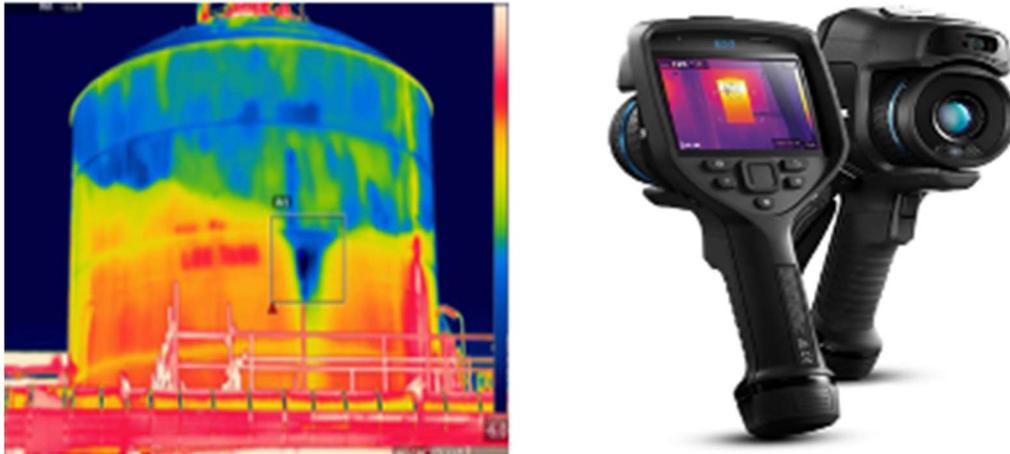


Figure III. 13: image du profil thermique de bac et caméra Infrarouge

III.3.7 Contrôle par scanner à perte de flux magnétique :

Également appelée MFL, qui est largement utilisée dans toutes les matériaux ferromagnétiques, elle a gagné en popularité ces dernières années, ce qui en fait la méthode d'inspection la plus utilisée à côté de l'UT, en particulier en Algérie.

Les MFL fonctionnant à basse fréquence et basse tension, ils présentent l'avantage de fonctionner sur batteries



Figure III. 14: MFL surface scanner

III.3.8 Contrôle par magnétoscopie :

La magnétoscopie consiste à créer un flux d'induction magnétique, des traceurs magnétiques déposés à la surface des matériaux mettent en évidence des défauts jusque 1 à 2 mm sous la surface. Et son Domaine d'application : Soudures sur robe et fond



Figure III. 15: sonde de magnétoscopie

III.4 Technique de contrôle de l'étanchéité par flux magnétique MFL :

III.4.1 Principe fondamental:

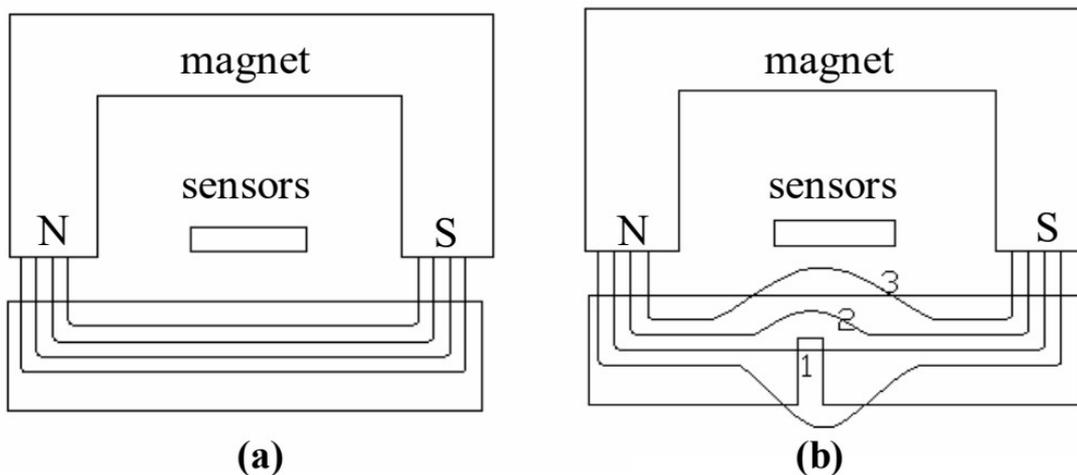


Figure III. 16: schéma détaille le principe du MFL

Une fois qu'un matériau ferromagnétique est aimanté, il peut générer un champ magnétique de fuite au-dessus de sa surface en raison de ses imperfections internes. Le test de fuite de flux magnétique (MFL) est une méthode de mesure du champ magnétique de fuite à l'aide de capteurs. Lorsque le matériau est magnétisé et que sa surface est lisse et sans défaut, le flux magnétique circule librement dans le circuit magnétique, comme illustré dans la **Figure III.16 (a)**. Cependant, si le matériau présente un défaut, la perméabilité magnétique à proximité du

défaut diminue, ce qui entraîne une augmentation de la réluctance. Cela provoque une déformation du champ magnétique à proximité du défaut, comme le montre **Figure III-16 (b)**. Par conséquent, le flux magnétique se divise en trois parties :

- Une petite partie qui passe à travers le défaut ;
- La plus grande partie qui contourne le défaut ;
- Le reste qui s'écarte des surfaces supérieure et inférieure et contourne le défaut par l'air.

La troisième partie est la fuite de flux magnétique qui peut être collectée par des capteurs.

Enfin, les informations sur les défauts peuvent être obtenues en analysant les signaux de fuite de flux magnétique et en établissant la relation quantitative entre le champ magnétique de fuite et le défaut.

III.4.2. Facteurs d'influence de la sensibilité de la MFL

La méthode MFL permet d'identifier précisément les défauts de corrosion dans les sols des réservoirs de stockage, y compris à leur surface inférieure, tout en éliminant les effets des facteurs humains, réduisant ainsi le besoin de main-d'œuvre et offrant de nombreux avantages tels que la rapidité, l'efficacité, la polyvalence et la perméabilité, sans nécessiter l'utilisation de coûteux échafaudages ni d'enlever le revêtement anticorrosion. Cette méthode permet également de guider efficacement la réparation des sols des réservoirs. Un exemple d'inspection montrant une perte d'épaisseur d'environ 70 % sur la surface inférieure d'une tôle de sol de réservoir est présenté dans la **Figure IV.17**, avec les images réelles des surfaces supérieure et inférieure de la tôle représentées respectivement dans la **Figure IV.18** Ces résultats peuvent avoir des implications importantes pour l'application pratique de la méthode.

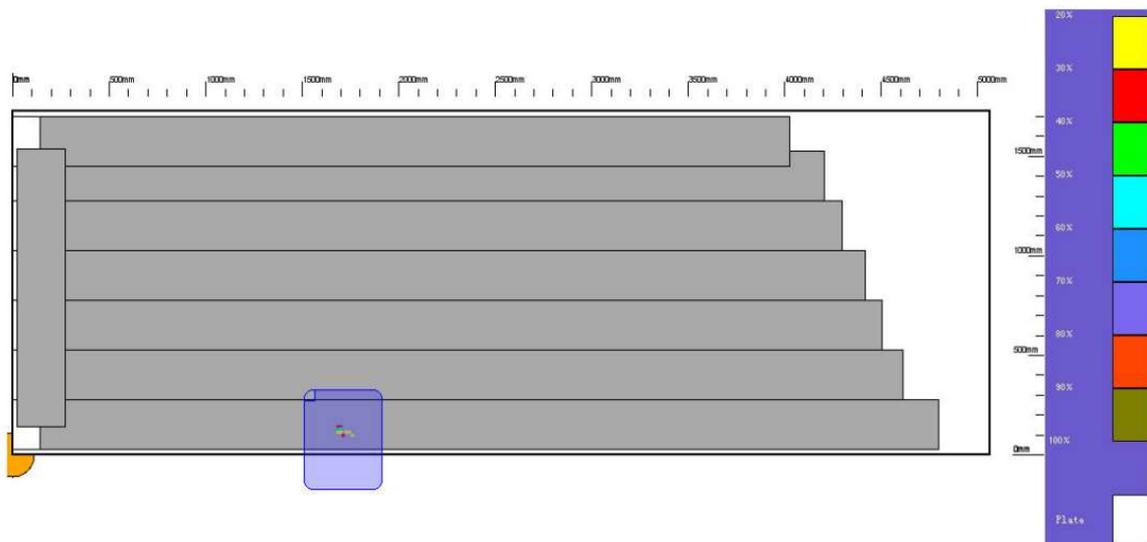


Figure III. 17: exemple d'inspection d'une perte d'épaisseur de 70%

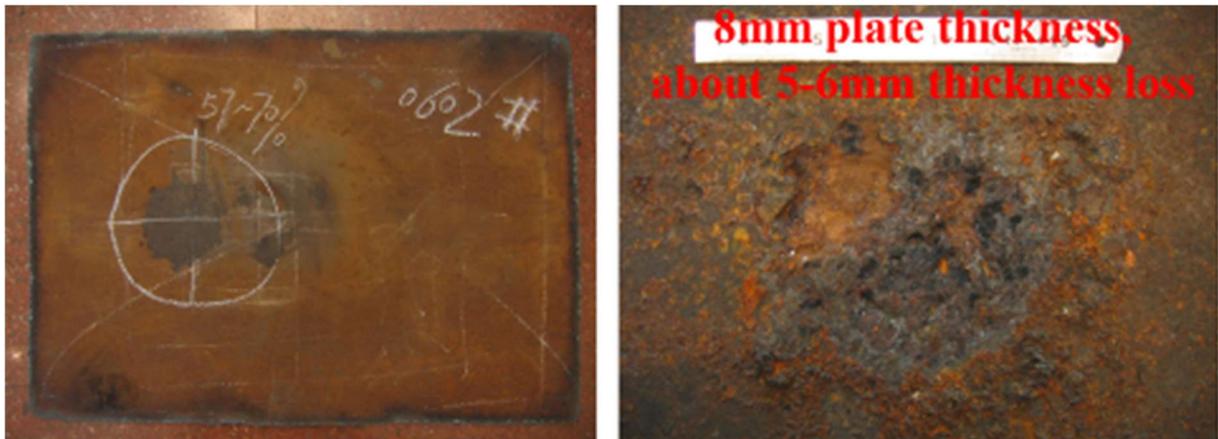


Figure III.18 : image réelle de perte d'épaisseur dans les surfaces supérieure et inférieure de la tôle

La sensibilité de la MFL est toujours influencée par de nombreux facteurs décrits ci-dessous :

➤ **L'intensité du champ magnétique** : généré par l'équipement joue un rôle crucial dans la magnétisation de la tôle du fond du bac. Elle détermine également le champ magnétique de fuite du défaut, car ce dernier est directement lié au degré de magnétisation de la tôle de fond du bac. Lorsque l'épaisseur des fonds du bac inspectés est importante, une intensité de champ magnétique plus élevée est nécessaire. Toutefois, détecter les défauts à la surface du fond devient très difficile dans de telles conditions. Les bacs dont l'épaisseur du fond est égale ou inférieure à 12 mm offrent un effet idéal et sont acceptables pour les propriétaires de bacs utilisant actuellement des équipements MFL dans le monde entier. Cependant, lorsque l'épaisseur du fond du bac dépasse 12 mm, la sensibilité et la précision diminuent considérablement. Une inspection réalisée avec la technique MFL a révélé une épaisseur de tôle de 8 mm et une perte d'épaisseur d'environ 5-6 mm. Ces problèmes au niveau des surfaces supérieure et inférieure de la tôle de fond de réservoir doivent être résolus de manière urgente par une équipe scientifique et technique à l'avenir.

➤ **Direction, position et dimension du défaut** : Si le défaut est perpendiculaire à la direction du champ magnétisé, le champ magnétique de fuite est si fort que le défaut est le plus facile à trouver ; au contraire, si le défaut est parallèle à la direction du champ magnétisé, le champ magnétique de fuite est presque nul, et il est impossible de trouver le défaut. Pour le même défaut, le champ magnétique de fuite est le plus fort lorsque la position du défaut est située à la surface supérieure des bacs des réservoirs, et il diminue progressivement avec l'augmentation de la profondeur de la position. Le rapport entre la profondeur et la largeur peut également influencer le champ magnétique de fuite. Plus il est grand, plus le champ magnétique de fuite est important. Nous devons donc balayer les sols des réservoirs dans différentes directions pour trouver les défauts avec plus de précision dans les applications pratiques. L'application pratique.

➤ **Revêtement anticorrosion** : La sensibilité de l'inspection est fortement influencée par l'épaisseur du revêtement anticorrosion, la sensibilité d'inspection diminue rapidement avec l'augmentation de l'épaisseur du revêtement anticorrosif. Pour les équipements de MFL actuels dans le monde entier, les signaux de défaut efficaces sont difficilement obtenus si l'épaisseur du revêtement anticorrosif est supérieure à 6 mm Par conséquent, les pièces rouillées, en particulier celles qui sont tombées et inclinées, doivent être essuyées dans la pratique.

➤ **Rugosité de la surface** : La rugosité de la surface peut entraîner des variations de hauteur entre les capteurs de l'équipement et la surface inspectée, et influencer sur la cohérence de la sensibilité de l'inspection. En outre, les bruits électroniques causés par les vibrations de l'équipement affectent également les résultats des inspections. En outre, les bruits électroniques causés par les vibrations de l'équipement affectent également les résultats de l'inspection.

➤ **Faux défaut** : Un faux défaut signifie généralement un bourrelet de soudure. Il convient d'observer avec les yeux et d'enregistrer pour éliminer son influence.

Dans les tableaux III.3 , nous pouvons voir le pourcentage d'erreur concernant la technique MFL, en fonction de la profondeur, du diamètre et de la nature des défauts.

Tableau III. 3 : l'incertitude du MFL

Defects	Defects depth (mm)	Actual defect location (mm)	Measured defect location (mm)	Error percentage
Grooves	2	60	55	9.1
	4	150	150	0
	6	240	240	0
6 mm diameter	2	80	73	9.5
	4	160	161	0.6
	6	240	242	0.8
	8	320	318.5	0.5
8 mm diameter	2	80	80	0
	4	160	157.5	1.6
	6	240	238.5	0.6
	8	320	317.5	0.8

P = Possible / M = Moyenne / TB = Très Bonne / NA = Non applicable

III.5 Considérations relatives au choix de la méthode d'inspection :

Tableau III. 4 : le degré d'efficacité de chaque méthode d'inspection pour différents défauts

Techniques de contrôle	Type de défauts recherchés / Degré d'efficacité des méthodes de contrôles				
	Fond				Piquages
	Corrosion interne	Corrosion externe	Fissures	Déformations	Corrosion
Examen visuel	P	NA (P en périphérie)	P	P	P
Examen visuel après sablage	M à TB	NA (P en périphérie)	P	P	P
UT selon génératrice	M	M	NA	NA	M à TB
UT ondes guidées	M	M	P	NA	NA
Hand-scan MFL	TB	TB	NA	NA	NA
Floor-Scan MFL	TB	TB	NA à TB (selon outil)	NA	NA
Radiographie - Gammagraphie	NA	NA	NA	NA	TB
Thermographie infrarouge	NA	P	M	NA	P
Magnétoscopie	NA	NA	TB	NA	NA

Tableau III.5 : l'effet de différentes conditions sur la précision des données de chaque méthode

	Inspection visuelle	Inspection ultrasons	Inspection MFL	Inspection Radiographie	Thermographie infrarouge	Courants de Foucault
Bac doit être vide	OUI	NON	OUI	NON	NON	OUI
Limité aux défauts de surface	OUI	NON	NON	NON	OUI	OUI
Éclairage	II	AI	AI	AI	AI	AI
Revêtement	AI	IM	AI	FI	AI	IM
Ferromagnétisme	AI	AI	II	AI	AI	FI
Conductivité électrique	AI	AI	AI	AI	AI	II
Faible épaisseur	AI	AI	II	AI	AI	IM
Forte épaisseur	II	II	AI	FI	II	FI

**AI = aucun impact, /. FI = faible impact, / IM = impact moyen, /.
II = impact important**

III.6. la détermination de l'épaisseur minimale des tôles centrales :

Le tableau 4-1 de l'api 653 donne l'épaisseur minimale de la tôle autorisée en fonction de la conception du fond du réservoir.

Minimum Bottom Plate Thickness ^a at Next Inspection (inches)	Tank Bottom/Foundation Design
0.10	Tank bottom/foundation design with no means for detection and containment of a bottom leak.
0.05	Tank bottom/foundation design with means to provide detection and containment of a bottom leak.
0.05	Applied tank bottom reinforced lining, >0.05 inch thick, in accordance with API RP 652.

Figure III.19: l'épaisseur minimale de tôle centrale du fond

2.5 millimètres : pour une installation de fond de bac sans moyens de détection et de confinement des fuites.

1.27 millimètres : une installation de fond de bac avec moyens de détection et de confinement des fuites.

1.27 millimètres : une installation avec revêtement renforcé appliqué au fond du réservoir d'une épaisseur supérieure à 1.27 millimètres.

III.7. Classes de revêtements :

Les revêtements de fond de bac peuvent généralement être classés en deux catégories : les couches minces (dont l'épaisseur du film sec est inférieure à 20 mils (0,51 µm)) et les couches épaisses (dont l'épaisseur du film sec est de 20 mils (0,51 µm) ou plus). Les revêtements à couche mince sont appliqués aux fonds de réservoirs qui s'attendent à être corrodés ou qui le sont peu. Ils ne conviennent pas aux fonds de réservoirs fortement piqués.

Les revêtements à couche épaisse peuvent être divisés en deux types : renforcés ou non renforcés. Les revêtements renforcés sont souvent utilisés sur les fonds vieilliss qui ont subi une corrosion et sont rugueux et piqués, ainsi que sur les fonds de bacs amincis.

CLASSES OF LININGS

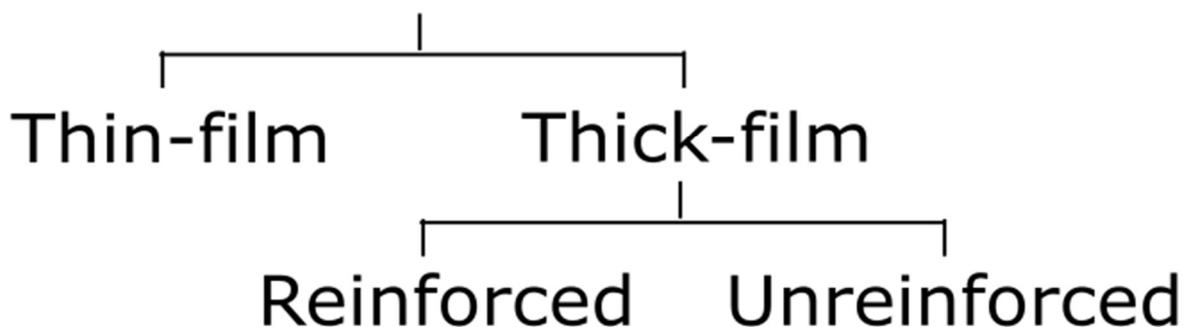


Figure III. 20 Les class de revêtement

III.8. Considérations relatives au choix du revêtement :

Avantages des revêtements à couche mince :

- Le coût initial est généralement inférieur à celui des revêtements renforcés en couche épaisse.
- Ils sont plus faciles à appliquer.
- L'expérience a montré que, lorsqu'ils sont correctement sélectionnés, appliqués et non endommagés, les revêtements à couche mince peuvent avoir une durée de vie supérieure à 20 ans.
- La plupart des revêtements époxy à couche mince présentent une bonne flexibilité.
- Permet des analyses plus précises du sol de la MFL.
- Plus facile à enlever.

Avantages des revêtements renforcés à couche épaisse :

- Il est plus facile d'obtenir une couverture sur l'acier rugueux, piqué et sur les irrégularités de surface.
- Capacité prouvée à combler les futures pénétrations dans l'acier du bac.
- Résistance aux dommages mécaniques.
- Il peut être posé à la main ou à l'aide d'un pistolet hacheur.
- Peu ou pas de discontinuités à réparer après l'essai "vacances".
- Service à long terme - plus de 20 ans

Avantages des revêtements non renforcés à couche épaisse :

- Certains revêtements à couche épaisse peuvent être construits jusqu'à 100 mils (2540µm) en une seule couche.
- Meilleure couverture des surfaces rugueuses.
- Généralement appliqué en une seule couche, il n'y a pas de problèmes de contamination entre les couches.
- Les produits à forte teneur en solides peuvent présenter une meilleure rétention des bords grâce à la réduction du retrait du matériau.
- En général, ces revêtements durcissent rapidement et peuvent être remis en service après 24 heures à des températures ambiantes normales.
- Peu ou pas de discontinuités à réparer après l'essai "vacances".
- Coûts de main-d'œuvre réduite par rapport aux revêtements à couches minces multiples ou aux revêtements à couches épaisses renforcées qui nécessitent beaucoup de main-d'œuvre.
- Favorise la réduction du temps de rotation des réservoirs.
- Service à long terme - plus de 20 ans
- Résiste à la perméation de l'humidité.

III.9. la détermination de l'épaisseur minimale de les tôles annulaires :

Le tableau 2-3 de l'api 653 donne l'épaisseur minimale de la tôle autorisée pour les bacs stockant des liquides d'une densité inférieure à 1 , en fonction de l'épaisseur et les contraintes de la première virole .

Plate Thickness ^a of First Shell Course (Inches)	Stress ^b in First Shell Course (pounds per square inch)			
	<24,300	<27,000	<29,700	<32,400
$t \leq 0.75$	0.17	0.20	0.23	0.30
$0.75 < t \leq 1.00$	0.17	0.22	0.31	0.38
$1.00 < t \leq 1.25$	0.17	0.26	0.38	0.48
$1.25 < t \leq 1.50$	0.22	0.34	0.47	0.59
$t > 1.50$	0.27	0.40	0.53	0.68

Figure III. 21: l'épaisseur minimale de tôle annulaire du fond

- L'épaisseur de la tôle se réfère à la robe du bac telle qu'elle est construite.
- Les contraintes sont calculées à partir de la formule suivante :

$$\frac{2,34D(H-1)}{t}$$

III. 1

Où : D = le diamètre nominal du bac en pieds

H = la hauteur du niveau de conception du liquide en pieds

t = l'épaisseur de la première virole en pouces

- **Remarque** : Les épaisseurs spécifiées dans le tableau sont basées sur le fait que la fondation fournit un support uniforme sous toute la largeur de la tôle annulaire. Si la fondation n'est pas correctement compactée, en particulier à l'intérieur d'un mur annulaire en béton, le tassement produira des contraintes supplémentaires dans la tôle annulaire.

III.10. Inspection des accessoires et obstacles de fond :

Comme le scanner manuel MFL est conçu pour détecter les défauts horizontalement, il ne peut pas être utilisé pour vérifier l'intégrité des accessoires du sol et des obstructions possibles, pour

Cela une autre méthode d'inspection doit être utilisée, en général l'UT c'est quoi est la meilleure Ces accessoires qu'elle utilise sont : Flotteur, Collecteur de drainage du toit, Supports du toit, Purges, Échelles, Soupapes, Pipes, Rustines...

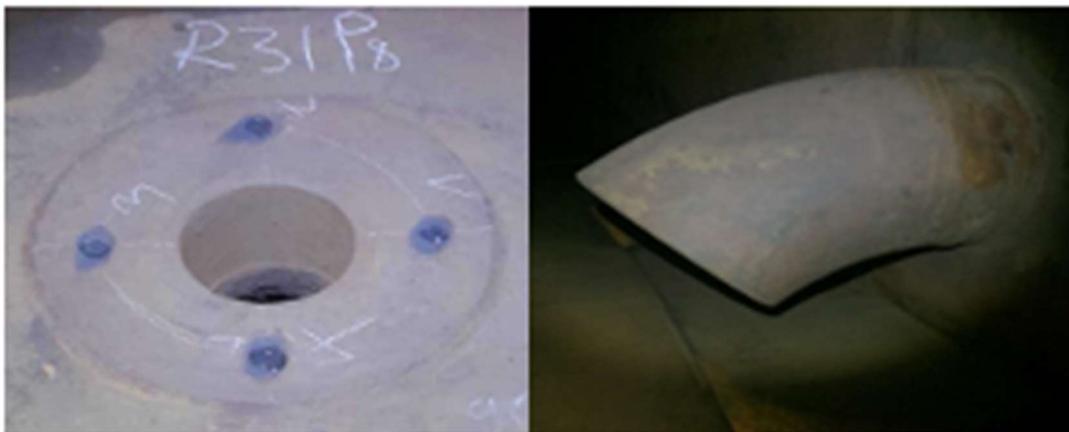


Figure III. 22 : purge et pipe



Figure III. 23: support du toit flottant et rustine

Chapitre IV :
**Inspection du fond du bac 303-TA-
22-01 et du bac 818 RTO**
-Étude de cas-



IV.1. Introduction :

Dans cette partie, nous avons pris comme exemple d'étude le cas de l'inspection de deux (02) bacs de stockage à différents endroits et de caractéristiques similaires.

Le premier cas étant l'inspection du bac **303-TA-22-01** du client : SH-ORGANISATION-OURHOUD qui a été faite en 2/11/2022.

Le deuxième cas est celui de l'inspection du bac **818 RTO** qui a commencé le 16 octobre 2021 et s'est terminée le 09 septembre 2022.

IV.1.1. Pourquoi avoir choisi ces deux bacs ? :

L'objectif principal est d'inclure le plus grand nombre d'informations possible dans le document, car l'examen d'un seul réservoir peut comporter de nombreuses lacunes. Il est possible que certains scénarios soient présents dans un réservoir et pas dans un autre. Si l'inspecteur se retrouve dans une situation où des données cruciales sont manquantes, il doit savoir comment procéder. En outre, il peut y avoir plusieurs solutions à un même problème. Les raisons spécifiques pour cela sont les suivantes :

- **Localisation du défaut :**

Dans le bac 818, presque tous les défauts étaient localisés dans les tôles centrales, et proches de zéro dans la zone critique, donc en étudiant le deuxième cas, nous pouvons voir les procédures à suivre lorsque l'on rencontre des défauts dans la zone critique.

- **Gravité des défauts :**

Il convient de noter que dans le bac 303-TA-22-01, les défauts sont peu graves et peuvent être résolus en utilisant des solutions simples. En revanche, dans le cas du bac 818, la gravité des défauts est beaucoup plus importante, et il sera nécessaire d'explorer diverses solutions pour résoudre les problèmes.

- **Des méthodes et technologies d'inspection différentes :**

En raison de la gravité du cas du bac 818, des méthodes d'inspection supplémentaires, telles que l'ultrason (UT) par exemple, ont été mises en place. En revanche, pour le bac 303-TA-22-01, où les défauts sont moins graves, une technologie MFL légèrement plus avancée a été utilisée.

IV.1.2. Pourquoi deux bacs avec des caractéristiques similaires ? :

Nous avons sélectionné deux réservoirs de capacité de stockage similaire - l'un avec une capacité de 50 000 m³ et l'autre avec 38 000 m³, contenant tous deux du pétrole brut - afin de pouvoir comparer les données de manière juste. Les deux réservoirs ont des âges et des diamètres très similaires, ce qui permettrait potentiellement d'utiliser les données d'un cas dans l'autre (par exemple, la vitesse de corrosion, l'épaisseur minimale des tôles), car l'état des fonds de bacs est presque identique, avec un diamètre nominal identique et le même matériau de stockage.

IV.2. Étude du premier bac :

Le bac **303-TA-22-01** est situé à OURHOUD, HASSI MESSAOUD, il a les caractéristiques suivantes :

SONATRACH	
ORGANISATION OURHOUD	
303-TA-22-01	BAC D'HUILE BRUTE
Code de calcul utilisé	Edition
API STANDARD 650	TENTH
Appendice	Révision No.
Date-essai	Surépaisseur Corp. mm
	ROBE:3.0 FOND:3.0 TOIT:3.0
Diamètre Nominal m	Hauteur Nominal m
69	13.8
Capacité m ³	Niveau du Fluide m
37.970	12.5
Poids Spécifique	Temp. Max. Service °C
0.784/0.747	65
Press. de Calcul mbar g	Traitement Thermique
ATMOSPHERIQUE	OUI
N° de Fabrication	L'Année de Fabrication
ITE-1100	2001

Figure IV.1: tableau statistique du bac 303-TA-22-01

IV.2.1. Les caractéristiques des tôles de fond :

- L'épaisseur nominale des tôles centrales est de 9 mm.
- L'épaisseur nominale des tôles annulaires est de 9 mm.
- l'épaisseur de la première virole est de 22.7 mm
- Revêtement à couche mince : époxy 300 microns.

IV.2.2. Vue générale du fond :

En examinant cette vue d'ensemble (fig IV.2), on peut observer l'état global du fond, avec la plupart des défauts se situant entre 20% et 39% de perte de métal, ce qui est considéré comme faible et ne nécessitera probablement aucune action, mais plutôt une surveillance continue au fil des ans.

Il est intéressant de noter qu'il n'y a que deux rustines installées sur le fond, une dans la tôle annulaire 22 et une dans la tôle 27 de la rangée 5, comme indiqué par les cases rouges sur la figure. Cela suggère que le fond a subi très peu de réparations et de défauts dans le passé.

Pendant, le nombre de défauts est considérable dans la zone critique, ce qui pourrait menacer l'intégrité du réservoir à l'avenir s'il n'est pas bien entretenu. Il est également évident qu'il n'y a pas de discontinuités de soudure entre les tôles et dans les soudures entre la robe et le fond. En ce qui concerne les défauts les plus graves, ils sont isolés et se situent principalement dans des zones accessibles du fond, ce qui facilite les procédures de réparation.

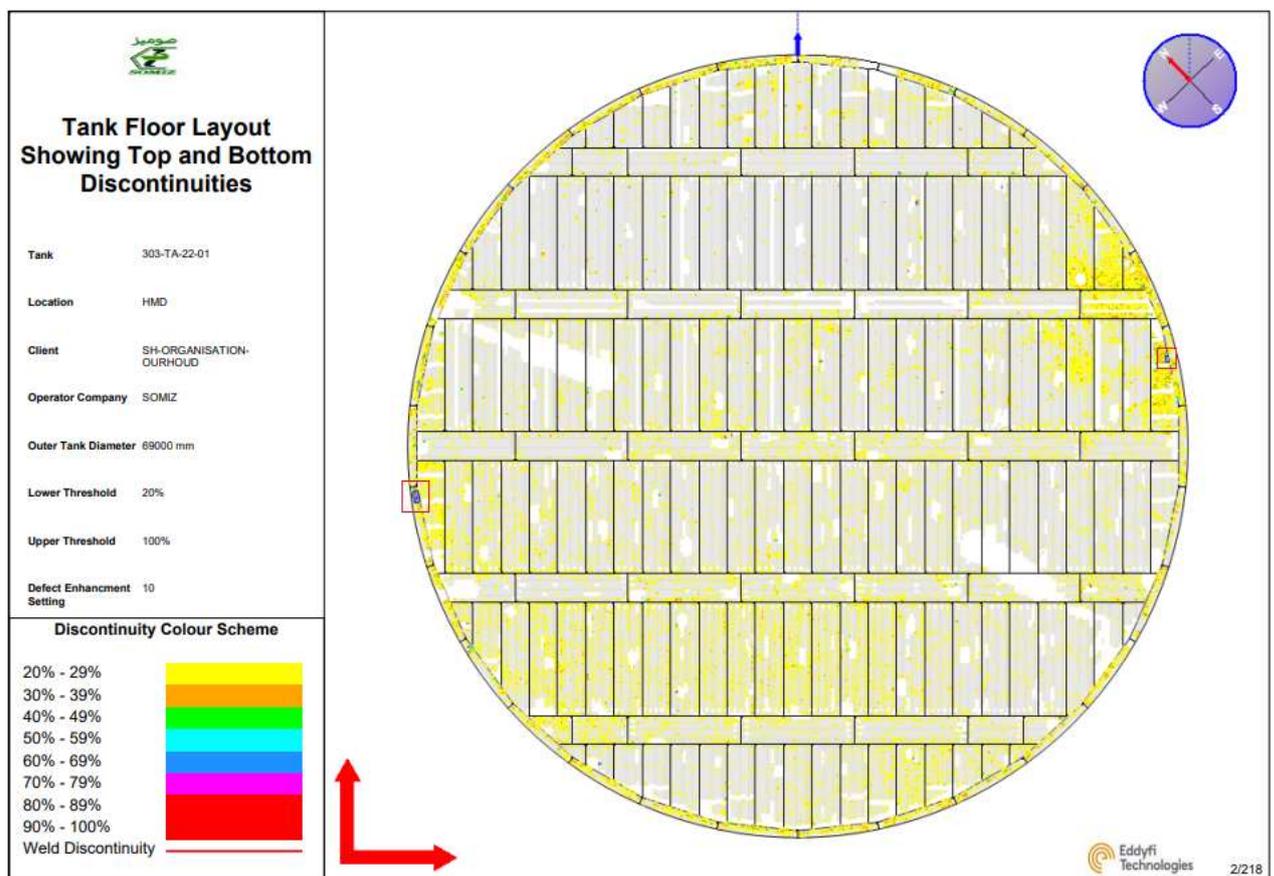


Figure IV.2 : vue générale du fond de Bac 303-TA-22-01

IV.2.3. Identification des défauts de la face supérieure et de la face inférieure :

La figure IV.3 présente une répartition des défauts sur les surfaces supérieure et inférieure du fond. En examinant ces résultats, on constate que la majorité des défauts se trouvent sur la face supérieure, ce qui peut être considéré comme un indicateur de :

- Mauvaise qualité ou implication du revêtement.
- L'épaisseur du revêtement appliqué était insuffisante.
- Une évolution du défaut non traité précédent sur le côté supérieur du fond.

De plus, nous remarquons un petit groupe de défauts sur le côté inférieur du fond, plus précisément sur le côté droit de la troisième, quatrième et cinquième rangée, ce qui peut indiquer que :

- La protection cathodique de cette zone spécifique est insuffisante, tout comme la couverture de la partie extérieure du fond (tôles annulaires), ce qui est inadéquat.
- L'humidité ou d'autres facteurs de corrosion sont présents dans cette zone sous le fond.
- Il est également possible qu'il y ait une fuite dans cette zone, surtout si l'on considère l'énorme quantité de défauts présents sur la face supérieure, qui peuvent à leur tour provoquer des défauts sur la face inférieure.

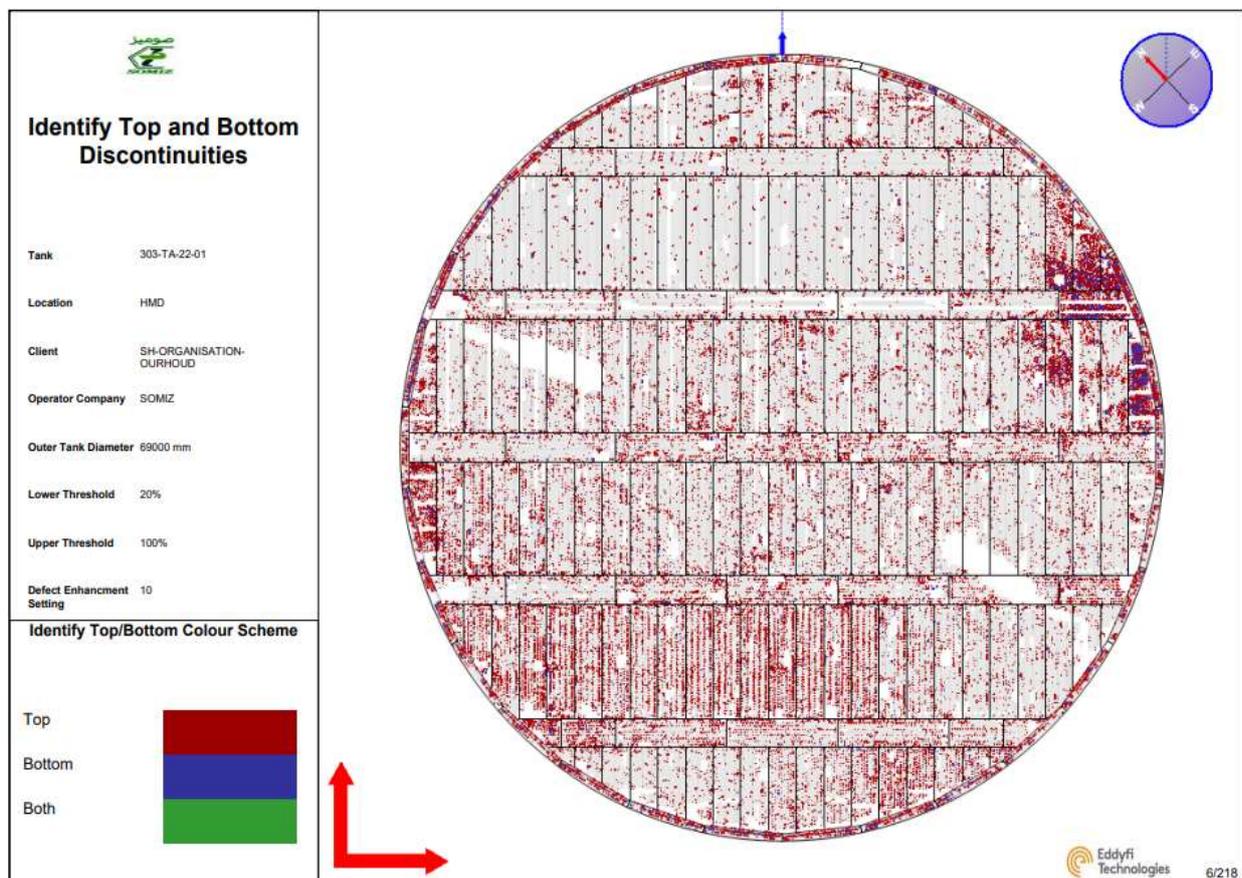


Figure IV.4 : la répartition des défauts entre la face supérieure et la face inférieure

IV.2.4. Identification des défauts à réparer :

IV.2.4.1. Tôles centrales :

Dans notre cas et d'après la figure III.17, l'épaisseur minimale autorisée pour la tôle est de 2,54 mm, avec une épaisseur nominale de 9 mm, ce qui correspond à une perte de métal de :

$$9 - 2.54 = 6.46 \text{ mm} \Rightarrow \frac{6.5}{9} = 0.7177 \approx 72\%$$

Donc tout défaut qui dépasse 72 % de perte de métal doit être réparé.

IV.2.4.2. Les tôles concernées par la réparation:

Tableau IV.1 : les défauts à réparer

Rangée	Tôle	Perte de métal maximale %	Position (Top/Bottom)
1	5	79	Top
2	5	90	Bottom
	6	80	Top
3	17	100	Top
	20	86	Bottom
	25	100	TOP & BOTTOM
4	1	94	Bottom
	3	86	Top
	4	85	Top
	5	75	Top
	7	95	Bottom
5	7	75	Top
	19	94	Top
	23	79	Top
	27	100	Top
6	1	82	Top
	3	100	Top
	7	74	Top
7	9	77	Top
	12	76	Bottom
	13	85	Top
8	3	90	Top
	7	100	TOP & BOTTOM
9	1	77	Top
	6	97	Top
	9	99	Top
10	7	100	TOP & BOTTOM
11	2	100	Top
	6	99	Top

Le rapport fournit des informations sur l'emplacement et la taille des défauts, tôle par tôle, ce qui permet de déterminer la meilleure méthode de réparation et la taille appropriée de la rustine à installer, le cas échéant. Pour mieux comprendre, nous allons présenter quelques exemples.



Figure IV.5: schéma de couleur de discontinuité

R2 T5 :

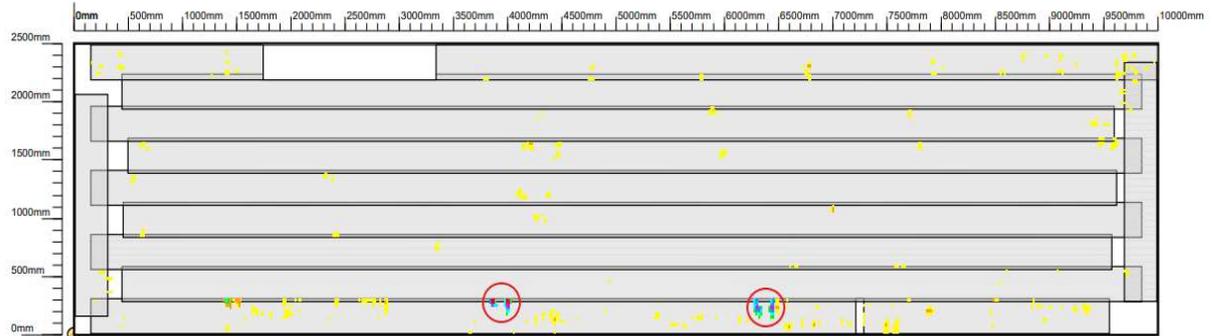


Figure IV. 6 : Rangée 2 Tôle 5

R3 T17 :

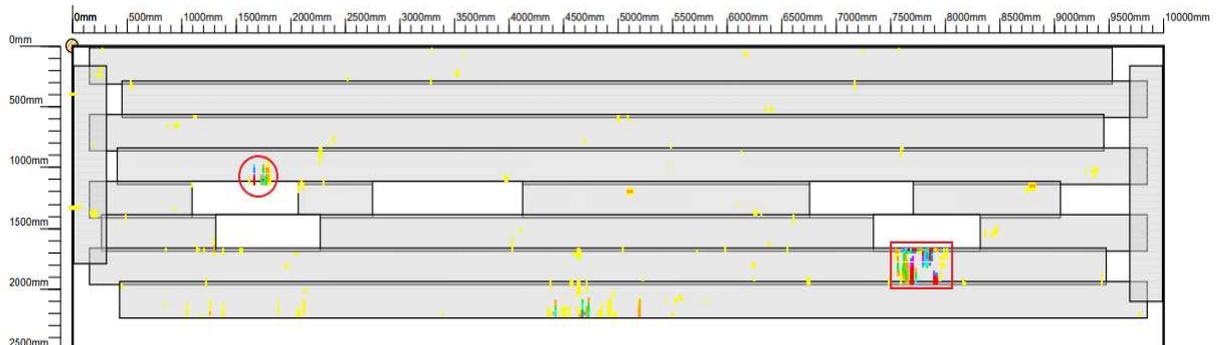


Figure IV. 7 : Rangée 3 Tôle 17

R4 T7 :

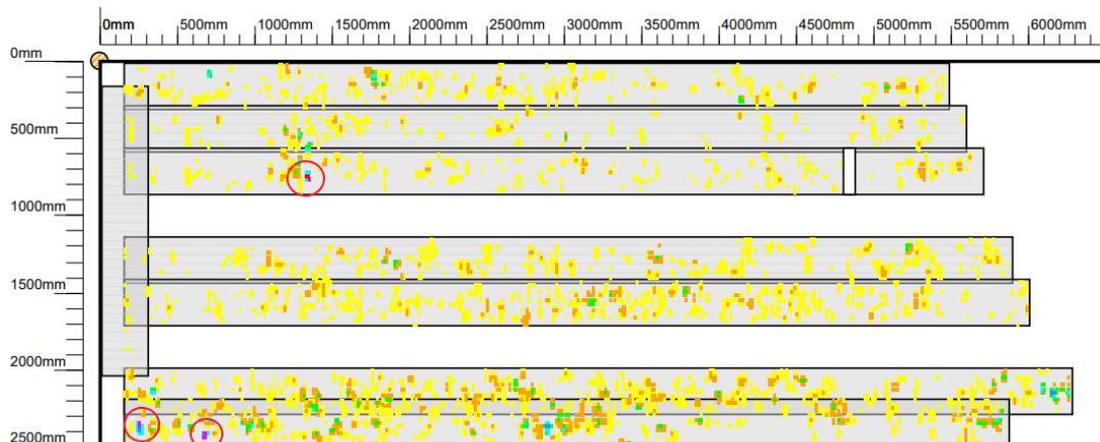


Figure IV. 8: Rangée 4 Tôle 7

R5 T27 :

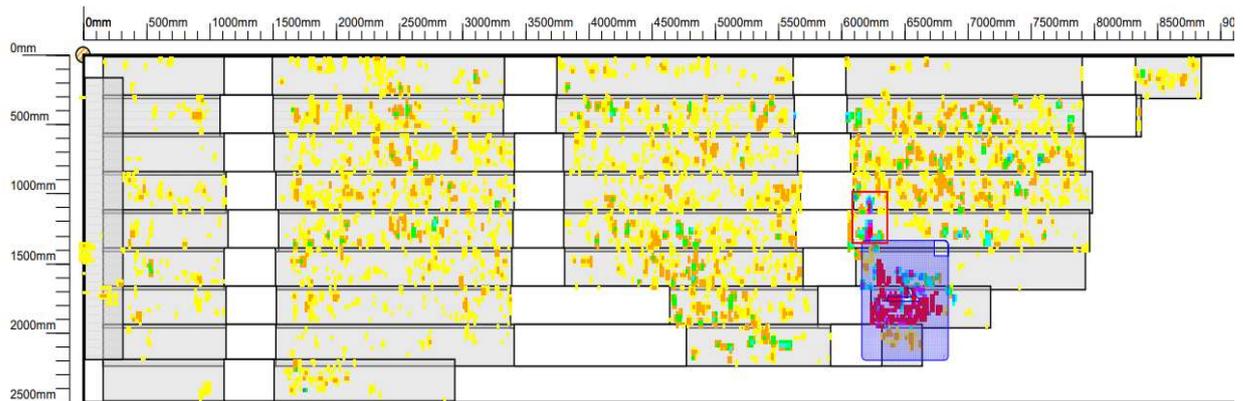


Figure IV. 9: Rangée 5 Tôle 27

R7 T9 :

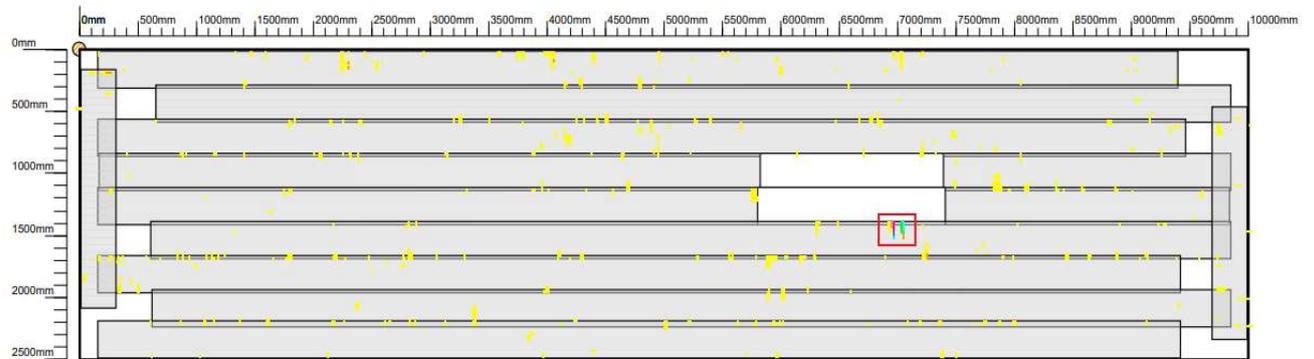


Figure IV. 10 : Rangée 7 Tôle 9

IV.2.4.3. Tôles annulaires :

IV.2.4.3.1 Calcul de la contrainte dans la première virole de la robe :

Selon la formule III. 1 nous avons calculé la contrainte dans la première virole de la robe

$$\frac{[2.34 \times D \times (H-1)]}{t} = \frac{[(2.34) \times (226.37) \times (41.01-1)]}{0,8937} = 23714.3661 \text{ PSI}$$

À partir de la figure IV.10 nous pouvons déduire que l'épaisseur minimale de la tôle annulaire autorisée dans ce cas est de 0,17 pouce, soit 4,318mm.

Plate Thickness ^a of First Shell Course (Inches)	Stress ^b in First Shell Course (pounds per square inch)			
	<24,300	<27,000	<29,700	<32,400
$t \leq 0.75$	0.17	0.20	0.23	0.30
$0.75 < t \leq 1.00$	0.17	0.22	0.31	0.38
$1.00 < t \leq 1.25$	0.17	0.26	0.38	0.48
$1.25 < t \leq 1.50$	0.22	0.34	0.47	0.59
$t > 1.50$	0.27	0.40	0.53	0.68

Figure IV.11 : Norme de l'épaisseur minimale de la tôle annulaire

Ce qui correspond à une perte de métal de :

$$9 - 4,318 = 4,682 \text{ mm} \Rightarrow \frac{4,69}{9} = 0,5202 \approx 52.02\%$$

Donc tout défaut qui dépasse 52.02% de perte de métal doit être réparé.

IV.2.4.4. Tôles concernées par la réparation :

Les tôles concernées sont portées dans le tableau IV.2

Tableau IV.3 : les tôles annulaires à réparer

Annulaire	N° de défauts	Perte de métal maximale %	Poin de référence
2	2	63	Bottom-right
7	2	58	Bottom-left
9	1	57	Bottom-left
20	4	73	Bottom-left
24	2	66	Bottom-left
26	1	51	Bottom-left
30	1	55	Bottom-left

Nous pouvons voir dans le rapport des tôles annulaires, l'emplacement et la taille des défauts afin de décider de la meilleure méthode de réparation et de la taille de la rustine à installer si nécessaire, en particulier parce qu'il y a plus de restrictions aux réparations effectuées dans la zone critique.

Annulaire 2 :

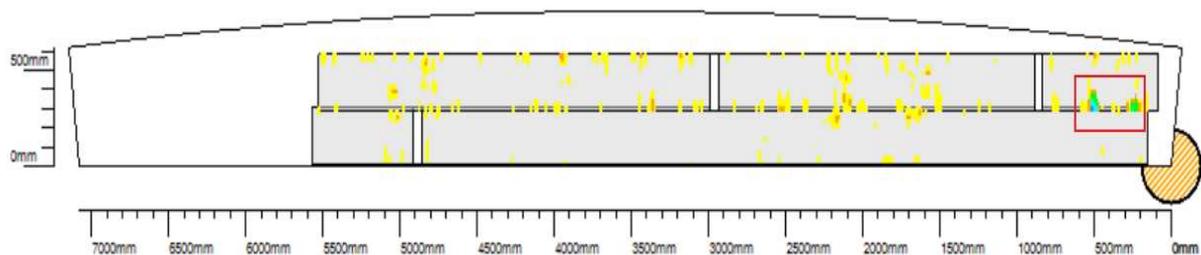


Figure IV.12 : tôle annulaire 2

Annulaire 7 :

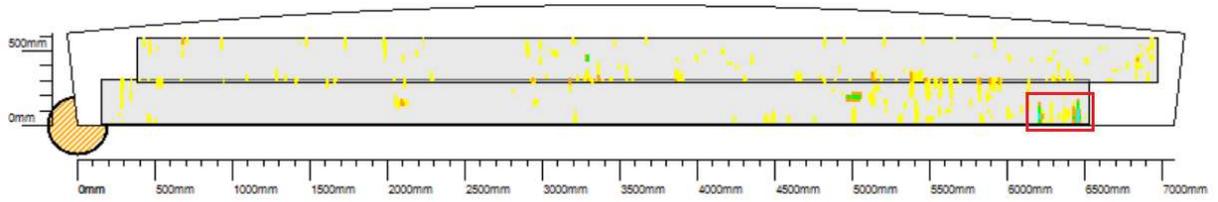


Figure IV.13 : tôle annulaire 7

Annulaire 9 :

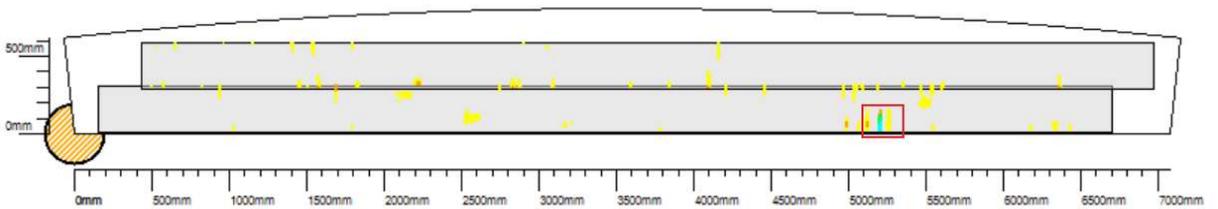


Figure IV.14 : tôle annulaire 9

Annulaire 20 :

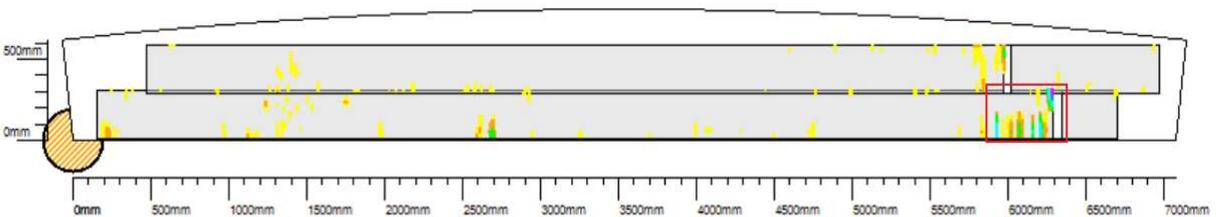


Figure IV.15 : tôle annulaire 20

Annulaire 24 :

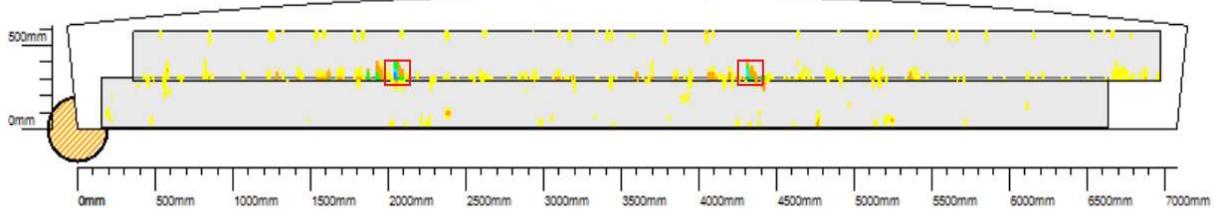


Figure IV.16 : tôle annulaire 24

Annulaire 26 :

Pour l'annulaire 26, la perte de métal n'a pas atteint 52,11 %, mais elle s'en approche (51 %), il est donc préférable de la réparer.

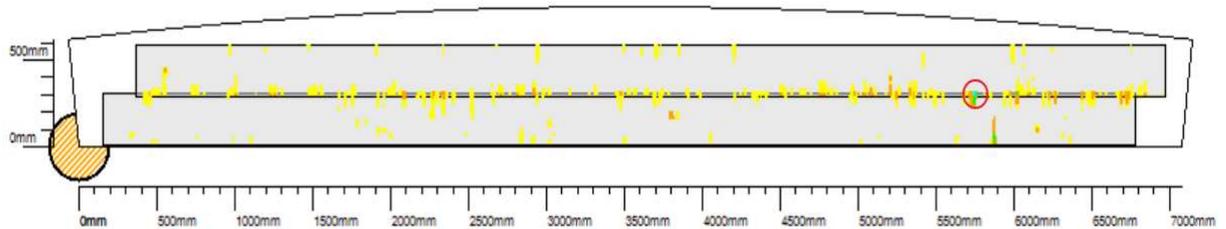


Figure IV.17 : tôle annulaire 26

Annulaire 30 :

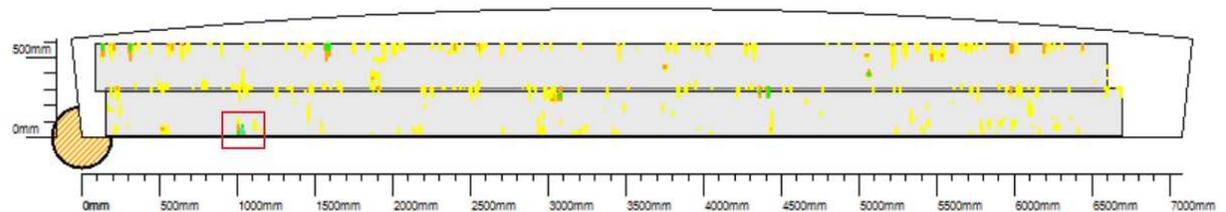


Figure IV.18 : tôle annulaire 30

IV.2.5. Épaisseur minimale pour les tôles avant la prochaine inspection :

L'identification des défauts qui nécessitent une réparation n'est pas suffisante, car, en fonction du taux de corrosion, des défauts plus petits peuvent passer sous le seuil de 2,54 mm avant la prochaine inspection, d'autant plus que les petits défauts sont plus nombreux, ce qui peut provoquer des fuites et la défaillance du fond du bac.

Une méthode admissible pour déterminer l'épaisseur minimale acceptable du fond pour l'ensemble du réservoir ou pour certaines parties est donnée par la relation ci-après :

$$MTR = (\text{minimum de } RT_{bc} \text{ ou } RT_{ip}) - O_r (S_t P_r + UP_r) \quad \text{IV.1}$$

Où :

MTR = Épaisseur minimale restante à la fin de l'intervalle O_r .

O_r = Intervalle d'année pour la prochaine inspection.

RT_{bc} = épaisseur minimum mesurée pour la partie inférieure.

RT_{ip} = épaisseur minimum mesurée du côté supérieur.

S_tP_r = vitesse de corrosion du côté supérieur du fond.

UP_r = vitesse de corrosion de la partie inférieure du fond.

Remarque :

- $S_tP_r = 0$ Pour les zones revêtues du fond, cette condition n'est utilisée que si la durée de vie prévue du revêtement est supérieure ou égale à O_r .

- $UP_r = 0$ Pour les zones qui ont une protection cathodique efficace.

Dans notre situation, nous pouvons utiliser la valeur $UP_r = 0$, car le rapport montre que la majorité des défauts se trouvent dans la partie supérieure du fond.

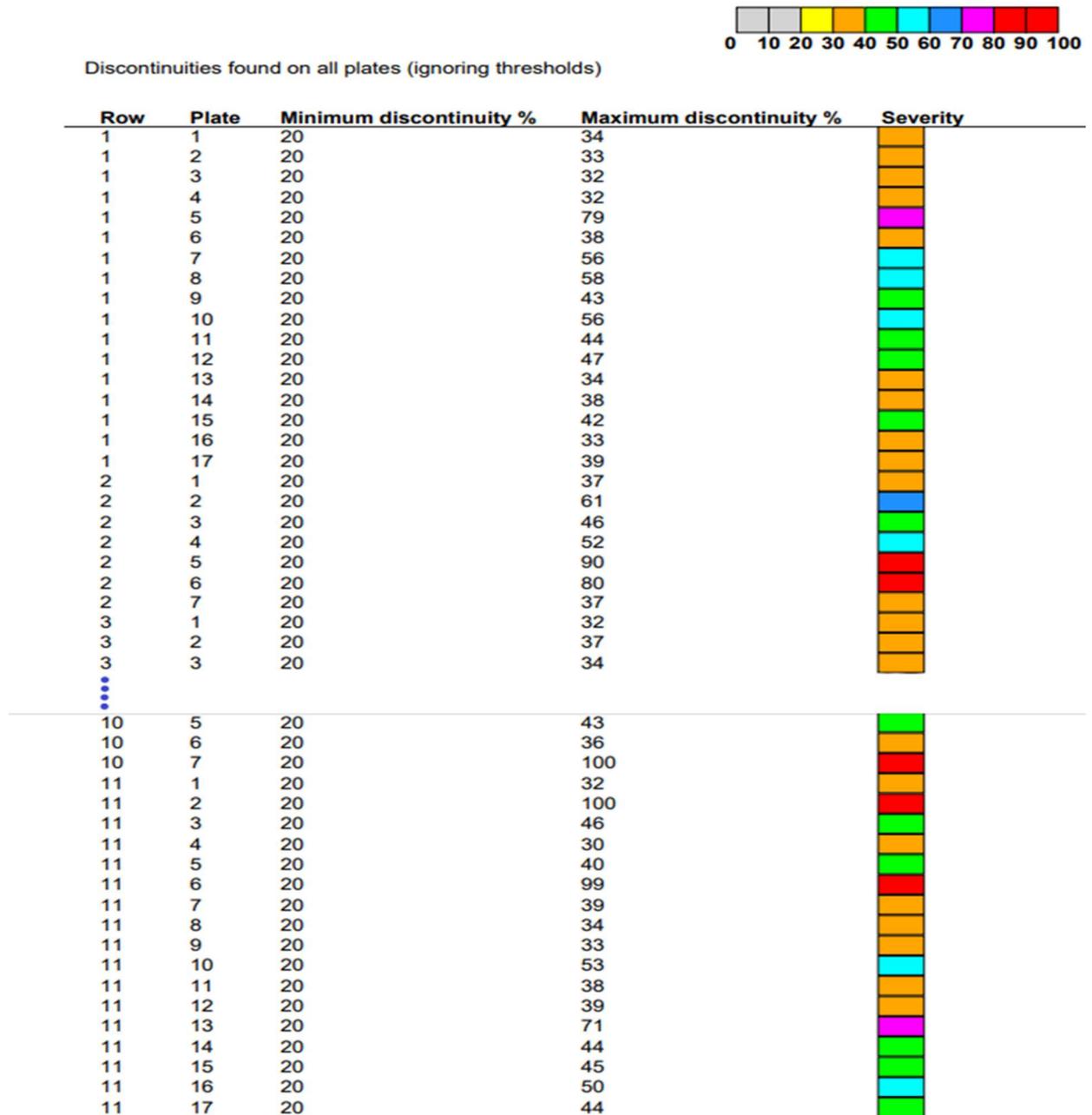
À partir de là, nous pouvons supposer que la protection cathodique est adéquate pour la partie inférieure du fond.

Cependant, pour la même raison, nous ne pouvons pas utiliser la valeur $S_tP_r = 0$, car il est possible de supposer que le revêtement de la partie supérieure est insuffisant pour protéger le fond.

Et $O_r = 10$ ans, tel qu'il est utilisé couramment dans notre cas et par de nombreux autres opérateurs.

IV.2.5.1. Calcul de l'épaisseur minimale moyenne :

Pour cela, nous devons trouver l'épaisseur minimale de chaque tôle du fond de notre bac.
À partir du rapport de la perte maximale de métal pour chaque tôle :



Total number Of plates for Tank 303-TA-22-01 = 173

Figure IV.19 : les pertes maximales de metal pour chaque tôle

En divisant la somme de la perte maximale de métal de chaque tôle par le nombre de tôles :
Le rapport nous donne une perte de métal maximale moyenne de :

$$\frac{8855}{173} = 51,1849 \%$$

D'après la figure IV.18 Une pertes de métal de 51,1849% d'épaisseur nominal de 9 mm correspond à une perte de 4,60 mm . L'épaisseur minimale moyenne du côté supérieur est :

$$RT_{ip} = T_{nominal} - h \quad \text{IV.2}$$

Avec :

$T_{nominal}$ = l'épaisseur nominale de la tôle en *mm*

h = pertes de métal du côté supérieur en *mm*

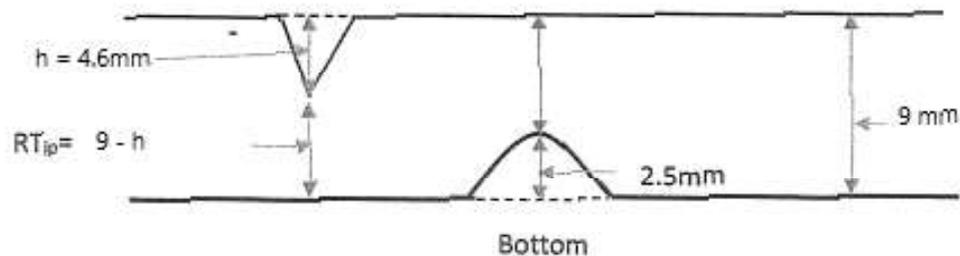


Figure IV.20 : l'épaisseur minimale moyenne du côté supérieur

En utilisant la formule IV.2 ; nous avons donc une épaisseur minimale moyenne du côté supérieur :

$$RT_{ip} = 9 - 4.6 = 4.4 \text{ mm}$$

IV.2.5.2. Calcul de la vitesse de corrosion :

- Pour calculer la vitesse de corrosion, on utilise l'épaisseur minimale restante après réparations.
- On suppose un taux linéaire de corrosion basé sur l'âge des bacs

Sans tenir compte de l'année du début de l'exploitation, et en prenant en compte la période allant de l'année de fabrication du réservoir (2001) jusqu'à l'année de l'inspection (fin 2022), ce qui correspond à une période de 22 ans.

Ainsi, nous avons $T_{nominal} = 9 \text{ mm}$, et nous avons $RT_{ip} = 4.4 \text{ mm}$, dans une période de 22 ans Et la vitesse de corrosion S_tP_r est de :

$$S_tP_r = \frac{T_{nominal} - RT_{ip}}{N_{ans}} = \frac{(9 - 4.4)}{22} = 0.209 \text{ mm / an}$$

Ce qui nous donne une épaisseur minimale requise :

$$MTR = (4.4) - 10(0.209 + 0)$$

$$MTR = 2.31 \text{ mm} < 2.54 \text{ mm}$$

Donc l'épaisseur minimale de la tôle n'est pas respectée dans une période de 10 ans selon la figure III.17

Il est impératif de ne pas ignorer ces défauts, car ils pourraient atteindre une épaisseur inférieure à la limite critique de 2,54 mm Cette situation pourrait entraîner des fuites, des fissures et une accélération de la corrosion, voire des problèmes plus graves.

Il est essentiel de prendre en compte que l'évolution de ces défauts ne sera détectée qu'au moment de la prochaine inspection, d'où la nécessité de palier à ces problèmes en adoptants les solutions adéquates.

IV.2.6. Solutions possibles :

Les facteurs qui déterminent le choix de la solution sont une combinaison de facteurs de sécurité et de facteurs économiques.

Dans ce cas, en plus de la réparation de tous les défauts graves (épaisseur inférieure à 2,5 mm), l'opérateur est invité à choisir une ou plusieurs des solutions suivantes :

- **Installation de revêtement :**

Si la majorité des défauts se trouvent sur la face supérieure du fond, on peut supposer que le revêtement est insuffisant, un revêtement suffisamment bon pour garantir l'intégrité de la surface du fond pendant la période donnée (O_r) doit être installé en respectant les normes de l'api 652 .

Cette solution, bien que possible, est très risquée, car l'évolution de la corrosion est souvent imprévisible, il est préférable de la coupler soit à un intervalle d'inspection plus court, soit à une réparation des défauts qui sont proches de la marque de 2,5 mm.

- **Modification de l'intervalle d'inspection :**

L'opérateur devra s'assurer que l'intervalle avant le prochain inspection interne est raccourci, pour déterminer l'intervalle approprié dans notre cas, nous pouvons utiliser la formule suivante:

$$MTR = 2.5 \leq (4.4) - O_r (0.209 + 0)$$

$$\Rightarrow O_r \leq 9 \text{ ans}$$

mais comme la vitesse de corrosion calculée et l'épaisseur minimale sont des moyennes, il est préférable de supposer un intervalle plus court jusqu'à la prochaine inspection (5 ans par exemple) .

- **Remplacement complet du fond de bac ou de tôles spécifiques :**

pour le remplacement des tôles spécifiques, il est nécessaire lorsque la corrosion est très généralisée ou que les dommages sont trop importants, ainsi que lorsque les défauts sont trop dispersés et qu'une rustine ne peut pas être appliquée de manière efficace.

D'autre part, le remplacement du fond du bac peut poser un problème économique. En général, le remplacement des tôles endommagées est une option moins coûteuse et plus rapide, sauf si l'intégrité du fond est à risque.

Dans notre cas, cette solution n'a pas de sens, car les dégâts sont généralement faibles, le métal est suffisamment intact, ce sera un énorme gaspillage d'argent et de temps .

- **Réparation préventive :**

C'est la solution la meilleure et la plus sûre, sans risquer l'évolution imprévue du taux de corrosion, ni dépendre du revêtement (le revêtement ne peut pas protéger contre la corrosion de la face inférieure), ni de raccourcir l'intervalle entre les inspections, ce qui peut coûter plus cher si la date de la prochaine inspection est trop rapprochée, une réparation préventive des défauts qui n'ont pas encore causé une épaisseur inférieure à 2,5 mm est parfaite.

Pour identifier la nouvelle épaisseur minimale pour les réparations préventives pour les 10 prochaines années, nous pouvons utiliser la vitesse de corrosion calculée de la manière suivante :

$$\mathbf{MTR = S_t P_r \times O_r + 2.5} \quad \text{IV.3}$$

Ou $S_t P_r \times O_r$ est la perte de métal prévue pour les années à venir, ce qui nous donne :

$$\mathbf{10(0.209) + 2.5 = 4.59 \text{ mm}}$$

qui correspond à tous les défauts supérieurs à la perte de métal de 51% .

S'il est accompagné d'un délai court avant la prochaine inspection et d'un revêtement suffisamment bon, le seuil sera beaucoup plus élevé que 51%.

- **Remarque :**

si l'opérateur décide d'opter pour cette seule solution, sans utiliser un revêtement adéquat et de procéder à une nouvelle inspection après 10 ans, il est préférable de calculer le taux de corrosion pour chaque tôle ou zone spécifique du fond, et d'utiliser la même équation pour obtenir le seuil approprié de défauts à réparer, ce qui permet d'économiser de l'argent et du temps pour mettre le bac en service plus tôt.

IV.3. Etude du deuxième bac :

le deuxième bac c'est le bac 818 RTO situé à ARZEW , ORAN
Le nom de chaque bac est exclusif dans le monde d'entier , il n'existe pas de bac avec des noms identiques



Figure IV.21 : Bac 818 RTO

IV.3.1. Les caractéristiques du bac :

BATENCO - SECOMOC			
APPENDIX	AP1650 H	YEAR COMPLETED	2005
EDITION	1998	REVISION N°	0
NOMINAL DIAMETER	67.02 M	NOMINAL HEIGHT	17.08 M
NOMINAL CAPACITY	50 000 M3	DESIGN LIQUID LEVEL	15.9 M
DESIGN SPECIFIC GRAVITY	0.81	MAXIMUM OPERATING TEMP.	35
DESIGN PRESSURE	ATM.	PARTIAL STRESS RELIEF	ATM.
MANUFACTURE'S SERIAL N°	0257	PURCHASER'S TANK N°	818
FABRICATED BY	BATENCO-SECOMOC		
ERECTED BY	BATENCO-SECOMOC		
DATES DES EPREUVES			

Figure IV.22 : tableau statistique du bac 818 RTO

- L'épaisseur nominale des tôles centrales est 6.70 mm.
- L'épaisseur nominale des tôles annulaires est 13 mm.
- L'épaisseur de la première virole est de 25 mm = 0.9842 inch.
- Revêtements renforcés à couche épaisse : revêtement époxy renforcé par des fibres de verre avec un minimum de 3 mm à l'état sec

IV.3.2 Inspection visuelle :

IV.3.2.1. Les accessoires du fond :

L'état général des accessoires du fond était acceptable, à l'exception de quelques traces de corrosion visibles dans certains supports du toit, et de quelques purges, ainsi que de la dégradation du revêtement de certaines pièces, qui a provoqué l'accumulation de saletés et d'autres particules qui étaient probablement présentes dans le pétrole brut stocké.

Pour ces raisons, une nouvelle inspection s'imposerait, et comme la technique MFL n'est pas applicable dans ce cas, la meilleure option est l'inspection par ondes ultra-soniques, pour déterminer l'état de l'équipement.



Figure IV. 23: flotteur et Pipe



Figure IV. 24 : défaut détecte par œil dans les Supports.



Figure IV. 25 : détection des défauts par vision des Purges



Figure IV. 26 : l'accumulation de saleté

IV.3.2.2. L'inspection par ULTRASON :

L'inspection UT a montré une très faible perte de métal dans les zones aveugles du scanner MFL, à l'exception de ce qui suit :

- **Supports de toit flottants :**

Tableau IV.4 : Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R3P4

Tôle R3/P4			
Point	Coordonnées		Mesure (mm)
	X	Y	
1	7400	150	3.33
2	7600	150	4.95
3	7750	150	5.96

Tableau IV.5 : Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R11P2

Tôle R11/P2			
Point	Coordonnées		Mesure (mm)
	X	Y	
1	800	1100	6.07
2	1200	1100	6,62
3	800	1400	4.86
4	1000	1400	3.46
5	1200	1400	5.39
6	800	1600	5.49
7	1200	1600	5.44

Tableau IV. 6: Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R18/P5

Tôle R18/P5			
Point	Coordonnées		Mesure (mm)
	X	Y	
1	3100	250	5.39
2	3100	500	5.88
3	3100	750	5.67
4	3100	1000	6.31
5	3100	1250	5.93
6	3100	1500	5.77
7	3100	1750	5.8
8	3300	250	5.8
9	3300	500	5,83
10	3300	750	5.58
11	3300	1000	5.89
12	3300	1250	5.77
13	3300	1500	6.23
14	3300	1750	5.91
15	3500	250	5.52
16	3500	500	5.68
17	3500	750	3.65
18	3500	1000	6.3
19	3500	1250	5.71
20	3500	1500	5.83
21	3500	1750	5.9

Tableau IV. 7: Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R21/P5

Tôle R21/P5			
Point	Coordonnées		Mesure (mm)
	X	Y	
1	5200	100	6.05
2	5400	100	6.11
3	5400	150	5.96
4	5600	250	6.06
5	5600	750	3.24
6	5600	1000	5.99
7	5600	1500	5.97
8	5600	1750	5.69
9	5750	250	6.22
10	5750	500	6.13
11	5750	750	6.1
12	5750	1000	5.94
13	5950	1500	5,99
14	5950	1500	6.15
15	5950	1750	6,05

Tableau IV. 8: Résultats de l'inspection ultrasonique de support de la tôle R27/P6

Tôle R27/P6			
Point	Coordonnées		Mesure (mm)
	X	Y	
1	2050	500	5.73
2	2200	500	4.59
3	2350	500	4.99
4	3000	1500	4.72
5	50	1550	4.81
6	3350	1350	5.26
7	3150	1500	3.98

IV.3.2.3 La surface du fond :

L'inspection visuelle a montré que la surface du fond est en très mauvais état, avec de multiples défauts visibles, allant d'une simple corrosion à des trous visibles, une corrosion agressive, perforations des tôles et des fissures dans les joints de soudure (plus de 90 défauts visibles).



Figure IV. 27: Defaut détecté par l'inspection visuelle dans la surface du bac



Figure IV. 28: Corrosion généralisée visible à l'œil nue



Figure IV.29 : Défauts dans les joints de soudure

IV.3.3. Vue générale du fond :

Dès le premier coup d'œil sur le rapport de perte de métal de 80% à 100%, on peut voir un nombre anormal de défauts graves, exactement **2 592** défauts, avec une large distribution, la majorité étant groupée et situé sur la face inférieure du fond, avec quelques défauts isolés.

En outre, il y a quelques défauts de soudure, entre les rangs 17 et 18 autour de la 6ème et 7ème tôle et entre le rang 31 et la zone critique.

La position du défaut rejette la possibilité d'un mauvais revêtement, et nous pouvons suspecter que la cause la plus probable de ces graves défauts est :

- Un certain nombre de défauts antérieurs, petits ou moyens, qui n'ont pas été réparés ou traités correctement, d'autant plus qu'il y a un nombre considérable des rustines, ce qui implique une réparation précédente , car on peut s'attendre à un grand nombre de défauts si la vitesse de corrosion est élevée ou si le sol est agressif pour le métal, mais cela n'explique pas que les défauts atteignent plus de 80% en moins de 10 ans (il est très probable que cela ait pris moins de 10 ans parce qu'il y a un grand nombre de pénétrations sur le fond du bac).

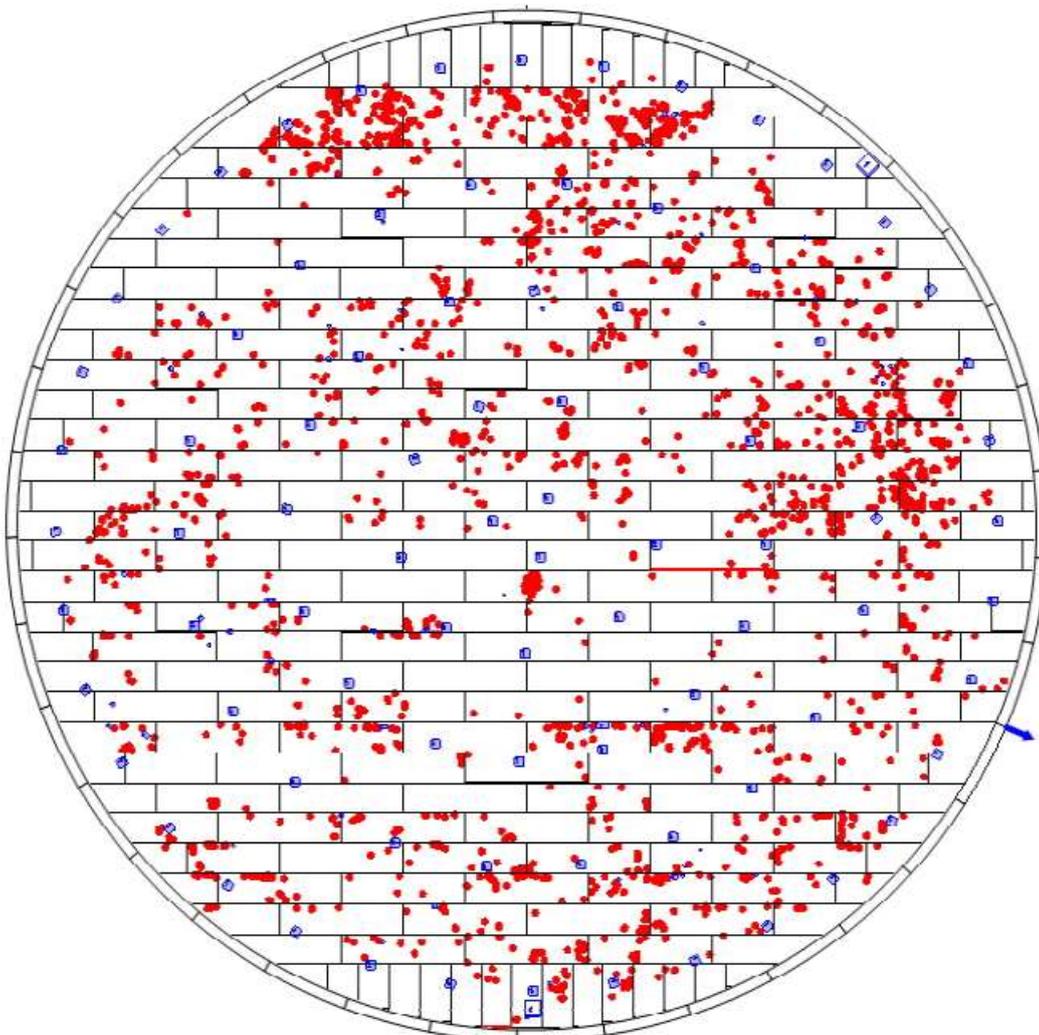


Figure IV. 30: Vue générale montrant des défauts de 80 à 100 % de perte de métal

Pour les défauts allant de 70% à 79% de perte de métal, les dommages sont bien pires avec environ 4 052 défauts, et c'est encore pire pour les défauts allant de 60% à 69% avec environ 5932 défauts, et presque toutes les tôles ont un défaut d'environ 50% à 59% de perte de métal avec plus de 8203 défauts autour de tout le fond, Les raisons possibles sont les suivantes :

- Comme presque tous les défauts sont situés sur la surface inférieure du fond, on peut supposer que la protection cathodique est très faible, mais nous ne pouvons pas en être sûrs car la région annulaire qui serait la plus affectée présente très peu de défauts.
- Un sol très corrosif, en raison d'une humidité élevée ou d'une fuite, ce qui est très possible puisqu'il y a un grand nombre de défauts graves qui provoqueraient certainement une fuite.

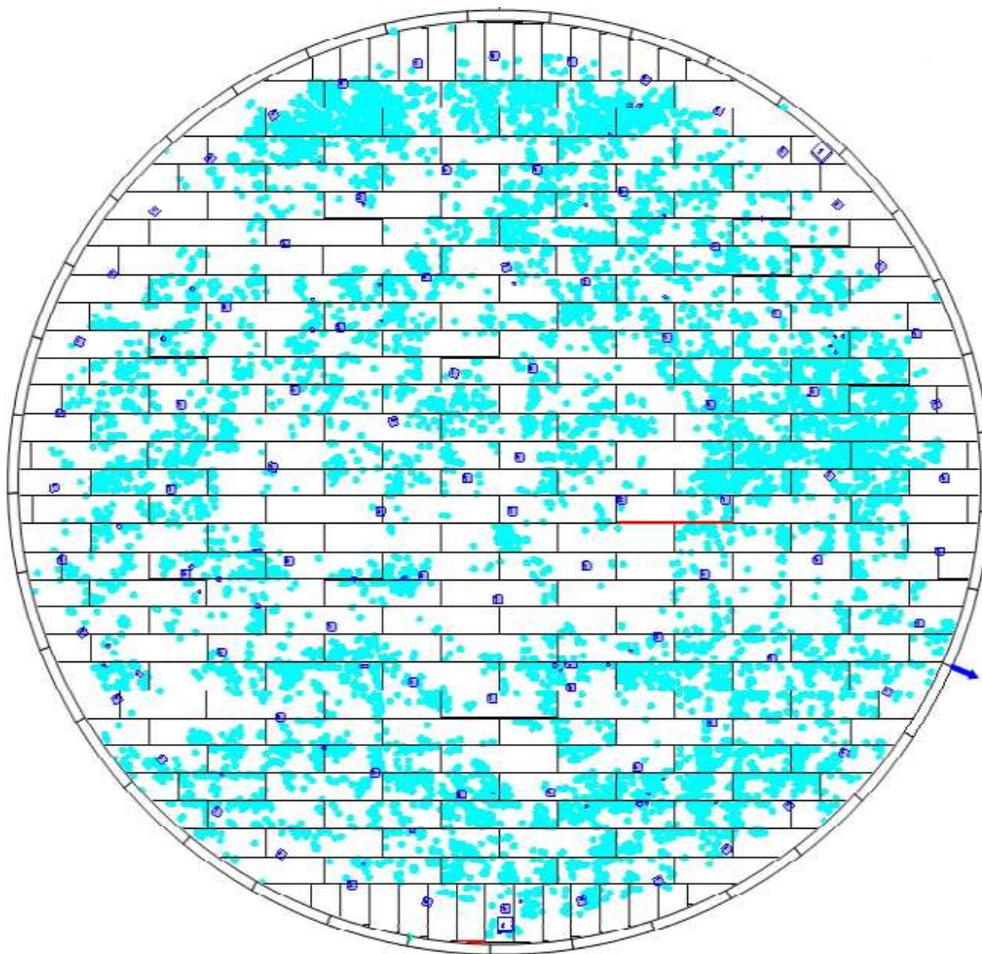


Figure IV. 31 : les défauts de 50%-59% de perte de métal

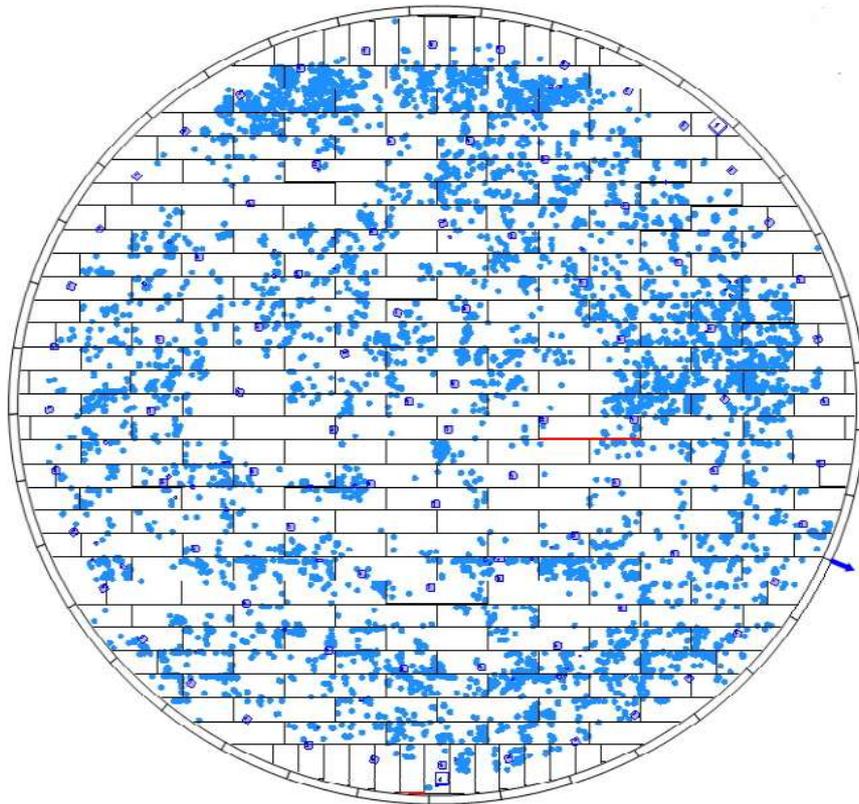


Figure IV. 32: 60%-69% de perte de métal

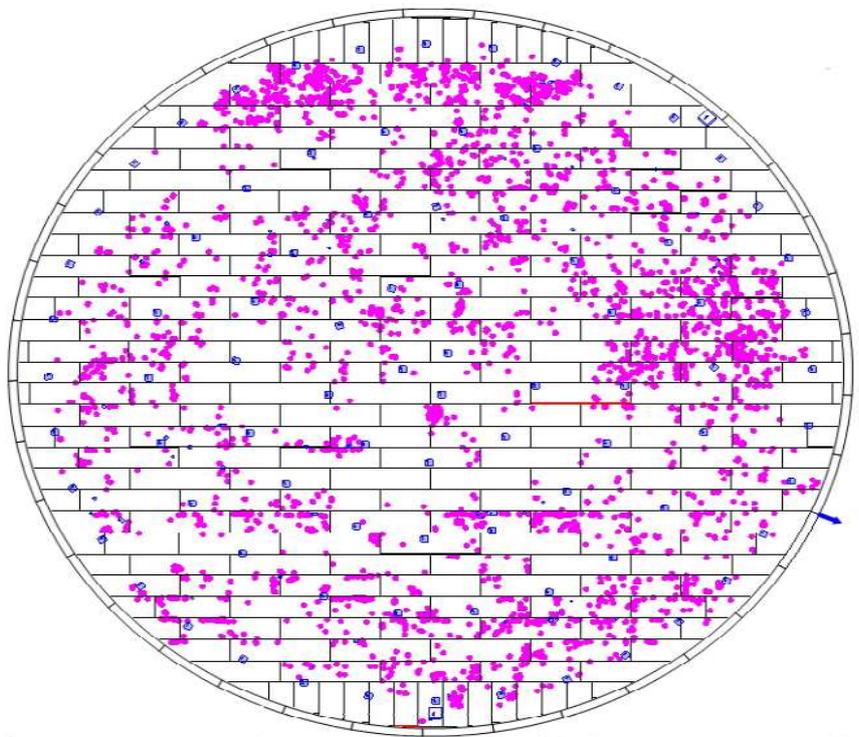


Figure IV. 33 : les défauts de 70% - 79 % de perte de métal

IV.3.4. Identification des défauts à réparer :

Dans notre cas, d'après la figure III.17, l'épaisseur minimale autorisée pour la tôle est de 1.27 mm, avec une épaisseur nominale de 6.7 mm, ce qui correspond à une perte de métal de :

$$6.7 - 1.27 = 5.43 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \frac{5.43}{6.7} = 0.8104 = 81.04\%$$

Tout défaut qui dépasse 81.04% de perte de métal est supérieur à la limite.

La liste du nombre de défauts et leur rangée et tôle respectives ainsi que la perte maximale de métal sont présentées à l'annexe 2. Dans les figures qui suivent nous montrons quelques tôles avec l'emplacement des défauts.

1) R12 T8 :

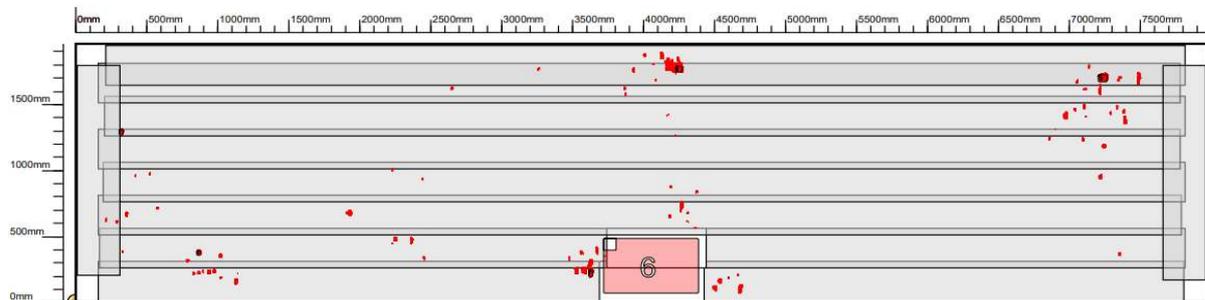


Figure IV. 34: Rangée 12 tôle 8

2) R13 T5 :

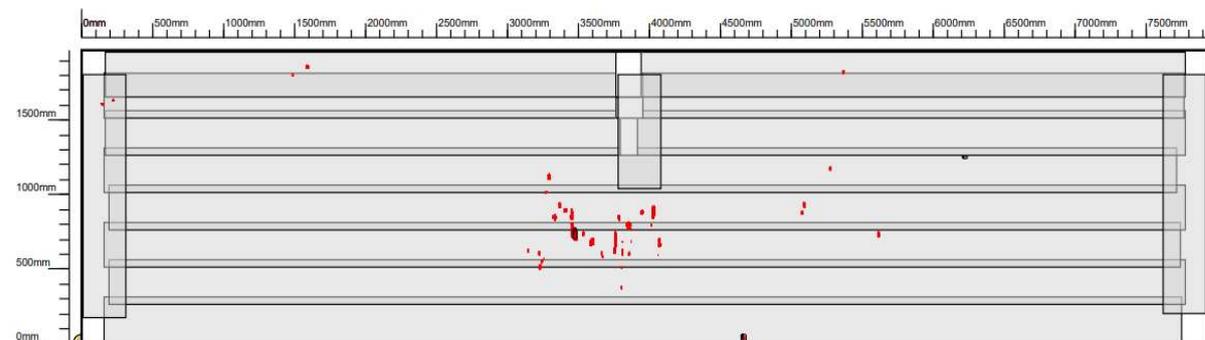


Figure IV. 35: Rangée 13 tôle 5

3) R14 T5 :

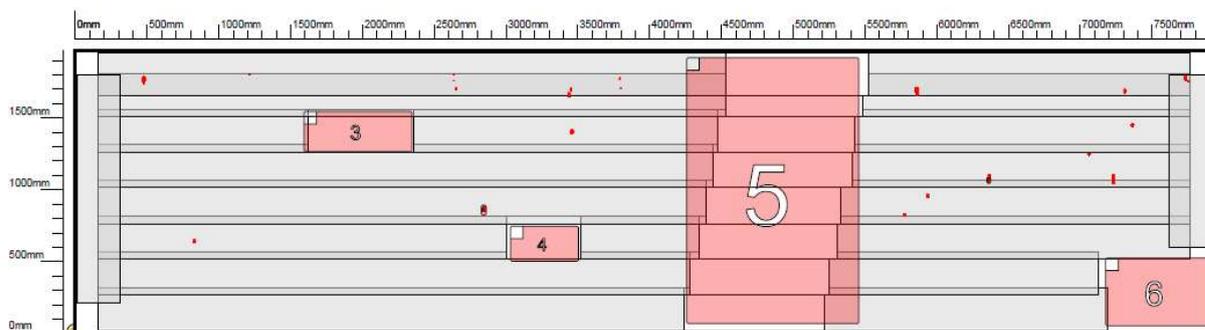


Figure IV. 36: Rangée 14 tôle 5

4) R14 T8 :

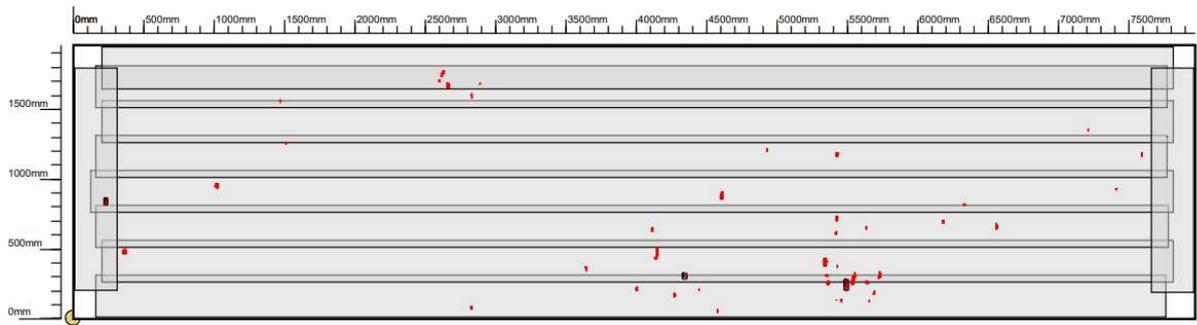


Figure IV. 37: Rangée 14 tôle 8

5) R27 T8 :

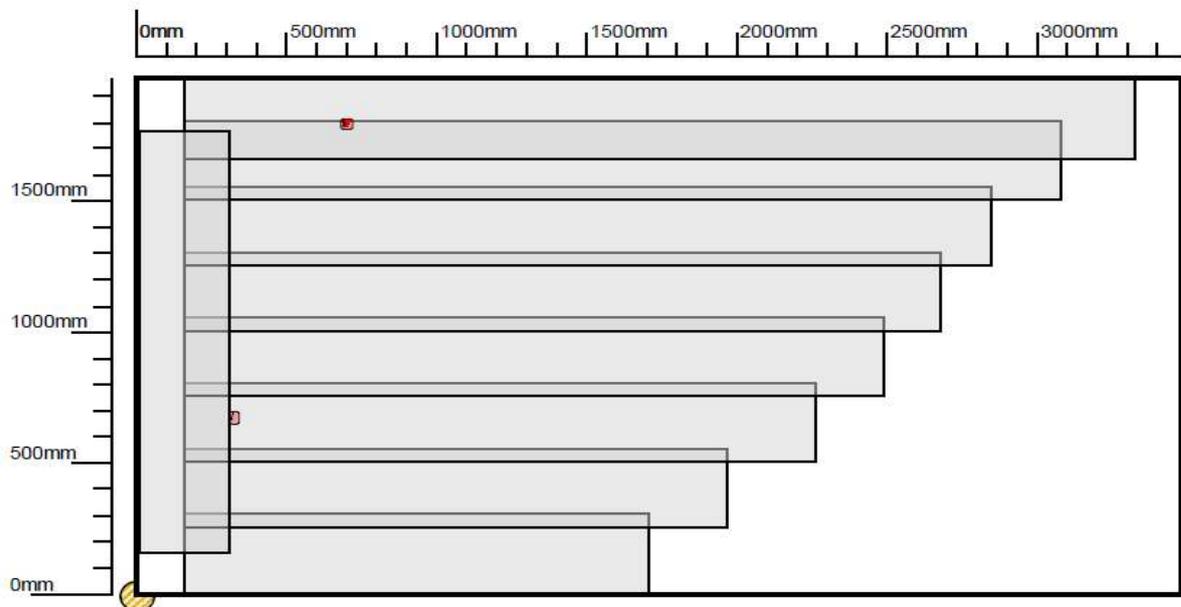


Figure IV. 38: Rangée 27 tôle 8

IV.3.5. Tôles annulaires :

IV.3.5.1 Calcul de la contrainte dans la première virole de la robe :

Nous pouvons calculer la contrainte sur la première virole en utilisant l'équation III. 1

$$\frac{[(2.34) \times D \times (H-1)]}{t} = \frac{[(2.34) \times (219.8818) \times (52.1653-1)]}{0.9842} = 26748.368 \text{ PSI}$$

Plate Thickness ^a of First Shell	Stress ^b in First Shell Course (pounds per square inch)			
	Course (Inches)	<24,300	<27,000	<29,700
$t \leq 0.75$	0.17	0.20	0.23	0.30
$0.75 < t \leq 1.00$	0.17	0.22	0.31	0.38
$1.00 < t \leq 1.25$	0.17	0.26	0.38	0.48
$1.25 < t \leq 1.50$	0.22	0.34	0.47	0.59
$t > 1.50$	0.27	0.40	0.53	0.68

Figure IV. 39: l'épaisseur minimale de tôle annulaire de fond

À partir de la figure V-38, l'épaisseur minimale de la tôle annulaire autorisée dans ce cas est de 0,22 pouce, soit 5,588mm.

Ce qui correspond à une perte de métal de :

$$13 - 5,588 = 7,412 \text{ mm} \Rightarrow \frac{7,412}{13} = 0,5701 \approx 57.01\%$$

Donc tout défaut qui dépasse 57.01% de perte de métal doit être réparé.

Les tôles mentionnées sont très proches du seuil de sécurité, il est donc préférable de les réparer.

L'inspection UT a donné des résultats similaires, sauf dans le cas de l'annulaire 30, pour lequel l'opérateur devra vérifier une autre fois, ou utiliser les résultats donnés avec l'inspection MFL.

Tableau IV. 9: les tôles ont réparé d'une façon préventive

Annulaire	Perte de métal maximale %	Position (x)	Position (y)	Top/Bottom
8	54	5534	32	Bottom
25	56	460	109	Top
30	52	492	204	Bottom

Cependant, comme le fond est en très mauvais état, l'opérateur procède à une deuxième inspection à l'aide de l'ultra-son afin de procéder à une double vérification.

Les mesures d'épaisseur UT de la zone critique sont prises en millimètre tous les 1000 mm à partir de la première annulaire (porte de visite) dans le sens horaire, avec une longueur moyenne de tôle de 5,7 m .

L'inspection UT a donné des résultats similaires, sauf dans le cas de l'annulaire 30, pour lequel l'opérateur devra vérifier une autre fois, ou utiliser les résultats donnés avec l'inspection MFL.

Tableau IV. 10: les resultas de l'inspection UT

Distance (m)	Mesures (mm)	Distance (m)	Mesures (mm)
45	9.16	155	8.48
46	9.22	156	8.84
47	8.98	157	8.81
48	9.56	158	8.86
49	9.41	159	9.16
50	9.19	160	8.64
51	7.47	170	9.20
52	9.05	171	9.14
53	8.75	172	9.19
54	8.92	173	8.95
55	9.18	174	8.92
150	9.12	175	9.12
151	9.21	176	9.04
152	8.95	177	9.15
153	7.95	178	9.08
154	7.79	179	9.00

les figures suivantes montrent les démentions et la localisation des défauts relatifs à la tôle annulaire :

6) Anulaire 8 :

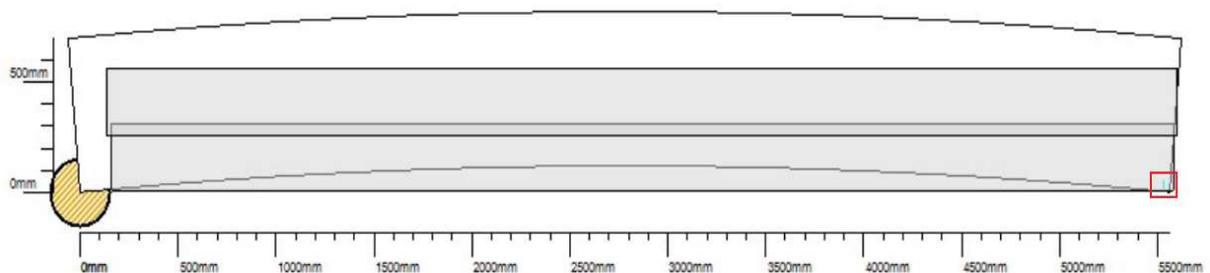


Figure IV. 40: tole annulaire 8

7) Anulaire 25 :

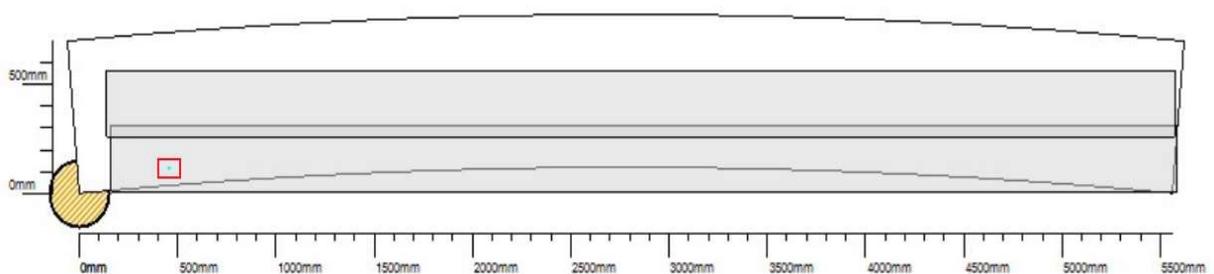


Figure IV. 41: tole annulaire 25

8) Anulaire 30 :

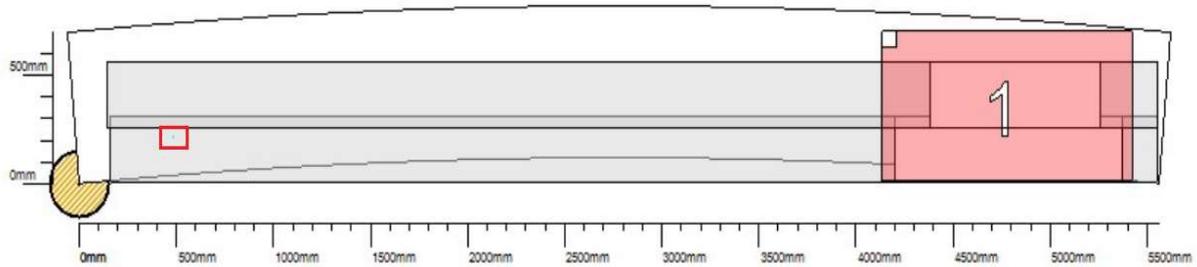


Figure IV. 42: tole annulaire 30

IV.3.6. Prévision de l'épaisseur minimale des tôles avant la prochaine inspection :

Dans ce cas, nous sommes confrontés à un certain nombre de problèmes, de sorte que nous ne pouvons pas utiliser la même formule, du moins les résultats ne seront pas fiables.

les problèmes sont :

Nous ne pouvons pas calculer la vitesse de corrosion : comme le montre **annexe 2** il y a un grand nombre de défauts qui ont atteint une perte de métal de 100% , il est donc impossible d'obtenir une vitesse de corrosion précise à partir des données que nous avons obtenues de l'inspection , car nous ne savons pas quand ces défauts ont atteint 100% , il est possible que cela ait pris **16 ans** , **10 ans** , **5 ans** , ou même moins de temps , d'autant plus que nous n'avons pas les données de l'épaisseur de la tôle de ces dernières années .

Cependant, grâce à l'api 653, nous pouvons savoir une pour ce problème.

l'épaisseur minimale moyenne des tôles sera imprécise : pour la même raison , Dans des cas similaires, l'opérateur devra calculer une épaisseur minimale moyenne pour chaque tôle, ou même pour une zone spécifique de la tôle

IV.3.6.1. l'épaisseur minimale moyenne des tôles :

sera imprécise pour la même raison , Dans des cas similaires, l'opérateur devra calculer une épaisseur minimale moyenne pour chaque tôle, ou même pour une zone spécifique de la tôle.

Cependant, pour les besoins de l'étude, nous calculerons l'épaisseur minimale requise afin de proposer des solutions en fonction des résultats.

$$MTR = (\text{minimum de } RT_{bc} \text{ ou } RT_{ip}) - O_r (S_t P_r + UP_r)$$

Dans notre situation, nous ne pouvons pas utiliser la valeur $UP_r = 0$ la majorité des défauts se trouvent dans la partie inférieure du fond.

  partir de là, nous pouvons supposer que la protection cathodique n'est pas suffisante pour la partie inférieure du fond.

Cependant, pour la même raison, nous pouvons utiliser la valeur $S_t P_r = 0$, car il est possible de supposer que le revêtement de la partie supérieure est suffisant pour protéger le fond.

Et $O_r = 10$ ans

IV.3.6.2. Calcul de l'épaisseur minimale moyenne :

du **annexe 2** et en tenant compte des tôles qui n'y sont pas mentionnées, on peut calculer une perte de métal maximale moyenne :

$$\frac{17473}{228} = 76,63 \%$$

Une pertes de métal de **76,63 %** d'épaisseur nominal de $6.7mm$ correspondent à une perte de $5.13 mm$.

Et l'épaisseur minimale moyenne du coté inférieure est :

$$RT_{bc} = T_{nominal} - h$$

Avec :

$T_{nominal}$ = l'épaisseur nominale de la tôle en mm

h = pertes de métal du coté inférieure en mm

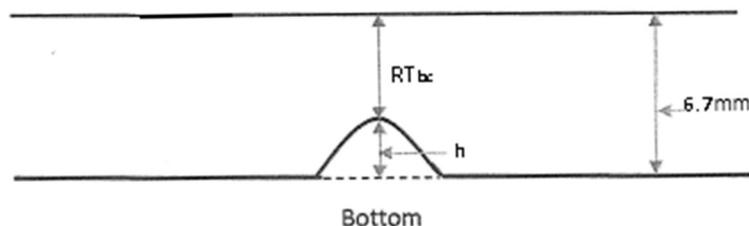


Figure IV. 43: l'épaisseur minimale moyenne du coté inférieure

Donc :

$$RT_{bc} = 6.7 - 5.13 = 1,57 mm$$

IV.3.6.3. l'évaluation de la vitesse de corrosion :

en cas d'absence de données sur l'épaisseur des tôles lors des inspections précédentes, avant et après les réparations, les accidents, ou dans le cas d'un fond où la vitesse de corrosion ne peut être calculée, il est permis de supposer la vitesse de corrosion d'un bac similaire présentant des caractéristiques comparables (diamètre du fond, produits stockés, cycles d'exploitation...), de préférence sur le même site .

nous avons les vitesse de corrosion :

Bac 303-TA-22-01 SH-ORGANISATION- OURHOUD : 0.2 mm/an

Bac 806-TA-RTO : 0.16 mm/an

Donc on prend la **moyenne** :

$$UP_r = 0.18 \text{ mm/an}$$

Ce qui nous donne une épaisseur minimale requise :

$$MTR = (1,57) - 10(0 + 0.18)$$

$$MTR = -0,23 \text{ mm} < 1.27 \text{ mm}$$

Donc l'épaisseur minimale de la tôle n'est pas respectée dans une période de 10 ans

IV.3.7. Les solutions possibles:

- **une installation de protection cathodique :**

Comme le fond est équipé d'un revêtement épais renforcé de fibre de verre conforme aux normes APi 652, et qu'il a prouvé son efficacité en ne présentant pratiquement aucun défaut sur la face supérieure du fond, il n'est pas nécessaire de le modifier ou de l'améliorer.

Cependant, une amélioration de la protection cathodique de la face inférieure est nécessaire, ce qui devra se faire après avoir vérifié l'état des fondations et s'être assuré du taux d'humidité et de l'absence de fuites.

- **une modification de l'intervalle d'inspection :**

Pour déterminer l'intervalle approprié dans notre cas, nous pouvons utiliser l'équation suivante

$$MTR = 1.27 \leq (1,57) - O_r (0.18 + 0)$$

$$\Rightarrow O_r \leq 1,66 \text{ ans}$$

et comme nous l'avons mentionné précédemment, la vitesse de corrosion est une estimation, l'intervalle sera encore plus court que ce qui a été calculé.

- **un remplacement complet du fond de bac ou de tôles spécifiques :**

Dans notre situation, c'est la meilleure solution possible, en raison des dommages importants sur le fond du réservoir, pour les tôles qui ont une petite quantité de défauts, ou une grande quantité mais à proximité, il est suffisant d'installer une rustine.

Cependant, si les défauts sont séparés ou situés sur les bords de la tôle, l'API 653 interdit l'installation de plaques de rustine, sauf dans certaines conditions, auquel cas une désinstallation et une reconstruction de la tôle sont nécessaires.

Si c'est le cas pour un grand nombre de tôles, une étude économique et une étude d'intégrité doivent être réalisées pour décider si une reconstruction de l'ensemble du fond est nécessaire.

○ **une réparation préventive :**

pour identifier la nouvelle épaisseur minimale pour les réparations préventives pour les 10 prochaines années, nous pouvons utiliser la vitesse de corrosion estim de la manière suivante :

$$\mathbf{MTR = UP_r \times O_r + 1.27}$$

Ou $UP_r \times O_r$ est la perte de métal prévue pour les O_r années à venir .

Sa nous donne :

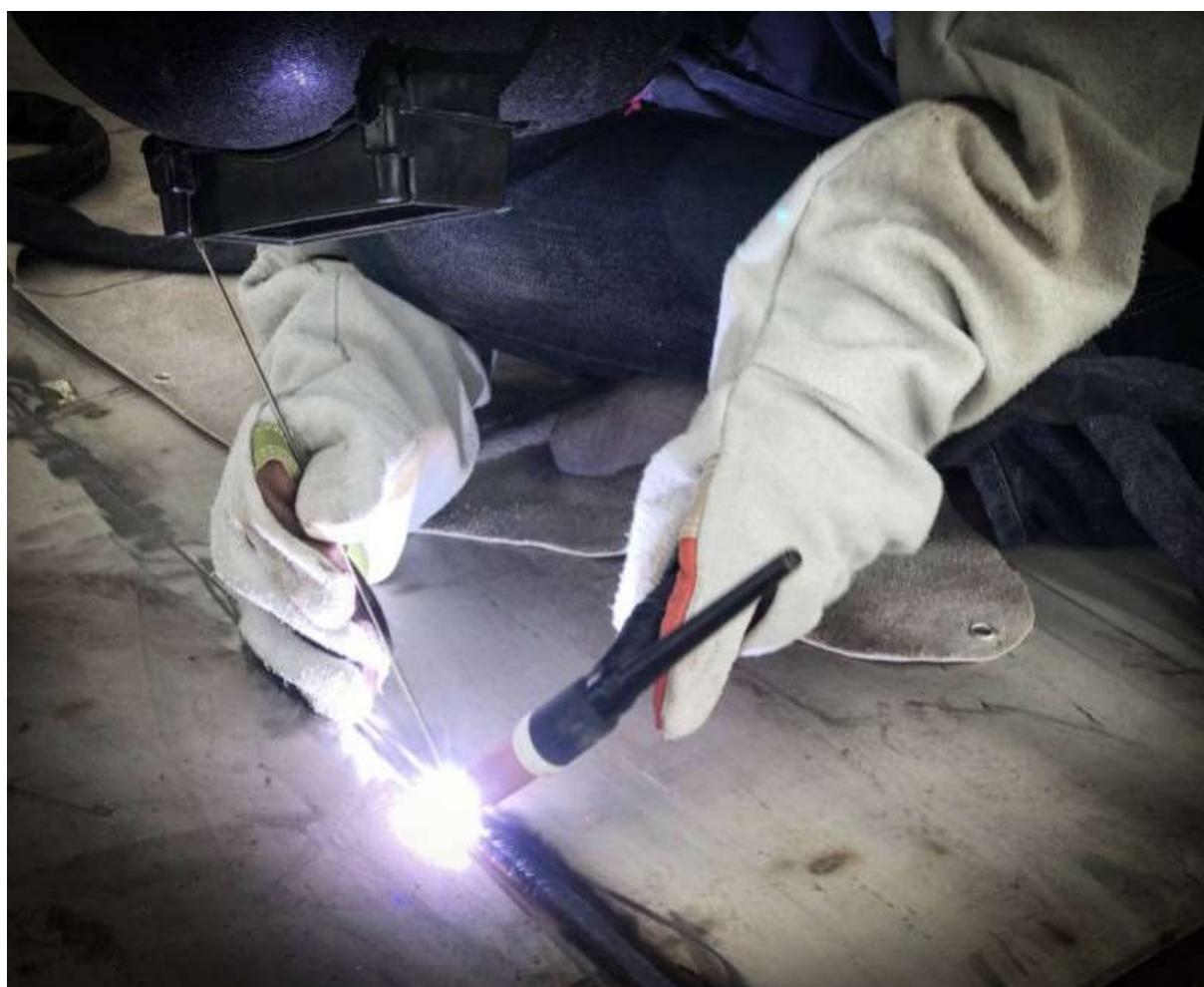
$$\mathbf{10(0.18) + 1.27 = 3,07 \text{ mm}}$$

qui correspond à tous les défauts supérieurs à la perte de métal plus de 45.82% .

• **remarque :** si l'opérateur adopte cette solution, il sera confronté aux mêmes problèmes car plus il y a de défauts à réparer, plus il y a de complications et de restrictions à rencontrer.

CHAPITRE V :

REPARATION DU BAC 303-TA-22-01



V.1. les méthodes de réparation :

Pour la réparation des défauts, des piqûres, de la corrosion, les méthodes autorisées par l'API 653 sont : soudage en fosse, de soudage en revêtement ou de l'application de rustines. Ces méthodes présentent plusieurs avantages lorsqu'il s'agit de traiter les dommages localisés du fond du bac :

V.1.1. Soudage en fosse (pit welding):

Le soudage en fosse (fig V.1) permet des réparations précises et ciblées des zones corrodées du fond du bac. En fusionnant le métal sur les zones spécifiques touchées, il rétablit l'intégrité structurale du fond du bac. Cette technique est économique en termes de coûts et de temps, car elle se concentre uniquement sur les zones endommagées, réduisant ainsi la nécessité de réparations ou de remplacements étendus. Cependant, le soudage en fosse peut ne pas être adapté aux cas de corrosion plus importante, car cela peut nécessiter plusieurs passes et des configurations de soudage complexes.

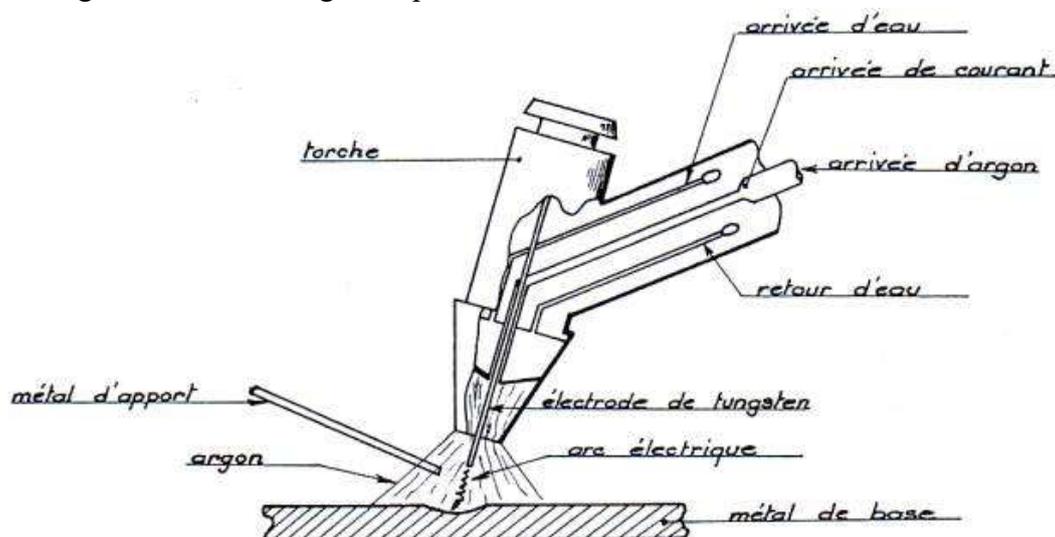


Figure V.1 : Soudage en fosse

V.1.2. Soudage en revêtement (overlay welding) :

Le soudage en revêtement (fig V.2) consiste à appliquer une couche de métal d'apport protectrice sur la surface endommagée du fond du bac. Cette méthode permet non seulement de réparer la corrosion, mais également de fournir une résistance accrue à la corrosion, prolongeant ainsi la durée de vie du bac. Le soudage en revêtement est connu pour sa polyvalence, car il peut être appliqué sur différents matériaux et épaisseurs du fond du bac. Cependant, il peut être plus chronophage et nécessiter une préparation de surface poussée afin d'assurer une adhérence adéquate et prévenir les défauts.



Figure V.2 : Soudage en revêtement

V.1.3. Application des rustines :

L'application de rustines (fig V.3), considérée comme l'une des techniques de réparation les plus efficaces, consiste à souder des plaques de métal sur la zone endommagée du fond du bac. Cette méthode offre une solution de réparation solide et durable, renforçant ainsi les zones affaiblies par la corrosion. L'application de rustines est particulièrement efficace pour les cas de corrosion plus importante du fond du bac. Elle garantit une excellente intégrité structurelle, réduit le risque de nouveaux dommages et assure une performance à long terme du bac. De plus, les rustines peuvent agir en tant qu'anodes sacrificielles, déviant la corrosion du fond du bac et prolongeant ainsi sa durée de vie globale.



Figure V.3 : rustine soudée

Ces techniques de réparation offrent des solutions efficaces pour réparer les dommages de corrosion du fond du bac. Le choix de la méthode appropriée dépendra de la nature et de la gravité de la corrosion, ainsi que des contraintes spécifiques du projet.

Cependant, dans le cas de notre étude, et puisque la seule méthode que nous pouvons calculer et établir un plan et les matériaux nécessaires pour les réparations, nous nous concentrerons sur les réparations avec des rustines.

V.2. La réparation du fond de bac 303-TA-22-0 par pose des rustines :

V.2.1. Les règles et les normes concernant les rustines :

Les limitations pour les rustines dans la zone des tôles centrales sont les suivantes :

- les rustines installées doivent restaurer l'épaisseur de la tôle au moins jusqu'à son épaisseur nominale.

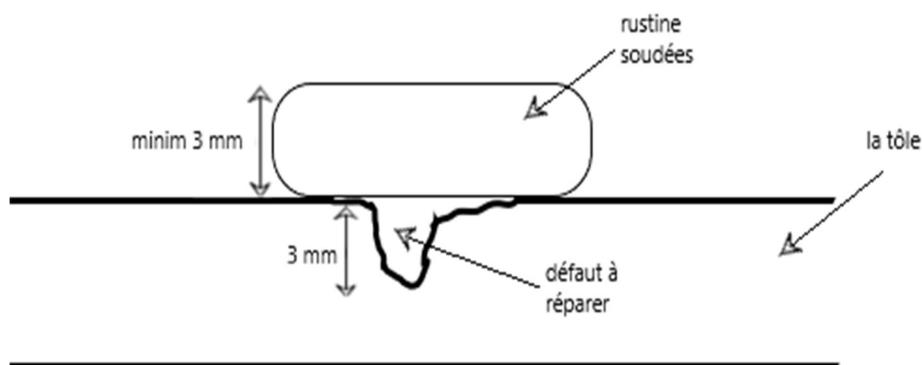


Figure V.4 : l'épaisseur minimale des rustines

- La dimension minimale d'une rustine qui recouvre un joint de fond ou une rustine existante est de 305 mm, La rustine soudée peut être circulaire, oblongue ou polygonale avec des coins arrondis.
- Lorsque le bord d'une rustine est pratiquement parallèle à un joint de soudure, il doit être maintenu à 51 mm (avant ou après le joint).

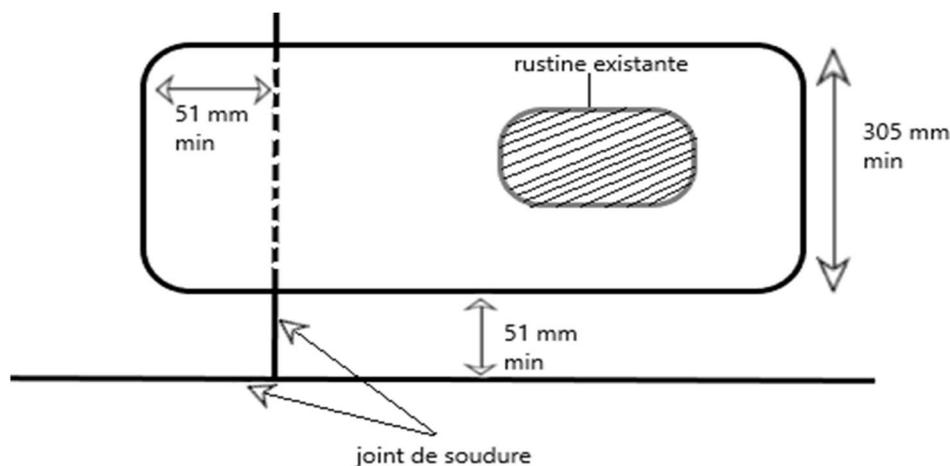


Figure V.5 : les dimensions minimales des rustines couvrant un joint de soudure

- Si aucune des conditions mentionnées ne s'applique, il peut avoir un diamètre minimum de 152.5 mm et dépasser la zone corrodée du tole d'au moins 51 mm.

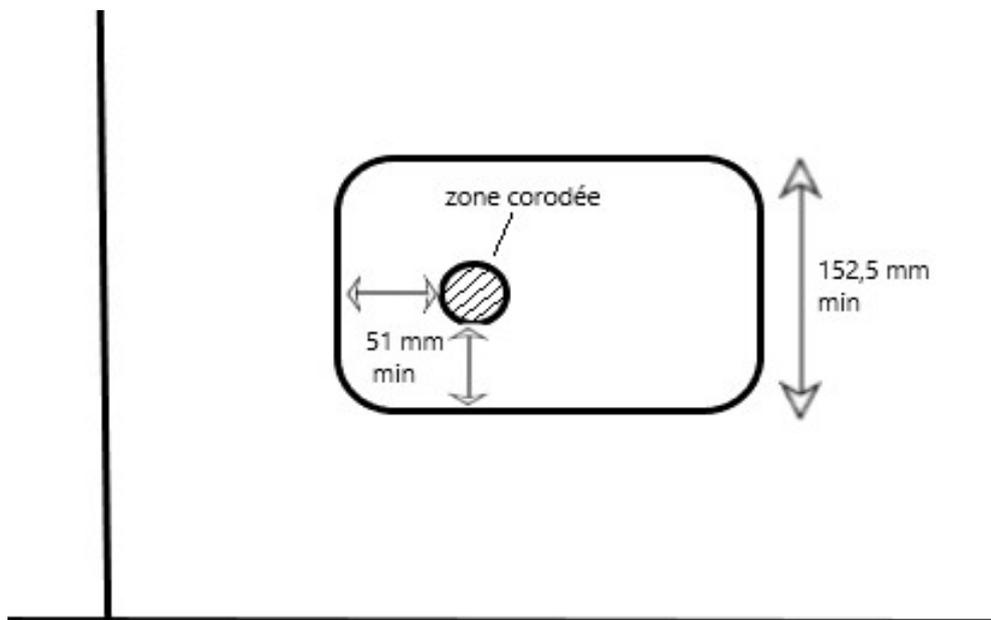


Figure V.6 : les dimensions minimales des rustines loin d'un joint de soudure

- Si une rustine se superpose à un joint à trois tôles, elle doit dépasser le minimum de au-delà des trois soudures.

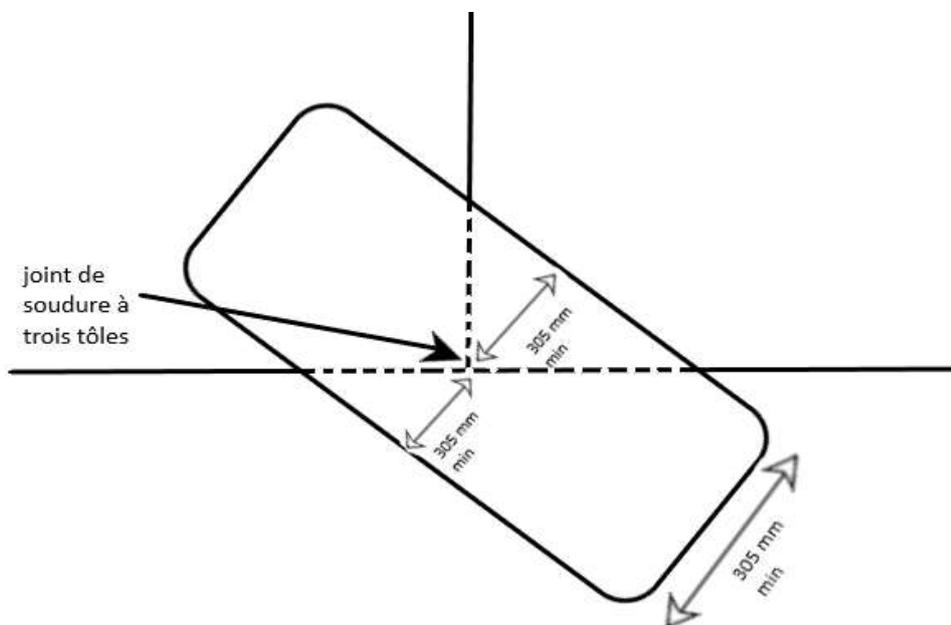


Figure V.7 : les dimensions minimales des rustines couvrant un joint à triple soudure

Les limitations pour les rustines dans la zone critique et la zone annulaire sont les suivantes :

- L'épaisseur maximale des rustines soudées à l'intérieur de la zone critique est de 6.35 mm

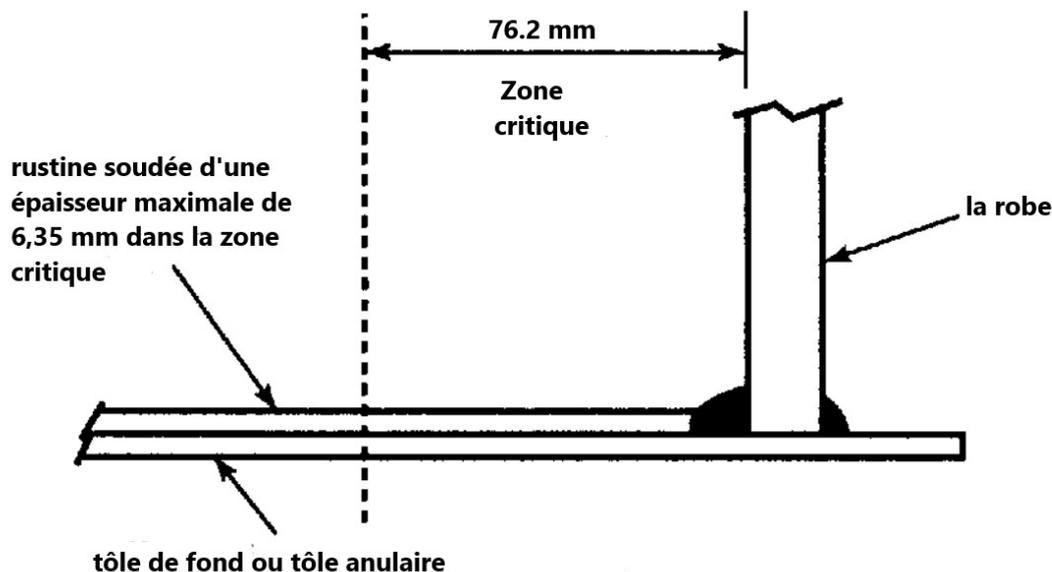


Figure V.8 : l'épaisseur maximale des rustines dans la zone critique

- Lorsqu'une rustine soudée se trouve à moins de 152,4 mm du de la robe, la rustine soudée doit être en forme de "pierre tombale". Les côtés de la rustine soudée en forme de pierre tombale doivent couper le joint entre la robe et le fond à environ 90 degrés.

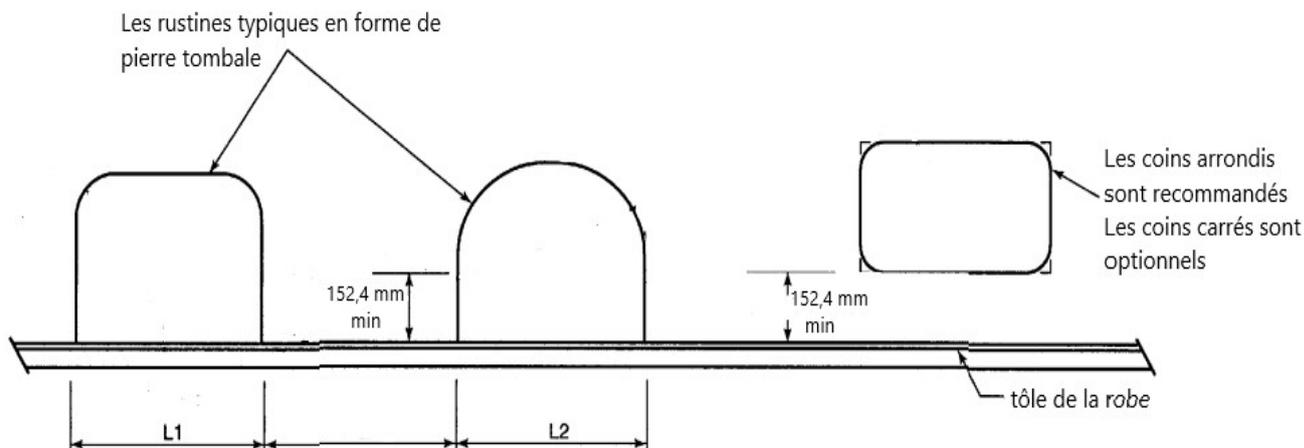


Figure V.9 : la forme et la longueur des rustines dans la zone critique

- La distance maximale entre deux rustines dans la zone critique est égale à la moitié de la valeur la plus faible entre L1 et L2
- La longueur maximale de L1 ou L2 ne doit pas dépasser 609,6 mm
- L'installation d'une rustine soudée par soudage bout à bout à une rustine existante adjacente n'est pas autorisée dans la zone critique.
- Les rustines soudées sur des rustines existantes ne sont pas autorisées dans la zone critique.

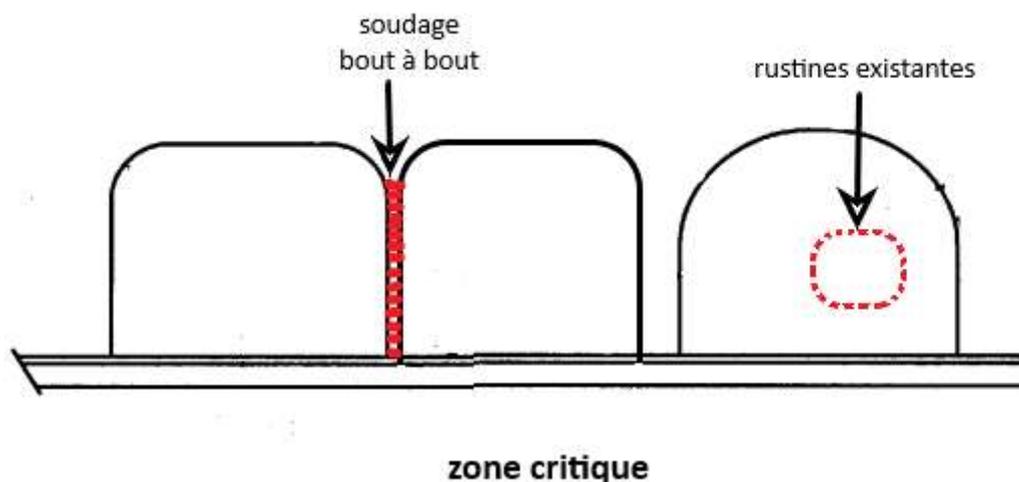


Figure V.10 : les rustines othorisées dans la zone critique

- Les rustines soudées ne sont pas autorisées dans la zone critique d'un fond de bac dont la température de fonctionnement dépasse $93,33^{\circ}\text{C}$ pour l'acier au carbone ou $37,77^{\circ}\text{C}$ pour l'acier inoxydable.

V.2.2. L'acier à utiliser :

Les rustines doivent être composées du même métal que la tôle d'origine ou s'en approcher le plus possible et dans notre cas, il s'agit de l'acier au carbone ASTM A283 GR.C, qui a les propriétés suivantes :

- Densité : La densité de l'acier ASTM A283 GR.C est d'environ $7,85$ et 8 g/cm^3 (ou 7850 kg/m^3).
- Résistance à la traction : La résistance à la traction minimale de l'acier ASTM A283 GR.C est d'environ $380\text{-}515\text{ MPa}$ ($55\ 000\text{-}75\ 000\text{ psi}$).
- Limite d'élasticité : La limite d'élasticité minimale de l'acier ASTM A283 GR.C est d'environ 205 MPa ($30\ 000\text{ psis}$).
- Allongement : L'allongement typique pour l'acier ASTM A283 GR.C est d'environ 25% .
- Dureté : L'acier ASTM A283 GR.C est généralement fourni dans un état laminé à chaud, ce qui lui confère une dureté relativement faible.
- Résistance à la corrosion : L'acier ASTM A283 GR.C offre une résistance à la corrosion généralement adéquate pour des applications structurelles standard. Cependant, il peut nécessiter une protection supplémentaire, telle que la peinture ou l'utilisation d'un revêtement anticorrosion, dans des environnements corrosifs plus agressifs.

V.2.3. La détermination du poids de l'acier :

Nous devons d'abord déterminer la longueur, la largeur et l'épaisseur des rustines nécessaires à la réparation, en respectant les spécifications mentionnées.

Pour déterminer le poids du métal, on peut utiliser la formule suivante :

$$m = t * l * w * 7,85 \quad \text{V.1}$$

Avec : m = Poids de l'acier (kg)

t = Épaisseur de l'acier (mm)

l = Largeur de l'acier (m)

w = Longueur de l'acier (m)

V.3. Identification de la taille et le poids des rustines :

Nous avons d'abord mesuré les dimensions des défauts à réparer, puis en respectant les normes et les règles de l'application des rustines, nous avons calculé les dimensions minimales des rustines nécessaires, avec une épaisseur des rustines uniforme de 9 mm, afin de s'assurer que toutes les zones réparées sont restaurées à l'épaisseur nominale de la tôle.

Nous avons considéré les défauts qui sont proches les uns des autres comme un seul, pour faciliter le calcul de la longueur et de la largeur.

En utilisant la formule V.1, on peut calculer le poids de chaque rustine pour déterminer le poids total de métal nécessaire à la réparation.

V.3.1. tôles centrales :

Tableau V.1 : le poids et les dimensions minimales des rustines nécessaires à la réparation des tôles centrales

Tôle	Longueur des défauts (mm)	Largeur des défauts (mm)	Forme et N° des rustines	Longueur de la rustine (mm)	Largeur de la rustine (mm)	Poids (KG)
R1P5	96,06	21,21	1-rectangle	198,06	152,5	2.1339
R2P5	184,83	69,69	2-rectangle	286,83	171,69	3.4792
	182	121,2		284	223,2	4.4784
R2P6	369,66	100	1-rectangle	471,66	202	6.7312
R3P17	18,2	96,1	2-rectangle	152,5	198,1	2.1343
	333,4	318,15		435,4	420,15	12.9242
R3P20	100	96,1	1-carré	202	202	2.8828
R3P25	36,4	24,3	2-carré	152,5	152,5	1.643
	51,5	51,5		153,5	153,5	1.6646
R4P1	84,9	36,4	1-carré	186,9	152,5	2.0136

	48,5	48,5	1-rectangle	152,5	152,5	1.643
R4P3	51,5	30,3	3-carré	153,5	153,5	1.6646
	36,4	27,3		152,5	152,5	1.643
	48,5	18,2		152,5	152,5	1.643
R4P4	51,5	33,3	1-carré	153,5	153,5	1.6646
R4P5	39,4	27,3	1-carré	152,5	152,5	1.643
R4P7	475	120	2-rectangle	577	305	12.4333
	70	36,4		172	152,5	1.8531
R5P7	51,5	18,2	1-carré	153,5	153,5	1.6646
R5P19	154,53	100	1-rectangle	256,53	202	3.661
R5P23	30,3	27,3	1-rectangle	152,5	129,3	1.393
R5P27	669,63	515,1	1-rectangle	771,63	617,1	33.641
R6P1	103,2	100	1-carré	205,2	205,2	2.9748
R6P3	151,5	18,2	2-rectangle	253,5	152,5	2.7312
	93,9	18,2		195,9	152,5	2.1106
R6P7	51,5	21,2	1-carré	153,5	153,5	1.6646
R7P9	84,8	21,2	1-rectangle	186,8	152,5	2.0126
R7P12	30,3	27,3	1-carré	152,5	152,5	1.643
R7P13	321,2	121,2	1-rectangle	423,2	152,5	4.5596
R8P3	51,5	18,2	1-carré	153,5	153,5	1.6646
	318,15	281,8	1-rectangle	438,15	383,8	11.8806
R8P7	321,2	97	1-rectangle	423,2	199	5.9499
R9P1	151,5	115,14	1-rectangle	253,5	217,14	3.8889
R9P6	454,5	312,09	1-rectangle	556,5	414,09	16.2806
R9P9	157,6	100	1-rectangle	259,6	202	3.7048
	48,5	18,2	1-carré	152,5	152,5	1.643
R10P7	524,2	206,04	1-rectangle	626,2	308,04	13.628
R11P2	157,56	39,4	1-rectangle	259,56	152,5	2.7965
R11P6	75,75	54,5	1-rectangle	305	305	6.5722
Totale			39	10521,82	8113,31	190.34017

V.3.2. tôles annulaires :**Tableau V.2 : le poids et les dimensions minimales des rustines nécessaires à la réparation des tôles annulaires**

Annulaire	Longueur des défauts (mm)	Largeur des défauts (mm)	Forme et N° des rustines	Longueur de la rustine (mm)	Largeur de la rustine (mm)	Poids (KG)
A2	60,6	42,4	1-rectangle	162,6	152,5	1,7518
A7	275,55	114	1-rectangle	387,55	305	8,351
A9	103,2	35,4	1-rectangle	205,2	152,5	2,2108
A20	392,4	314,6	1-rectangle	504,4	416,6	14,8458
A24	66,7	30,3	2-rectangles	168,7	152,5	1,81759
	66,7	18,2		168,7	152,5	1,8175
A26	27,3	18,2	1-carré	152,5	152,5	1,6430
A30	48,5	24,2	1-carré	305	305	6,5722
Totale			8	2054,65	1789,1	39,01

- **Les limitations rencontrées :**

Pour les tôles centrales et annulaires, six (06) défauts étaient inférieurs à 51 mm à proximité des joints de soudure, une rustine plus large était donc nécessaire (305 mm), les tôles concernées sont : **R4P7, R8P3, R11P6, A7, A20, A30.**

V.3.3. Estimation de perte de métal :

Lors de la découpe de la tôle pour fabriquer des rustines de dimensions spécifiques, il faut s'attendre à une perte de métal, dont l'estimation dépend de la technique de découpe. Dans notre cas, comme l'épaisseur de la tôle n'est que de 9 mm, la meilleure technique est la découpe au plasma, avec une largeur de découpe de 3 mm dans le pire des cas.

D'après les tableaux V.1 et V.2, le nombre total de rustines est de **47** et pour compenser la perte supplémentaire de métal lors de la découpe, nous pouvons ajouter **5 mm** de chaque côté des rustines, ce qui signifie **10 mm** supplémentaires en longueur et en largeur.

En utilisant l'équation V.1, nous pouvons calculer le poids du métal supplémentaire nécessaire.

Tableau V.3 : l'estimation du métal supplémentaire pour la réparation

Longueur supplémentaire (mm)	Largeur supplémentaire (mm)	N° des rustines	Poids (kg)
10	10	47	15,606

V.4. Le soudage des rustines :

V.4.1. Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :

SMAW est une méthode couramment utilisée pour le soudage de structures métalliques, y compris les réparations de tôles de fond (fig V.11). Elle implique l'utilisation d'une électrode métallique couverte d'un enrobage de flux. L'enrobage fournit à la fois le métal d'apport pour le soudage et un flux qui crée un gaz protecteur pour protéger le bain de fusion des contaminants atmosphériques.

Nous avons choisi le SMAW plutôt que le GMAW (Gas métal arc welding) en raison de l'historique des réparations effectuées sur les fonds de bacs, et des limitations de la température de travail dans la zone critique, car le GMAW est généralement réalisé avec une tension et des ampères plus élevés, ce qui conduit à des températures plus élevées.



Figure V.11 : électrode utilisée dans le procédé SMAW

V.4.2. L'électrode utilisée dans le soudage:

L'électrode de type E7018 est un type courant d'électrode enrobée qui offre de bonnes propriétés de soudage et de résistance mécanique. Elle est souvent utilisée pour des applications de soudage structurel où des soudures de qualité et une résistance élevée sont requises.



Figure V.12 : électrode E7018

V.4.3. Le calcul du taux de consommation de l'électrode :

V.4.3.1. Première méthode :

Pour calculer le taux de consommation de l'électrode E7018, les informations suivantes sont nécessaires :

- Paramètres de soudage : Il est essentiel de déterminer les paramètres de soudage spécifiques pour l'application, tels que le courant de soudage (ampérage), la tension et la vitesse de soudage.

-Diamètre de l'électrode : Il convient d'identifier le diamètre de l'électrode E7018 utilisée, les diamètres couramment utilisés sont de 3,2 mm et 4,0 mm

-Facteur d'efficacité de l'électrode : Le facteur d'efficacité de l'électrode représente la proportion réellement consommée de l'électrode lors du processus de soudage. Pour les électrodes E7018, le facteur d'efficacité se situe généralement entre 90 et 95 %.

Une fois ces informations rassemblées, la formule suivante peut être utilisée pour calculer le taux de consommation de l'électrode E7018 :

$$\tau = \frac{A \times v}{D \times E} \quad (V.2)$$

Avec : τ = Taux de consommation (en kg/min)

A = Courant de soudage (en ampères A)

v = Tension de soudage (en volts V)

D = Diamètre de l'électrode (en millimètres mm)

E = Facteur d'efficacité de l'électrode.

V.4.3.2. Deuxième méthode :

Cette méthode consiste à calculer le taux de dépôt de l'électrode (poids du métal fondu/heure) sur la base des expériences précédentes, puis à calculer le taux de consommation à l'aide de l'équation V.1 :

$$\tau = \frac{Dr*0.4536}{E*60} \quad (V.3)$$

Avec : τ = Taux de consommation en kg/min.

Dr = Le taux de dépôt en lbs/h, calculé à partir du tableau V.4.

E = Facteur d'efficacité de l'électrode.

Le tableau V.4 présente le taux de dépôt de la soudure par le procédé de soudage (SMAW). Ce tableau fournit une estimation du taux de dépôt de la soudure en prenant en considération la valeur de l'ampérage de soudage.

Tableau V.4 : formules pour calculer le taux de dépôt de E7018

Électrode	Diamètre (mm)	taux de dépôt (lbs/h)
E7018	3,2	0.012* Ampérage +1
	4	0.0084* Ampérage +2.15
	4.75	0.016* Ampérage +1.6
	5.5	0.0165* Ampérage +2.638

V.4.3.3. Spécification de la procédure de soudage (WPS) :

La spécification du procédé de soudage (**WPS**) joue également un rôle crucial dans le calcul du poids des électrodes nécessaires pour le soudage. En spécifiant les paramètres de soudage tels que le courant de soudage, la tension et la vitesse de déplacement, le WPS fournit

les informations nécessaires pour déterminer la consommation d'électrode. Cela permet d'estimer avec précision la quantité d'électrode requise pour un travail de soudage particulier. Le WPS sert de référence précieuse pour les soudeurs et garantit l'utilisation de la quantité appropriée d'électrode, minimisant ainsi le gaspillage de matériau et optimisant l'efficacité économique du processus de soudage.

Nous avons comparé les WPS des projets de soudage utilisant la même technique de soudage, la même électrode, le même métal de base et la même épaisseur de soudure (6 à 10 mm), afin d'estimer la tension et l'ampérage nécessaires.

Et nous avons comparé des projets de la même position de soudage 2F (soudage horizontal à plat) pour estimer la vitesse de soudage, voici les résultats obtenus :

Tableau V.5 : WPS pour le soudage SMAW de A283 GR.C avec E7018

Couche de soudure	Processus	Métal d'apport		Courant		Voltage (V)	Vitesse de soudage (mm/min)
		Classe	Diamètre (mm)	Type	AMP		
Pénétration	SMAW	E7018	3.2	DC (+)	70-110	10-14	75-100
Bourrage	SMAW	E7018	3.2	DC (+)	80-130	10-14	100-150
Finition	SMAW	E7018	3.2	DC (+)	90-130	10-15	100-150

Les tableaux V.4, V.3 et l'équation V.3 nous ont permis de calculer un taux de consommation moyenne pour chaque Couche de soudure.

Tableau V.6 : taux de dépôt et de consommation calculés pour chaque couche de soudure

Couche de soudure	Amperage	Dr (lbs/h)	τ (Kg/min)
Pénétration	90	2.08	0.017
Bourrage	105	2.26	0.018
finition	110	2.32	0.019

V.4.3.4. Le calcul du poids de l'électrode :

Pour calculer le poids de l'électrode nécessaire au processus de soudage, on peut utiliser la formule suivante :

$$m = T * \tau \quad (V.4)$$

Avec : m = poids de l'électrode (kg).

T = la durée estimée du soudage, fonction de la vitesse de soudage et périmètre des rustines.

τ = Taux de consommation en kg/min.

A partir des tableaux VI.1 et VI.2 et afin d'estimer le temps nécessaire à la soudure de chaque couche, nous avons calculer le périmètre total des rustines (Pr)

$$Pr = (10521,82 + 8113,31) * 2 + (2054,65 + 1789.1) * 2 = 44957,76 \text{ mm}$$

Tableau V.7 : poids de l'électrode calculé pour chaque couche de soudure

Couche de soudure	Pr (mm)	v (mm/min)	T(min)	m (kg)
Penetration	44957,76	88	510,883	8,685
Bourrage	44957,76	125	359,662	6,473
Finition	44957,76	125	359,662	6,833

V.5. Calcul du coût total du matériel de soudure :

Selon les tableaux V.1 et V.2 et V.3, les dimensions de la tôle sont : 13*10 m, avec une épaisseur de 9 mm.

Pour les électrodes, le matériel disponible sur le marché est des boîtes de 5 kg, alors qu'un total de 22,41 kg est nécessaire.

Tableau V.8 : une estimation du coût du matériel de soudage

Le matériel		Unité	Quantité	Prix unitaire (\$)	Montant (\$)
L'acier ASTM A283	Tôle centrale	Kg	190.34	1.43	272.18
	Tôle annulaire	Kg	39.01	1.43	55.78
	Métal Supplémentaire	Kg	15.6	1.43	22,3
Électrode E7018		Boîte de 5 kg	5	21.41	107,05
Totale					457,31

V.6. Revêtement du fond :

Après avoir effectué les réparations appropriées, et pour limiter l'évolution des petits dégâts présents sur le fond, la meilleure solution consiste à mettre en place un nouveau revêtement de meilleure qualité, d'autant plus que la majorité des défauts se situaient sur la face supérieure du fond.

Ce nouveau revêtement devra répondre aux exigences de l'API 652 (Linings of Aboveground Petroleum Storage Tank Bottom). Pour garantir une résistance optimale et minimiser les risques de fuites à l'avenir, il est impératif que le revêtement utilisé appartienne à la catégorie des revêtements renforcés épais, présentant une épaisseur sèche minimale de 1,27 mm. Cela signifie que les tôles centrales doivent avoir une épaisseur minimale de 1,27 mm, assurant ainsi une protection adéquate.

Le revêtement devra couvrir l'ensemble du fond et jusqu'à 1,2 m du la première virole. Pour notre étude, et pour pouvoir estimer le coût de l'opération de revêtement et s'assurer qu'elle a été effectuée correctement, nous utiliserons le même revêtement que celui utilisé dans le bac 818 RTO (revêtement a base résine époxy stratifié au mat de fibre de verre), en particulier parce qu'il a prouvé son efficacité dans la protection du fond, et qu'il fait partie de la catégorie des revêtements épais renforcés.

V.6.1. Le procédé de revêtement en fibre de verre :

- Toutes les surfaces devront être soigneusement dépoussiérées, par aspiration avant l'application de la première couche.
- Application d'une couche époxy bi composante :
- Pose du mat de verre 450 g/m².
- Débullage soigné.
- Application d'une couche du revêtement.
- Débullage soigné jusqu'à complète imprégnation des fibres.
- Répéter l'opération pour la pose des deux autres mats suivants.
- Si nécessaire, les fibres seront soigneusement couchées à l'aide d'un rouleau de laine à poils longs (fig V.13).

Pour une bonne imprégnation des fibres, il est important d'avoir au minimum une équipe de quatre personnes pour la phase débullage (4 personnes munis de débulleurs). Après polymérisation et après les contrôles des épaisseurs et de la porosité du revêtement, il faut appliquer la couche de finition au pistolet, avec époxy bi composants.

Tableau V.9 : le revêtement en fibre de verre du bac 818 RTO

Système de revêtement du fond			
Phasage	Produits	Application	Épaisseur (mm)
Primaire	Époxy bi composante	Pistolet/airless	0.05
1^{er} Imprégnation	Époxy bi composante	Rouleau/ airless	0.6
1^{er} Renfort mécanique	Mat Fibre de verre 450 g/m²	D'ébulleur	0.1
2^{eme} Imprégnation	Époxy bi composante	Rouleau/ airless	0.6
2^{eme} Renfort mécanique	Mat Fibre de verre 450 g/m²	D'ébulleur	0.1
3^{eme} Imprégnation	Époxy bi composante	Rouleau/ airless	0.6
3^{eme} Renfort mécanique	Mat Fibre de verre 450 g/m²	D'ébulleur	0.1
4^{eme} Imprégnation	Époxy bi composante	Rouleau/ airless	0.6
Finition	Époxy bi composante	Pistolet/airless	0.3

Épaisseur total minimal : 3 mm



Figure V.13 : les fibres de verre couchées à l'aide d'un rouleau

V.6.2. La surface à revêtir :

- **La surface du fond :**

Le fond du bac est considéré comme un cercle et sa surface est calculée comme suit :

$$S_1 = \pi * r^2 = 34.5^2 * \pi = 3739,28 \text{ m}^2 \quad (\text{V.5})$$

Avec : r = le rayon du fond ($r = D/2$)

- **La surface de la première virole :**

La surface de la première virole est calculée comme suit :

$$S_2 = D * L * \pi = 69 * 1.2 * \pi = 260.12 \text{ m}^2 \quad (\text{V.6})$$

Avec :

D = le diamètre du fond

L = la hauteur de la surface à revêtir (1.2m)

- **La surface totale :**

$$S = S_1 + S_2 = 4000 \text{ m}^2$$

Tableau V.10 : Estimation du coût de revêtement en fibre de verre

Traitement du fond	Unité	S	Prix unitaire (DA)	Montant DA
Préparation de surface par grenailage suivi d'un nettoyage et d'un dépoussiérage soigné de toute la surface du fond, de la Première virole sur une hauteur de 1,20 m	M²	4000	3358,00	13432000
Une couche de Bi-composant primaire	M²	4000	407,00	1628000
Trois (3) de revêtement Bi-composant a base résine époxy stratifié au mat de fibre de verre a 450g/m², de 1 mm d'épaisseur pour chaque couche	M²	4000	4284,2	51410400
Une couche finale de Bi-composant sans stratification	M²	4000	1465,00	5860000
Totale				72330400

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire de master a abordé plusieurs aspects clés concernant l'inspection et la réparation des fonds de réservoir.

Tout d'abord, l'étude s'est concentrée sur la détermination de l'intervalle d'inspection optimal et des méthodes, en mettant particulièrement l'accent sur la fiabilité de la technique de fuite de flux magnétique (MFL) largement utilisée. Cela permet une détection précise des défauts et des problèmes potentiels au sein de la structure du réservoir.

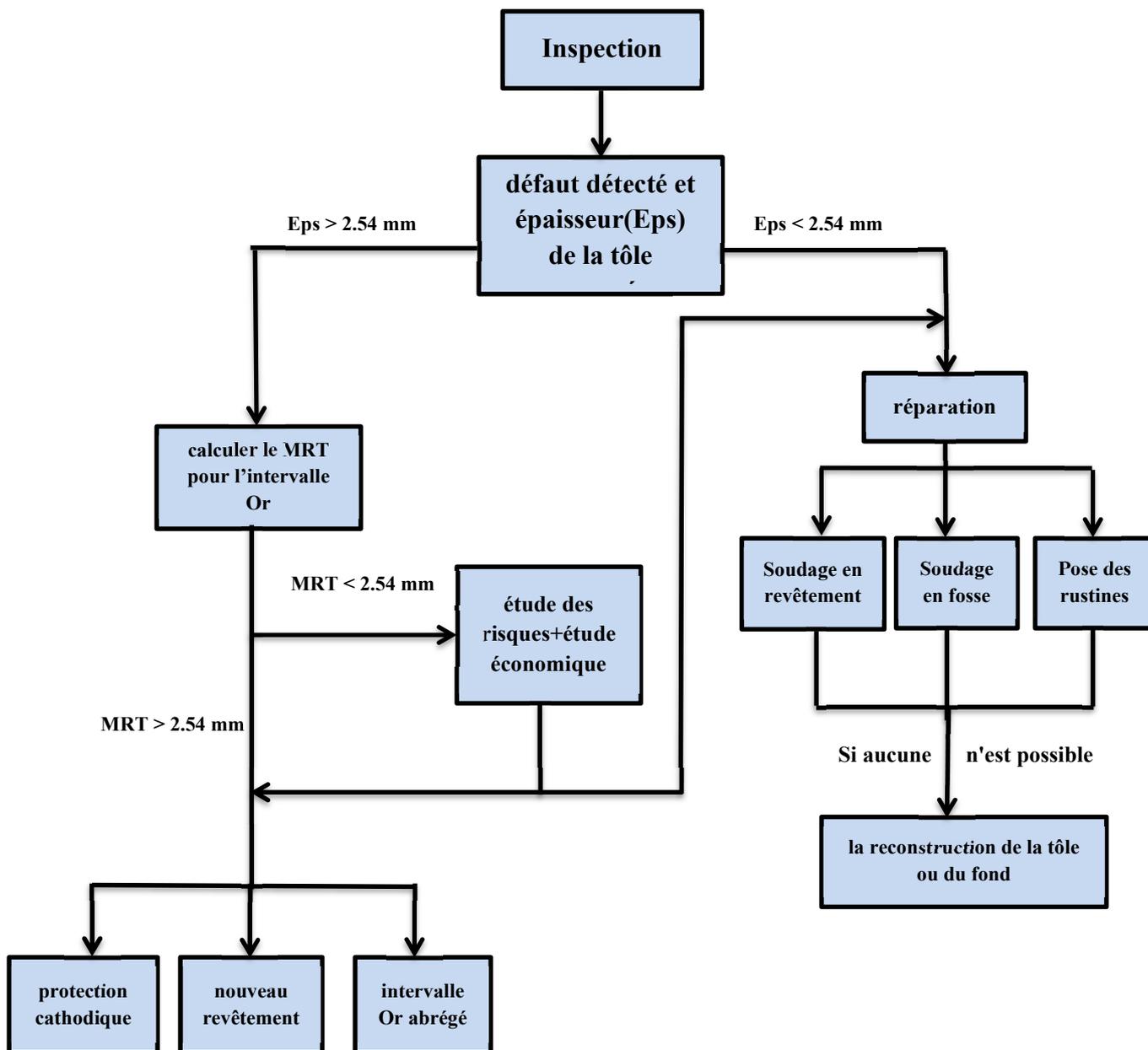
Ensuite, deux études de cas ont été réalisées pour calculer l'épaisseur minimale autorisée des plaques centrales et annulaires. Un cas concernait des dommages mineurs et des solutions simples, tandis que l'autre présentait des dommages importants et le défi de trouver des options de réparation appropriées. La recherche a également fourni des informations sur l'estimation de la vitesse de corrosion en cas de données manquantes, facilitant la prise de décision dans de telles situations.

Enfin, l'étude a exploré les méthodes de réparation, en mettant spécifiquement l'accent sur les rustines soudées, en expliquant les règles et les directives pour effectuer les réparations efficaces et en fournissant des estimations du poids et du coût des matériaux métalliques et de soudage nécessaires.

Les résultats obtenus permettent aux industriels de prendre des décisions éclairées sur les intervalles d'inspection à adopter, de privilégier des méthodes d'inspection fiables comme la MFL, de s'assurer que les tôles ont une épaisseur minimale suffisante et de mettre en place des stratégies de réparation efficaces qui impliquent l'utilisation de rustines soudées. Ces mesures contribueront à améliorer l'intégrité, la sécurité et la rentabilité de la maintenance des fonds de réservoir.

Annexe I

Organigramme récapitulatif du plan de travail de l'inspection+ réparation effectuée dans ce mémoire



Annexe II

Tableau IV. 11 : les défauts trouvés dans le fond du bac 818

Tôle	N de défauts	Perte de métal maximale %	Position Top/Bottom	Tôle	N de défauts	Perte de métal maximale %	PositionTop/Bottom
R1P3	1	83	Bottom	R7P7	18	100	Bottom
R1P7	3	96	Bottom	R8P3	1	87	Bottom
R1P10	3	91	Bottom	R8P4	17	100	Bottom
R1P12	1	80	Bottom	R8P5	8	94	Bottom
R2P1	26	100	Bottom	R8P6	8	95	Bottom
R2P2	62	94	Bottom	R8P7	16	100	Both
R2P3	58	100	Bottom	R8P8	12	100	Bottom
R2P4	66	96	Bottom	R9P2	16	100	Bottom
R3P1	9	100	Both	R9P3	16	100	Bottom
R3P2	90	100	Bottom	R9P4	12	100	Bottom
R3P3	23	100	Bottom	R9P5	10	100	Bottom
R3P4	87	100	Bottom	R9P6	1	82	Bottom
R3P5	48	100	Bottom	R9P7	31	100	Bottom
R4P2	29	100	Bottom	R9P8	3	92	Bottom
R4P3	6	95	Bottom	R10P2	9	100	Bottom
R4P4	8	100	Bottom	R10P3	8	94	Bottom
R4P5	7	100	Bottom	R10P4	12	100	Both
R4P6	3	87	Bottom	R10P5	11	100	Bottom
R5P2	1	100	Bottom	R10P6	22	100	Bottom
R5P3	6	100	Bottom	R10P7	2	89	Bottom
R5P4	4	93	Bottom	R10P10	8	100	Bottom
R5P5	32	100	Bottom	R11P1	1	86	Bottom
R5P6	16	100	Top	R11P2	8	100	Bottom
R6P1	1	96	Bottom	R11P3	7	100	Bottom
R6P4	32	100	Bottom	R11P4	4	98	Bottom
R6P5	17	100	Bottom	R11P5	8	100	Bottom
R6P6	9	100	Bottom	R11P6	5	90	Bottom
R7P2	1	87	Bottom	R11P7	20	94	Bottom
R7P4	10	100	Bottom	R11P8	8	100	Bottom
R7P5	35	100	Bottom	R12P2	2	96	Bottom
R7P6	38	100	Bottom	R12P3	11	100	Top
R12P4	6	100	Bottom	R19P3	10	100	Bottom
R12P5	12	100	Both	R19P4	3	100	Bottom

Annexe

R12P6	3	92	Bottom	R19P5	8	98	Bottom
R12P7	18	99	Bottom	R19P6	2	82	Both
R12P8	81	100	Bottom	R19P9	21	100	Bottom
R13P2	2	100	Both	R20P2	13	98	Bottom
R13P3	12	100	Bottom	R20P3	4	100	Bottom
R13P4	11	89	Bottom	R20P4	10	100	Bottom
R13P5	39	100	Bottom	R21P7	7	100	Bottom
R13P6	13	100	Bottom	R22P8	12	100	Top
R13P7	14	100	Bottom	R22P3	4	100	Bottom
R13P8	37	100	Bottom	R22P4	12	96	Both
R13P9	21	100	Bottom	R22P5	3	85	Bottom
R14P2	13	100	Bottom	R22P7	3	100	Bottom
R14P3	6	100	Bottom	R22P8	8	100	Bottom
R14P4	2	86	Bottom	R22P9	1	83	Both
R14P5	22	96	Bottom	R23P1	15	100	Bottom
R14P6	9	100	Bottom	R23P2	5	93	Bottom
R14P7	33	88	Bottom	R23P3	34	100	Bottom
R14P7	44	100	Top	R23P5	29	100	Bottom
R15P2	17	100	Bottom	R23P6	69	100	Bottom
R15P3	11	97	Bottom	R23P7	7	100	Bottom
R15P4	2	86	Bottom	R23P8	5	100	Bottom
R15P5	5	100	Bottom	R24P4	6	95	Bottom
R15P6	11	100	Bottom	R24P5	3	94	Bottom
R15P7	9	97	Bottom	R24P7	11	95	Bottom
R15P8	40	100	Bottom	R24P8	4	95	Bottom
R15P9	63	100	Top	R25P2	8	94	Bottom
R16P2	19	100	Bottom	R25P5	11	100	Top
R16P3	3	92	Both	R25P7	1	84	Bottom
R16P4	7	100	Bottom	R26P1	7	100	Both
R16P5	5	100	Bottom	R26P2	9	100	Bottom
R16P6	1	100	Bottom	R26P3	13	99	Bottom
R16P7	44	100	Both	R26P4	8	94	Bottom
R16P8	19	100	Bottom	R26P5	4	91	Both
R17P2	8	98	Bottom	R26P6	14	100	Bottom
R17P3	7	95	Bottom	R26P7	23	100	Bottom
R17P6	2	97	Bottom	R27P1	1	86	Bottom
R17P7	4	94	Bottom	R27P2	18	94	Bottom
R17P8	1	87	Bottom	R27P3	2	91	Bottom
R17P9	10	100	Bottom	R27P4	26	100	Bottom
R18P1	1	87	Bottom	R27P5	15	98	Bottom
R18P2	8	90	Bottom	R27P6	8	96	Bottom
R18P3	2	100	Bottom	R27P7	21	100	Bottom

Annexe

R18P5	63	100	Bottom	R27P8	1	92	Bottom
R18P6	1	81	Bottom	R28P1	11	95	Bottom
R18P7	17	89	Top	R28P2	19	96	Bottom
R18P8	12	99	Bottom	R28P3	4	92	Top
R19P2	10	100	Both	R28P4	24	100	Bottom
R20P5	1	82	Bottom	R28P5	28	100	Both
R20P7	4	100	Bottom	R28P6	16	100	Bottom
R20P8	9	98	Bottom	R28P7	2	92	Bottom
R20P9	1	80	Bottom	R29P1	5	96	Bottom
R21P1	3	88	Bottom	R29P2	4	94	Both
R21P2	3	100	Bottom	R29P3	9	97	Bottom
R21P3	3	97	Bottom	R29P4	13	100	Bottom
R21P6	3	92	Bottom	R29P5	20	100	Bottom
R29P6	4	96	Bottom	R31P8	3	98	Bottom
R30P2	10	97	Bottom	R31P9	14	100	Bottom
R30P3	25	100	Bottom	R31P10	1	90	Bottom
R30P4	14	92	Bottom	R31P11	9	100	Bottom
R31P6	1	84	Both	R31P12	1	88	Bottom
R31P7	3	84	Bottom	R31P13	2	90	Bottom

BIBLIOGRAPHIE

- Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux DT 94 octobre 2011 (**Chapitre III**)
- API Standard 653-Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, (**Chapitre IV**)
- The 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China-Magnetic Flux Leakage and Acoustic Emission Testing Technique for Atmospheric (**Chapitre III**)
- J Fail. Anal. And Preven. (2022) 22:807–814 - Study of Defects in the Petrochemical Storage Tank Floor using the Magnetic Flux Leakage (MFL) Technique. (**Chapitre III**)
- API 571-2020 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment (**Chapitre II**)
- Linings in tank bottoms – API 652 training-Published 7 December 2016 - By Eng. Carlos F Molina (**Chapitre III**)
- DECOMPOSITION DU MONTANT CONTRACTUEL DE LA REHABILITAION DU BAC 806 TA OZ112 BRUT (**Chapitre V**)
- Rapport d'inspection de bac 2A2 Bejaïa décembre 2022 (**Chapitre IV**)
- [Www.hdsoudage.fr](http://www.hdsoudage.fr) (**Chapitre V**)
- EURL ALCOVA WPS 13/01/22 - QC-WPS-06 REV. 0 A283 GR.C (**Chapitre V**)
- Décomposition du montant contractuel de la réhabilitation du bac 806 ta oz112 brut (**Chapitre V**)
- The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition (**Chapitre V**)
- Cahier de charge de construction d'un bac de stockage RTE Skikda (**Chapitre I**)
- Calcul de structures métallique selon L'Eurocode 3 (**Chapitre I**)
- Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux. (**Chapitre III**)
- API Std 650 11ème Edition (Américain Petroleum Institute) (**Chapitre IV**)
- CODRES 2007 (**Chapitre II**)
- Euro code 3 NV65 (**Chapitre II**)