REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement superieur
et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté de Génie de la construction
Département de Génie Civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Civil

Spécialité : Construction Métallique

Thème

Etude des performances des réservoirs métalliques avec toit flottant

Présenté par : DEKKALI Massinissa

Membres du jury :

- **President: Mr. MECHICHE** — **M . C . B**
- **Promoteur : Mr. DAHMANI** — **Professeur**
- **Examinateur: Mr. BOUDJEMIA** — **M . A . A**

1ére Promotion

Année universitaire : 2014-2015

RÉSUMÉ

Ce mémoire de fin d'étude expose les réservoirs métalliques en général et à toit flottant en particulier, en énumérant les codes et normes qui étudient ce genre de structure.

Une recherche initiale traite les types de réservoirs, la façon dont ils sont conçus et les inconvénients et avantages que présente chaque type.

Ensuite, une recherche approfondie a été réalisée avec soin, afin de vulgariser le réservoir à toit flottant et les principes de conception et de fonctionnement de celui-ci, tout en définissant les différents types de ce genre de toit, comment et de quoi ils sont conçu, nommer les principaux accessoires de pose pour ces toits et les dangers que provoquerait un dysfonctionnement de ces accessoires, aussi en exposant les problèmes susceptibles de rencontrer sur ces toits et les avantages considérables et importants qu'apportent les réservoirs à toit flottant.

Une simplification des deux règlements API 650 et Eurocode 3 -Partie réservoirs- a été faite, en expliquant et mentionnant les règles et lois de conception de ce genre de structure. Ainsi une comparaison des deux règlements est accomplie en exemplifiant ceci avec une étude d'un projet réel.

ABSTRACT

This final study memory exposes the metal tanks in general and with floating roof in particular by listing the codes and standards that are studying this kind of structure.

An initial research treats the types of tanks, how they are designed and inconvenience and advantages of each type.

Then, a thorough search was carried out with care, in order to popularize the floating roof tank and the principles of design and operation of it, while defining the different types of this kind of roof, how and what they are designed, identify the main installation accessories for these roofs and dangers that would cause dysfunction of these accessories, also outlined problems that may encounter on these roofs and the considerable and important benefits that bring the floating roof tanks.

A simplification of the two codes, API 650 and Eurocode 3-Part Tanks- was made, by explaining and setting out the rules and laws of conception of this kind of structure. Thus a comparison of the two codes is accomplished by exemplifying this with a study of a real project.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remercîments à mon encadreur Monsieur DAHMANI, professeur à l'UMMTO, de m'avoir suivis et dirigé tout le long de ce travail.

Je remercie aussi les membres du jury qui m'ont accordé l'honneur d'examiner et de juger ce modeste travail.

Je tiens également à remercier tous les enseignants et tout le staff technique qui ont contribué à ma formation.

Dieu merci, de m'avoir donné la patience pour terminer ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

_A mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé à aller de l'avant et pour leur soutien moral et matériel tout au long de mes études.

_A ma chère fiancée et futur épouse « Dyhia », à ma rose que j'aime énormément à qui je dois un grand merci, merci Dihoucha pour ta patience et tes encouragements... que Dieu te garde auprès de moi.

_A ma belle famille « ABDELLI ».

_A mes deux frères Nafaa et Rabah.

_A mes sœurs Kahina et Dalila ainsi que leurs enfants : Anais, Louiza et Mouhamed (Moumouh) et à leurs maris Rachid et Kouceila.

_A mes grands parents maternels, paternels et mes proches.

_A tous mes amis sans exception.

_ A toute ma promotion.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 : Introduction générale

1.1 Introduction 01
1.2 Raisonnement 01
1.3 Objectif de recherche 02
1.3.1 Buts du projet 02
1.3.2 Objectifs du projet 02
1.4 Méthodologie de la recherche 03
1.4.1 Revues littéraires 03
1.4.2 Choix des matériaux 03
1.4.3 Effet indirect de l'échec de conception 03

Chapitre 2: Revue littéraire des réservoirs métalliques

2.1 Introduction 04
2.2 Types de réservoir de stockage 06
2.2.1 Réservoirs à toit ouverts 06
2.2.2 Réservoirs à toit fixe 11
2.2.3 Réservoirs à toit flottant 15
2.3 Différentiation de la fiabilité 17
2.4 Codes et normes de conception 17

Chapitre 3: Technologie des réservoirs à toit flottant

3.1 Histoire et introduction 19
3.2 Principes du toit flottant 19
3.3 Types de toits flottants 19
3.3.1 Réservoirs à toit flottant externe 19
3.3.2 Réservoirs à toit flottant interne 25
3.4 Les avantage du réservoir de stockage à toit flottant 28
3.5 Description du processus et exigences techniques 28
3.6 Le choix des matériaux et l'évaluation de la corrosion 30
3.6.1 Corrosion du CO_2 30
3.7 Conception mécanique 32
3.8 Considération de la conception mécanique 33
3.9 Méthode de calcul de réservoir selon API 650 35
3.9.1 Calcul de l'épaisseur de la robe 35
3.9.2 Conception de plaque de fond 37
3.10 Méthode de calcul de réservoir selon l'Eurocode 3 38
3.10.1 Base du calcul 38
3.10.2 Calcul de la coque 38
3.10.3 Renfort annulaire 39
3.10.4 Calcul du fond 42
3.10.5 Ouvertures dans les parois de réservoir 44
3.10.6 Vérification de la stabilité de l'ensemble 46
3.10.7 Calcul de l'ancrage 47
3.11 Conception du toit flottant 48
3.12 Une attention particulière 49

3.12.1 Le tassement du sol 49
3.12.2 Conception parasismique..... 50
3.13 Mode de rupture due à des effets sismiques sur réservoir à toit flottant 52
3.14 Conditions de conception et montage..... 54
3.15 Principaux types d'accessoires de pose pour toit flottant..... 55
3.15.1 Système d'étanchéité de toiture..... 55
3.15.2 Les pieds supports 60
3.15.3 Le système de drain du toit..... 61
3.15.4 Vent – Purge évent 64
3.15.5 Dispositif de centrage et anti-rotation (pôle de guidage) 65
3.15.6 Echelle roulante et plate-forme de Gauger..... 65
3.16 Système de lutte contre l'incendie et mousse barrage 66
3.17 Dégâts caractéristiques de réservoirs métalliques 68

Chapitre 4 : Exemple de calcul d'un réservoir à toit flottant

Partie I :

4.1 Calcul selon l'Eurocode 3 70
4.1.1 Données du réservoir..... 70
4.1.2 Calcul des épaisseurs de la robe 71
4.1.3 Calcul des plaques de fond et annulaire 73
4.1.4 Vérification de la stabilité sous le vent (Calcul du renfort annulaire)..... 75
4.1.5 Vérification de la stabilité du réservoir au vent..... 79

Partie II :

4.2 Calcul selon l'API 650 82
4.2.1 Données du réservoir..... 82
4.2.2 Calcul des épaisseurs de la robe : **ONE FOOT METHOD**..... 82
4.2.3 Calcul des plaques de fond et annulaires 83
4.2.4 Vérification de la stabilité sous le vent (Calcul du renfort annulaire)..... 84
4.2.5 Vérification de la stabilité du réservoir au vent 89
4.2.6 Géométrie du toit flottant 91

4.3 Comparaison et commentaires 109

Conclusion générale..... 110

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Réservoir métallique à toit flottant.

Figure 2.1 : Feu et incidents du à l'explosion dans les réservoirs.
Figure 2.2 : Types des réservoirs de stockage.
Figure 2.3 : Réservoir à toit ouvert.
Figure 2.4 : Exemple d'un fond de réservoir.
Figure 2.5 : Détails d'une cuve ouverte.
Figure 2.6 : Types de forme de toit.
Figure 2.7 : Types de Toit fixe.
Figure 2.8 : Types de réservoir à toit fixe selon la pression.
Figure 2.9 : Réservoir à toit fixe : perte de produit.
Figure 2.10 : Types de toit flottant.
Figure 2.11 : Toit flottant simple pont.
Figure 2.12 : Toit flottant double pont.

Figure 3.1 : Toit flottant externe simple pont.
Figure 3.2 : Toit flottant externe double pont.
Figure 3.3 : Toits flottants internes soudés.
Figure 3.4 : Toits flottants internes boulonnés.
Figure 3.5 : Capacités de stockage et niveaux d'un réservoir.
Figure 3.6 : Ruine d'un réservoir du au vacuum.
Figure 3.7 : Les charges primaires exercées sur la paroi du réservoir.
Figure 3.8 : Résultantes de contrainte de membrane dans la paroi cylindrique du réservoir.
Figure 3.9 : La rotation de la connexion coque-fond.
Figure 3.10 : Tôle annulaire pour les réservoirs de diamètre supérieur à 12,5m.
Figure 3.11 : Application de la force du vent, stabilisée par le poids propre du réservoir.
Figure 3.12 : Toit à simple pont fléchi avec des inondations d'eau de pluie.
Figure 3.13 : Effet du balancement du fluide sur un toit flottant sur le fluide contenu.
Figure 3.14. Haut : La composante horizontale du séisme peut entraîner des soulèvements.
Bas : La composante verticale du séisme « augmente la gravité », donc les pressions du fluide.
Figure 3.15 : Toit flottant dominait par le liquide du réservoir.
Figure 3.16 : Flambement du ponton.
Figure 3.17 : Flambement en pied d'éléphant « elephant foot buckling » (Grands réservoirs).
Figure 3.18 : Flambement en diamant (Réservoirs élancés).
Figure 3.19 : Réservoirs brûlé.
Figure 3.20 : Réservoirs de ferme en feu.
Figure 3.21 : Joints primaires d'étanchéité métalliques pour toit flottants externes.
Figure 3.22 : Joints primaires d'étanchéité élastiques pour toits flottants externes.
Figure 3.23 : Joints secondaires d'étanchéité flexibles pour toits flottants.
Figure 3.24 : Joints d'étanchéité primaires avec joints secondaires pour toits flottants.
Figure 3.25 : Flexion latérale du pied support.
Figure 3.26 : Système de tuyauterie articulée.
Figure 3.27 : Système de tuyaux flexible en acier a l'intérieur du réservoir à toit flottant.
Figure 3.28 : Système de tuyau de drainage articulé installé à l'intérieur du réservoir.
Figure 3.29 : Joint pivotant flexible.

Figure 3.30 : Purge évent.
Figure 3.31 : Le dispositif anti rotation et la plate-forme de service (Gauger).
Figure 3.32 : Image représentant la plate-forme de Gauger, l'échelle roulante et la structure de support de l'échelle.
Figure 3.33 : Système mousse de lutte contre incendie.
Figure 3.34 : Exemples d'éjection de mousse expansée.
Figure 3.35 : représente un ensemble de photos qui montrent les dommages typiques dans les réservoirs métalliques.

Figure 4.1 : Epaisseur et distances des plaques annulaires.
Figure 4.2 : Dimensions du raidisseur primaire (selon l'eurocode).
Figure 4.3 : Application de la force du vent, stabilisée par le poids propre du réservoir.
Figure 4.4 : Schéma regroupant les résultats du réservoir.
Figure 4.5 : Dimensions du raidisseur primaire (selon le règlement API 650).
Figure 4.6 : Dimensions du raidisseur secondaire (selon le règlement API 650).
Figure 4.7 : Toit flottant a simple pont.
Figure 4.8 : Pont central et 2 compartiments adjacents percés.
Figure 4.9 : Les sections détaillées du ponton (caisson de flotabilité).
Figure 4.10 : Accessoires importants d'un toit flottant.
Figure 4.11 : Crochet pantographe.
Figure 4.12 : Crochet ciseau.
Figure 4.13 : Assemblage complet du système pantographe.
Figure 4.14 : la section d'extrémité du crochet pantographe.
Figure 4.15 : Joint rempli mousse.
Figure 4.16 : Joint rempli liquide.
Figure 4.17 : Joint secondaire.
Figure 4.18 : Le nombre et l'emplacement des pieds support.
Figure 4.19a : System de drainage à la position haute.
Figure 4.19b : System de drainage à la position basse.
Figure 4.20 : Disposition d'un système de tuyauterie articulée.
Figure 4.21a : Joint pivotant flexible.
Figure 4.21b : Joint pivotant assemblé.
Figure 4.22 : Système de drain de tuyau flexible.
Figure 4.23 : Système de drain de tuyau flexible dans différents réservoirs.
Figure 4.24 : Croquis d'une échelle roulante et plate-forme de Gauger.
Figure 4.25 : Echelle roulante avec la plate-forme de roue et Gauger installé dans un réservoir à toit flottant.
Figure 4.26 : Une chambre de mousse réelle installé sur un réservoir à toit flottant.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Simple comparaison entre une boite de conserve d'haricot et un réservoir de stockage.
Tableau 3.2 : Les épaisseurs minimales de la robe recommandées par l'Eurocode 3.
Tableau 3.3 : Les dimensions minimales des raidisseurs secondaires.
Tableau 3.4 : Épaisseur nominale minimale de la tôle de fond.
Tableau 3.5 : Épaisseur minimale du corps de la tubulure.
Tableau 3.6(a) : Exigences de montage d'accessoires sur la coque du réservoir.
Tableau 3.6(b) : Exigences de montage d'accessoires sur le toit flottant.

Tableau 4.1 : Propriétés mécaniques des matériaux utilisés.
Tableau 4.2 : Résultats des épaisseurs de la robe selon l'eurocode 3.
Tableau 4.3 : Calcul des sections et moments d'inerties de chaque élément selon l'eurocode 3.
Tableau 4.4 : Résultats des épaisseurs de la robe selon l'API 650.
Tableau 4.5 : Calcul des sections et moments d'inerties de chaque élément du raidisseur primaire selon l'API 650
Tableau 4.6 : Calculs et résultats des largeurs et hauteur équivalentes.
Tableau 4.7 : Calcul des sections et moments d'inerties de chaque élément du raidisseur secondaire selon l'API 650.
Tableau 4.8 : Tableau résumant tous les résultats des deus règlements « Eurocode 3 » et « API650 (2007) » à titre comparatif.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

API: American Petroleum Institute.

EN: European Norm.

CODRES: Code de stockage des réservoirs cylindriques verticaux.

UCCIP: Union des Chambres de Commerce et d'Industrie de Portneuf.

SNCT: Syndicat National de la Chaudronnerie et Tuyauterie.

CB: Chicago Bridge (Pont de Chicago).

IC: Iron Company (Société de Fer).

HLL: High Level of Liquid (Niveau élevé du liquide).

LLL: Low Level of Liquid (Niveau bas du liquide).

INERIS: Institut National de l'Environnement Industriel et des risques.

CRA: Corrosion-Resistant Alloy (Alliage résistant à la corrosion).

EL1: Etat Limite plastique.

EL3: Etat Limite de stabilité.

PTS: Petronas Technical Specification.

1.1 Introduction

L'industrie moderne est basée sur la construction métallique qui répond aux besoins actuels, notamment dans l'industrie des hydrocarbures (construction des réservoirs destinée au stockage des hydrocarbures et produits pétroliers), ainsi de la charpente métallique (hangars, ponts et bâtiments,…).

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

Le domaine de la chaudronnerie est très étendu, satisfait aux conditions de stockage des produits pétrolier qui ont des caractéristiques différentes. Pour cela les constructeurs fabriquent des réservoirs de formes géométriques divers telles que sphériques, cylindriques, …etc.

Il existe trois types de réservoir cylindrique qui sont défini suivant la nature de leur toit : les réservoirs à toit ouvert, les réservoirs à toit fixe et les réservoirs à toit flottant **(Dr.Krishanaiyengar Rajagoplan, 1990)**.

Et pour notre cas on consacrera une attention particulière aux réservoirs à toit flottant.

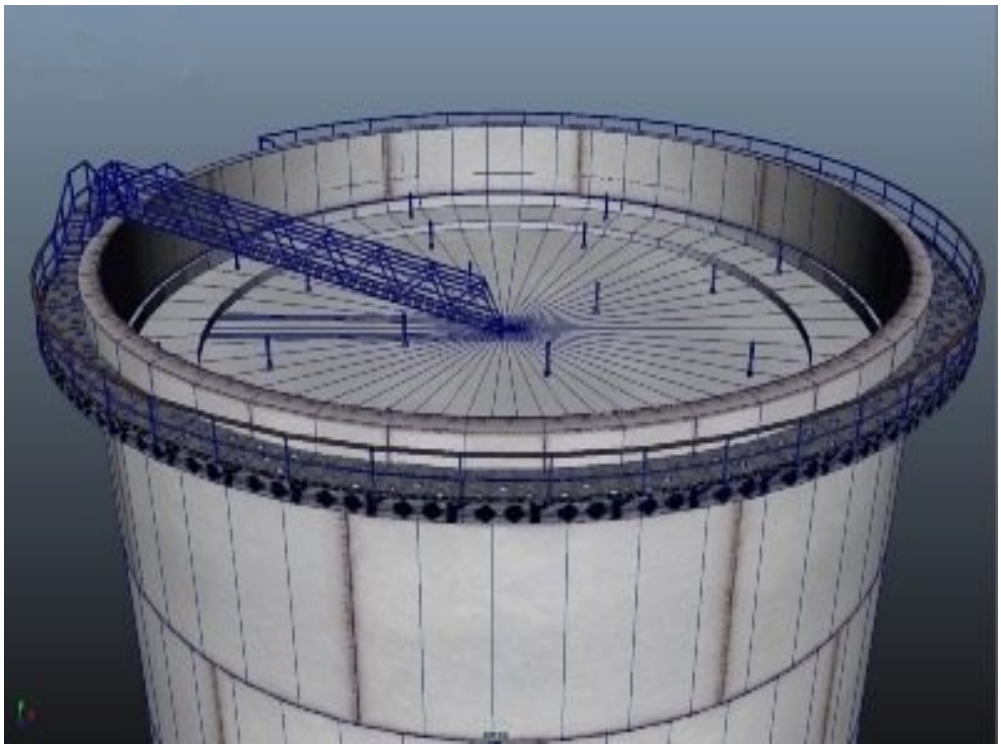


Figure 1.1 : Réservoir métallique à toit flottant (www.astanks.com/Tanks).

1.2 Raisonnement :

Le réservoir à toit flottant n'est pas une nouvelle technologie ou d'équipements, il a été utilisé dans de nombreuses industries dans le monde entier. Les cuves de stockage sont conçues, fabriquées et testées afin de mettre au point des codes et des normes de calcul.

Les procédures et règles de conception de toit flottant sont très limitées. Celles-ci avaient résulté beaucoup d'effondrement de toit flottant dans l'industrie. Ainsi le maitre de l'ouvrage du réservoir peut être lui même le concepteur. D'où la nécessitée qu'un ingénieur doit avoir des règles simples et des formules pour assurer la stabilité et la résistance du toit flottant sous différents chargement pendant son fonctionnement.

A côté des procédures et des règles, la compréhension de la façon dont se comportent les contraintes dans le matériau du réservoir est essentielle pour une conception complète et sécuritaire.

Les réservoirs à toit flottant sont généralement construits dans une taille gigantesque et ceci impliquerait des diverses disciplines telles que civil, chimique, mécanique, sécurité incendie, la construction, l'inspection, la mise en service et l'exploitation.

La portée de travail de chaque discipline aura un effet direct sur la conception du réservoir, comme l'exemple de la base du réservoir qui est conçue par le personnel civil. Les fondations doivent être conçues pour résister à la charge de la cuve avec son contenu. Une mauvaise conception entraînerait l'affaissement des fondations ou le tassement du sol excessif qui à son tour induit des contraintes supplémentaires pour le fond et la coque du réservoir.

Il est donc essentiel pour les ingénieurs ou concepteur de réservoir, de savoir comment et quels effets chaque modèle interdisciplinaire aurait sur le calcul de l'intégrité du réservoir, et en prenant toutes ces considérations dans leurs designs.

1.3 Objectif de recherche

1.3.1 Buts du projet

L'objectif de ce projet est d'élaborer des règles et procédures de base, en soulignant les préoccupations dans la conception, la construction et l'exploitation d'un réservoir avec le toit flottant.

1.3.2 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet est d'étudier les performances des réservoirs métalliques en utilisant un système de toit flottant.

En prenant un Projet de Développement Pétrolier existant avec ses informations disponibles comme données de base, on mène une étude de conception et d'analyse selon le nouveau règlement Eurocode et de comparer ensuite les résultats obtenus avec le règlement Américain existant API 650 (à titre de comparaison).

1.4 Méthodologie de la recherche

1.4.1 Revues littéraires

Les Revues littéraires sont réalisées pour étudier la conception de base et les exigences d'une cuve de stockage à toit flottant comme le code de conception du réservoir de stockage (API 650 - Citernes en acier soudées pour le stockage des produits pétroliers).

De nouvelles études sur la conception de réservoir ont été faites par des autres ouvrages de référence telle que l'Eurocode et la spécification de norme d'entreprise et d'informations provenant de différentes disciplines.

1.4.2 Choix des matériaux :

Les matériaux constitutifs des réservoirs sont en général des aciers au carbone, l'acier inoxydable ou un matériau composite pouvant être utilisé pour contenir certains produits chimiques. Les choix d'acier sont effectués en fonction des contraintes propres à chaque élément. Les caractéristiques mécaniques des aciers à prendre en compte sont définies dans les codes de construction ou à défaut dans les codes de réparation.

Le choix des matériaux doit être fondé sur l'examen probable de toutes les données relatives aux conditions de fonctionnement de l'appareil.

Les impuretés de certains matériaux peuvent évoluer dans le temps. Cette évolution dépend des conditions d'élaboration du métal et de l'état de livraison du produit, des conditions de mise en forme et des conditions de services en particulier de la température.

Comptabilité économique :

- moindre coût
- minimiser la quantité : choisir un acier de bonne dureté
- soudabilité.

Les tôles destinées à la construction des réservoirs, des renforts de tubulures et amorces de poteaux, des viroles de trous d'homme, seront en acier de qualité chaudière (**Kuan Siew Yeng, 2009)**.

1.4.3 Effet indirect de l'échec de conception

Les ingénieurs ou les concepteurs de réservoir qui élaborent la conception préliminaire et détaillée ne sont pas familier ou même non exposés à la condition réelle du site. Leur création est essentiellement fondée sur les codes et les normes établies théoriquement sur la base des ouvrages de référence. Certains comptes seulement sur le logiciel commercial pour la conception de base, ils ont une connaissance limitée sur le fonctionnement réel du réservoir qui les limite sur la rentabilité et même la conception des détails de sécurité, en particulier sur le réservoir à toit flottant.

Combien même, chaque installation et accessoire sont d'une grande importance, un dysfonctionnement de celles-ci, peuvent entrainer même la ruine de l'ouvrage.

2.1 Introduction

Les réservoirs de stockage ont été largement utilisés dans de nombreuses industries établies en particulier dans l'usine de traitement tel que la raffinerie de pétrole et l'industrie pétrochimique. Ils sont utilisés pour stocker une multitude de produits différents. Ils viennent dans une gamme de tailles de petite à vraiment gigantesque, le produit entreposé va de matière première au produits finis, du gaz aux liquides, solide et de leurs mélanges.

La configuration d'un réservoir dépend de deux impératifs essentiels qui sont, d'une part, la conservation du produit en limitant ou en interdisant les évaporations et, d'autre part, la tenue de la structure à la pression interne développée par le produit ou maintenue à un certain niveau pour faciliter l'exploitation.

Il y a une grande variété de réservoirs de stockage, ils peuvent être construits au dessus du sol, au sol et en sous-sol. En forme, ils peuvent être cylindrique vertical, cylindrique horizontale, de forme sphérique ou rectangulaire, mais les plus utilisés sont les cylindriques verticaux **(Dr.Krishanaiyengar Rajagoplan, 1990)**.

Un réservoir de stockage cylindrique vertical est divisé en différents types, y compris le réservoir à toit ouvert, réservoir à toit fixe, le réservoir à toit flottant externe et à toit flottant interne.

Le type de réservoir utilisé pour un produit spécifié est principalement déterminé par la sécurité et l'exigence de l'environnement. Le coût d'exploitation et la rentabilité sont les principaux facteurs dans le choix du type de réservoir de stockage, d'où la forme cylindrique est la plus courante en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa bonne résistance à la pression interne. Lorsque la pression interne est importante, on a recours aussi à des formes sphériques mieux adaptées que les cylindres et qui permettent de réduire les épaisseurs de paroi.

Le souci de conception et la sécurité à prit une grande préoccupation après les cas signalé d'incendies et d'explosions et qui ne cesse pas d'augmenter et causant plusieurs incendies mortels. Les déversements et les incendies de citernes non seulement provoquent une pollution de l'environnement, mais ils causent aussi de graves conséquences financières et un impact significatif sur l'activité future et la réputation de l'industrie. La figure **2.1** montre des accidents des réservoirs qui ont pris feu et ont explosé. Beaucoup de ces accidents étaient arrivés et ils sont susceptibles de continuer à moins que les leçons du passé soient correctement apprises.

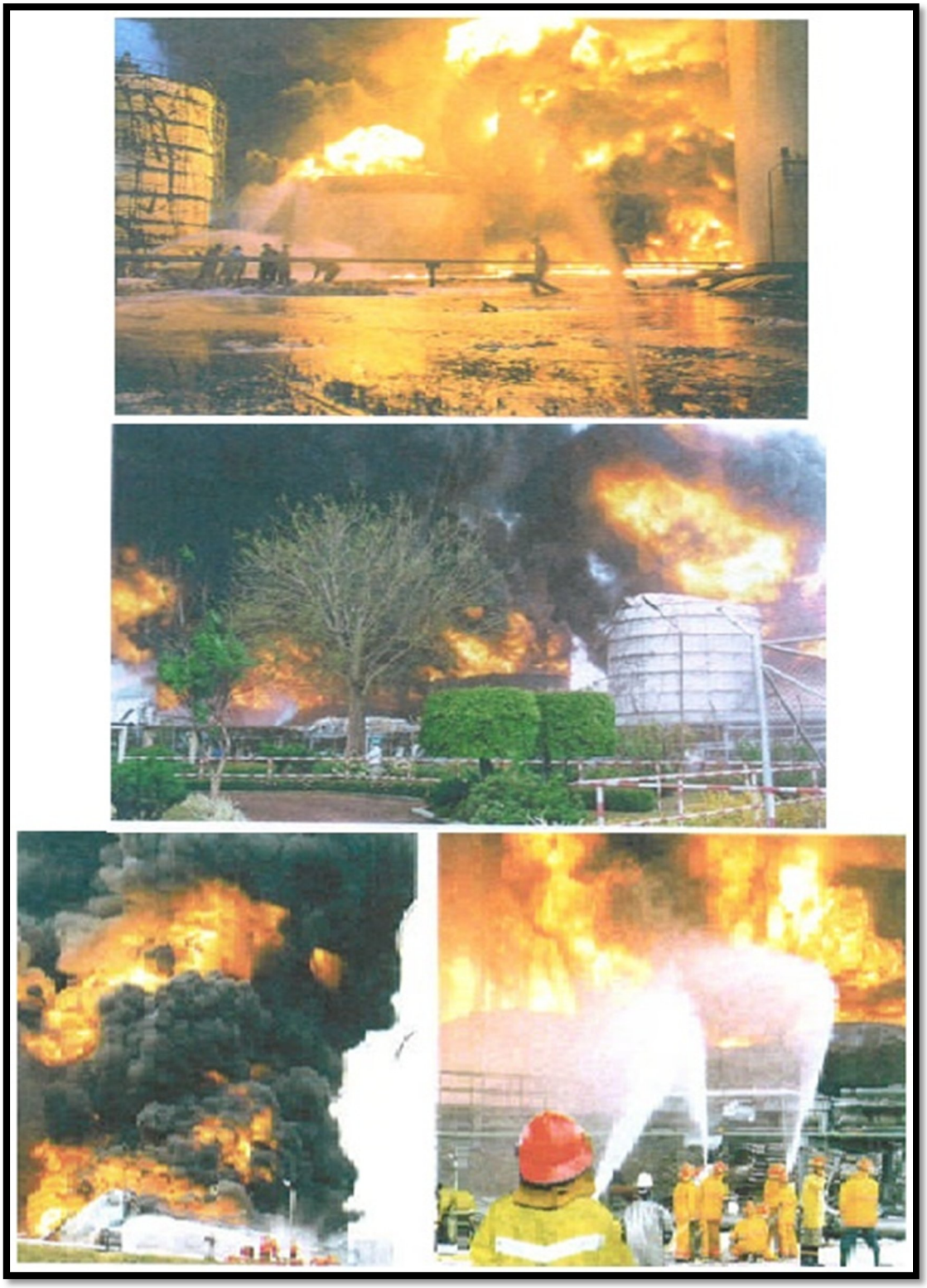


Figure 2.1 : Feu et incidents du à l'explosion dans les réservoirs (Kuan Siew Yeng, 2009).

2.2 Types de réservoir de stockage

La figure **2.2** illustre divers types de réservoirs de stockage qui sont couramment utilisés dans l'industrie aujourd'hui.

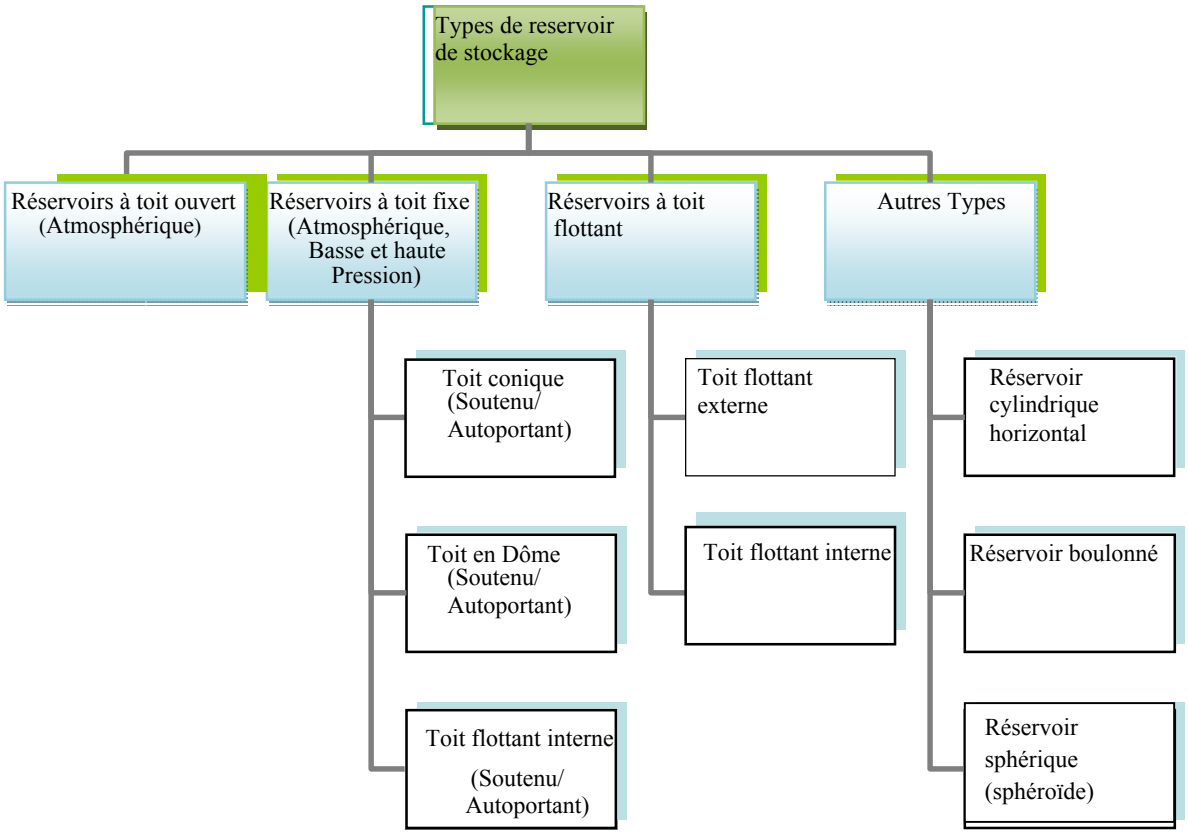


Figure 2.2 Types des réservoirs de stockage.

2.2.1 Réservoirs à toit ouverts

Les cuves ouvertes (figure **2.3**) ne comporte pas de toit et leur emploi est limité aux quelques liquides que l'on peut, sans danger, pour leur qualité ou pour l'environnement, exposer à l'air libre **(Regis Chamayou, 1997)**.

Ce type de réservoir est principalement destiné au stockage d'eau incendie ou d'eau industrielle. Il ne convient pas pour le stockage d'eau potable, de produit pétroliers volatils ou de produits émettant des vapeurs polluantes. Il faut de surcroit tenir compte de la pollution importante du produit stocké (par l'atmosphère, les insectes et les oiseaux), en particulier pour les stockages de longue durée comme, par exemple, les réservoirs d'eau incendient.

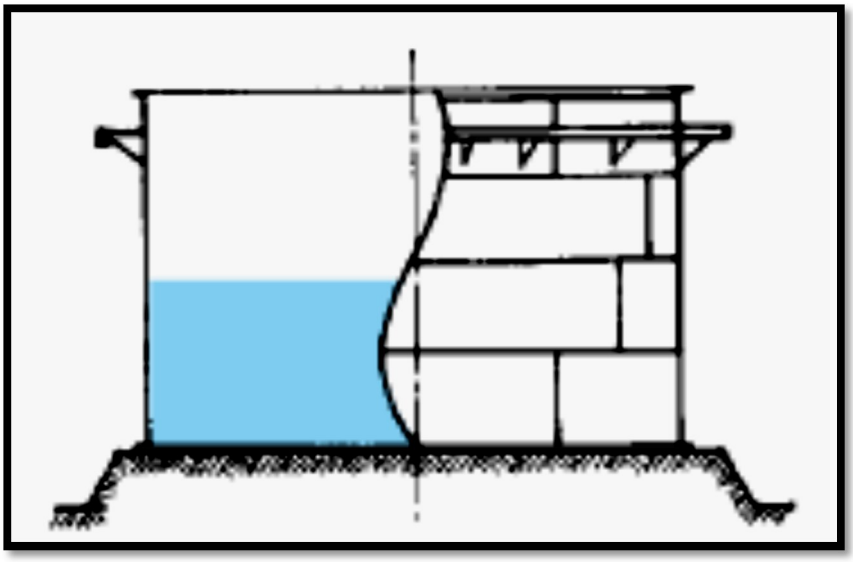


Figure 2.3 : Réservoir à toit ouvert (Regis Chamayou, 1997).

Ces cuves ouvertes sont constituées essentiellement d'**un fond**, d'**une robe** et d'une **poutre raidisseuse** au sommet de la robe.

a) Fond

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 traction. Par contre, la bordure périphérique (tôles annulaires), 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 (figure**2.4a**).

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 (figure **2.4b**) **(Regis Chamayou, 1997)**.

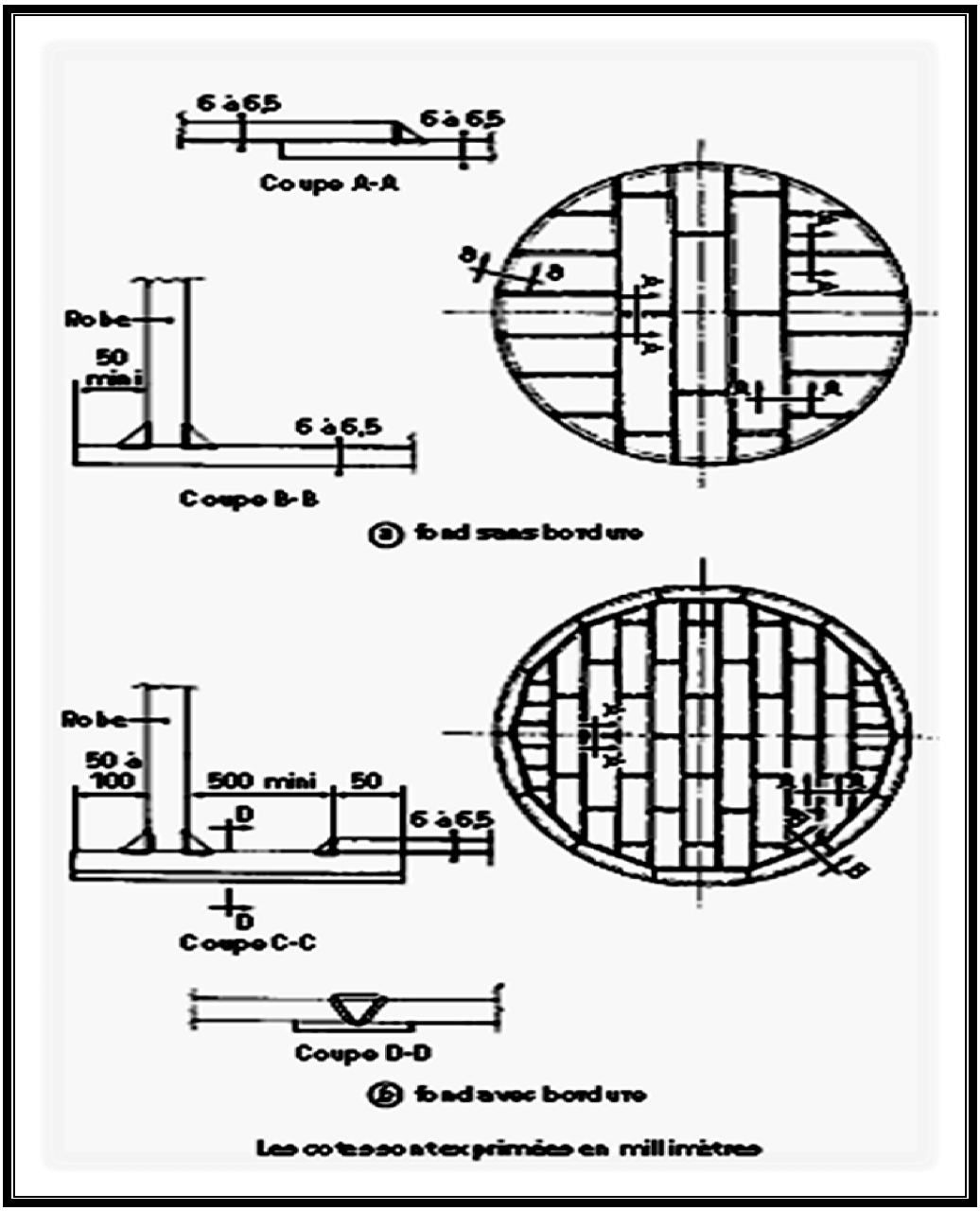


Figure 2.4 : Exemple d'un fond de réservoir (les cotes sont exprimées en millimètre) (Regis Chamayou, 1997).

b) Robe

Elle doit résister aux contraintes développées par la pression hydraulique du liquide stocké. Elle est constituée de rangées de tôles rectangulaires (de longueur L) superposées, appelées **viroles**, qui sont soudées bout à bout. Les joints verticaux de ces tôles sont généralement décalés, à chaque changement de virole, du tiers de leur longueur (figure **2.5a**). L'**épaisseur minimale** de chaque virole est calculée à partir de formules simples définies par les codes de construction. Sa valeur dépend des dimensions de la cuve, de la masse volumique du produit stocké, des caractéristiques mécaniques des aciers employés, des coefficients de sécurité imposés par le code, de la température d'étude et de la surépaisseur de corrosion retenue. L'**épaisseur maximale** autorisée par la plupart des codes de construction est limitée

à 45 mm. Par ailleurs, pour des raisons de construction, ces codes précisent également une épaisseur minimale de robe comprise entre 5 et 10 mm suivant le diamètre du réservoir.

La liaison de la robe sur le fond ou sa bordure s'effectue par une double soudure d'angle (figure **2.4**). Cet **assemblage** est très sollicité par la pression hydrostatique et les mouvements de rotation de la robe qui en découlent. Il doit donc être considéré comme un **détail important** de la construction **(Regis Chamayou, 1997)**.

c) Poutre raidisseuse et raidissage de robe

En l'absence de toit, la partie haute de la robe doit être renforcée par une poutre raidisseuse, pour conserver sa rotondité sous l'action du vent. Cette poutre est placée en principe à un mètre du sommet. Quand elle est assez large, elle est utilisée comme passerelle de circulation autour du réservoir. Elle est souvent constituée de segments de tôles pliés formant sur sa partie extérieure un polygone régulier (figure **2.5b**).

Un raidissage intermédiaire de dimension beaucoup plus modeste, peut être aussi nécessaire sur la robe, entre la poutre supérieure et le fond (figure **2.5c**), pour assurer une résistance correcte au cloquage local de la paroi cylindrique soumise à la pression dynamique du vent. On limite ce raidissage, ou on le supprime, en augmentant légèrement l'épaisseur des viroles les plus minces. Lorsqu'il subsiste, il est réalisé par un ou plusieurs anneaux en profilés cintrés ou par de petites poutres en tôle pliée comme la poutre au vent supérieure **(Regis Chamayou, 1997)**.

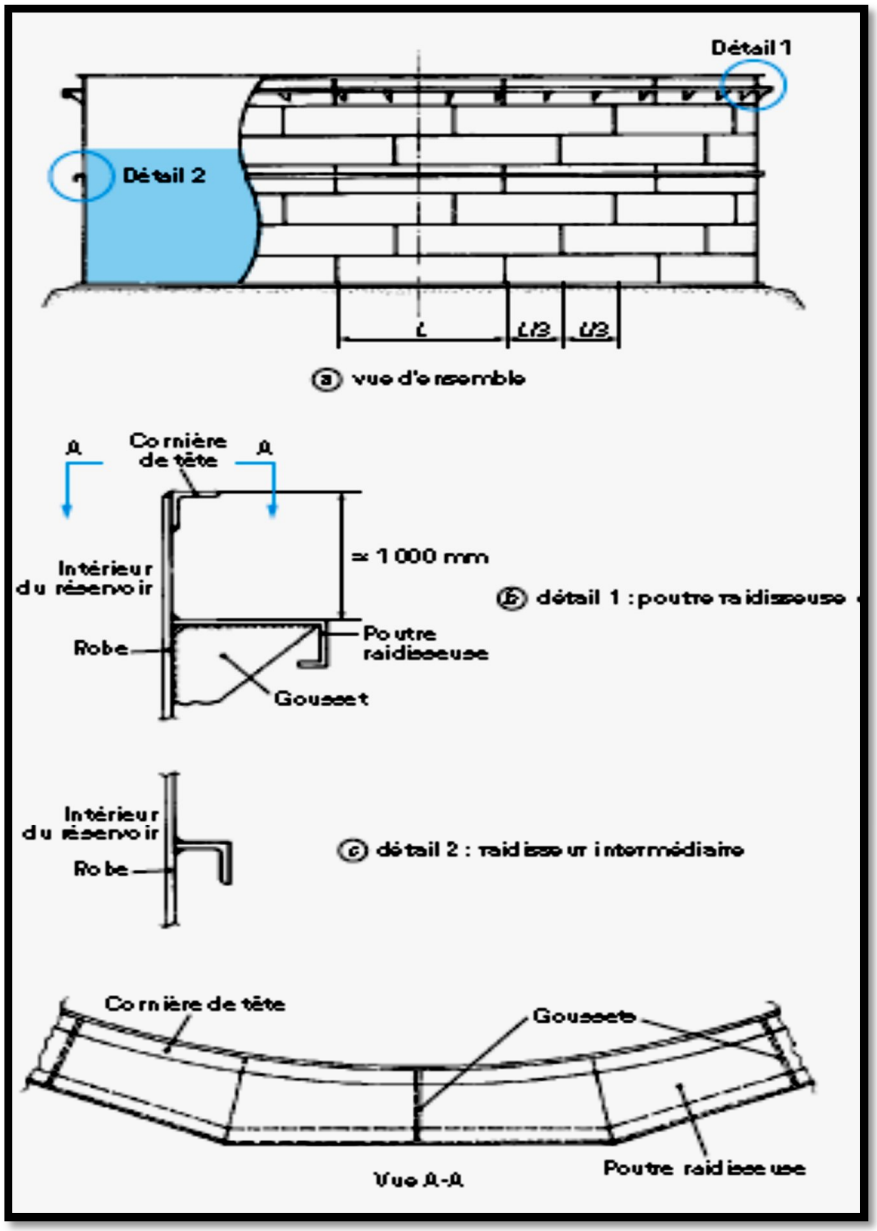


Figure 2.5 : Détails d'une cuve ouverte (Regis Chamayou, 1997).

L'action horizontale d'ensemble du vent, agissant sur la structure, peut aussi nécessiter l'installation de boulons d'ancrage, à la base de la robe. Ils ont pour fonction de s'opposer au soulèvement du fond, lorsque le poids propre en pied de robe n'est pas suffisant pour assurer l'équilibre de l'ouvrage. Lorsqu'ils sont nécessaires, ces ancrages sont répartis à intervalles réguliers autour du réservoir sur des chaises soudées à la robe. La fondation du réservoir doit alors comporter sur sa périphérie un anneau de béton, de section suffisante pour s'opposer aux efforts de soulèvement repris par chaque ancrage.

Les effets d'un séisme peuvent également imposer la mise en place du boulon d'ancrage, mais aussi le renforcement de l'épaisseur des viroles basses et de la bordure de fond. Les vérifications pour ce cas d'étude sont clairement exposées dans l'appendice E du code de construction API-650 édité par l'American Petroleum Institute **(Regis Chamayou, 1997)**.

Nota : L'ensemble des informations données ci-avant pour le fond, la robe et le raidissage des cuves ouvertes reste applicable aux réservoirs à toit fixe et à toit flottant.

2.2.2 Réservoirs à toit fixe

Les réservoirs à toit fixe sont pourvus d'un toit et permettent donc une meilleure conservation des liquides volatils, dangereux ou polluants. Il est ainsi possible d'assurer plus facilement leur conservation et d'empêcher leur contamination par les agents extérieurs.

D'une manière générale, il s'agit de produits dont la tension de vapeur absolue à température ambiante est inférieure à 0,1 bar ou dont le point d'éclair est supérieur à 55 °C **(Regis Chamayou, 1997)**.

Les produits les plus lourds sont à l'état pâteux à température ambiante. Ils nécessitent l'installation d'un système de réchauffage permanent, placé sur le fond des réservoirs, pour les maintenir suffisamment liquides et permettre ainsi leur transfert. Dans ce cas, un calorifuge est prévu sur la robe et, suivant la température de réchauffage, sur le toit du réservoir.

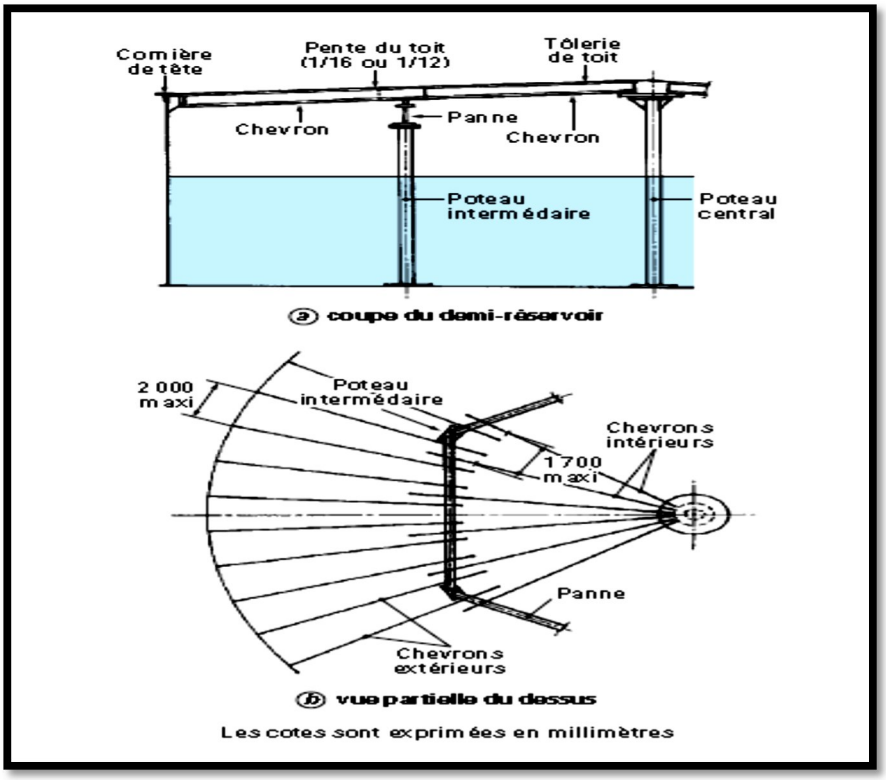
- Le **fond** et la **robe** de ces réservoirs sont du même type que sur les cuves ouvertes. Cependant, la présence du toit fixe assure une rigidité suffisante au sommet de la robe qui permet d'éviter **l'installation d'une poutre raidisseuse**.

- Les toits sont de forme conique ou sphérique (figure **2.6**). Ils sont étudiés pour supporter une surcharge externe d'au moins 120 daN/m^2 correspondant aux effets combinés d'une charge temporaire (neige et dépression interne). La tôlerie de ces toits est réalisée à partir de tôles rectangulaires de 5 mm d'épaisseur, soudées entre elles par recouvrement sur leur face supérieure. La tôlerie est indépendante de la charpente et il n'y a pas de liaison par soudure entre ces deux éléments du toit **(Regis Chamayou, 1997)**.

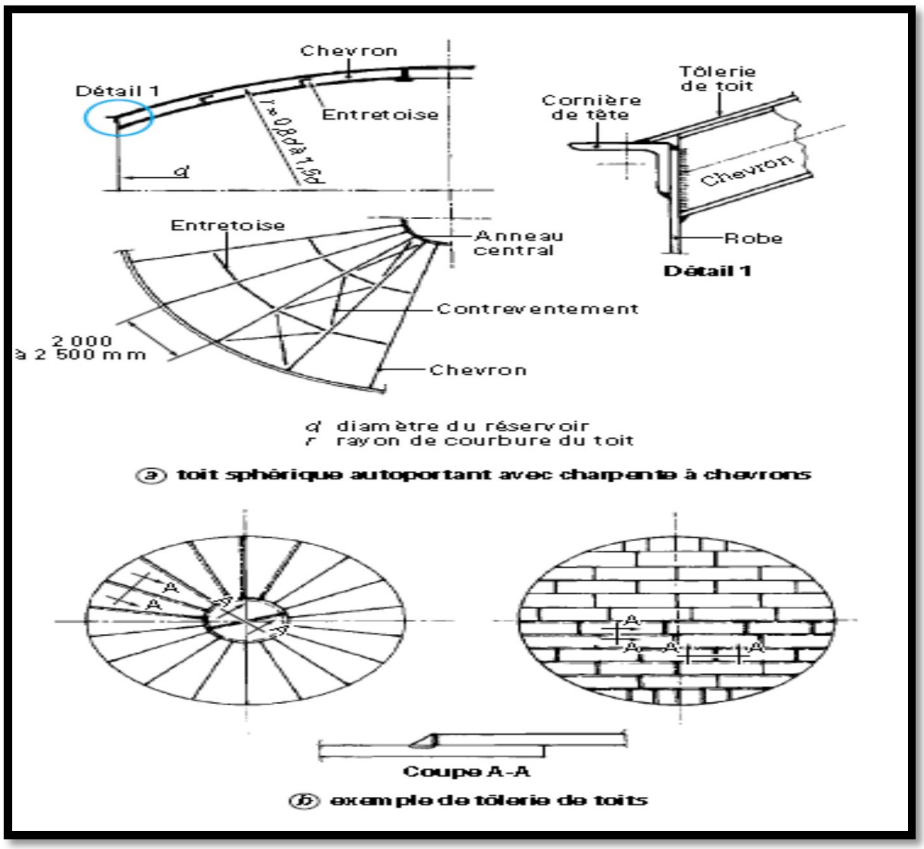
On range les toits fixes en deux catégories : les **toits supportés** et les **toits autoportants** (figure **2.7**).

Toit en forme de Dôme (Sphère) **Toit en forme de Cône**

Figure 2.6 : Types de forme de toit (Regis Chamayou, 1997)..



Toit fixe supportés.



Toit fixe autoportant

Figure 2.7 : Types de Toit fixe (Regis Chamayou, 1997).

Les réservoirs à toits fixe peuvent être aussi classé suivant leur pression et ils sont conçus comme des :

_ Réservoir atmosphérique (libre cours)

_ Réservoirs à basse pression (env. 20 mbar de pression interne)

_ Réservoirs haute pression (env. 56 mbar de pression interne)

Figure **2.8** ci-dessous montre ces trois types de réservoirs.

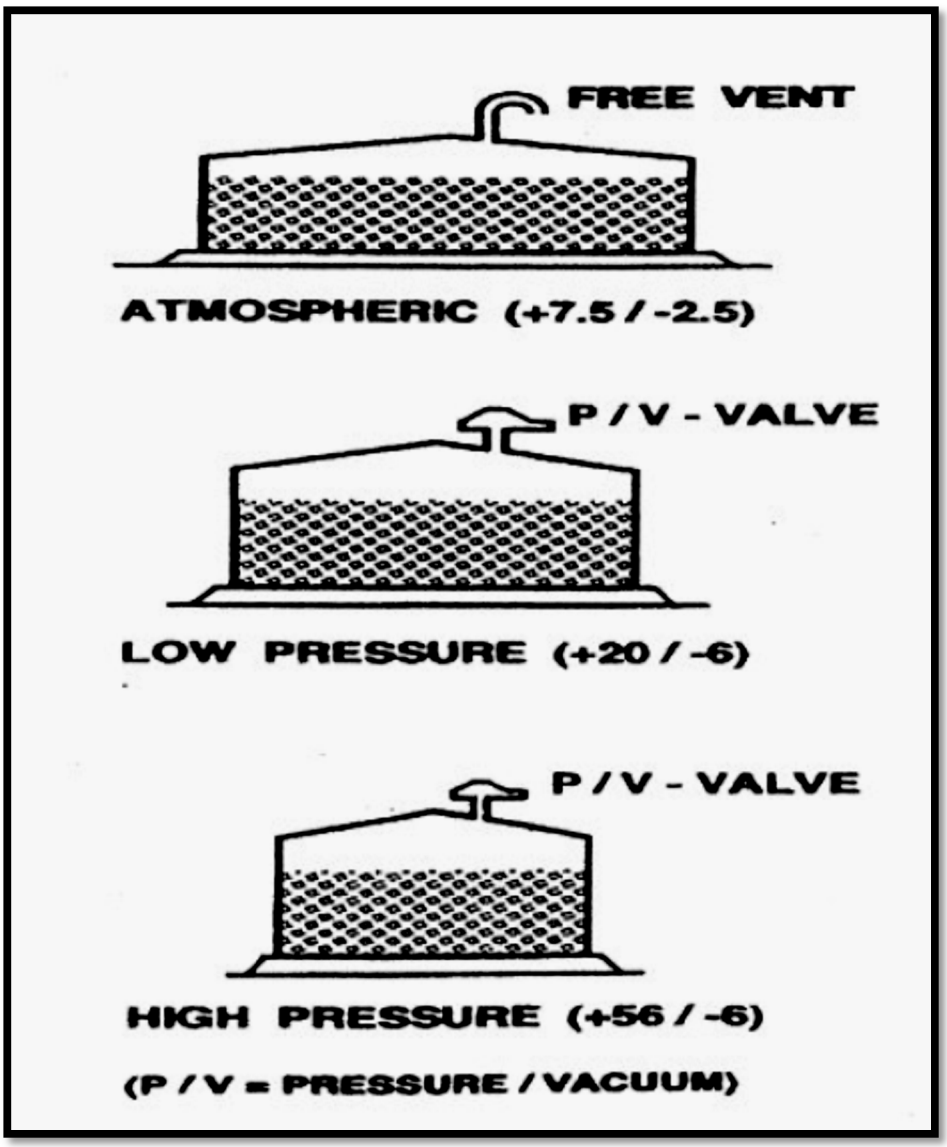


Figure 2.8 : Types de réservoir à toit fixe selon la pression (Kuan Siew Yeng, 2009).

Malgré la protection que constitue le toit, les réservoirs à toit fixe ne sont pas les capacités les mieux adaptées pour la conservation des produits stockés. C'est d'ailleurs pour cette raison que ce type de réservoir n'est plus accepté par les autorités responsables de la protection de l'environnement pour le stockage des liquides volatils à tension de vapeur non négligeable. Les réservoirs à toit fixe sont, en effet, à l'origine de pertes importantes de

produits provenant de deux phénomènes distincts qui sont la capacité de respiration et les mouvements du produit.

a) Pertes par respiration et remplissage

Un réservoir à toit fixe n'est jamais complètement rempli de liquide et il existe toujours au-dessus du produit stocké un espace gazeux, composé d'un mélange d'air et de vapeur émise par le liquide. Cet espace de vapeur est au moins égal au volume du toit, car le niveau maximal de liquide autorisé dans le réservoir est limité au sommet de la robe.

- Au cours de la journée, lorsque le soleil chauffe le réservoir, le liquide s'évapore et la pression dans le réservoir s'élève. Les réservoirs à toit fixe ne sont conçus que pour de faibles surpressions de l'ordre de 5 à 25 mbar. Ces valeurs ne permettent pas de contenir, sur une journée, l'expansion provoquée par cet échauffement et le mélange air-vapeur doit être évacué dans l'atmosphère au travers des évents de toit.
  Tout au contraire, le soir et durant la nuit quand la température baisse, les vapeurs se condensent et de l'air extérieur doit être admis dans le réservoir, par les évents de toit, pour éviter que la structure ne soit soumise aux effets d'une dépression interne. Cet air se mélange ensuite, jusqu'à saturation, avec la vapeur émise par le liquide et, au cours de l'expiration du jour suivant, une nouvelle quantité de produit sera expulsée dans l'atmosphère.
  Le même phénomène de respiration est produit par les variations de la pression atmosphérique. Chaque fois que cette respiration se manifeste, les pertes augmentent et le volume du liquide conservé se réduit. Ces pertes sont appelées **pertes par respiration** (figure **2.9a**).

- Lorsque l'on soutire du liquide, de l'air est également aspiré dans l'espace vapeur, et un nouvel équilibre du mélange air-vapeur se crée en provoquant une évaporation du liquide, qui conduit à une réduction du volume stocké. Par ailleurs, quand on remplit le réservoir, le mélange riche air-vapeur est expulsé à l'extérieur par les évents et perdu dans l'atmosphère. Les pertes associées à ces mouvements de produit sont appelées **pertes par remplissage** (figure **2.9b**) **(Regis Chamayou, 1997)**.

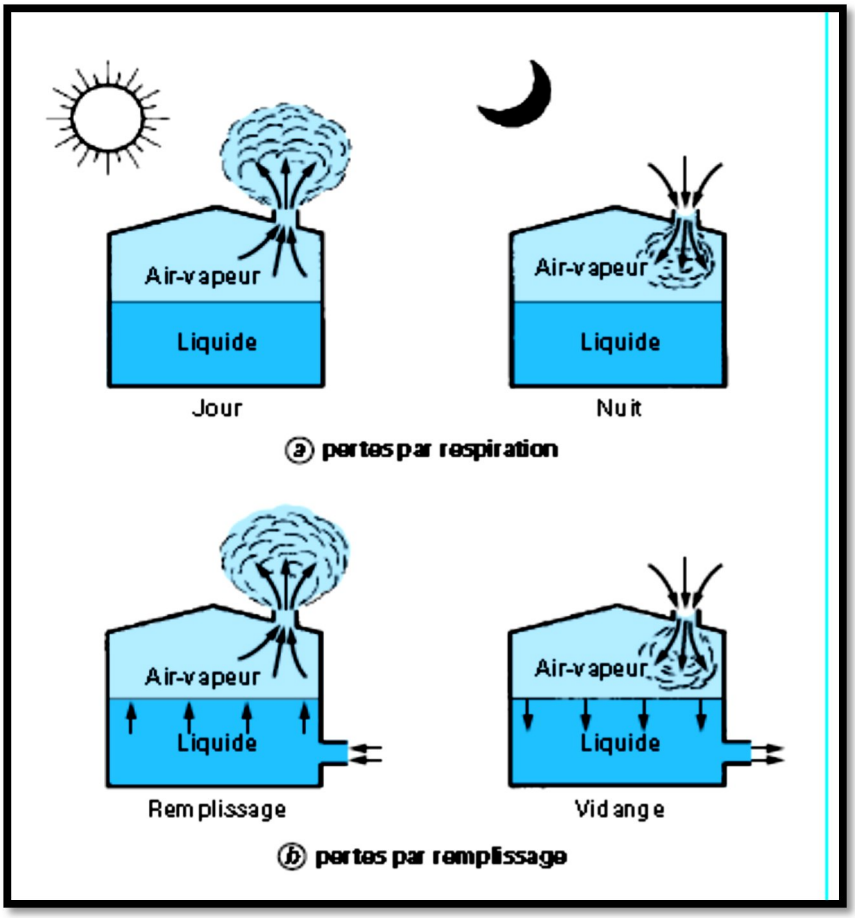


Figure 2.9 : Réservoir à toit fixe : perte de produit (Regis Chamayou, 1997).

L'évaluation des pertes par respiration et par remplissage peut être établie à partir des éléments donnés par le bulletin API-2518 édité par l'American Petroleum Institute.

Le dimensionnement des évents de toit est défini par le code de construction qui se réfère ou qui renvoie le plus souvent aux règles émises par le document API-2000 de l'American Petroleum Institute.

2.2.3 Réservoirs à toit flottant

Les réservoirs à toit flottant comprennent une structure flottante, directement posée sur le liquide, que l'on installe soit dans une cuve ouverte, soit dans un réservoir à toit fixe. Ces réservoirs, en raison de leur remarquable capacité à réduire les évaporations, sont réservés au stockage des produits les plus volatils.

Il ya deux types de toit flottant:

Toit flottant interne est où le toit flotte sur le produit dans un réservoir à toit fixe.

Toit flottant externe est là que le toit flotte sur le produit dans un réservoir ouvert et le toit est ouvert à l'atmosphère.

La figure **2.10** ci-après montre les deux types de toit flottant.

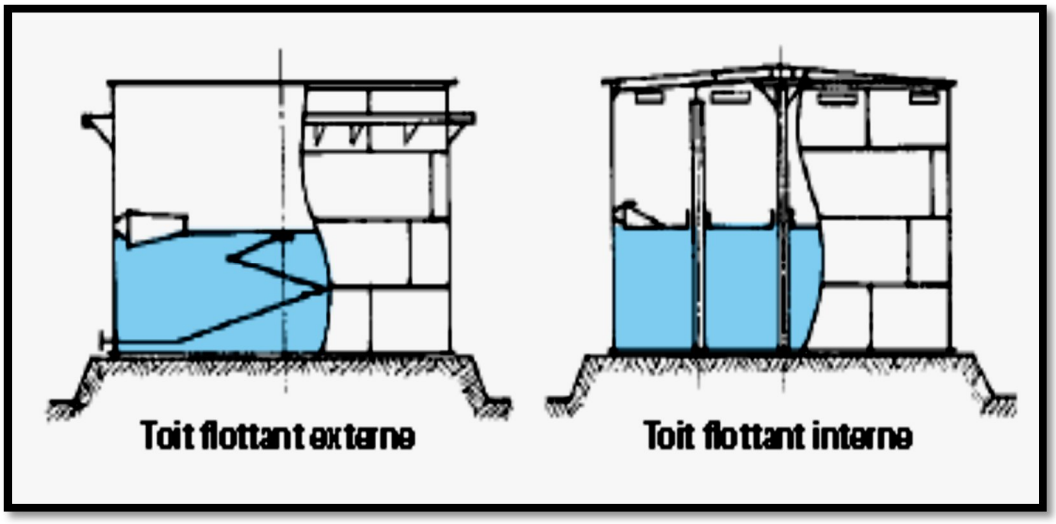


Figure 2.10 : Types de toit flottant (Regis Chamayou, 1997).

Les types de toit flottant externe se composent de:

_ Toit flottant simple pont (Figure **2.11**)

_ Toit flottant Double pont (Figure **2.12**)

_ Bouée spécial et toits renforcés radialement

Le réservoir à toit flottant sera examiné plus en détail dans le chapitre suivant.

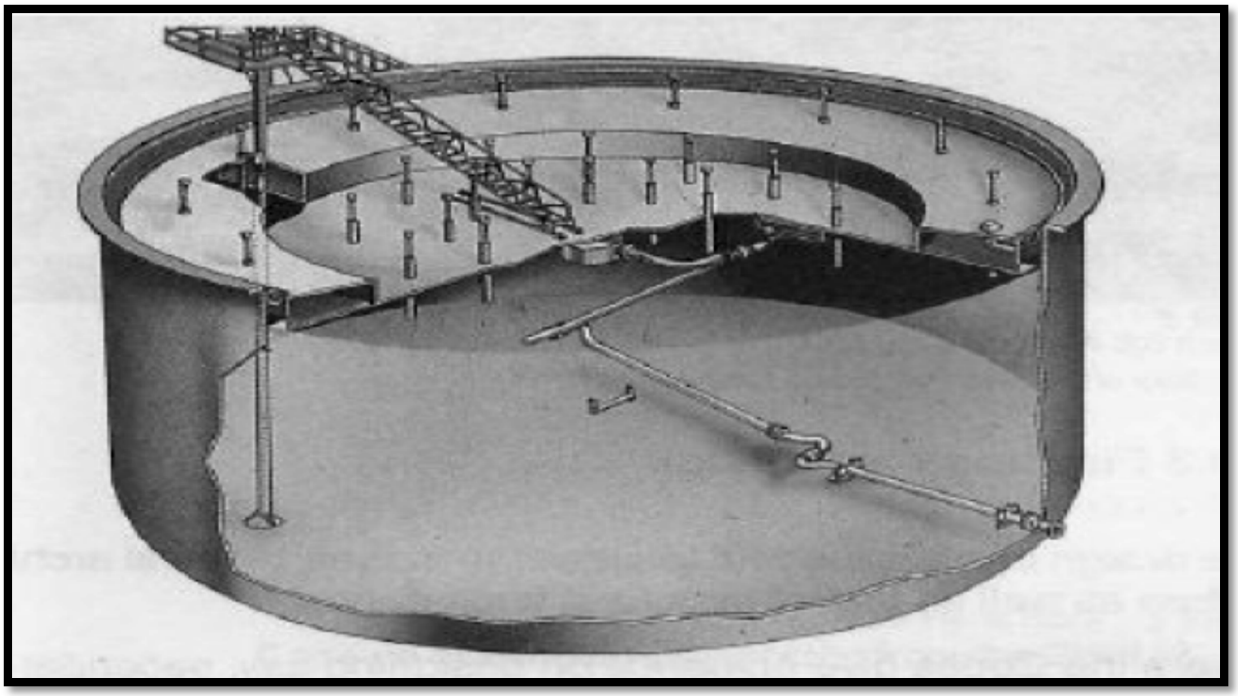


Figure 2.11 : Toit flottant simple pont (Kuan Siew Yeng, 2009).

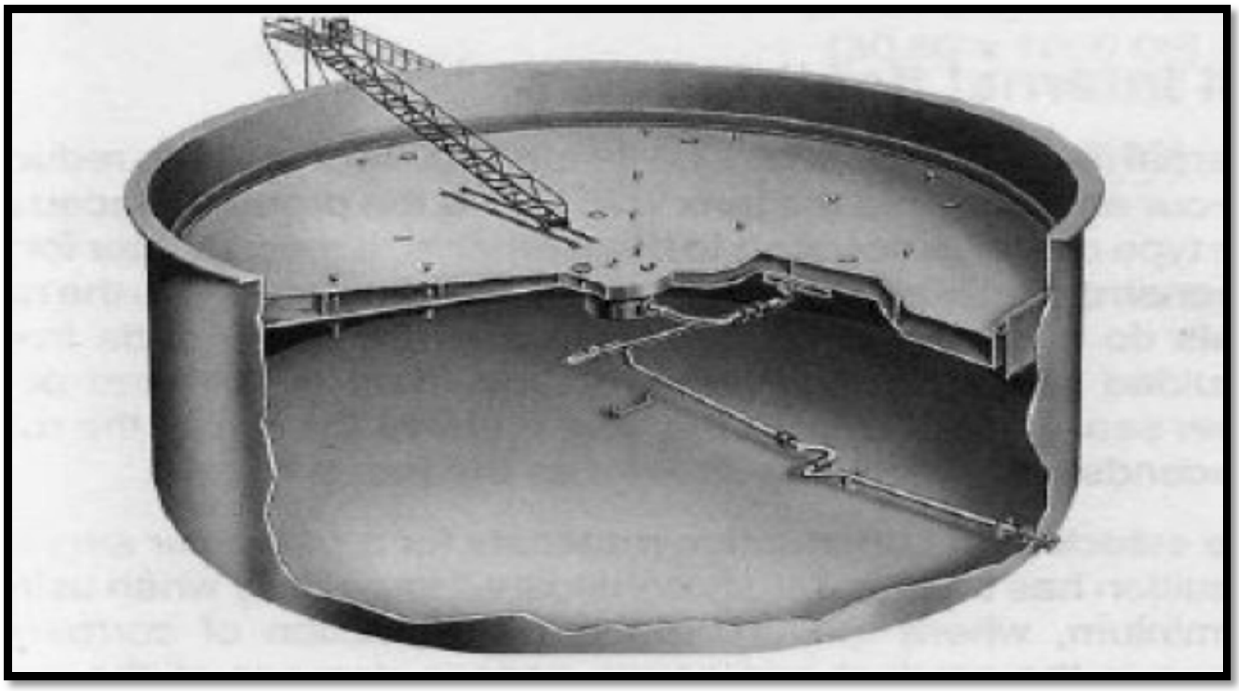


Figure 2.12 : Toit flottant double pont (Kuan Siew Yeng, 2009)..

2.3 Différentiation de la fiabilité

Différents niveaux de fiabilité doivent être adoptés pour les réservoirs, en fonction des conséquences économiques et sociales potentielles de leur défaillance.

a) **Classe de fiabilité 3 :** réservoirs destiné au stockage de liquides ou de gaz liquéfiés potentiellement toxiques ou explosifs et réservoirs de grande taille contenant des liquides inflammables ou polluants des eaux situés en zone urbaine. S'il y a lieu, il convient de prendre en compte les chargements en situations d'urgence pour ces structures.

b) **Classe de fiabilité 2 :** réservoirs de taille moyenne contenant des liquides inflammables ou polluants des eaux situés en zone urbaine.

c) **Classe de fiabilité 1 :** réservoirs agricoles ou réservoirs contenant de l'eau **(Eurocode 3)**.

2.4 Codes et normes de conception

L'étude et la construction des réservoirs de stockage sont régies par des codes et des normes qui regroupent un ensemble de dispositions considérées comme minimales pour la sécurité. Ces règles concernent la conception, le calcul, le choix des matériaux, la construction, la soudure, les contrôles et les essais de résistance. Elles sont élaborées conjointement par les utilisateurs et les constructeurs et sont régulièrement mises à jour pour être complétées ou pour tenir compte des résultats de l'expérience acquise sur les structures en service.

Les documents existants sont peu nombreux. Ce sont tous des documents nationaux, mais leur audience s'étend largement au-delà des frontières des pays émetteurs au profit des pays qui ne possèdent pas de réglementation propre.

La conception et la construction des réservoirs de stockage sont limitées et réglementés par différents codes et normes.

Ces réservoirs sont généralement construits selon les référentiels suivants :

- EN14015 - Spécification pour la conception et la fabrication de réservoirs en acier, soudés, aériens, à fond plat, cylindriques, verticaux, construits sur site destinés au stockage des liquides à la température ambiante ou supérieure (Norme européenne pour la construction des réservoirs de stockage).
- API 650 "Réservoirs soudés en acier destinés au stockage de produits pétroliers" ou les versions précédentes telles que l'API12C-etc.
- CODRES Division 1 - Code français de construction des réservoirs cylindriques verticaux en acier (U.C.C.I.P. et S.N.C.T.).

De manière moins fréquente, les codes suivants ont pu être utilisés :

- British Standard BS 2654 "Construction de réservoirs verticaux non réfrigérés en acier pour l'industrie pétrolière, à partir de tôles de robe soudées bout à bout"
- DIN4119 - Code de construction des réservoirs verticaux allemands

Dans notre cas on va utiliser le règlement Eurocode 3 et le règlement API 650 à titre comparatif des résultats.

3.1 Histoire et introduction

Le réservoir à toit flottant a été développé peu après la Première Guerre mondiale par Chicago Bridge & Iron Company (CB & IC). L'évaporation du produit dans le toit fixe a causé une grande perte d'argent; cette recherche a conduit à mettre au point un toit qui peut flotter directement sur la surface du produit, ce qui réduit les pertes par évaporation.

Les réservoirs à toit flottant sont principalement utilisés pour le stockage de liquides volatiles, dont la tension de vapeur absolue à température ambiante est comprise entre 0.1et 0.75 bar où dont le point éclair est inferieur à 55°C. Tel est le cas des pétroles bruts, des naphtas, des diverses essences et carburants **(Regis Chamayou, 1997)**.

3.2 Principes du toit flottant

Le toit flottant est un disque mobile en acier fourni avec un construit en flottabilité qui lui permet de flotter au-dessus du produit liquide dans un réservoir ouvert ou fermé.

Le diamètre hors tout de la toiture est plus petit de 400 mm que le diamètre intérieur de la cuve, qui a environ 200 mm d'écart de part et d'autre entre le toit et la paroi intérieur du réservoir. Cela est dû à la limitation de la précision de dimension lors de la construction des cuves de grand diamètre. Cet espace annulaire libre existant entre le toit et la robe de la cuve est obturé par un système d'étanchéité déformable qui permet au toit flottant de suivre les mouvements de descente et de montée du produit et de coulisser sans contrainte à l'intérieur de la robe **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Afin de protéger le produit contenu dans le réservoir contre l'évaporation à l'atmosphère et la contamination à partir de des eaux de pluie à travers les espaces entre le bord extérieur du toit flottant et la paroi interne du réservoir, les écarts seront fermés ou scellés par moyen d'un système d'étanchéité flexible.

En raison de problème environnemental, le choix du joint de toit est une des préoccupations majeures dans la conception du réservoir à toit flottant.

Il existe deux types de réservoirs à toit flottant :

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

3.3 Types de toits flottants

3.3.1 Réservoirs à toit flottant externe

Le **réservoir** proprement dit n'est autre qu'une simple cuve ouverte et les détails de conception de la robe et du fond sont identiques à ceux exposés dans le réservoir à toit ouvert du chapitre précédent.

Le **toit flottant** a été inventé au début des années 1920 et, depuis, de nombreux modèles ont été développés avec plus ou moins de succès. Seuls subsistent aujourd'hui ceux

qui ont fait la preuve de leur efficacité. Ils sont tous du type **à contact**, c'est-à-dire que leur face inférieure est entièrement mouillée par le liquide sur lequel ils flottent. Aucun espace vapeur n'existe, ce qui permet d'éliminer les problèmes de corrosion interne, de limiter les risques d'incendie et de pratiquement supprimer les pertes par évaporation. Les deux types principaux de toit flottant à contact actuellement utilisés dans l'industrie, sont **simple pont** et le **double pont**.

Ces toits sont exposés aux intempéries et doivent donc être conçus pour résister aux effets du vent, de la pluie et de la neige. Ils sont dimensionnés pour rester en flottaison sur un liquide de masse volumique au moins égale à 700 kg/m^3 en supportant une charge d'eaux pluviales correspondant à une chute de 250 mm sur une période de 24 h et en supposant que le système de drainage principal est inopérant. Lorsque le toit est au repos sur le fond du réservoir en appui sur ses pieds supports, il doit pouvoir soutenir une surcharge de 120daN/m^2 sans accumulation d'eau **(Regis Chamayou, 1997)**.

a) Toits flottants à simple pont

Ils sont constitués (figure **3.1**) par une membrane circulaire centrale, appelée **pont**, qui repose directement sur le liquide stocké et qui est bordée sur sa périphérie par un caisson annulaire continu divisé, par des cloisons radiales, en compartiments étanches au liquide (figures **3.1** et **3.2**). Le but de ces compartiments est d'assurer la flottabilité de la structure, en service normal, en cas d'accumulation d'eau de pluie sur le pont, ou lors d'une éventuelle crevaison de ce pont. Pour cette dernière condition, on considère que le pont central et deux compartiments quelconques du caisson annulaire sont percés simultanément.

La surface du **caisson annulaire** représente environ 20 à 25 % de la surface du toit sauf pour les petits réservoirs où elle peut atteindre 35 %. La partie inférieure de ce caisson peut être horizontale, mais elle est le plus souvent réalisée avec une pente, orientée vers le haut et au centre du réservoir (figures **3.1a** et **3.1b**). Cela permet de diriger et de piéger sous le pont central les vapeurs émises par le produit, sous l'effet de la chaleur ambiante. La flexibilité du pont central permet ainsi à ces vapeurs de former un dôme gazeux qui agit ensuite comme un isolant au-dessus du liquide jusqu'à ce que la température extérieure baisse et que, par condensation, ces vapeurs retournent à l'état liquide. La partie supérieure du caisson a une pente inverse qui draine les eaux de pluie, ou celles provenant de la fonte des neiges, vers le pont central à partir duquel elles sont ensuite évacuées à l'extérieur du réservoir. Le drainage se fait par le centre du pont au moyen d'une canalisation flexible ou articulée, placée sous le toit flottant, qui chemine dans le produit jusqu'à une tubulure située au bas de la robe **(Regis Chamayou, 1997)**.

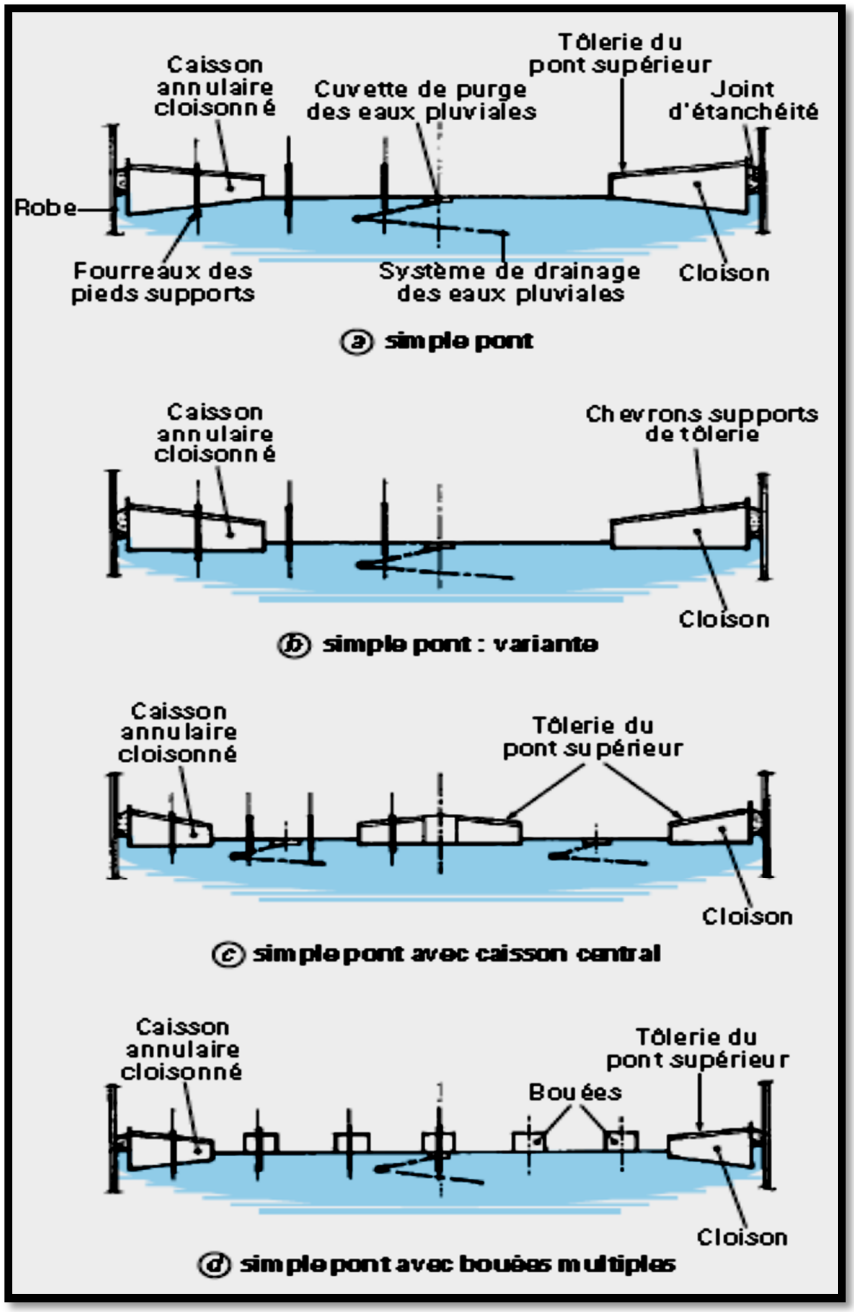


Figure 3.1 : Toit flottant externe simple pont (Regis Chamayou, 1997).

Le **pont central** est réalisé à l'aide de tôles rectangulaires, ayant une épaisseur minimale de 5 mm, assemblées par recouvrement et soudées sur leur face supérieure. Les ponts supérieur et inférieur du caisson annulaire sont également constitués de tôles de 5 mm d'épaisseur, mais, en revanche, les couronnes sont souvent plus épaisses.

Le toit flottant comporte une série de **pieds supports** tubulaires disposés régulièrement sur le caisson annulaire et sur le pont central. Ils servent à poser le toit flottant sur le fond du réservoir. Ces pieds sont réglables en altitude par l'intermédiaire de **fourreaux** soudés au toit. Ils permettent de placer le toit soit en position basse de service, soit en position haute de nettoyage. Les fourreaux des pieds supports doivent avoir une longueur suffisante sous le toit pour éviter la fuite vers l'atmosphère des vapeurs piégées sous le pont central **(Regis Chamayou, 1997)**.

Remarque :

Les toits flottants simples pont sont utilisés pour des réservoirs de 15 à environ 100 m de diamètre. Ils sont plus légers et plus économiques que les toits flottants double pont, mais ils sont plus sensibles aux effets du vent. Leur emploi n'est pas conseillé dans les régions de vent violent ou permanent, en particulier pour des réservoirs excédant 50 m de diamètre.
Ils sont appréciés pour leur capacité à retenir de grandes quantités d'eau en raison de la déformation importante que peut prendre le pont central. Cette propriété est intéressante en cas de mauvais fonctionnement du système de drainage, car elle permet d'éviter la pollution du produit.

Des **variantes de toit flottant simple pont** ont été développées ; il s'agit principalement :

- du toit flottant simple pont **avec caisson central** sur lequel un caisson de flottabilité cylindrique a été ajouté au centre du pont (figure **3.1c**);
- du toit flottant simple pont **avec bouées multiples** qui comporte un ensemble de petits caissons fermés, cylindriques ou cubiques, disposés au-dessus du pont et sur toute sa surface suivant une maille régulière (figure **3.1d**).

L'objectif recherché dans ces concepts est pour l'essentiel la réalisation d'une structure **plus économique**. Elle est obtenue par une réduction de la largeur du caisson annulaire, et donc du poids du toit flottant. Cela est rendu possible par la diminution des efforts exercés par le pont sur le caisson annulaire.

En revanche, ces toits introduisent un **inconvénient** majeur pour le drainage des eaux, qu'il est difficile de rendre efficace. C'est la source de sévères problèmes de corrosion sur le pont.

b) Toits flottants à double pont

Ils sont constitués (figure **3.2**) de deux voiles circulaires en tôle (le pont inférieur en contact avec le liquide et le pont supérieur avec l'air ambiant) qui couvrent tous deux la surface complète du réservoir.

Ces ponts sont séparés par une série de couronnes concentriques verticales formant des caissons de flottaison étanches au liquide. Le caisson annulaire extérieur est, de plus, divisé en compartiments par des cloisons radiales, également étanches au liquide. La flottabilité du toit doit être assurée avec deux compartiments ou caissons quelconques percés ou en cas d'accumulation d'eau sur le toit. La charge d'eau à considérer correspond à une chute d'eau de 250 mm sur 24 h ou à une valeur plus faible si le toit est équipé de trop-pleins de secours, ce qui est, en général, le cas.

Le **pont inférieur** est le plus souvent plat, mais peut être construit avec une légère conicité vers le haut. Quelle que soit sa configuration, le toit double pont possède une capacité de déformation suffisante pour piéger les évaporations au centre du toit. Les effets de la température extérieure sont d'ailleurs bien moindres sur ce type de toit, car le matelas d'air qui existe entre les deux ponts constitue une excellente isolation thermique au-dessus du liquide **(Regis Chamayou, 1997)**.

Le **pont supérieur** repose sur des chevrons en profilés, installés radialement entre les couronnes concentriques qui séparent les deux ponts. Il comporte une pente qui favorise le drainage des eaux vers le centre du toit (figure **3.2a**). Pour les toits de diamètre supérieur à 60m, le pont supérieur est souvent réalisé avec un profil conique à deux pentes opposées pour limiter la hauteur de la couronne extérieure sur laquelle est fixé le joint d'étanchéité (figure **3.2b**). Dans ce cas, le point bas de collecte des eaux se situe sur un cercle intermédiaire où l'on installe deux systèmes de drainage, du même type que ceux qui équipent les toits simple pont **(Regis Chamayou, 1997)**.

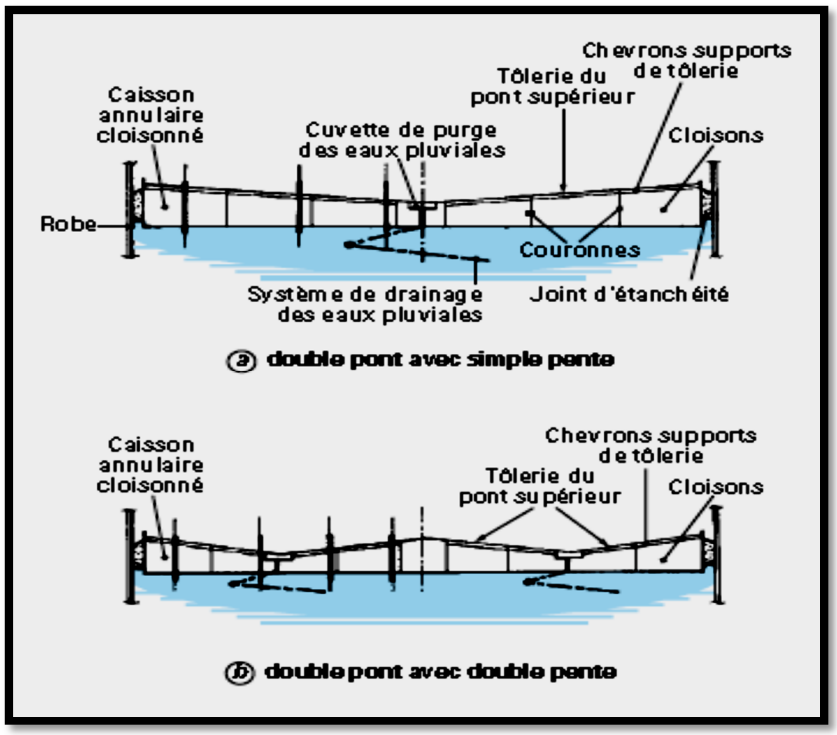


Figure 3.2 : Toit flottant externe double pont.

Les toits flottants doubles pont sont habituellement équipés de drains de secours qui permettent, en agissant comme des trop-pleins, de limiter la charge d'eau sur le toit. L'utilisation de ces trop-pleins de secours, réalisés par de simples tubes ouverts traversant les deux ponts, n'est pas envisageable sur les toits flottants simple pont. En effet, sur ce type de toit, la grande déformation sous charge du pont central ne permet pas l'installation de ces accessoires car ils favoriseraient l'inondation du pont par les remontées du produit stocké.

L'équipement des toits double pont comprend également un ensemble de pieds supports tubulaires, réglables sur deux positions, répartis sur toute la surface de la structure. La construction de ces toits est réalisée à partir de tôles, de 5 mm d'épaisseur minimale, assemblées par recouvrement et soudées par dessus.

Remarque :

Les toits flottants doubles pont sont employés pour des réservoirs de diamètre compris entre 15 et 125 m **(Regis Chamayou, 1997)**.

Malgré leur coût plus élevé, ils présentent un certain nombre d'**avantages**.

- La surface lisse et sans relief du pont supérieur permet un entretien plus facile, une meilleure résistance à la corrosion externe et une prise au vent plus faible. Le pont supérieur est beaucoup plus stable aux effets du vent.

- La couche d'air emprisonnée entre les deux ponts constitue un espace isolant efficace au-dessus du liquide et limite sensiblement les effets de la température ambiante. Par rapport à un toit flottant simple pont, on estime que l'augmentation de la température de surface du liquide stocké, au contact du toit exposé au soleil, est inférieure d'environ 10 °C sur un toit double pont.

Remarque :

Cela conduit à sélectionner de préférence ce type de toit pour le stockage des liquides les plus volatils et pour les pays chauds. Ce toit permet aussi, sous des climats très froids, l'installation d'une isolation thermique complémentaire sur le pont inférieur.

Par ailleurs, lorsqu'il est permis qu'une certaine quantité d'eau traverse le produit stocké par les trop-pleins de secours, le toit double pont est aussi recommandé pour les régions sujettes à des pluies torrentielles.

i) Sécurité

Ces réservoirs sont réservés au stockage des produits liquides volatiles. Ils offrent l'avantage d'interdire la formation d'un ciel gazeux explosible. Cependant, ils peuvent connaître des défaillances parmi lesquelles on citera le coincement du toit flottant, sa perte de flottabilité qui amène sa submersion. De plus, la nécessité de drainer l'eau de pluie, susceptible de s'accumuler, impose la mise en place d'une ligne traversant le produit stocké. Cette ligne est obligatoirement articulée (genouillère) pour suivre les mouvements du toit. Des fuites aux genouillères se sont déjà produites sur de telles installations.

ii) Commentaires

Ces réservoirs sont présents dans toutes les raffineries et sont principalement utilisés pour le stockage du pétrole brut et des produits légers. Ils sont généralement de grandes dimensions et les plus conséquents pouvaient contenir environ 1 000 000 m^3 de produit. A noter qu'en matière de sécurité, nous avons observé la présence de systèmes de fermeture automatique sur les lignes de drainage des eaux des toits flottants des réservoirs. Ces dispositifs qui fonctionnent par différence de densité permettent d'éviter les fuites par ces lignes en cas de perçage d'une genouillère par exemple ou en cas de submersion du toit. En Allemagne, les drains de toit des réservoirs à toit flottant se déversent dans l'espace annulaire formé d'une part par la robe du réservoir et d'autre part, la cuvette de rétention métallique qui forme une double enveloppe.

3.3.2 Réservoirs à toit flottant interne

Les réservoirs à toit flottant interne sont des réservoirs à toit fixe, dans lesquels est installé un toit flottant simplifié, également désigné sous l'appellation d'**écran flottant (Regis Chamayou, 1997)**.

Le toit fixe peut être soit du type supporté, avec des poteaux verticaux à l'intérieur du réservoir, soit du type autoportant sans poteau. Lorsque la structure comporte des poteaux, ils traversent le toit flottant interne par des puits équipés de joints d'étanchéité. Il est recommandé que ces poteaux soient de section tubulaire pour faciliter les déplacements du toit et la réalisation de l'étanchéité des puits.

Ces réservoirs sont particulièrement bien adaptés pour le stockage des produits volatils dont il faut assurer la **conservation**, préserver la **pureté** ou **limiter l'émission des vapeurs toxiques** vers l'atmosphère.

La présence du toit fixe élimine aussi les problèmes d'exploitation rencontrés sur les toits flottants externes dans les régions soumises à d'importantes chutes de neige, à forte pluviométrie ou exposées au vent d'où le blocage du joint d'étanchéité sur la robe par le gel n'est pas à craindre, le drainage des eaux n'est pas nécessaire et l'entretien général est inexistant. Le fonctionnement du toit flottant, à l'abri des turbulences du vent, contribue énormément à réduire les pertes par évaporation et rend ce type de réservoir plus performant que les toits flottants externes.

Des évents (dont le nombre et les dimensions sont fixés par le code de construction) sont installés à intervalles réguliers au sommet de la robe ou en périphérie du toit, pour permettre une circulation d'air dans l'espace compris entre l'écran flottant et le toit. Ils empêchent la formation éventuelle d'un mélange air-vapeur inflammable ou dangereux au-dessus du toit flottant. Cependant, sur les stockages de produits toxiques où l'on désire éviter, pour la sécurité de l'environnement, les émissions vers l'atmosphère, ces évents sont supprimés et la respiration de cet espace s'effectue en circuit fermé, le plus souvent sous gaz neutre.

Les toits flottants internes les plus employés appartiennent à l'un des deux **types** généraux suivants :

- toit flottant de conception soudée ;
- écran flottant de conception boulonnée.

Ces toits sont dimensionnés pour flotter sur un liquide ayant une masse volumique au moins égale à 700 kg/m^3. Ils doivent avoir une flottabilité suffisante pour supporter au moins deux fois leur propre poids lorsque deux compartiments ou deux flotteurs quelconques sont crevés. De plus, ils doivent permettre, en flottaison ou au repos, la circulation en toute sécurité de deux hommes sur n'importe quelle partie du toit **(Regis Chamayou, 1997)**.

Ils sont équipés (comme les toits flottants externes) d'un ensemble de **pieds supports** qui peuvent être fixes ou réglables sur deux positions. Ces supports doivent résister à une surcharge uniformément répartie sur le toit de 60 daN/m^2 lorsqu'ils reposent sur le fond du réservoir **(Regis Chamayou, 1997)**.

a) Toits flottants internes soudés

Ils sont réalisés à partir de tôles d'acier de 4 à 5 mm d'épaisseur, soudées entre elles par recouvrement sur leur face supérieure, pour former un pont continu et étanche, en contact direct avec le liquide stocké. Une couronne verticale soudée au-dessus du pont, borde le périmètre du toit et permet l'installation du joint annulaire d'étanchéité (figure **3.3a**). La flottaison de ce simple couvercle n'est assurée que par le volume correspondant à l'enfoncement de la structure dans le liquide **(Regis Chamayou, 1997)**.

Ce type de toit est largement employé jusqu'à 50 m de diamètre. Au-delà et jusqu'à 100 m de diamètre, sa flottabilité est augmentée par l'adjonction de compartiments annulaires placés au-dessus du pont (figure **3.3b**).

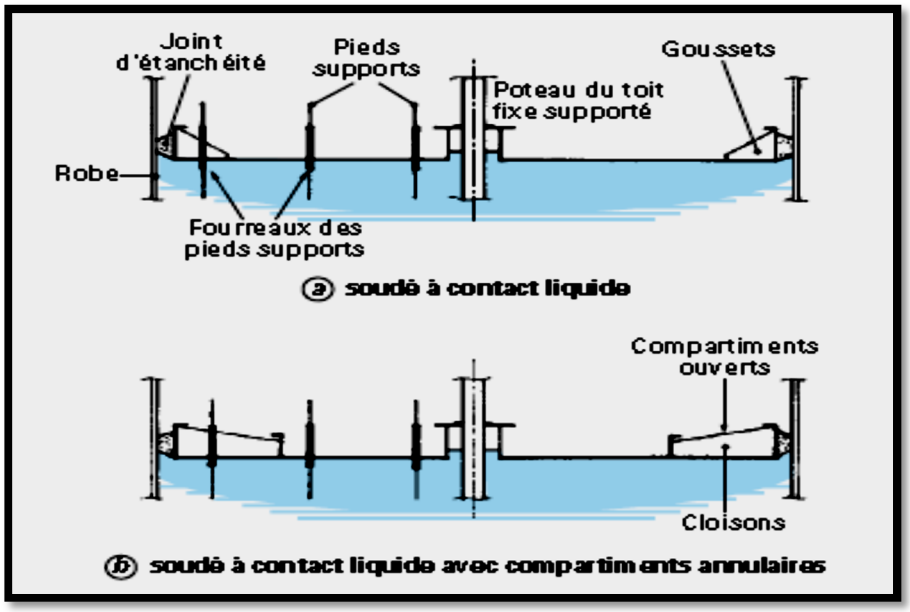


Figure 3.3 : Toits flottants internes soudés (Regis Chamayou, 1997).

Ces compartiments ne comportent pas de fermeture supérieure, en raison de la protection atmosphérique assurée par le toit fixe. Lorsque l'on recherche une plus grande sécurité, ils peuvent être couverts pour former des caissons annulaires étanches, comme sur les toits flottants externes simples pont.

Ces toits à contact ont tous les avantages d'une construction soudée. Ils sont résistants et durables, ont une bonne stabilité en présence de produits émulsionnés ou gazeux et sont particulièrement étanches aux vapeurs. Leur conception simple ne permet pas au produit d'être piégé et, lors de mise hors service du réservoir pour entretien, leur dégazage avant intervention s'effectue sans problème et d'une façon sûre.

b) Toits flottants internes boulonnés

Ils peuvent être à contact liquide ou comporter une phase vapeur.

Les **écrans boulonnés à contact liquide** sont constitués de panneaux rigides préfabriqués de 25 à 40 mm d'épaisseur comportant un revêtement de surface (figure **3.4a**). Ils sont mécaniquement reliés entre eux par boulonnage pour former un pont continu étanche, posé directement sur le liquide. Ces panneaux peuvent être réalisés soit en mousse de polyuréthanne à cellules fermées, prise en sandwich entre deux feuilles minces d'aluminium,

soit en mousse de plastique rigide moulée recouverte de résine renforcée de fibres de verre. Une couronne périphérique délimite la surface de ces panneaux en permettant la fixation du joint d'étanchéité **(Regis Chamayou, 1997)**.

Ce type d'écran est insubmersible, mais il peut s'imprégner du liquide stocké sur lequel il baigne. Il n'est pas aussi étanche aux vapeurs que les toits soudés. Il peut atteindre 80m de diamètre.

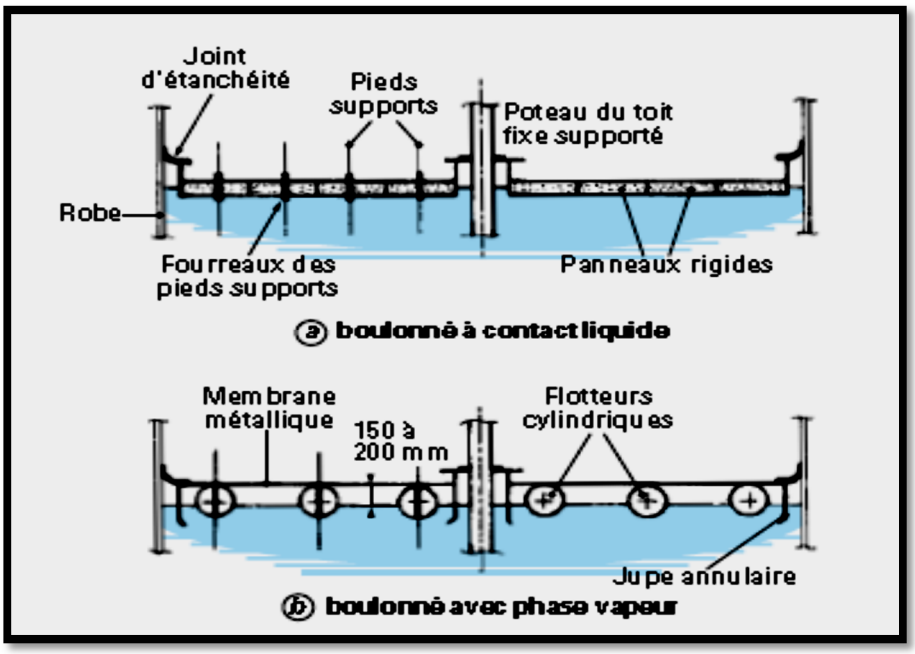


Figure 3.4 : Toits flottants internes boulonnés (Regis Chamayou, 1997).

Les **écrans boulonnés avec phase vapeur** sont constitués d'une membrane métallique très mince (0,5 mm), réalisée par une série de bandes étroites et parallèles de feuillards, réunis entre elles par boulonnage sur des longerons qui reposent sur des flotteurs tubulaires de 200 à 250 mm de diamètre (figure **3.4b**). Un espace de vapeur de 150 à 200 mm de hauteur existe entre le liquide stocké et cette membrane. Une jupe verticale ceinture cette structure flottante en plongeant dans le liquide pour contenir les vapeurs. Elle assure également le support du joint d'étanchéité annulaire. L'ensemble des matériaux constituant ces écrans doivent résister à l'éventuelle action corrosive des vapeurs. En général, la totalité des composants sont soit en aluminium, soit en acier inoxydable.

La conception boulonnée et la présence d'un matelas gazeux sous le pont sont des éléments défavorables sur le plan des pertes de produit. En revanche, ces écrans présentent certains **avantages** :

- ils possèdent une importante réserve de flottabilité qui donne une grande sécurité de service ;
- leur conception modulaire permet leur installation sur des réservoirs à toit fixe existants sans qu'il soit nécessaire de pratiquer une ouverture de montage dans la robe : tous les éléments de ces écrans peuvent, en effet, être introduits dans le réservoir par un simple trou d'homme placé sur la robe.

3.4 Les avantage du réservoir de stockage à toit flottant

Comme le toit flottant flotte directement sur le produit, il n'y a aucun espace vapeur et éliminant ainsi toute possibilité d'une atmosphère inflammable.

Il réduit les pertes par évaporation et donc la réduction de la pollution atmosphérique comme l'exige la réglementation.

Le surcout entrainé par la construction du toit flottant est compensé par les gains réalisés par la préservation du stock.

Le fait qu'il n'existe pas de vide entre le liquide et le toit flottant ne laisse pas apparaître la formation de vagues pendant le séisme.

3.5 Description du processus et exigences techniques

La détermination des capacités est l'une des premières étapes de la conception du réservoir. Ce n'est qu'après la capacité est connue, que le réservoir peut être dimensionné en place.

La définition de la portée maximale peut être facilement expliquée à la figure **3.5** ci-après.

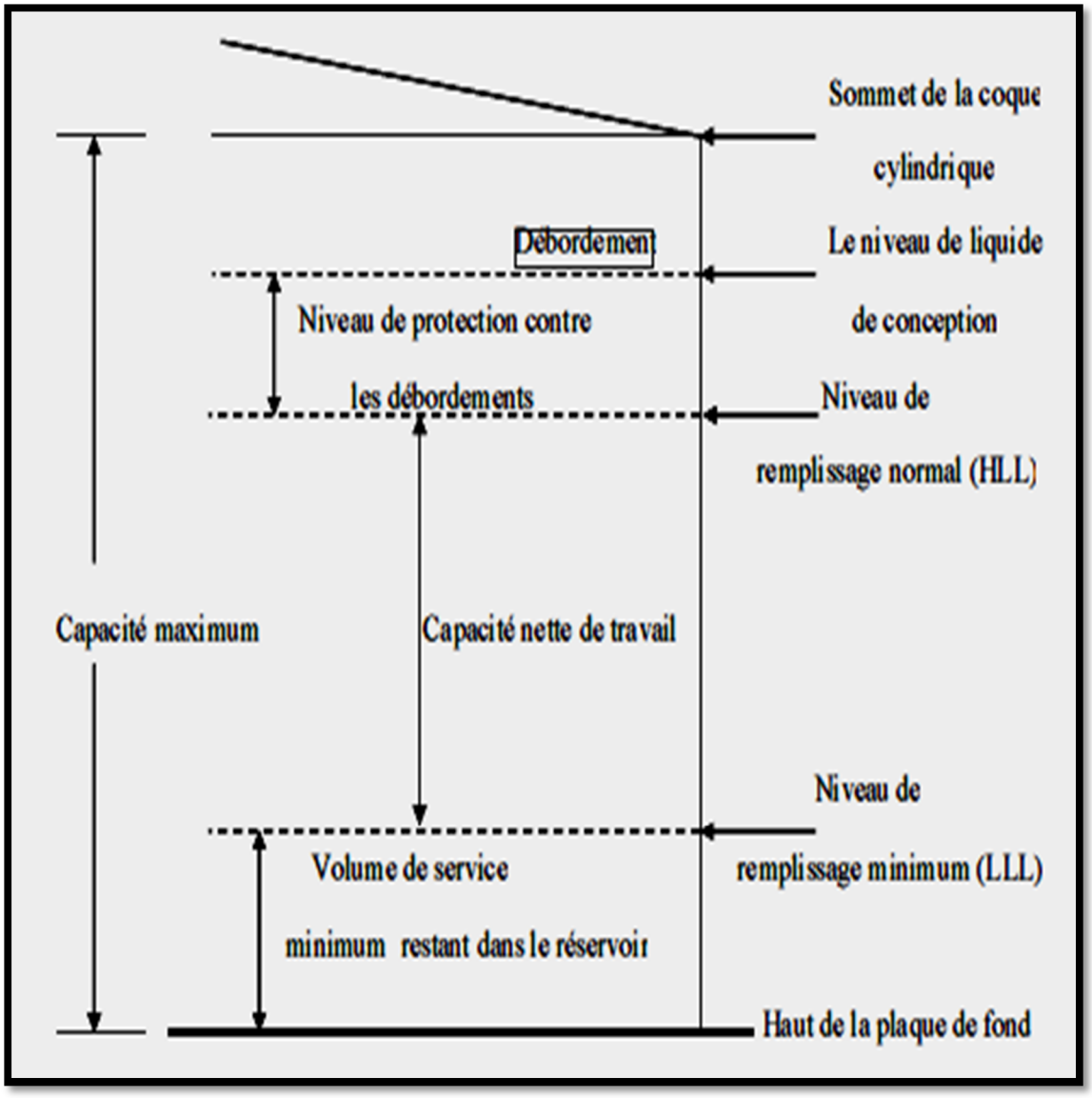


Figure 3.5 : Capacités de stockage et niveaux d'un réservoir (Kuan Siew Yeng, 2009).

La capacité maximale ou totale est la somme de la capacité inactive (volume restant de fonctionnement minimale dans le réservoir), de la capacité de travail réel ou net et de la capacité de protection contre les débordements.

La capacité de roulement net est le volume de produit disponible dans des conditions normales d'exploitation, qui est entre le niveau bas de liquide (LLL) et le niveau de liquide élevé (HLL) **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

La capacité du réservoir de stockage est dimensionné en fonction des 85 000 barils pétrolier et 3 jours d'indisponibilité du système de chargement hors le taux de production est de 51 000 barils par jour **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Les exigences techniques à définir pour un dispositif sont la déclinaison des exigences techniques de la fonction de sécurité qui lui est associée.

Ces exigences techniques sont indiquées dans le document intitulé *« détermination des fonctions de sécurité et de leurs exigences techniques - identification des barrières techniques de sécurité »* **(Isabelle Vuidart & Marc Caumont)**.

Dans le document intitulé *« Présentation de la méthodologie pour l'identification des barrières techniques de sécurité et de leurs exigences techniques »*, l'INERIS propose une grille permettant de définir les exigences techniques d'éléments de sécurité. Cette grille est à adapter au dispositif étudié **(Isabelle Vuidart & Marc Caumont)**.

3.6 Le choix des matériaux et l'évaluation de la corrosion

L'étude de sélection des matériaux est effectuée par le spécialiste matériels, pour passer en revue le plan d'étude de base et évaluer la longévité attendue des matériaux pour diverse tuyauterie et équipement, il propose ensuite des matériaux appropriés pour la durée de vie requise de 30 ans. L'approche de ce choix des matériaux est d'évaluer la corrosivité interne des fluides par rapport à l'utilisation d'acier au carbone.

L'acier au carbone est considéré comme premier choix, en raison de son faible coût, de sa disponibilité et les conditions de fabrication et d'essais bien comprises. La sélection matérielle pour le système d'hydrocarbure est basée sur l'évaluation de propriétés détaillées des fluides, en particulier en utilisant les modèles de dioxyde de carbone.

Les réservoirs de stockage atmosphériques sont réalisés en acier au carbone. Cependant, pour quelques applications particulières assez rares, l'utilisation d'aciers inoxydables peut être nécessaire (nature corrosive des produits stockés, stockage alimentaire, impératifs de pureté, etc.). Les aciers au carbone employés sont de deux types : les aciers de construction et les aciers pour chaudières et appareils à pression. Les aciers de construction sont utilisés en priorité pour la réalisation des réservoirs atmosphériques. L'emploi des aciers pour chaudières ou pour appareils à pression est, en général, limité aux viroles basses épaisses des robes des ouvrages de grande capacité. Les caractéristiques mécaniques minimales de ces aciers restent dans les fourchettes suivantes :

- Résistance à la rupture de 360 à 530 N/mm^2 ;
- Limite d'élasticité de 235 à 355 N/mm^2 **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Les aciers utilisés sont généralement choisis parmi ceux couverts par les normes données dans le fascicule Doc. BM 6 593 **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

3.6.1 Corrosion du CO_2

Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau et se dissocie pour former de l'acide carbonique faible qui provoque la corrosion des aciers au carbone. L'élévation de la pressions partielles du CO_2 impliquent plus de CO_2 dissous donc la vitesse de corrosion est plus élevé. Une température et une pression plus élevées augmentent le taux de corrosion, mais dans certaines conditions, d'environ 70 à 80 ° C, une couche protectrice de carbonate peut se former sur la surface d'acier qui réduit la vitesse de corrosion comparée à des températures plus basses, où la couche ne forme pas **(DT 94, Octobre 2011)**.

Les alliages anticorrosion (CRA) sont utilisés pour éviter la corrosion à des teneurs élevées de CO_2, et dans un état moins corrosif et où la durée de vie requise est limité, il serait plus économique d'utiliser l'acier au carbone avec une surépaisseur de corrosion et / ou un traitement de l'inhibiteur chimique. La présence de CO_2 laisse entendre que l'acier au carbone aura une durée de vie limitée en raison de l'amincissement de la paroi, une surépaisseur de corrosion est pratique qui peut aller jusqu'à 6 mm **(DT 94, Octobre 2011)**.

Autres préoccupations pour le choix des matériaux sont:

i) Matériel à la température minimale

A basse température, les aciers ferrite (aciers alliés non ou faiblement alliés, et les aciers inoxydables duplex), perdent leur ductilité spontanément pendant que les matériaux sont refroidies, ce qui permet toutes les fissures et craquelures comme défauts, ces dernières sont inoffensifs à des températures normales de fonctionnement, mais risquent de se propager sous la charge**(DT 94, Octobre 2011)**.

Pour avoir une plus grande résistance à la fragilisation à basse température, les matériaux et les soudures doivent être traités thermiquement. Pour une température de service encore plus basse, les matériaux à grains fins sont requis, les aciers à forte teneur en nickel, ou des matériaux austénitiques doivent être utilisés **(DT 94, Octobre 2011)**.

Les changements saisonniers dans des températures ambiantes exigent que les propriétés à basse température des matériaux doivent être sélectionnées.

ii) Mercure

Mercure (Hg) est un composant de trace de tous les combustibles fossiles. Il est donc présent dans les gisements d'hydrocarbures liquides et de gaz naturel, et peut transférer dans l'air, l'eau et le sol **(DT 94, Octobre 2011)**.

Les matériaux inappropriés pour l'hydrocarbure coulent en présence de mercure due à la fragilisation du métal liquide, qui aura comme conséquence :

- Aluminium et alliages d'aluminium
- Titane et alliages de titane
- Cuivre et alliages de cuivre
- Zinc et alliages de zinc **(DT 94, Octobre 2011)**.

Les matériaux recommandés sont:

- Les aciers au carbone
- Les aciers inoxydables (acier inoxydable austénitique, l'acier inoxydable duplex)
- Alliages de nickel **(DT 94, Octobre 2011)**.

3.7 Conception mécanique

La conception de contrainte et l'analyse du réservoir de stockage, est la plus grande étape de réalisation, car elle fournit la base pour la stabilité et l'intégrité du réservoir.

L'analyse des contraintes de base sont pris en charge dans la conception du réservoir comme suit:

- Paroi de l'enveloppe du réservoir due à une charge interne et externe
- Plaque de fond / plancher Réservoir
- Toit du réservoir - Dans ce cas, toit flottant

Les réservoirs de stockage ont toujours l'air grand et fort, et on les désigne souvent comme «boîte de conserve». Une simple comparaison est faite en termes de leurs tailles et force dans le tableau **3.1** ci-après.

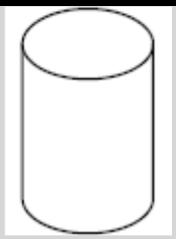
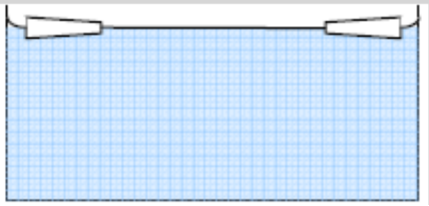
	Boite de conserve d'haricot	**Réservoir de stockage**
		
Diamètre, D	75 mm	10 000 mm
Hauteur, H	105 mm	14 000 mm
Épaisseur de la robe, t	0.15 mm	5 mm
Rapport D / H	1/1.4	1/1.4
Rapport t/D	0.002	0.0005

Tableau 3.1 : Simple comparaison entre une boite de conserve d'haricot et un réservoir de stockage (Kuan Siew Yeng, 2009).

D'après le tableau **3.1** on peut voir que le rapport du réservoir **« t/D »** est quatre (4) fois moins que celui de la boite de conserve, ce qui montre la fragilité du réservoir s'il est soumis a un vide partiel qu'on appelle aussi Vacuum. La figure **3.6** montre un exemple d'un réservoir éclaté dus au vide partiel (vacuum) **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Figure 3.6 : Ruine d'un réservoir du au vacuum (Kuan Siew Yeng, 2009).

3.8 Considération de la conception mécanique

Les principaux facteurs pour déterminer l'épaisseur de la coque, est les charges. Le chargement primaire pour déterminer l'épaisseur de la coque de base, est comme suit:

- Produit interne - pression hydrostatique
- La pression dans l'espace vapeur

(Ce facteur n'est pas applicable pour le toit flottant car le toit flotte directement sur le liquide, ainsi il n'ya pas d'espace vapeur).

Autres charges externes qui doivent être prises en considération sont:

- Pressions internes (pression ou dépression)
- Action de la neige
- Action du vent
- Action séismique
- Souffle dû à l'explosion adjacente des réservoirs
- Incendie
- Test Hydraulique
- Surcharges sur le toit et les plates-formes
- Charge d'impact
- Charges localisées résultant de becs, des pièces jointes, d'échelle, d'escalier et de plate-forme.

Les charges primaires exercées sur le réservoir sont illustrés dans la Figure **3.7**:

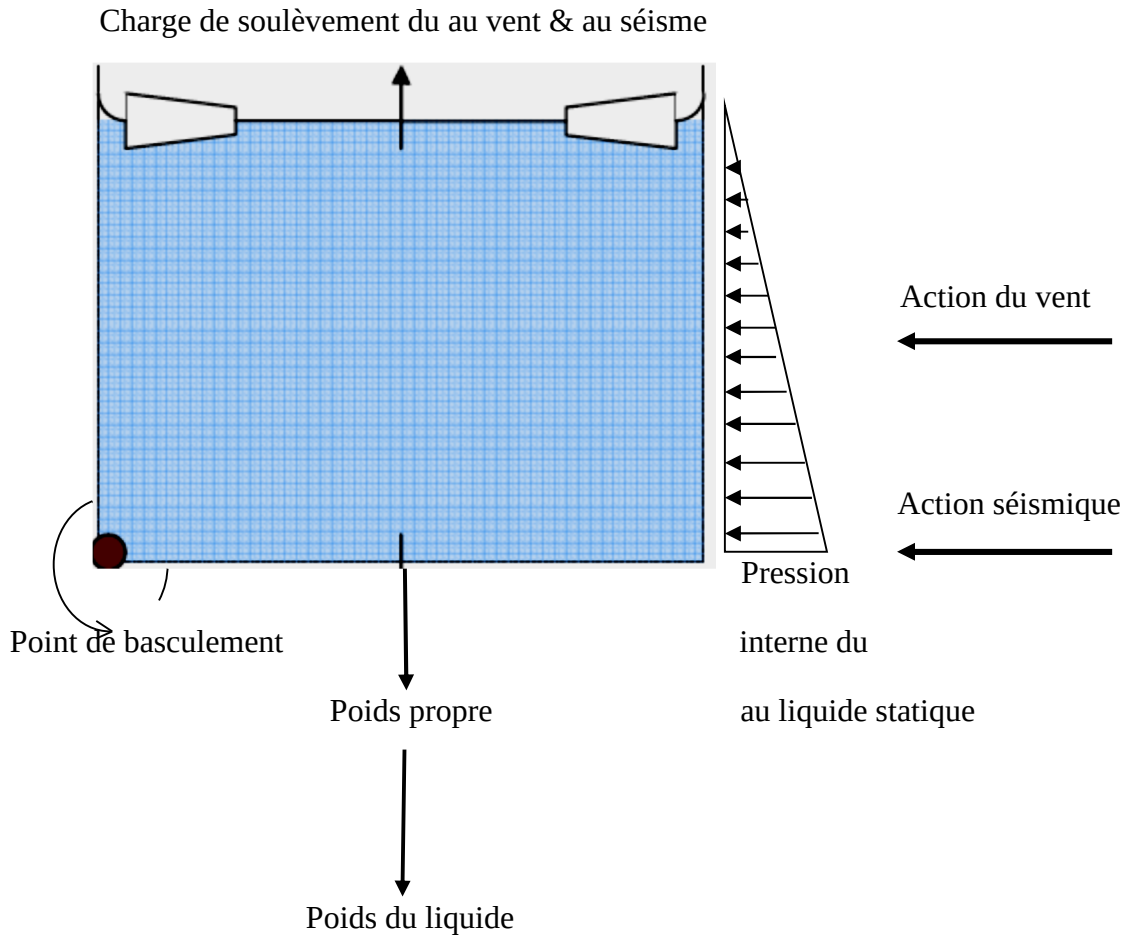


Figure 3.7 : Les charges primaires exercées sur la paroi du réservoir (Kuan Siew Yeng,2009).

La pression interne exercée sur la paroi du réservoir est principalement causé par le produit liquide stocké; la pression est au plus grande au bas de la robe du réservoir et diminue linéairement le long de sa hauteur. La charge externe du vent et l'action sismique sur la paroi du réservoir, crée un moment de renversement autour de l'articulation du fond de la coque (point de basculement), cela se traduit par la réaction de soulèvement de la cuve et affecte la stabilité du réservoir **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Les différentes contraintes de membrane auxquelles la paroi cylindrique d'un réservoir est soumise (figure **3.8**) sont :

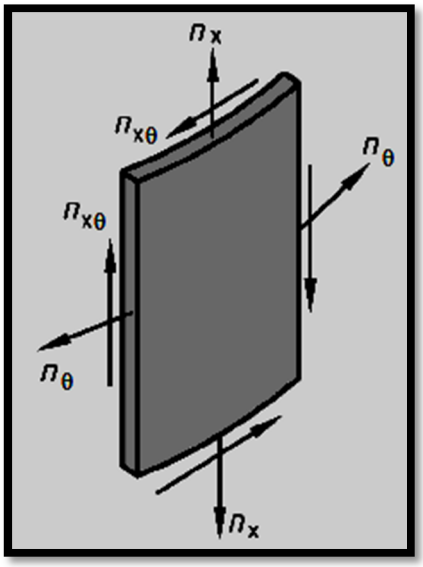


Figure 3.8 : Résultantes de contrainte de membrane dans la paroi cylindrique du réservoir (Eurocode 3).

$\mathbf{n_x}$: résultante méridienne de contrainte de membrane

$\mathbf{n_\theta}$: résultante circonférentielle de contrainte de membrane dans une coque

$\mathbf{n_{x\theta}}$: résultante de contrainte de cisaillement de membrane **(Eurocode 3)**.

3.9 Méthode de calcul de réservoir selon API 650

3.9.1 Calcul de l'épaisseur de la robe

a) Par one-foot method

One-foot method calcule l'épaisseur nécessaire au point de conception 0.3m (1 foot) au-dessus du bas de chaque virole de la robe **(API 650)**.

La formule qui donne l'épaisseur minimale requise est tel que suit:

- Pour épaisseur de la coque de design :

$$t_d = \frac{4.9D(H-0.3)G}{Sd} + C.A$$

- Pour épaisseur de la coque de test hydrostatique :

$$t_t = \frac{4.9D(H-0.3)}{St}$$

Où

t_d : Epaisseur de conception de la coque, en mm

t_t : Epaisseur de la coque de test hydrostatique, en mm

D : Diamètre nominal du réservoir, en m

H : Niveau de liquide de conception, en m

G : Gravité spécifique du liquide de conception à être stocké

C.A : Surépaisseur de corrosion, en mm

Sd : Contrainte admissible en service, en MPa

St : Contrainte admissible sous conditions d'épreuves (test hydrostatique), en MPa

Cette méthode ne doit pas être utilisée pour les réservoirs plus grands que 60 m de diamètre **(API 650)**.

b) Par méthode de conception variable par point (Variable-Design-Point Method)

La conception qui utilise la méthode Variable par point donne l'épaisseur de la coque au niveau de points de conception où le calcul de la contrainte est relativement fermé à l'effort circulaire réel de la coque **(API 650)**.

Cette méthode fournit une réduction de l'épaisseur et du poids total du matériau, mais le plus important, est sa capacité à permettre une construction de réservoirs de grand diamètre, avec une limitation maximale de l'épaisseur des plaques **(API 650)**.

Cette méthode ne peut être utilisée que lorsque la méthode 1-foot n'est pas spécifié et la condition suivante est vérifiée:

$$\frac{L}{H} \leq \frac{1000}{6}$$

c) Par analyse élastique

Pour les réservoirs où L / H est supérieur à 1000/6, le choix de l'épaisseur du réservoir doit être basée sur une analyse élastique qui montre que la contrainte circonférentielle de la coque calculé doit être inferieure à la contrainte admissible **(API 650)**.

3.9.2 Conception de plaque de fond

L'API 650 propose une condition très simple sur la condition d'épaisseur et de largeur des plaques de fond.

a) Flexion vertical de la coque

Lorsque le réservoir est rempli de produit, la coque se dilate radialement du fait de l'élasticité du matériau des plaques de robe. Cette expansion naturelle est limitée à l'endroit où la coque est soudé à la plaque de fond.

Le joint coque-fond est très rigide et il tourne comme une unité lorsque le réservoir est sous chargement hydrostatique.

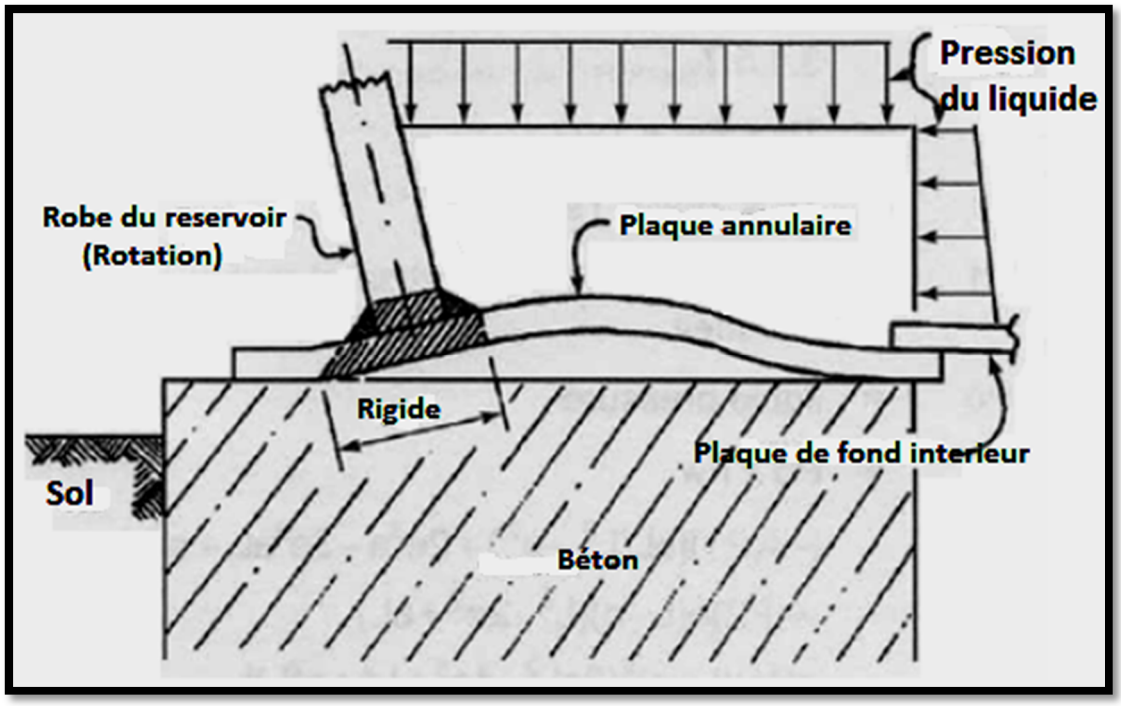


Figure 3.9 : La rotation de la connexion coque-fond (Kuan Siew Yeng, 2009).

La coque tend à tourner dans une direction vers l'extérieur autour du joint rigide tel que représenté dans la figure **3.9**, la plaque de fond fera aussi tourner et causera un soulèvement de la fondation.

A l'intérieur du réservoir, la pression du produit agissant sur la surface du fond équilibre l'effet du soulèvement.

Cette action provoque des contraintes de flexions élevées dans la plaque de fond et le bord de la soudure d'angle interne. En raison du remplissage et de la vidange continuels de la cuve, la charge est cyclique alors cette zone est soumise à la fatigue oligocyclique **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

3.10 Méthode de calcul de réservoir selon l'Eurocode 3

3.10.1 Base du calcul

Un réservoir doit être dimensionné, construit et entretenu en vue de satisfaire aux exigences la section 2 de l'ENV 1991-1.

3.10.2 Calcul de la coque

Il convient de vérifier la contrainte circonférentielle normale due à des charges liquides et à la pression interne dans chaque virole de la coque **(Eurocode 3)**.

La pression hydrostatique est résistée par la contrainte circonférentielle σ_θ :

$$\boldsymbol{\sigma_\theta = \frac{P.r}{t} \leq f_{y,d}}$$

La pression au niveau de la virole « j » est donnée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{P = \gamma_F.\rho.g.(H_j - 0,3) + P_0}$$

Ou :

P : est la pression hydrostatique à 0,3 m de la virole « j »

γ_F : est le coefficient de sécurité qu'on prend égale à 1,1 ou 1,2

ρ : est la masse volumique du liquide contenu

g : est l'accélération due à la gravité

H_j : est la distance verticale entre le bas de la virole de rang « j » et le niveau du liquide

P_0 : est la valeur de calcul de la pression au dessus du niveau du liquide

La formule de vérification à la sécurité est :

$$\boldsymbol{[\gamma_F.\rho.g.(H_j - 0,3) + P_0](\frac{r}{t}) \leq f_{y,d}}$$

Avec :

r : est le rayon du réservoir

t : est l'épaisseur de la virole « j »

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M_0}} \qquad et \qquad \gamma_{M_0} = 1,1$$

D'où l'épaisseur d'une virole est :

$$t \geq \frac{[\gamma_F . \rho . g . (H_j - 0,3) + P_0]r}{f_{y,d}}$$

Remarque : Le règlement Eurocode 3 préconise des épaisseurs minimales suivant le diamètre « D » du réservoir qui sont représentées dans le tableau **3.2** ci-dessous :

Diametre « D » en (m)	Epaisseur minimale « t » en (mm)
Si D ≤ 33 m	t ≥ 06 mm
Si 33 < D ≤ 60 m	t ≥ 08 mm
Si D > 60 m	t ≥ 10 mm

Tableau 3.2 : Les épaisseurs minimales de la robe recommandées par l'Eurocode 3.

3.10.3 Renfort annulaire

a) Raidisseur primaire

Il convient de renforcer les réservoirs à sommet ouvert et a toit flottant externe d'un collet primaire placé au sommet ou près du sommet de la virole supérieure. Le module résistant élastique minimal W_{min} du collet primaire peut être déterminé à partir de :

$$W_{min} = \frac{r^2 H}{4300000}$$

Ou :

H : est la hauteur de la coque du réservoir en (cm) ;

r : est le rayon du réservoir en (cm) ;

W_{min} : est le module résistant élastique minimal (en cm^3).

L'évaluation du module résistant élastique réel *W* du collet peut inclure les parties de la coque du réservoir qui sont comprises dans une distance de 16t à partir du sommet de la paroi. Avec « t » est l'épaisseur de la virole supérieure sans prise en compte de la corrosion.

Lorsque les renforts annulaires sont situés à plus de 600 mm sous le sommet de la coque, il convient de munir le réservoir d'une cornière de rive ayant les dimensions suivantes:

- 60 × 60 × 5 lorsque l'épaisseur de la virole supérieure de la coque est inférieure à 6 mm ;
- 80 × 80 × 6 lorsque l'épaisseur de la virole supérieure de la coque est égale ou supérieure à 6 mm.

Pour l'une ou l'autre de ces sections de cornière, il convient que la partie horizontale ne soit pas éloignée de plus 25 mm du rebord supérieur de la coque **(Eurocode 3)**.

b) Raidisseur secondaire

Il convient d'étudier s'il est indispensable de prévoir un raidisseur secondaire pour prévenir le voilement local de la coque.

Les dimensions minimales à donner aux raidisseurs secondaires que propose l'eurocode sont données dans le tableau **3.3** ci-après :

Diamètre du réservoir (m)	Cornière de rive (mm)
D ≤ 20 m	100 × 65 × 9
20 m < D ≤ 36 m	120 × 80 × 10
36 m < D ≤ 48 m	150 × 100 × 10
D > 48 m	200 ×100 × 12

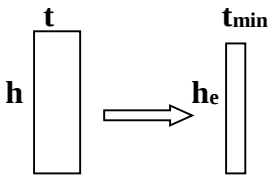
Tableau 3.3 : Les dimensions minimales des raidisseurs secondaires.

Remarque :

Il convient que la grande aile soit en position horizontale.

Dans le cas ou l'épaisseur du réservoir est variable, il convient de transformer la hauteur du réservoir à une hauteur équivalente ayant l'épaisseur t_{min}

Hauteur équivalente de la virole « h_e » :



$$\mathbf{h_e = h\left(\frac{t_{min}}{t}\right)^{2,5}}$$

t_{min} : est l'épaisseur de la virole la plus faible (mm).

t : est l'épaisseur de la virole.

h : est la hauteur de la virole sous le joint de bordure ou le contreventement primaire.

$$\mathbf{\Longrightarrow H_e = \sum h_e}$$

Avec

H_e : hauteur équivalente totale.

- La hauteur maximale entre raidisseurs « H_p » est donnée par la relation :

$$\mathbf{H_P = 0,46\left(\frac{E}{P_{Sd}}\right)\left(\frac{t_{min}}{r}\right)^{2,5} rk}$$

Avec :

E : est le module de Young

t_{min} : est l'épaisseur minimale des viroles

r : est le rayon du réservoir

k = 1.0 si la contrainte axiale Ϭx,d est en traction

$\mathbf{k} = \left\{\mathbf{1} - \left[\mathbf{2,67}\left(\frac{\sigma_{x,d}}{E}\right)\left(\frac{r}{t}\right)\left(\mathbf{1} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{45}}\left(\frac{r}{t}\right)^{\mathbf{0,72}}\right)\right]^{\mathbf{1,25}}\right\}^{\mathbf{0,8}}$ si la contrainte axiale Ϭx,d est en compression.

P_{Sd} : est la pression dut au vent et au force du vide partiel (vacuum) qui est égale à :

$$\boldsymbol{P_{Sd} = q_{eq.Sd} + q_{S.Sd}}$$

Ou :

$q_{s.sd}$ = est la dépression interne provoquée par la ventilation, le vide partiel interne (vacuum) ou d'autres phénomènes.

$q_{eq.sd}$ = est la pression équivalente uniforme du au vent horizontale donné par la relation suivante :

$q_{eq.Sd} = k_w . q_{w.max.Sd}$

Ou:

$q_{w.max.Sd}$: est la pression maximale du vent.

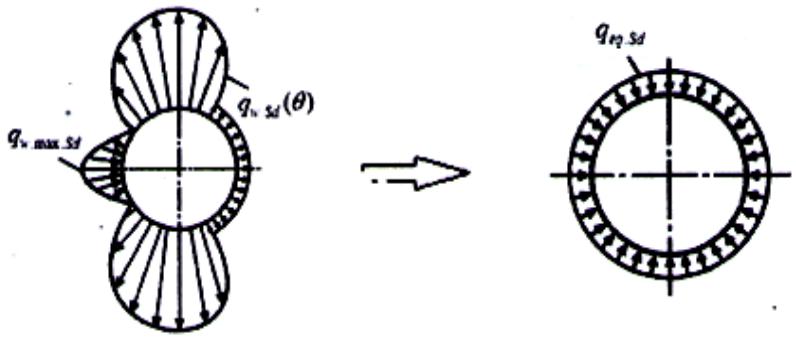
k_w: est un coefficient donné par la relation : $k_w = \frac{1}{C_w}$

C_w : coefficient de distribution de la pression du vent donné par la relation :

$$C_w = \max\left(\frac{2{,}2}{\left(1 + 0{,}1\sqrt{C_b\left(\frac{r}{l}\right)\sqrt{\frac{r}{t}}}\right)}; 1{,}0\right)$$

Avec :

$C_b \approx 1{,}0$: paramètre de flambement de pression externe.



Distribution de la pression du vent sur la circonférence de la coque **Distribution de pression axisymétrique équivalente**

- Si $H_e \leq H_p$, il n'est pas nécessaire d'utiliser un raidisseur secondaire.
- Si $H_e > H_p$, il convient de subdiviser la hauteur H_e par des collets de renfort régulièrement espacés aux séparations H_p ou moins pour prévenir le flambement de la paroi de la coque. Si plus d'un collet de renfort est nécessaire, la valeur de K peut être calculée séparément pour chaque travée entre les collets, pour obtenir des distances H_p différentes entre collets de renfort **(Eurocode 3)**.

***Remarque** :*

Il convient de ne pas placer les raidisseurs secondaires à moins de 150 mm d'un joint circonférentiel de réservoir.

3.10.4 Calcul du fond

Le calcul de la tôle de fond doit prendre en compte la corrosion.

Il convient que les tôles de fond soient soudées à recouvrement ou soudées en bout. Pour des précisions concernant la soudure.

Il convient que l'épaisseur spécifiée des tôles de fond ne soit pas inférieure à la spécification du Tableau **3.4**, tolérance de corrosion non comprise. Il convient d'utiliser des valeurs plus importantes si elles sont requises pour résister à un soulèvement dû à la pression interne négative, sauf si un niveau minimal garanti de liquide résiduel est utilisé pour aider à résister à ce soulèvement.

Matériau	Fonds soudés à recouvrement	Fonds soudés en bout
Aciers au carbone	6 mm	5 mm
Aciers inoxydables	5 mm	6 mm

Tableau 3.4 : Épaisseur nominale minimale de la tôle de fond (Eurocode 3).

Il convient que les fonds de réservoirs de diamètre supérieur à 12,5 m aient un renfort de tôles annulaires satisfaisant aux exigences de résistance et de dureté de la virole à laquelle elles sont fixées. Il convient que le renfort de fond ait une épaisseur nominale minimale t_a, tolérance de corrosion non comprise, égale à :

$$\mathbf{t_a = t_s/3 + 3} \text{ mm mais non inférieure à 6 mm}$$

Où t_s est l'épaisseur de la 1^{ére} virole de coque.

Il convient que le renfort de fond n'ait pas une largeur exposée *w* inférieure à la valeur limite W_a, égale à :

$$W_a = 240\frac{t_a}{\sqrt{H}} \quad \text{Mais non inférieure à 500 mm}$$

Ou :

H : est la hauteur de calcul maximale du liquide, en mètres ;

W_a : est la largeur exposée minimale (distance entre le bord de la tôle de fond et le bord inférieur de la tôle de coque), en millimètres ;

t_a : est l'épaisseur de la virole en prenant en compte la tolérance de corrosion, en millimètres.

Il convient que les joints radiaux reliant les plaques annulaires soient soudés en bout à pénétration complète. Pour des précisions concernant la soudure.

Il convient que la distance entre le bord extérieur de la tôle de coque et le bord extérieur des tôles de fond ou des tôles annulaires ne soit pas inférieure à 50 mm.

Il convient que la virole inférieure de la tôle de coque aux tôles annulaires ou tôles sur mesure du fond soit fixée par soudures d'angle continues des deux côtés de la tôle de la coque.

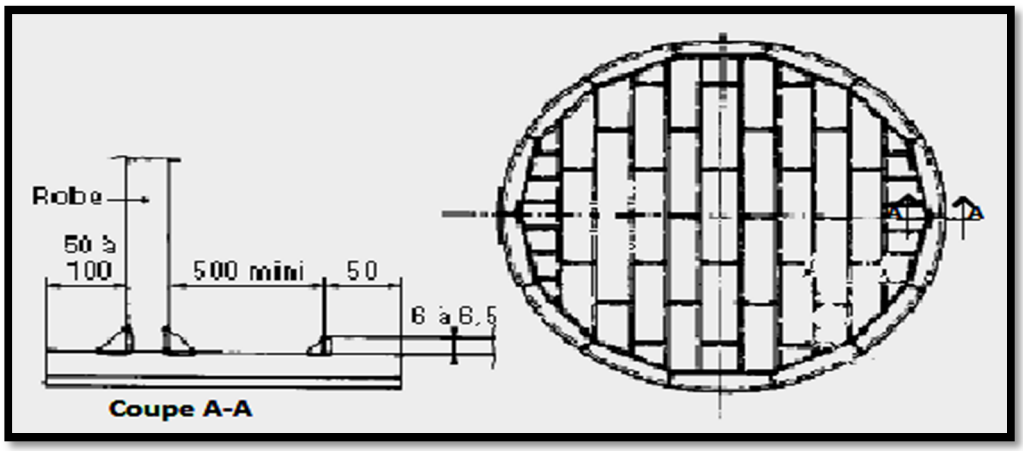


Figure 3.10 : Tôle annulaire pour les réservoirs de diamètre supérieur à 12,5m (Regis Chamayou, 1997).

3.10.5 Ouvertures dans les parois de réservoir

Lorsqu'une ouverture dans la paroi de la coque cylindrique réduit la capacité portante ou compromet la stabilité de la coque, l'ouverture doit être renforcée.

Il est possible de réaliser ce renforcement de différentes façons :

- augmentation de l'épaisseur de la plaque de la coque ;
- adjonction d'une plaque de renfort ;
- installation de tubulure.

NOTE : Le calcul en fonction de l'état limite plastique (EL1) régit en général la zone de chargement à haute pression (liquide et interne), alors que des considérations liées à la stabilité (EL3) régiront probablement le calcul concernant des zones où l'épaisseur de plaque est mince en raison de faibles pressions (viroles supérieures) **(Eurocode 3)**.

a) Tubulures de coque de diamètre extérieur inférieur à 80 mm

Le renforcement n'est pas indispensable, sous réserve que l'épaisseur de la paroi à l'emplacement de la tubulure ne soit pas inférieure aux valeurs données dans le Tableau **3.5**.

Diamètre extérieur d_n du trou d'homme ou de la tubulure (mm)	**Épaisseur nominale minimale $t_{ref,n}$ (mm)**	
	Acier au carbone	Acier austénitique
$d_n \leq 50$	5,0	3,5
$50 < d_n \leq 75$	5,5	5,0
$75 < d_n \leq 80$	7,5	6,0

Tableau 3.5 : Épaisseur minimale du corps de la tubulure (Eurocode 3).

b) Calcul des trous d'homme et des tubulures de coque ayant un diamètre extérieur égal ou supérieur à 80 mm pour EL1

Le calcul peut être effectué soit par la méthode de remplacement de surface, soit par la méthode d'introduction d'un corps de tubulure.

Il convient de prévoir un renforcement de la section transversale ΔA dans le plan vertical où se situe le centre de l'ouverture, au moyen de l'équation :

$$\Delta A = 0{,}75\ d\ t_{ref}$$

Où :

d : est le diamètre du trou découpé dans la plaque de la coque ;

t_{ref} : est l'épaisseur requise par le calcul pour EL1 concernant la plaque de la coque sans ouverture.

La surface de renfort ΔA peut être obtenue par une ou l'autre ou toute combinaison des trois méthodes suivantes :

- L'installation d'un corps de tubulure ou de trou d'homme. La partie du corps qui peut être considérée comme un renfort est celle qui est située dans l'épaisseur de la plaque de la coque et à une distance égale ou inférieure à quatre fois l'épaisseur du corps (4t) à partir de la surface de la plaque de la coque, sauf si l'épaisseur du corps diminue à l'intérieur de cette même distance, la limite étant le point où s'amorce la réduction.

- L'adjonction d'une plaque d'insert épaissie ou d'une plaque de renfort, la limite de renforcement étant telle que $1{,}5d < d_n < 2d$, où d_n est le diamètre efficace de renforcement. Une plaque de renfort non circulaire peut être utilisée, sous réserve que les exigences minimales soient satisfaites.

- L'installation d'une plaque de coque d'une épaisseur supérieure à celle requise par le calcul pour EL1 (état limite plastique) concernant la plaque de coque sans ouverture. La limite de renforcement est identique à celle décrite au point précédent.

En sus de la méthode de remplacement de surface spécifiée, il est aussi possible de réaliser le renforcement en introduisant un corps de tubulure dépassant des deux côtés de la plaque de la coque sur $1{,}17\sqrt{r_m t_{ref,n}}$ au minimum. Il convient de ne pas utiliser cette méthode, sauf si le corps de la buse est à plus de 100 mm de la plaque du fond **(Eurocode 3)**.

Où :

r_m : est le rayon moyen de la tubulure (surface médiane de la tubulure)

$$r_m = \frac{r_e + r_i}{2}$$

r_e et r_i : sont les rayons extérieur et intérieur de la tubulure respectivement.

c) Calcul pour EL3 (état limite de stabilité) en présence d'ouvertures dans la coque

Il est possible de négliger les effets des ouvertures sur la stabilité des coques pour autant que la taille de l'ouverture sans dimension η soit inférieure à $\eta_{max} = 0{,}6$, η étant obtenu par :

$$\eta = \frac{r_0}{\sqrt{r\,t}}$$

Où :

r : est le rayon de la coque cylindrique près de l'ouverture ;

t : est l'épaisseur de la paroi de coque non raidie près de l'ouverture ;

r_0 : est le rayon de l'ouverture.

Lorsque l'ouverture est rectangulaire, le rayon d'ouverture équivalent peut être pris comme égal à :

$$r_0 = \frac{a + b}{4}$$

Où :

a : est la longueur du côté horizontal de l'ouverture ;

b : est la hauteur verticale de l'ouverture.

Lorsque le diamètre de l'ouverture r_0 est inférieur au tiers du rayon r de la coque cylindrique, il n'est pas nécessaire de prévoir, du fait de l'ouverture, une réduction de la résistance au flambement évaluée, pour autant que la surface de section transversale enlevée par l'ouverture soit inférieure à la surface de section transversale de renforcement ΔA. Le renforcement peut être assuré au moyen de raidisseurs dans la direction méridienne.

Si des raidisseurs dans la direction méridienne sont utilisés pour renforcer l'ouverture, il convient de réduire la section transversale de chaque raidisseur aux extrémités afin d'empêcher le flambement dû à une concentration de contrainte dans la plaque de la coque proche des extrémités des raidisseurs.

3.10.6 Vérification de la stabilité de l'ensemble

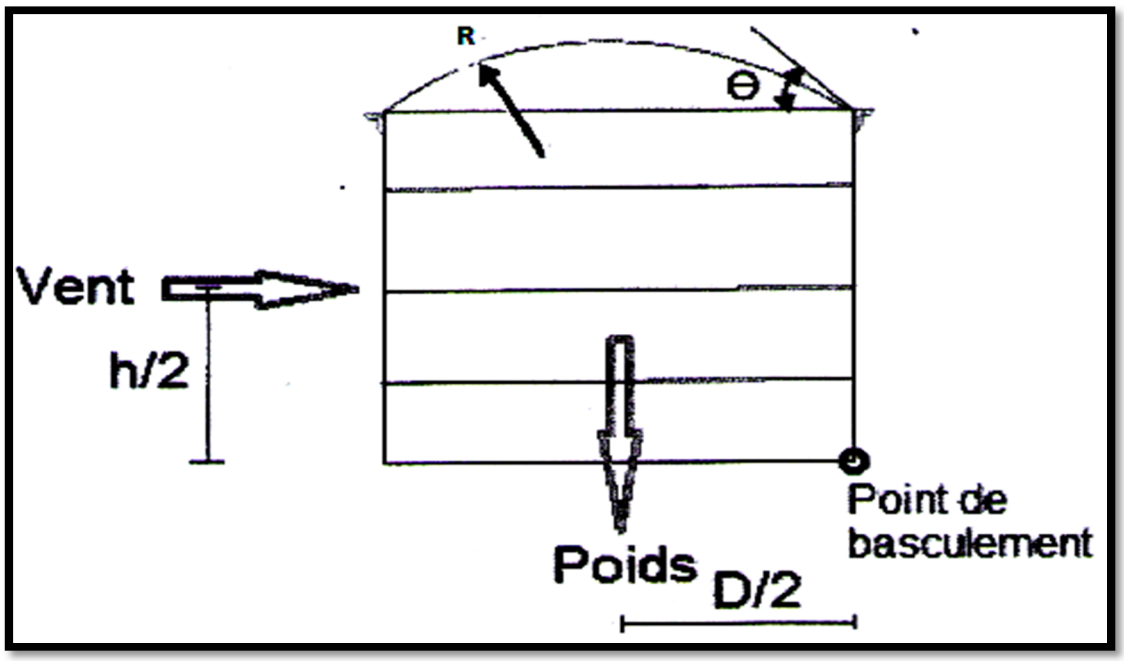


Figure 3.11 : Application de la force du vent, stabilisée par le poids propre du réservoir (Eurocode 3).

Pour que la stabilité au renversement du réservoir soit vérifiée il faut que la condition suivante soit vérifiée :

$$\mathbf{M_r} = \boldsymbol{V}\left(\frac{\boldsymbol{h}}{\mathbf{2}}\right) < \mathbf{M_s} = \boldsymbol{W}\left(\frac{\boldsymbol{D}}{\mathbf{2}}\right)$$

Avec :

V: est la force du vent;

h : est la hauteur du réservoir ;

W : est le poids total du réservoir à l'état vide ;

D : est le diamètre du réservoir ;

M_r : est le moment renversant ;

M_s : est le moment stabilisant.

a) Etapes de calcul de M_r et M_s :

- **Calcul du maitre couple :**
  $A = D \times h$
- **Calcul de l'action du vent :**
  $V = P_{Sd} \times A$
- **Calcul du moment de renversement du au vent :**
  $M_r = V \times h/2$
- **Calcul du poids total du réservoir à l'état vide :**
  $W = W_R$
  $\rho = 77$ KN/ m^2 : est le poids volumique de l'acier.
  $W_R = W_{cyl} + W_{toit}$: poids propre du cylindre et du toit flottant.
  $W_{cyl} = \rho \times V_c = \rho \times \pi D \times \sum h_j t_j$
  $W_{toit} = \rho \times V_t = \rho \times S \times t$
  Avec :
  V_c : volume du cylindre.
  h_j : hauteur de la virole j.
  t_j : épaisseur de la virole j.
  V_t : volume du toit.
  S : surface du toit.
  t : épaisseur de la tôle du toit.
- **Calcul du moment stabilisant du au poids propre totale :**
  $M_s = W (D/2)$

3.10.7 Calcul de l'ancrage

Il convient d'espacer régulièrement, dans toute la mesure du possible, les points d'ancrage sur la circonférence du réservoir.

Il convient que le calcul des boulons ou brides d'ancrage satisfassent aux exigences de l'ENV 1993-1-1. Il convient que la section minimale des boulons ou brides d'ancrage soit de 500 mm^2. Si une corrosion est prévue, il convient d'ajouter une tolérance minimale de corrosion de 1 mm.

L'ancrage doit être principalement fixé à la paroi de la coque. Il ne doit pas être fixé uniquement à la plaque de fond.

Le calcul de l'ancrage doit intégrer les mouvements du réservoir dus à des changements thermiques et à la pression hydrostatique et doit réduire au minimum toute contrainte induite dans la coque.

Il convient que le calcul de la coque pour ce qui concerne les efforts d'ancrage locaux et les moments fléchissant résultant de l'ancrage satisfassent aux exigences de 5.4.5 et 5.4.6 de l'ENV 1993-4-1.

Il convient de n'appliquer aucun serrage initial au boulon ou à la bride d'ancrage, afin de s'assurer d'une efficacité uniquement en cas d'effort de soulèvement exercé sur la coque du réservoir.

3.11 Conception du toit flottant

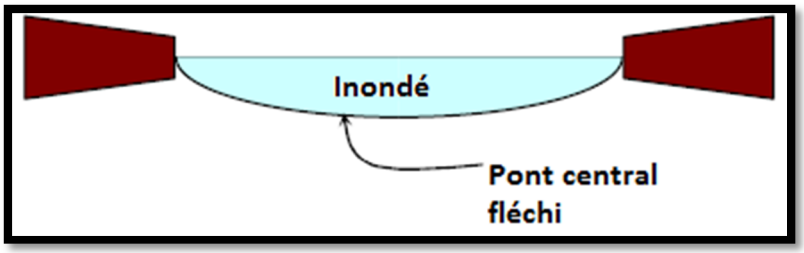


Figure 3.12 : Toit à simple pont fléchi avec des inondations d'eau de pluie (Kuan Siew Yeng, 2009).

Dans API 650 (2007), le toit flottant externe est traitée dans l'Annexe C, il donne des conseils et fournit les exigences minimales sur la conception du toit flottant externe. Des exigences minimales similaires ont également été fournis dans le BS 2654 où ils ont tous deux déclaré que le volume de ponton (caisson) doit être conçu pour avoir une flottabilité suffisante pour rester à flot sur le liquide avec une densité (gravité spécifique) inférieure à la densité du produit stocké ou de 0,7 avec le drain primaire inopérante pour les conditions suivantes:

- la plaque de pont et deux compartiments adjacents quelconques de caisson percés ont inondé le toit à pont simple ou double pont.
- Précipitations de 250 mm dans une période de 24 heures sur toute la surface horizontale du toit **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Ces deux codes fournissent également certaines exigences minimales sur les installations de toit et les accessoires pour optimiser la conception du toit flottant assurant que le toit fonctionne efficacement.

Bien que les codes adressent une exigence minimale sur le volume du caisson, il n'y a aucune mention sur l'adéquation structurelle. Il n'y a aucune procédure adéquate ou des règles normalisées et stables indiqué dans tout manuel de code ou de l'ingénierie dans la conception du toit flottant, comme dans l'intégrité structurelle et la stabilité de la flottabilité. Il est

toujours laissé au concepteur ou fabricant à développer leurs propres approches pour répondre à l'exigence minimum indiqué dans API 650 (2007) ou BS 2654. L'industrie ou l'acheteur devra compter sur le fabricant du réservoir et pour la conception sécuritaire du toit **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Par conséquent, il ya une grande variation dans l'approche de conception du toit flottante, une grande variation dans la durabilité et la fiabilité de la cuve, dans laquelle il ya aussi beaucoup de rupture de citerne en raison de problème de différentes conception dans chaque approche différente.

Si les toits flottants sont mal conçus, ou des mauvaises approches ont été appliquées à la conception, le toit va s'écrouler, le caisson sera voilé et endommagé. L'échec le plus commun sur le toit flottant est le naufrage du celui-ci. Le toit flottant sera submergées par le liquide à l'intérieur du réservoir ainsi le toit coule. Pour le pire des cas, le réservoir prendra feu en raison de l'étincelle produite pendant le mouvement instable de la toiture.

Remarque :

L'Eurocode 3 ne donne aucune indication et ne traite en aucun cas les toits flottants mais donne des normes de calcul de la robe et du fond.

3.12 Une attention particulière

3.12.1 Le tassement du sol

La fondation du réservoir doit être soigneusement conçue pour assurer une protection adéquate pour l'appui du réservoir. La reconnaissance et l'étude du sol sont nécessaires pour surveiller le tassement des sols. Ce dernier est un problème commun dans les sols compressibles, et il a des problèmes conséquents sur le réservoir à toit flottant.

Le tassement peut provenir du gel ou du dégel des sols. Les tassements peuvent conduire à l'un des effets ou à la combinaison de plusieurs des effets décrits ci-après. Le réservoir suit généralement les tassements du sol sur lequel il est implanté. Ces tassements peuvent être uniformes ou non uniformes ; il convient de les vérifier.

Toutefois, il convient de relever que les tassements, qui sont décrits ci-après, sont des phénomènes très lents et donc qu'ils peuvent être décelés précocement en service **(DT 97, Février 2012)**.

a) Tassement uniforme du réservoir

Le tassement uniforme des fondations d'un réservoir n'est généralement pas préjudiciable car il apparaît progressivement et augmente uniformément à la fois. Il ne conduit pas à une augmentation des contraintes dans l'équipement sauf, en cas de tassement excessif, pour les équipements raccordés au réservoir (tuyauteries, moyens d'accès …) **(DT 97, Février 2012)**.

Note : Les tuyauteries raccordées au réservoir et comportant des compensateurs sont généralement très sensibles à ce type de tassement.

b) Tassements non uniformes

Les tassements non uniformes sous le réservoir représentent un risque plus important car ils entraînent des contraintes importantes dans la structure. L'inclinaison d'un réservoir, peut suivre une rotation du plan de pose de celui-ci **(DT 97, Février 2012)**.

c) Tassements importants

Les tassements importants, uniformes ou non, peuvent engendrer l'instabilité du réservoir et des contraintes supplémentaires, en particulier aux raccordements des tuyauteries au réservoir, et à la liaison coque – toit **(DT 97, Février 2012)**.

Si les tassements sont visibles à l'œil nu, des mesures correctives appropriées doivent être prises, telles que : relevage du réservoir et remise en état des fondations et/ou adaptation de supports pour les éléments raccordés **(DT 97, Février 2012)**.

Le poids propre de la structure du réservoir est relativement faible par rapport à la charge du contenu (charge d'exploitation), des couches compressibles sont présentes dans le sol, le tassement excessif du sol peut se produire en raison du poids de la citerne et de son contenu liquide. Le tassement du sol excessif peut affecter l'intégrité de la robe et du fond du réservoir, et provoque une dizaine de problèmes conséquents. Quelques-uns des problèmes conséquents sont cités ci-dessous:

- Blocage de la structure du toit flottant autour du pôle de guidage
- Blocage du joint de toit en raison du (progressivement croissante) hors arrondi de la robe du réservoir
- Perte de flottabilité de toits flottants en raison de liquide dans les caissons
- Inondation du Toit qui fuit ou bloqué
- Déraillement de l'échelle de roulement sur le dessus du toit flottant
- Flambement des pieds support d'un réservoir à toit flottant en raison du soutien insuffisant, ou des conditions du vide partiel (vacuum)
- L'usure de la coque suite au grattement du toit.

3.12.2 Conception parasismique

Comme mentionné plus tôt que l'exigence minimale prévue dans l'API 650 (2007) et BS 2654 adressée seulement à la considération de la flottabilité. Le toit flottant a été simplifiée et supposé comme corps rigide, la dynamique, l'inondation et le ballottement du produit n'a pas été considéré. Le comportement du toit flottant dans des conditions sismiques est négligeable, et le comportement du ballottement lors d'un séisme est compliqué. L'industrie et le propriétaire comptent sur le fabricant du réservoir et du toit pour une conception sécuritaire, cependant, la plupart des réservoirs à toit flottant construits ne considèrent pas la condition

sismique dans leur conception du toit comme le code ne l'aborde jamais **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Lorsqu'un réservoir **couvert** est **entièrement plein** (le cas des réservoirs à toit flottant car il n'y a pas de vide entre le liquide stocké et le toit), il n'y a pas de mouvement relatif du fluide par rapport au réservoir à la suite d'une excitation sismique en base. Du point de vue dynamique, tout se passe comme si l'ensemble fluide réservoir constituait une masse unique. Ceci correspond à une situation "eau gelée" intéressante à considérer comme valeur de référence, mais qui ignore la mise en mouvement du fluide. Lorsque la surface du fluide est libre, la mise en mouvement du réservoir entraîne des oscillations, avec des implications diverses : distribution de pressions dynamiques dissymétriques, formations de vagues, moment de flexion et cisaillement en base différents du cas "eau gelée". Comme un faible défaut de remplissage d'un réservoir de l'ordre de 2 % du volume total laisse apparaître la formation de vagues, on considère la surface du fluide comme libre dans l'étude des réservoirs en zone sismique **(Chapitre 16 : Réservoirs en zone sismique)**.

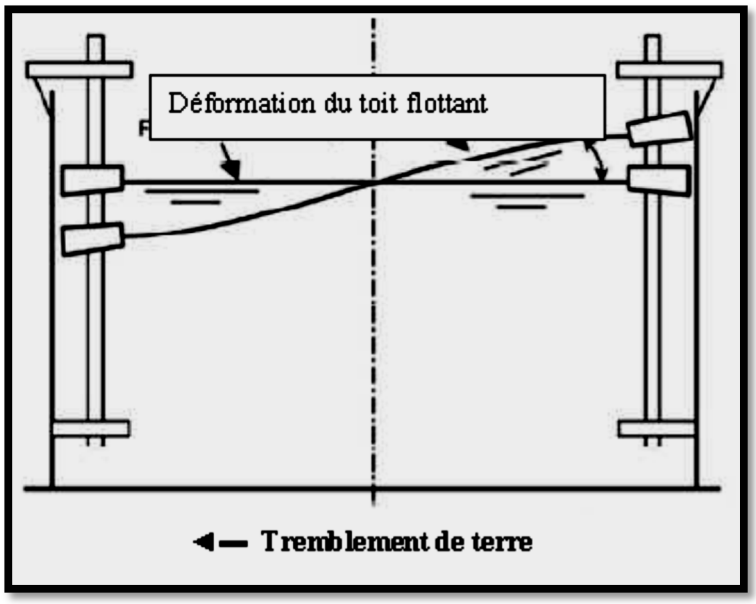


Figure 3.13 : Effet du balancement du fluide sur un toit flottant sur le fluide contenu (Chapitre 16 : Réservoirs en zone sismique).

Les dégâts aux réservoirs en zone sismique sont de natures diverses.

Les réservoirs de stockage constituent des « pendules inversés », structures peu ductiles et fortement sollicitées (Figure **3.14**).

Les réservoirs en coque mince posés au sol subissent des sollicitations dissymétriques qui peuvent entraîner des voilements des parois latérales ou du toit, car les contraintes appliquées sont défavorables.

Ainsi, un réservoir cylindrique, dans lequel les contraintes dans les parois sont habituellement membranaires circonférentielles (horizontales), va subir en plus:

- des contraintes membranaires verticales dues à la flexion globale sous l'action horizontale, qui peuvent entrainer des ruines par traction des ancrages et des soulèvements du réservoir
- l'ovalisation du réservoir et des contraintes de flexion sous l'action horizontale
- des contraintes membranaires additionnelles horizontales dues à l'accélération verticale (Figure **3.14. Bas**).
- des contraintes flexionnelles au pied des parois, car, l'expansion transversale du réservoir n'y est pas libre en raison de la liaison des parois avec le fond du réservoir **(Chapitre 16 : Réservoirs en zone sismique)**.

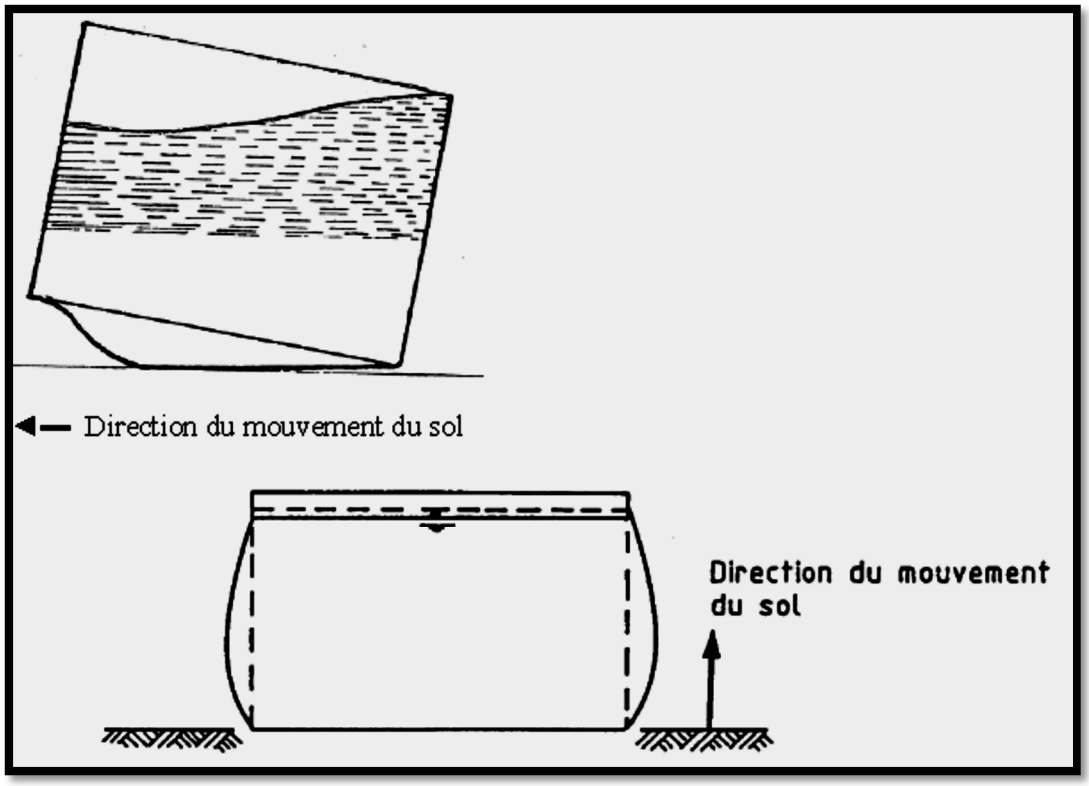


Figure 3.14. Haut : La composante horizontale du séisme peut entraîner des soulèvements.

Bas : La composante verticale du séisme « augmente la gravité », donc les pressions du fluide (Chapitre 16 : Réservoirs en zone sismique).

3.13 Mode de rupture due à des effets sismiques sur réservoir à toit flottant

Il ya trois cas sur le toit,

- ✓ Effondrement ou descente du toit
- ✓ Overtop (domination) du toit flottant par le liquide à l'intérieur du réservoir (Figure **3.15**)
- ✓ Flambement du ponton (plate-forme flottante) (Figure **3.16**)

Figure 3.15 : Toit flottant dominait par le liquide du réservoir (Kuan Siew Yeng, 2009).

Figure 3.16 : Flambement du ponton (Kuan Siew Yeng, 2009).

Il ya un cas sur la robe,

- ✓ Le flambement de la coque causé par une combinaison de pressions extérieures générées par le mouvement vertical et des contraintes de compression générée par le mouvement horizontal

Figure 3.17 : Flambement en pied d'éléphant « elephant foot buckling » (Grands réservoirs) (Kuan Siew Yeng, 2009).

Figure 3.18 : Flambement en diamant (Réservoirs élancés) (Kuan Siew Yeng, 2009).

Et un cas sur les réservoirs de ferme ou d'usine

- Les réservoirs prennent feu en raison d'étincelles générées par le mouvement de monté et descente du toit contre les guides.

Figure 3.19 : Réservoirs brûlé

(Kuan Siew Yeng, 2009).

Figure 3.20 : Réservoirs de ferme en feu

(Kuan Siew Yeng, 2009).

3.14 Conditions de conception et montage

Un ensemble complet de montage et d'accessoires sont nécessaires pour le toit flottant afin qu'il puisse fonctionner correctement. Il est essentiel de comprendre la fonction de chacun des accessoires et de la situation qui pourrait entraîner les accessoires qui ont un dysfonctionnement.

Il ya des exigences minimales énoncées pour le montage dans l'API 650 (2007), et Petronas Technical specification (PTS) a indiqué une exigence du nombre minimum de montage d'accessoires qui doivent être installé sur le réservoir à toit flottant. Le tableau **3.6 (a)** et **(b)** ci-dessous montrent l'exigence de montage des accessoires selon la PTS dans la paroi du réservoir et le toit flottant respectivement.

Description de montage	Nombre minimum requis
Trou d'homme dans la coque	2 trous. D 600
Vane de remplissage	Comme indiquée par le processus de conception
Vane de vidange	
Vane et tuyauterie de drainage du produit	
Vane et tuyauterie de drainage d'eau	
Tète de mise à la terre et parafoudres	
Trou d'homme pour mélangeurs	
Porte pour Nettoyer	
Escalier en Colimaçon (en spirale)	Un ensemble

Tableau 3.6(a) : Exigences de montage d'accessoires sur la coque du réservoir (Kuan Siew Yeng, 2009).

Description de montage	Nombre minimum requis
Système de drain de toit	Un ensemble
Carter de vidange du drain de toit	Un ensemble
Équipement de mise à la terre de toit	Un ensemble
Mécanisme d'étanchéité de toit	Comme indiquée par le processus de conception
Echelle à rouleau	Un ensemble
Trou d'homme de toit	Comme spécifié par le processus
Trou d'homme de compartiment de toit	Comme spécifié par le processus
Drain de secours	Un ensemble pour le double pont seulement
Bord d'évent	Comme indiquée
Event de toit (pression / vacuum (vide))	Comme indiquée par le processus de conception
Event de purge automatique	Un ensemble
Dispositif de guidage (pôle de guidage)	Un seul
Les pieds supports de toit	Un ensemble

Tableau 3.6(b) : Exigences de montage d'accessoires sur le toit flottant (Kuan Siew Yeng, 2009).

3.15 Principaux types d'accessoires de pose pour toit flottant

3.15.1 Système d'étanchéité de toiture

Le composant le plus important d'un toit flottant est le joint d'étanchéité installé sur son périmètre contre la robe du réservoir. Ce joint doit à la fois fermer le plus efficacement possible l'espace annulaire compris entre la robe et le toit flottant pour empêcher les évaporations, mais également permettre au toit de coulisser librement dans la cuve pour suivre les fluctuations du liquide. Il doit également posséder une capacité de déformation radiale suffisante pour s'accommoder des défauts de rotondité et de verticalité de la robe et des mouvements du toit sous l'action d'une force latérale (vent, séisme, turbulences du produit, etc.). Les défauts de forme de la robe peuvent provenir de la construction du réservoir ou du tassement des fondations. Ce dernier point affecte particulièrement les réservoirs de grands diamètres ou d'une hauteur importante.

L'**espace annulaire** est en principe de 200 mm pour les toits flottants externes, valeur généralement portée à 300 mm pour les diamètres supérieurs à 80 m. Pour les toits flottants internes, on adopte en général une largeur de 150 mm qui est souvent portée à 200 mm lorsque le diamètre est supérieur à 50 m. La largeur de cet espace varie lors des déplacements en altitude du toit pour s'adapter à la forme de la robe ou aux poussées du toit. Les joints sont conçus pour permettre, en cas de nécessité, leur compression jusqu'à une largeur minimale de 75 mm en un point de la périphérie, tout en restant, bien entendu, au contact de la robe sur le reste de leur longueur **(Regis Chamayou, 1997)**.

Le système d'étanchéité d'un toit flottant est le plus souvent constitué d'un joint unique appelé **joint primaire**. Cette étanchéité principale peut être complétée, pour réduire encore les pertes de produit, par un autre joint de conception plus simple, placé au-dessus, et appelé **joint secondaire**. L'installation d'un joint secondaire tend à se généraliser en raison de la sévérité des réglementations actuelles sur la limitation de la pollution atmosphérique.

Trois types principaux de joints sont employés :

- joint métallique avec patins en tôle ;
- joint élastique en mousse ou avec liquide ;
- joint flexible à lèvre ou métallique.

a) Joint métallique

Il est constitué de patins flexibles en tôle d'acier galvanisé ou inoxydable, de 1,5 mm d'épaisseur, formant une ceinture dont la partie basse trempe dans le liquide. Cette ceinture est maintenue au contact de la robe par un système de pantographes et de contrepoids (figure **3.21a**) ou à l'aide de ressorts (figure **3.21b**). L'étanchéité du volume, compris entre ces patins et le toit flottant, est assurée par une bande de caoutchouc synthétique placée en principe au-dessus de l'espace vapeur **(Regis Chamayou, 1997)**.

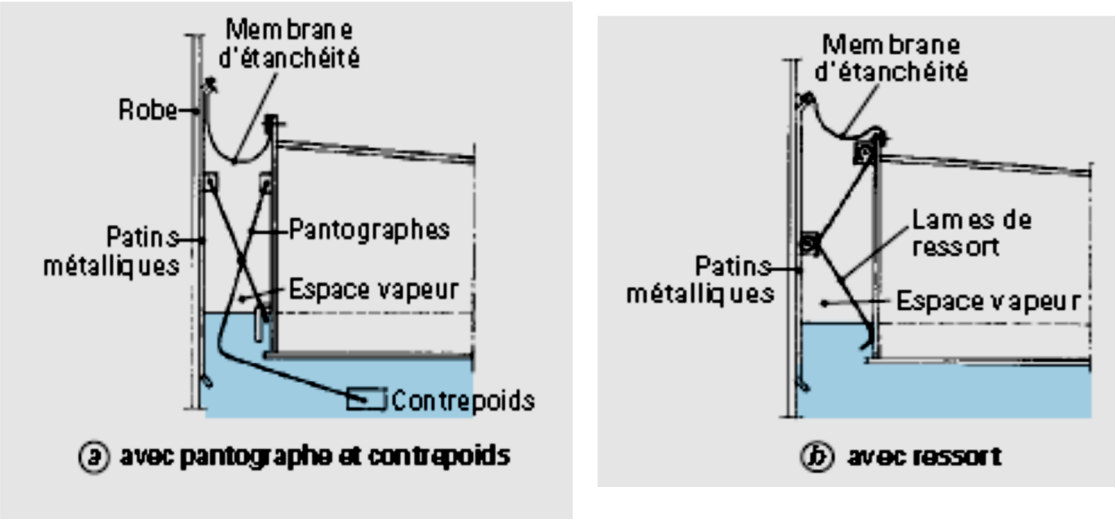


Figure 3.21 : Joints primaires d'étanchéités métalliques pour toits flottants externes (Regis Chamayou, 1997).

Cette membrane doit avoir une bonne tenue au contact des vapeurs et à l'exposition atmosphérique (rayons ultraviolets, ozone), et un bon comportement au feu en cas d'incendie. L'écoulement des charges électrostatiques et la mise à la terre du toit flottant se font par l'intermédiaire de lames d'acier inoxydable souples disposées à intervalles réguliers entre le toit flottant et les patins métalliques.

Nota : Ce joint est essentiellement utilisé sur les toits flottants externes. Il est très employé en raison de son exceptionnelle robustesse et de sa bonne étanchéité. Son emploi, doit cependant être limité aux cuves dont la paroi interne n'est pas protégée par un revêtement de peinture **(Regis Chamayou, 1997)**.

b) Joints élastiques

Ils comprennent deux versions : le joint mousse et le joint liquide. Ces deux joints comportent une enveloppe en tissu caoutchouté, fixée au toit flottant et remplie d'un matériau qui, par élasticité ou expansion, assure le contact entre la robe et le toit. Il s'agit soit d'élément en mousse de polyuréthanne élastique comprimée (figures **3.22a** et **3.22b**), soit d'un liquide (figure **3.22c**) qui, selon le régime des températures ambiantes, peut être un hydrocarbure (kérosène, fuel, huile, etc.) ou de l'eau. Le liquide est directement contenu dans l'enveloppe ou placé dans des tubes de caoutchouc, de longueur limitée pour former des sections indépendantes. Ce dernier système présente l'avantage d'éviter de vider le joint lorsque l'enveloppe principale est percée **(Regis Chamayou, 1997)**.

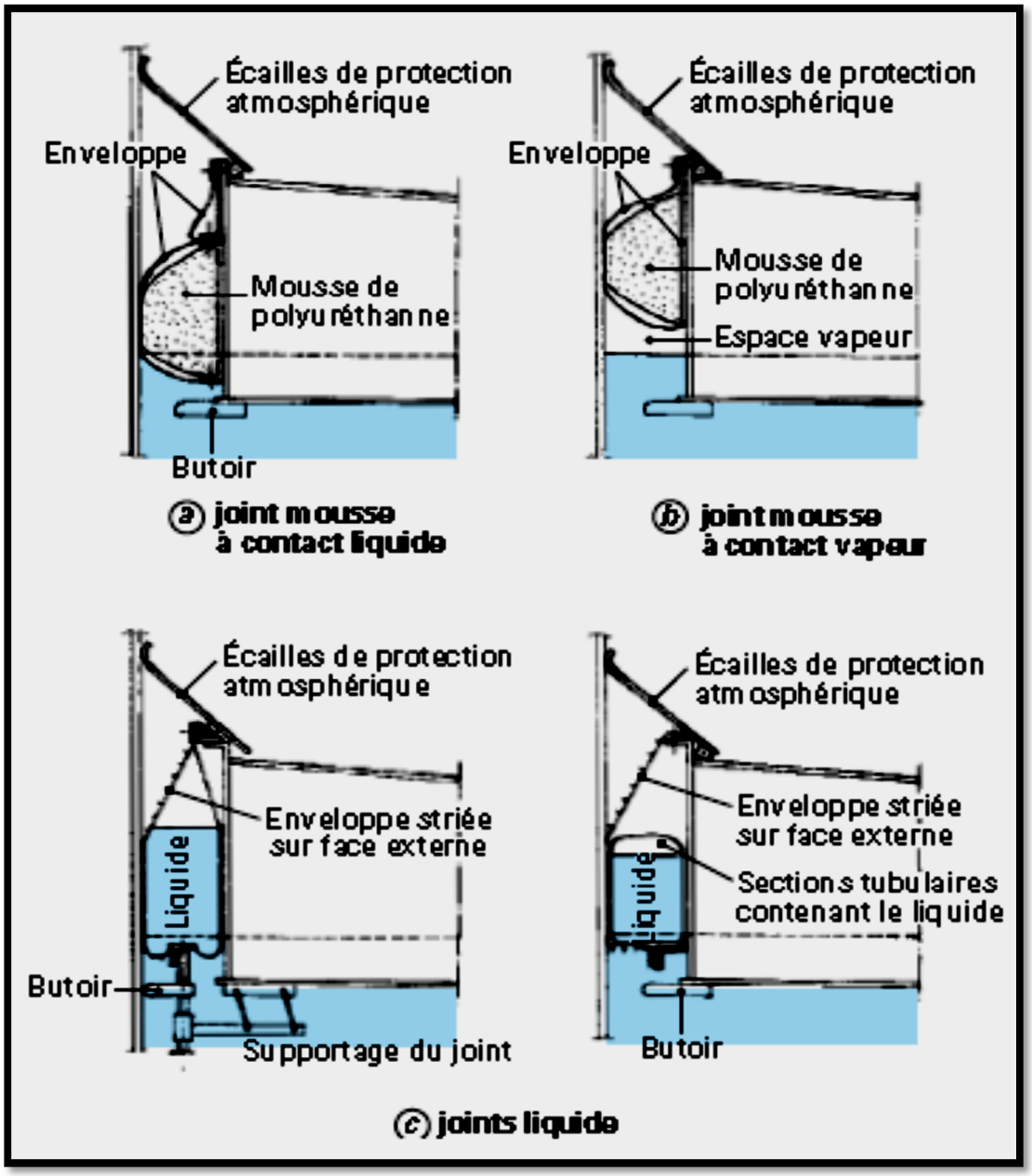


Figure 3.22 : Joints primaires d'étanchéités élastiques pour toits flottants externes (Regis Chamayou, 1997).

Nota : En raison de leur poids important, les joints liquides ne sont montés que sur les toits externes. En revanche, les joints mousses peuvent équiper tous les types de toits flottants.

Les enveloppes de ces joints doivent être de nature compatible avec le produit stocké et avoir une bonne résistance à l'abrasion, en particulier pour les joints liquide.

Les joints en mousse peuvent être installés dans l'espace annulaire de telle manière que leur partie inférieure trempe ou non dans le liquide stocké. Les joints à contact liquide sont beaucoup plus efficaces pour limiter les pertes que les joints à contact vapeur, mais leur coût est plus élevé en raison de leur hauteur plus importante. Le volume de vapeur qui existe sous les joints à contact vapeur (figure **3.22b**) est, en effet, difficile à conserver, en raison de l'étanchéité imparfaite de l'enveloppe sur la robe et de la succion due aux turbulences créées par le vent au-dessus du joint. Sur les joints à contact liquide (figure **3.22a**), l'absence de vapeur élimine cet inconvénient et permet donc une meilleure performance **(Regis Chamayou, 1997)**.

Lorsqu'un joint secondaire n'est pas prévu, une protection atmosphérique doit être installée au-dessus des joints élastiques. Elle a pour but d'empêcher la pénétration d'eau, de sable ou de débris dans le produit stocké et de protéger les enveloppes des effets atmosphériques. Elle est réalisée par des tuiles (écailles), en tôles minces galvanisées, fixées au moyen de charnières sur le toit flottant pour s'appuyer contre la paroi du réservoir en formant une pente. Ces écailles assurent également la liaison électrique entre le toit et la robe.

c) Joints flexibles

Ils existent en deux modèles : à lèvre ou métallique.

Le **joint flexible à lèvre** est réalisé par une simple bavette en caoutchouc synthétique comportant ou non une armature métallique interne (figure **3.23a**). Ce joint est placé au-dessus de l'espace annulaire. Il est maintenu plaqué contre la robe par flexion. Le matériau qui le constitue doit avoir un bon comportement à l'exposition atmosphérique et aux vapeurs du produit stocké. L'armature interne, lorsqu'elle existe, a pour objet de conserver le joint à lèvre tourné vers le haut, y compris lorsque le toit flottant s'élève dans la cuve, au cours du remplissage du réservoir. Lorsque la bavette n'est pas armée, le joint, qui a une bonne position quand le toit descend, se retourne vers le bas dès que le toit monte et forme ainsi une gouttière qui favorise le passage dans le produit des eaux de pluie, du sable et des débris **(Regis Chamayou, 1997)**.

Le **joint flexible métallique** est constitué par un ensemble d'écailles, en tôles minces pliées, en acier galvanisé ou inoxydable, fixées sur le toit flottant (figure **3.23b**). Par juxtaposition, elles forment une surface approximativement conique qui, par effet ressort, maintient contre la robe de la cuve un racleur en élastomère. L'étanchéité de ces écailles entre-elles est en général assurée par du ruban adhésif et des boulons **(Regis Chamayou, 1997)**.

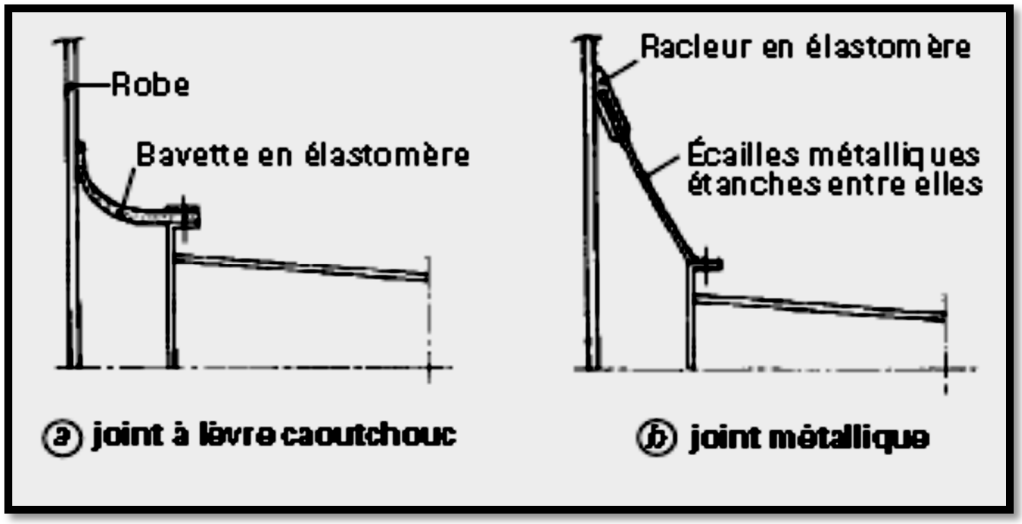


Figure 3.23 : Joints secondaires d'étanchéités flexibles pour toits flottants (Regis Chamayou, 1997).

Les joints flexibles n'ont pas une raideur suffisante pour maintenir le toit centré dans la cuve et ils ne sont, en principe, retenus sur les toits flottants externes que pour constituer une barrière secondaire (figure **3.24a**). Cependant, sur des structures légères et abritées telles que les toits flottants internes, les joints souples à lèvre peuvent être utilisés comme joint primaire (figure **3.24b**).

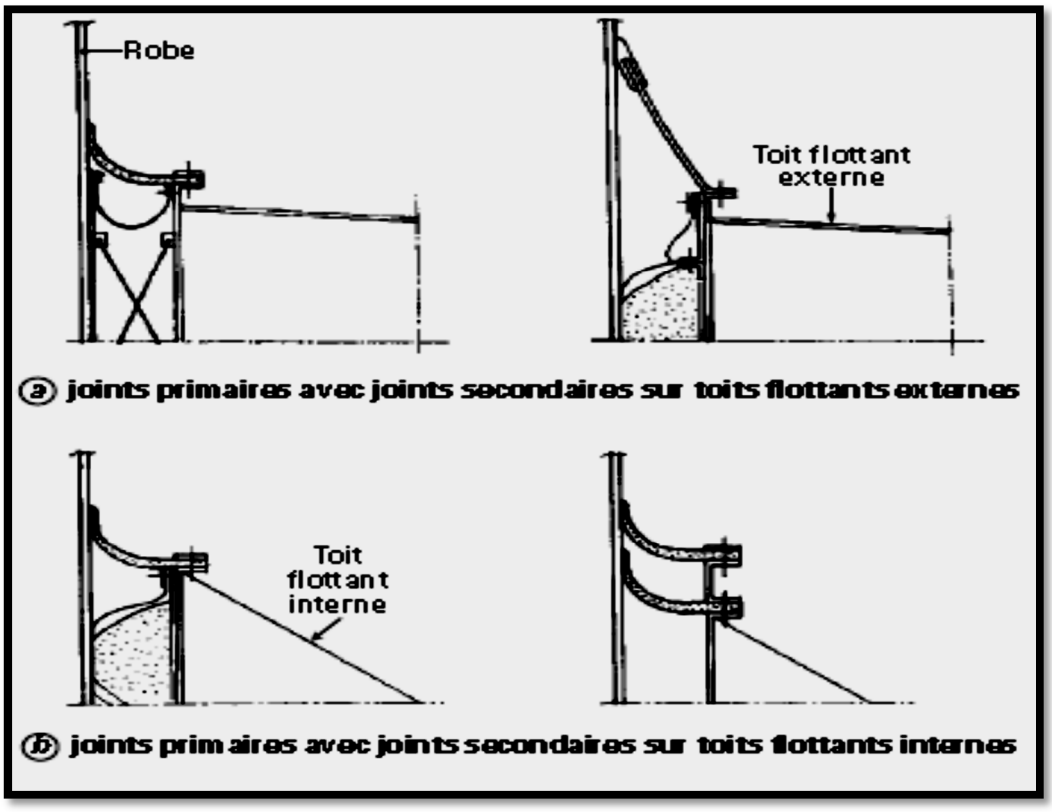


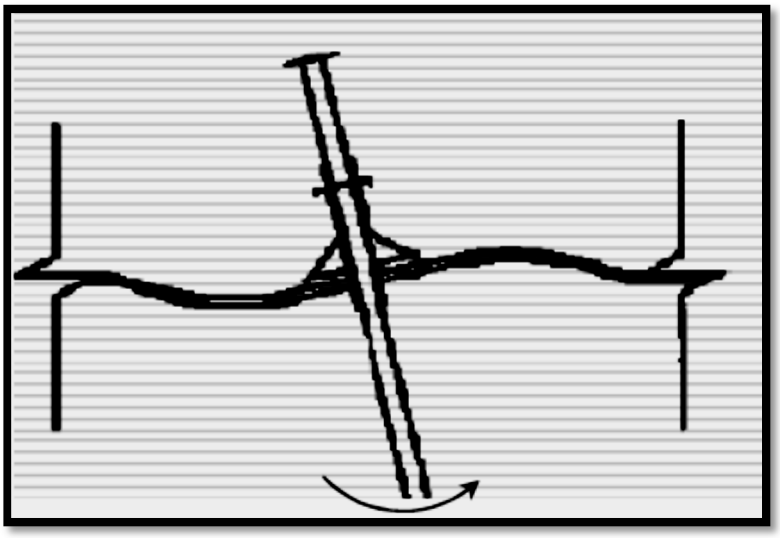
Figure 3.24 : Joints d'étanchéité primaires avec joints secondaires pour toits flottants (Regis Chamayou, 1997).

Les joints flexibles doivent être équipés de barrettes métalliques souples frottant contre la robe pour assurer le transfert des charges électriques du toit à la terre. Lorsque la cuve est peinte intérieurement, cette liaison électrique doit être assurée par un autre moyen, par exemple à l'aide d'un câble conducteur relié au sommet de la robe.

3.15.2 Les pieds supports

Les pieds supports sont les éléments de support pour le toit flottant lorsque le réservoir est vide où le toit descend à sa position la plus basse de service. Le toit devait être pris en charge à une certaine hauteur au-dessus du sol, non seulement que le toit ne sera pas encrasser avec tous les accessoires internes qui sont installé au bas de la coque tels que l'enroulement de chauffage, l'hélice de mixage. En position haute il fournit une salle d'accès pour le personnel de maintenance et de nettoyage. Comme indiqué dans l'API 650 (2007), les jambes de support peuvent être soit de type démontable ou non démontable. La zone du fond de la cuve dans laquelle repose les jambes doit être renforcée par une double plaque entièrement soudé pour répartir les charges du pied dans les plaques du fond **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Plus d'attention et de considération doit être apporter aux exigences des supports pour le toit a simple pont car ce type de toit est moins rigide. La figure **3.25** montre que le pont est faible en flexion et permet une déflexion latérale du pied support.



Force appliquée

Figure 3.25 : Flexion latérale du pied support (Kuan Siew Yeng, 2009).

Il y a une exigence minimum indiqué dans API 650 (2007) où les jambes et les pièces jointes doivent être conçues pour le toit et une charge d'exploitation uniforme d'au moins 1.2KPa. L'épaisseur des jambes doit être en série 80 minimums et les manchons doivent être en série 40 minimums **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

3.15.3 Le système de drain du toit

Le drainage du toit est l'une des préoccupations dans la conception du toit; un système de drainage fiable est indispensable pour les réservoirs de stockage à toit flottant. Un mauvais système de drainage du toit va nécessairement compromettre le fonctionnement du réservoir et menace la sécurité du produit stocké.

Comme indiqué dans l'API 650, les drains de toit doivent être dimensionnés et positionnés pour accueillir le taux de précipitations tout en empêchant le toit d'accumuler un niveau d'eau plus grand que sa capacité maximale de conception, sans permettre au toit d'incliner de manière excessive ou interférer avec son fonctionnement.

L'eau de pluie qui s'accumule sur le toit flottant, est drainée vers le carter qui est fixé habituellement dans le point bas du pont. Le puisard sera ensuite évacuée par un système de tuyauterie fermé à l'intérieur du réservoir et drainée a partir de la buse de coque sur le côté bas de la paroi du réservoir. Un clapet anti-retour est installé à l'entrée du drain.

Le système de tuyauterie qui fonctionne à l'intérieur du réservoir doit être souple pour permettre le mouvement du toit. Les deux systèmes les plus couramment utilisées, sont **le système de tuyauterie articulée** et **le système de conduites flexibles**.

Le système de tuyauterie articulée utilise des tuyaux en acier solide, avec une série de joints articulés ou joints pivotants flexibles. La figure **3.26** montre le système de tuyauterie articulée dans un réservoir à toit flottant **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

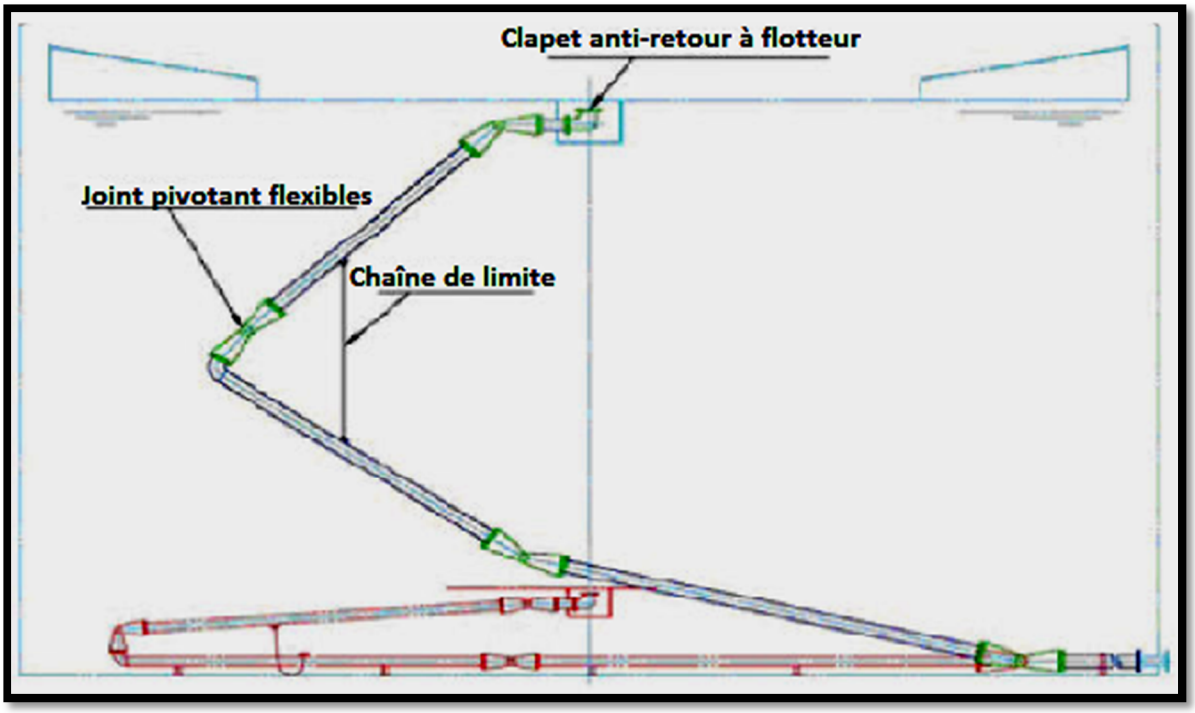


Figure 3.26 : Système de tuyauterie articulée (Kuan Siew Yeng, 2009).

Le système de tuyauterie flexible est installé en une seule longueur continue sans dispositifs d'équilibrage. Il dilate et contracte avec la montée et la descente du toit, pour ne pas interférer avec l'équipement d'accessoires à l'intérieur du réservoir.

Le système de tuyauterie flexible se compose de tuyau en caoutchouc souple ou de tuyaux en acier. Cependant le caoutchouc n'est pas recommandé pour l'industrie pétrolière. Comme mentionné dans l'API 650 (2007), le type siphon et type de tuyau non blindés ne sont pas acceptables comme drain primaire de toit. La figure **3.27** montre la photo d'un système de tuyauterie flexible en acier installé dans un réservoir à toit flottant **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Figure 3.27 : Système de tuyaux flexible en acier a l'intérieur du réservoir à toit flottant (Kuan Siew Yeng, 2009).

Le drain de toit d'urgence doit être installé, mais seulement au toit à double pont. Son but, est de permettre le drainage naturel des eaux de pluie, en cas de dysfonctionnement du drain principal. Les drains de toit d'urgence sont interdits par l'API 650 (2007) sur les toits à pont simples, comme le niveau du produit dans le réservoir est toujours plus élevé que le niveau de l'eau de pluie dans le centre du pont, cela feraient décharger le produit à travers le drain sur le toit au lieu de laisser écouler l'eau dans le réservoir. Il permettra également à la vapeur de s'échapper du réservoir car c'est un drain ouvert. Même si le drainage d'urgence a été abordé dans l'API 650 (2007) pour le toit à double pont, certaines compagnies interdisent l'utilisation du drain d'urgence **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

La figure **3.28** et **3.29** ont été prises en Novembre 1993, à l'une des usines de raffineries à Singapour, où elles montrent un système de vidange articulé installé dans le réservoir. Ce système était en service pendant seulement 2,5 ans; cependant la corrosion a été considérablement observée sur le raccord d'extrémité et la plaque latérale galvanisé.

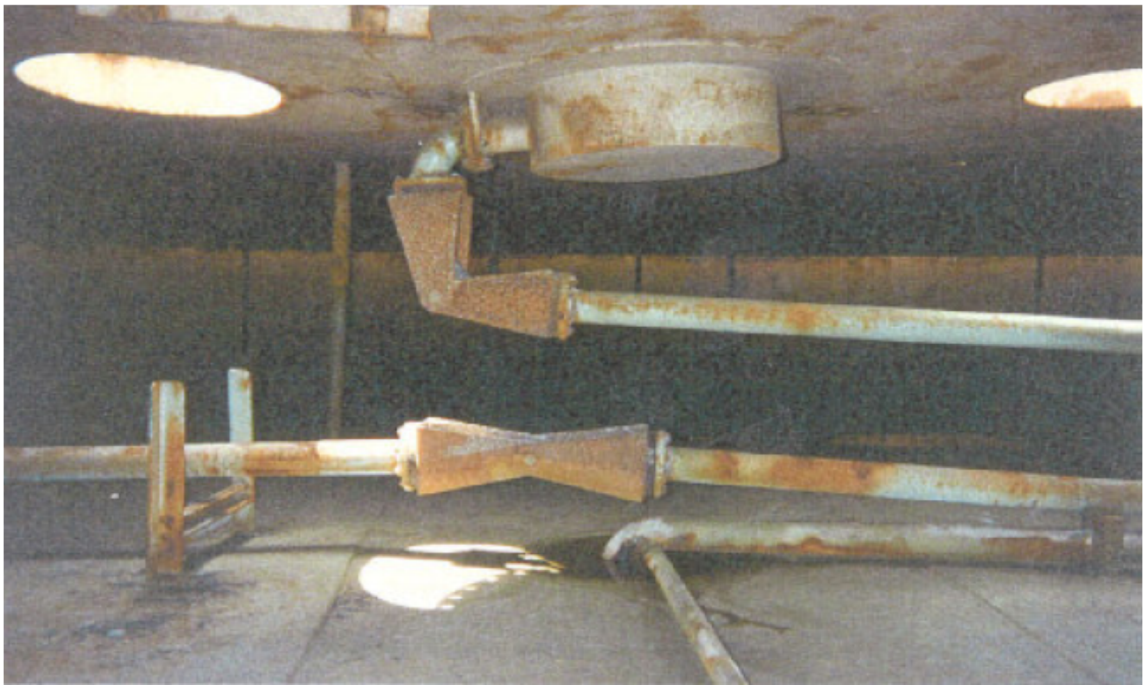


Figure 3.28 : Système de tuyau de drainage articulé installé à l'intérieur du réservoir (Kuan Siew Yeng, 2009).

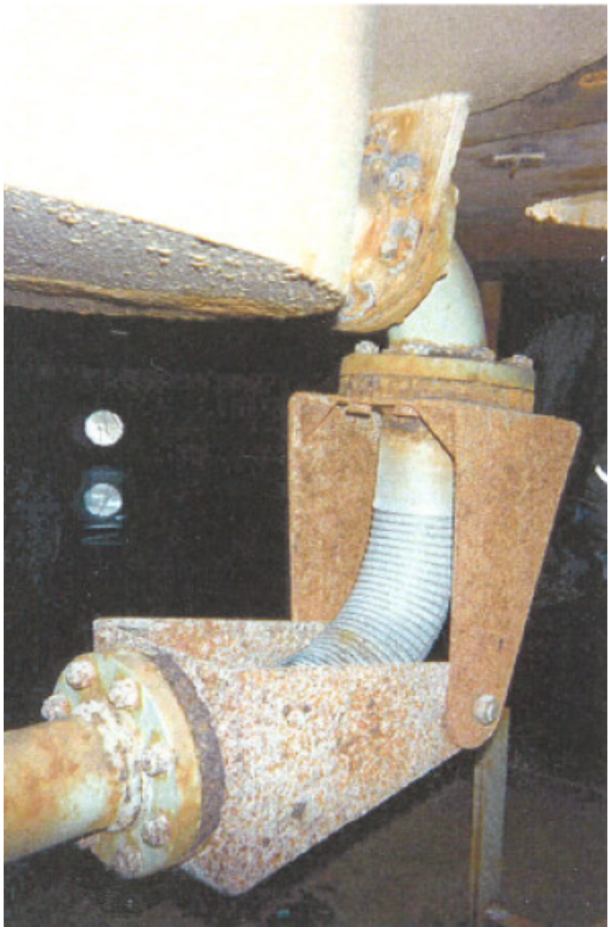


Figure 3.29 : Joint pivotant flexible (Kuan Siew Yeng, 2009).

3.15.4 Vent – Purge évent

Le type de purge évents automatiques est placé pour évacuer l'air vers le haut ou depuis le dessous du pont lors du remplissage et la vidange du réservoir. Ceci afin d'éviter une surcharge de la plate-forme du toit ou de la membrane d'étanchéité. Ces évents ne fonctionnent que lorsque le toit flottant descend et quand le réservoir est vidangé ou remplis.

La figure **3.30** illustre le fonctionnement de la valve. La longueur de la tige de poussée est conçu de manière que le réservoir est vidé, la tige touche le fond de la cuve avant que le pied de soutien de toit descend et l'ouvrira automatiquement, et ventile librement l'espace sous le pont. De même, lorsque le réservoir se remplit, la soupape se ferme après que tout l'air en dessous de la plate-forme du toit flottant est chassé.

Le nombre et la taille du purgeur d'air doivent être conformes au taux de remplissage maximal et au taux de vidange **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

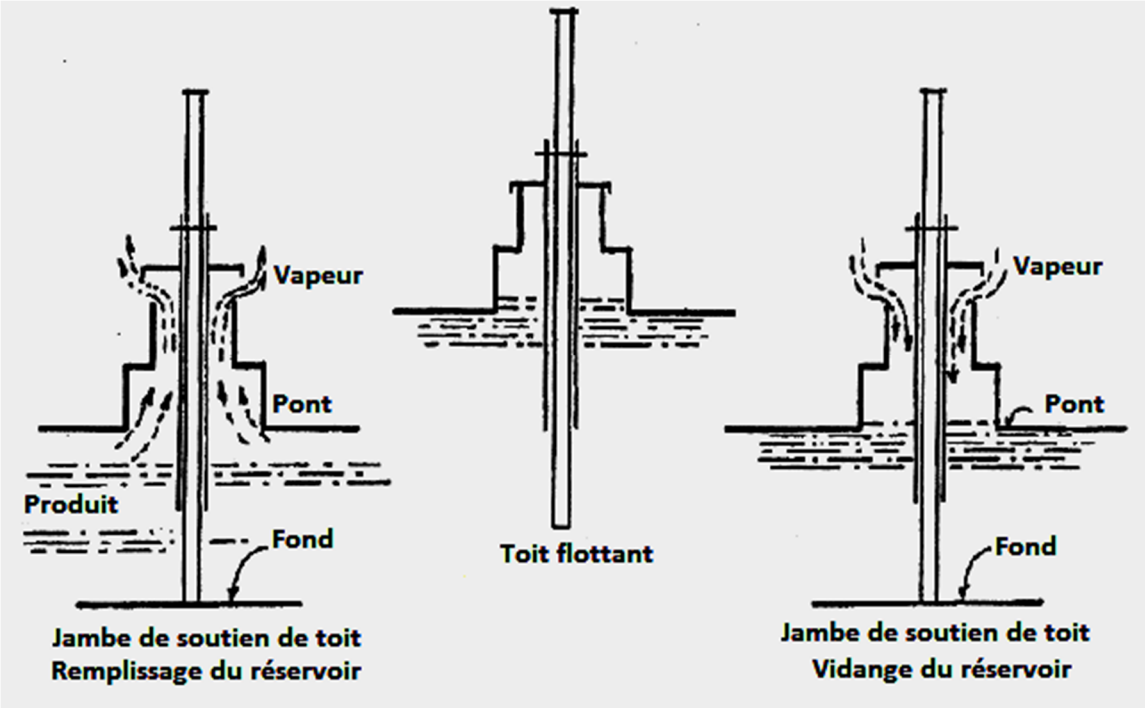


Figure 3.30 : Purge évent (Kuan Siew Yeng, 2009).

3.15.5 Dispositif de centrage et anti-rotation (pôle de guidage)

Les dispositifs anti-rotation (figure **3.31**) également appelés pôles de guidage sont nécessaires comme indiqué dans l'API 650 (2007) pour maintenir le toit en position centrale et empêcher sa rotation. Il est situé à proximité de la plate-forme de Gauger et capable de résister aux forces latérales imposées par l'échelle du toit, la charge inégale de neige et la charge du vent **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Figure 3.31 : Le dispositif anti rotation et la plate-forme de service (Gauger) (Kuan Siew Yeng, 2009).

3.15.6 Echelle roulante et plate-forme de Gauger

L'échelle roulante est le moyen d'accès au toit flottant. L'extrémité supérieure de l'échelle est fixé à la plate-forme de Gauger et l'extrémité inférieure est munie d'un essieu avec une roue de chaque côté de l'échelle qui se déroule sur une piste monté en acier sur une structure qui s'appuyé sur le toit comme illustré dans la figure **3.32**. Il en est ainsi pour que quand le toit monte et descend, l'échelle peut coulisser le long et prendre des angles variables selon les besoins. Ceci est la raison pour laquelle le toit flottant est dimensionné toujours de manière, à ce que le diamètre du réservoir doit être au moins égale à sa hauteur, pour permettre l'utilisation de l'échelle roulante afin d'accéder au toit.

Il y a une réaction à l'extrémité inférieure de l'échelle, entraînant une charge localisée et excentrique sur le toit, cela doit être pris en considération lors de la conception du toit. La plateforme Gauger est une petite zone qui surplombe la coque pour permettre l'accès au pôle de guidage, et d'autres instruments pour que le personnel de maintenance y accède **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Figure 3.32 : Image représentant la plate-forme de Gauger, l'échelle roulante et la structure de support de l'échelle.

3.16 Système de lutte contre l'incendie et mousse barrage

Un système de détection d'incendie doit être installée lorsqu'il est nécessaire, les incendies dans les réservoirs à toit flottant sont généralement dans la zone entre la coque et le bord du toit flottant. Les réservoirs à toit flottant doivent être équipés de système de lutte contre l'incendie, de système de mousse, dont le système est conçu pour fournir un mélange de mousse expansée et de cendre d'étouffement dans l'espace de bordure du réservoir pour éteindre le feu. Un barrage de mousse qui se compose d'une plaque verticale courte est soudé à la plaque du ponton (caisson) supérieure à une courte distance du joint d'étanchéité, avec une hauteur plus élevée que l'extrémité supérieure du joint d'étanchéité, pour permettre à l'ensemble de la zone d'étanchéité d'être inondé avec de la mousse et éteindre le feu efficacement **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

La figure **3.33** représente un dispositif typique du système de mousse qui est constitué d'une mousse générée et du verseur, installé autour de la périphérie du réservoir.

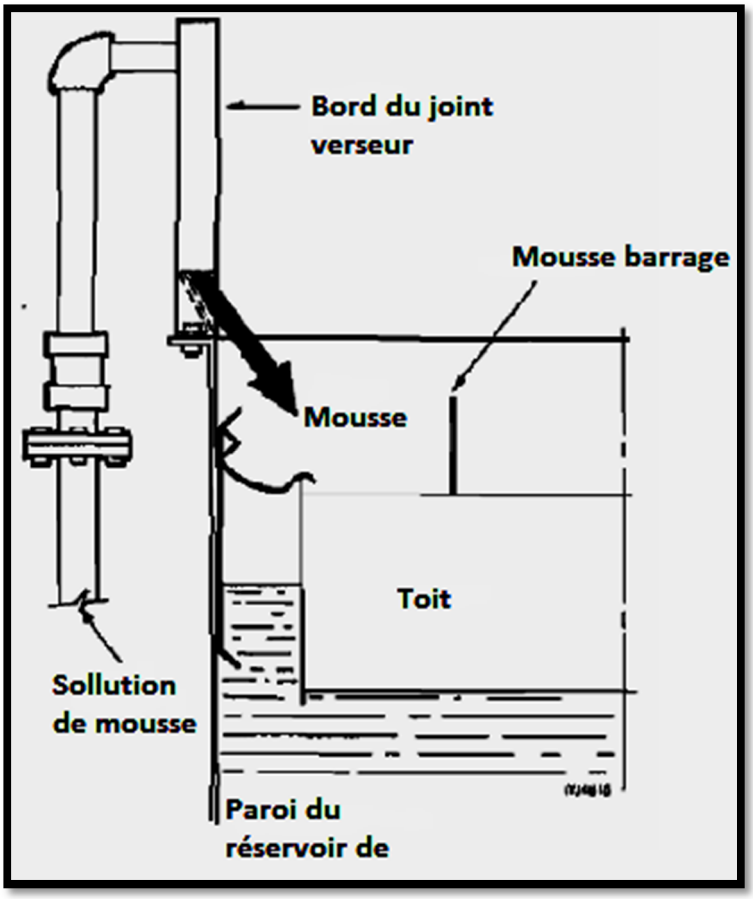


Figure 3.33 : Système mousse de lutte contre incendie (Kuan Siew Yeng, 2009).

Figure 3.34 : Exemples d'éjection de mousse expansée (www.astanks.com/Tanks).

.

3.17 Dégâts caractéristiques des réservoirs métalliques

Au cours de leur exploitation, les réservoirs en acier portent l'influence défavorable de l'environnement et du produit stocké. En conséquence, leur état devient pire et de nombreux dommages sont collectés dans la structure d'un réservoir. Ces dommages peuvent causer de graves défaillances dans les installations en acier.

Les dommages sur les réservoirs en acier, ayant lieu au cours de leur exploitation, pourraient être classés comme suit:

1. Déviation de la conception (forme géométrique):
    - Perte locale de la stabilité ;
    - Perte totale (de la cuve entière) de la stabilité;
    - Ecart à l'intérieur ou à l'extérieur de la coque et / ou au fond;
    - mouvements et / ou flexion des plaques de fond annulaires.

    a) Tassement uniforme :
    - Tassement de l'ensemble du fond
    - Tassement du périmètre du réservoir

    b) Tassement différentielle :
    - Réservoir incliné;
    - Par l'ensemble du fond;
    - Par le périmètre de la cuve ;
    - accrochement du toit flottant avec des dommages de dispositif anti-rotation, les supports et les équipements;
    - Déchirure des pieds supports de toit à partir du bas.

2. Les dommages de la corrosion
    - Corrosion des soudures;
    - La corrosion de la structure d'acier.

    a) La corrosion a une distribution régulière.

    b) La corrosion.

    (www.astanks.com/Tanks).

La figure **3.35** représente un ensemble de photos qui montrent les dommages typiques qui pourraient être résolus dans les réservoirs métallique en service.

Corrosion des ancrages

Tassement du réservoir

Enfoncement de fondation

Cavité sous la plaque de fond

Corrosion de l'intérieur de la robe

Toit flottant inondé d'eau

Corrosion des plaque de fond

Déformations locales dans la robe

Figure 3.35 représente un ensemble de photos qui montrent les dommages typiques dans les réservoirs métalliques (www.astanks.com/Tanks).

Partie I :

4.1 Calcul selon l'Eurocode 3

4.1.1 Données du réservoir

a) Réservoir

Toiture : Ouverte

Type de toiture : Toit flottant

b) Dimensions

Diamètre intérieur : D = 39.00 m

Hauteur du réservoir : H = 20.70 m

Capacité Nominale : V = 24736 m^3

Hauteur maximale du liquide : H_L = 20.70 m

Gravité spécifique du liquide : G = 1.00

Hauteur des six premières viroles : H_r = 2.44 m

Hauteur des trois dernières virole : H_r = 2.02 m

c) Pressions

Pression du vent : P_{sd} = 862.1 N/m²

Pression de calcul : P_0 = 0.00 mbarg (cuve ouverte)

Vitesse du vent : V = 140 Km/h = 38.88 m/s

d) Propriétés mécaniques des matériaux

Module de Young : E = 2.1 x 10^4 KN/cm^2

Composant	Matériau	Résistance à la traction f_u(N/mm^2)	Limite d'élasticité f_y(N/mm^2)	Surépaisseur de corrosion (mm)
Plaques :				
Tole verticale	A 516 GR. 65N	448.00	241.00	3.00
Plaque annulaire	A 516 GR. 65N	448.00	241.00	3.00
Plaque de fond	A 516 GR. 65N	448.00	241.00	3.00
Plaque de toiture	A 516 GR. 65N	448.00	241.00	3.00
Membres de structure				
Structures de toit	A 516 GR. 65N	448.00	241.00	3.00
Raidisseur primaire	A 516 GR. 65N	448.00	241.00	3.00
Raidisseur intermédiaire	A 516 GR. 65N	448.00	241.00	3.00

Tableau 4.1 : Propriétés mécaniques des matériaux utilisés.

4.1.2 Calcul des épaisseurs de la robe

La pression hydrostatique est résistée par la contrainte circonférentielle σ_θ :

$$\sigma_\theta = \frac{P.r}{t} \leq f_{y,d} \quad d'ou : \quad t \geq \frac{P.r}{f_{y.d}}$$

On a: $P = \gamma_F.\rho.g.(H_j - 0{,}3) + P_0$

P_0 = 0 KN/m² : est la surpression de calcul au dessus de niveau du liquide.

D'où :

$$\boldsymbol{t \geq \frac{[\gamma_F.\rho.g.(H_j - 0{,}3) + P_0]r}{f_{y,d}}}$$

Avec :

γ_F = 1.2 ; ρ = 1000 Kg/m^3 ; g = 10 m/s² ; $f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{241}{1.1} = 219.1\ N/mm^2$

1 KN/m² = 10^{-3} N/mm²

10^3 KN/m² = 1 N/mm²

$$\gamma_F.\rho.g = 1.2 \times 1000\frac{Kg}{m^3} \times 10\frac{m}{s^2} = 1.2 \times 10^4\frac{N}{m^3} = 12\frac{KN}{m^3}$$

$$t \geq \frac{[12(H_j - 0{,}3)]r}{219.1 \times 10^3} = 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 1ere rangée (virole 1) :** H = 20,70 m

$$t_1 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(20.7 - 0{,}3)19.5 = 21.88 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 21.88\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_1 = 22mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 2eme rangée (virole 2) :** H = 18.26 m

$$t_2 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(18.26 - 0{,}3)19.5 = 19.26 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 19.26\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_2 = 20mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 3eme rangée (virole 3) :** H = 15.82 m

$$t_3 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(15.82 - 0{,}3)19.5 = 16.65 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 16.65\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_3 = 18mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 4eme rangée (virole 4) :** H = 13.38 m

$$t_4 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(13.38 - 0{,}3)19.5 = 14.03 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 14.03\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_4 = 16mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 5eme rangée (virole 5) :** H = 10.94 m

$$t_5 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(10.94 - 0{,}3)19.5 = 11.41 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 11.41\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_5 = 12mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 6eme rangée (virole 6) :** H = 8.5 m

$$t_6 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(8.5 - 0{,}3)19.5 = 8.795 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 8.795\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_6 = 10mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 7eme rangée (virole 7) :** H = 6.06 m

$$t_7 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(6.06 - 0{,}3)19.5 = 6.178 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 6.178\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_7 = 8mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 8eme rangée (virole 8) :** H = 4.04 m

$$t_8 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(4.04 - 0{,}3)19.5 = 4.011 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$= 4.011\text{mm} \quad \text{soit} \quad \mathbf{t_8 = 8mm}$$

- **Calcul de l'épaisseur de la 9eme rangée (virole 9) :** H = 2.02 m

$$t_9 \geq 0.055 \times 10^{-3}(H_j - 0{,}3)r = 0.055 \times 10^{-3}(2.02 - 0{,}3)19.5 = 1.845 \times 10^{-3}m$$

$$= 1.845mm \quad soit \quad \mathbf{t_9 = 8mm}$$

Remarque :

Le règlement préconise une épaisseur minimale pour un diamètre « D = 39m » de « t_{min}= 8 mm ».

En tenant compte de la corrosion toutes les épaisseurs seront augmentées de 3 mm, le tableau **4.2** ci-dessous récapitule les résultats trouvé :

N° de la virole	Largeur (m)	Hauteur (m)	t_{cal} (mm)	t_{min} (mm)	Surépaisseur de corrosion (mm)	t_{sc} (mm)	Résultat
1	2.44	20.70	21.88	23	3.00	26.00	O.K
2	2.44	18.26	19.26	20	3.00	23.00	O.K
3	2.44	15.82	16.64	18	3.00	21.00	O.K
4	2.44	13.38	14.03	16	3.00	19.00	O.K
5	2.44	10.94	11.41	12	3.00	15.00	O.K
6	2.44	8.50	8.79	10	3.00	13.00	O.K
7	2.02	6.06	6.18	8	3.00	11.00	O.K
8	2.02	4.04	4.01	8	3.00	11.00	O.K
9	2.02	2.02	1.85	8	3.00	11.00	O.K

Tableau 4.2 : Résultats des épaisseurs de la robe selon l'eurocode 3.

4.1.3 Calcul des plaques de fond et annulaire

a) Plaques de fond

Epaisseur minimale pour l'acier carbone selon l'Eurocode 3 : = 6 mm

Surépaisseur de corrosion : = 3 mm

On opte pour une épaisseur de : **t_b = 9 mm**

b) Plaques annulaires

On a : D = 39 m > 12.5 m $\Longrightarrow t_a = \frac{t_s}{3} + 3 = \frac{26}{3} + 3 = 11.67\ mm\ \ soit\ \ t_a = 12\ mm$

Surépaisseur de corrosion : = 3 mm

Epaisseur de la tôle annulaire : **t_a = 15 mm**

Avec :

t_a : épaisseur de la tôle annulaire ;

t_s : épaisseur de la plaque de la 1ere virole.

La partie interne de la tôle annulaire de font doit avoir une largeur minimale supérieur à la valeur W_a donnée par la formule suivante :

$$W_a = 240\frac{t_a}{\sqrt{H}} \qquad \text{Mais non inférieure à 500 mm}$$

Avec :

H : est la hauteur de calcul maximale du liquide, en mètres ;

W_a : est la largeur exposée minimale (distance entre le bord de la tôle de fond et le bord inférieur de la tôle de coque), en millimètres ;

t_a : est l'épaisseur de la virole en prenant en compte la tolérance de corrosion, en millimètres.

$$W_a = 240 \times \frac{15}{\sqrt{20.7}} = 791.26\,mm \quad Soit \quad \boldsymbol{W_a = 795\,mm}$$

Le règlement Eurocode 3 préconise au minimum les valeurs suivantes :

- Pour la longueur de recouvrement de la tôle annulaire : 60 mm.
- Pour la distance minimale projeté à l'extérieure : 50 mm.

NOTA :

Il convient que les joints radiaux reliant les plaques annulaires soient soudés en bout à pénétration complète. Pour des précisions concernant la soudure.

Il convient que la virole inférieure de la tôle de coque aux tôles annulaires ou tôles sur mesure du fond soit fixée par soudures d'angle continues des deux côtés de la tôle de la coque.

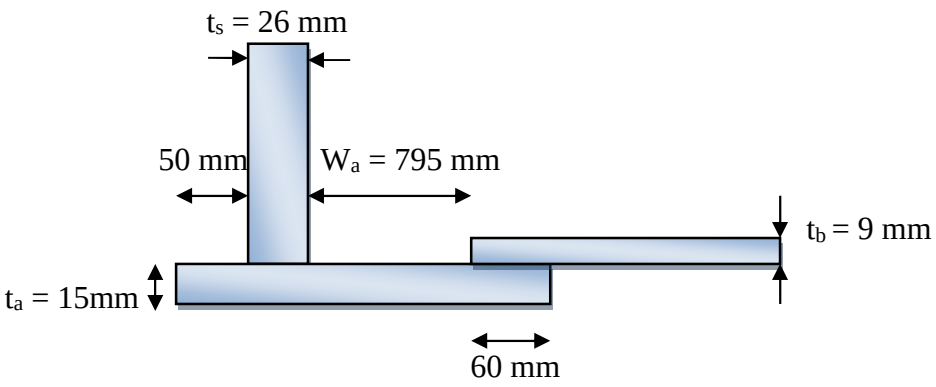


Figure 4.1 : Epaisseur et distances des plaques annulaires.

4.1.4 Vérification de la stabilité sous le vent (Calcul du renfort annulaire)

a) Raidisseur primaire

$$W_{min} = \frac{r^2 H}{4300000} = \frac{1950^2 \times 2070}{4300000}$$

$$\boldsymbol{W_{min} = 1\,830{,}506\ cm^3 = 1\,803\,506\ mm^3}$$

Ou :

H : est la hauteur de la coque du réservoir en (cm^3) ;

r : est le rayon du réservoir en (cm^3) ;

W_{min} : est le module résistant élastique minimal (en cm^3).

On opte pour une poutre en T de dimensions suivante :

Poutre en T	: T825x250x8x10
Long. De l'âme	= 825 mm
Long. Semelle	= 250 mm
Ep. De l'ame	= 8 mm
Ep. Semelle	= 10 mm
Ep. Minimale de la coque, $t_{sc.cor}$	= 8 mm

$t_{sc.cor}$: est l'épaisseur de la plaque sur la quelle le raidisseur primaire sera soudé sans prise en compte de la corrosion.

L'évaluation du module résistant élastique réel *W* du collet peut inclure les parties de la coque du réservoir qui sont comprises dans une distance de $16t_{sc.cor}$ à partir du sommet de la paroi.

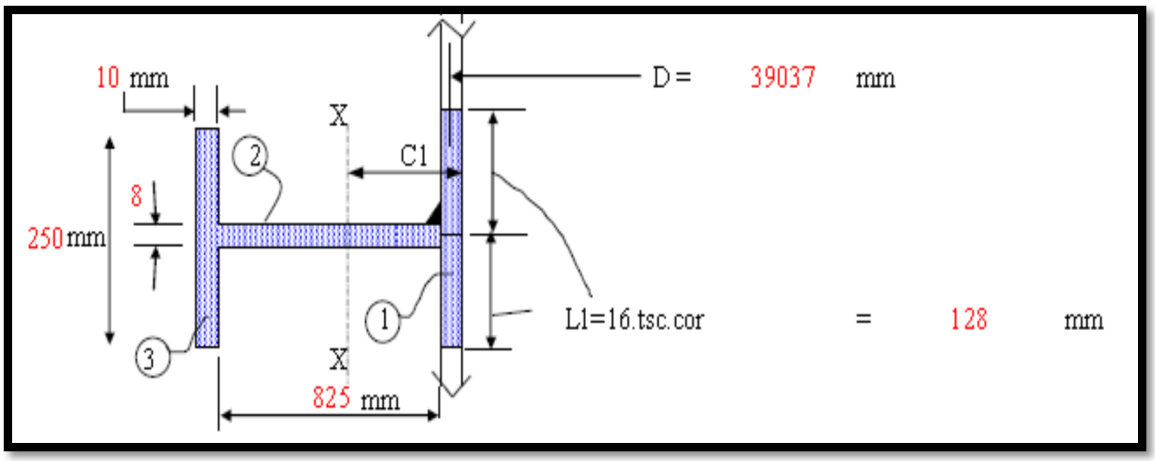


Figure 4.2 : Dimensions du raidisseur primaire (selon l'eurocode).

	A (mm^2)	Y (mm)	A.Y (mm^3)	I = (bh^3)/12 (mm^4)
1	2048	4.00	8192	10 923
2	6600	420.5	2 775 300	374 343 750
3	2 500	838.00	2 095 000	20 833
TOTAL	11 148		4 878 492	374 375 506

Tableau 4.3 : Calcul des sections et moments d'inerties de chaque élément selon l'eurocode 3.

Axe neutre de la section, C1 : 438 mm

Moment d'inertie, I_{x-x} : 1 162 148 161 mm^4

Module de résistance, W_A : 2 655 662 mm^3

$$\Longrightarrow W_A > W_{min}$$

$\Longrightarrow$ **Donc la section choisie est adéquate**

Le raidisseur primaire est à 1m du sommet du la robe (1m > 0.6m), et sachant que l'épaisseur la virole supérieure est de 8 mm, donc il y a lieu de munir le réservoir d'une cornière de rive ayant les dimensions suivant :

L 80 x 80 x 6

b) Raidisseur secondaire

➢ **Calcul de la hauteur équivalente « H_e » :**

$$H_e = \sum_{x=1}^{9} h_{e,x}$$

$$h_{e,x} = h_x\left(\frac{t_{min}}{t_x}\right)^{2,5}$$

- **1ere virole :**

$$h_{e,1} = h_1\left(\frac{t_{min}}{t_1}\right)^{2,5} = 2.44\left(\frac{0.008}{0.023}\right)^{2.5} = \mathbf{0.174\ m = 174\ mm}$$

- **2eme virole :**

$$h_{e,2} = h_2\left(\frac{t_{min}}{t_2}\right)^{2,5} = 2.44\left(\frac{0.008}{0.020}\right)^{2.5} = \mathbf{0.247\ m = 247\ mm}$$

- **3eme virole :**

$$h_{e,3} = h_3\left(\frac{t_{min}}{t_3}\right)^{2,5} = 2.44\left(\frac{0.008}{0.018}\right)^{2.5} = \mathbf{0.321\ m = 321\ mm}$$

- **4eme virole :**

$$h_{e,4} = h_4\left(\frac{t_{min}}{t_4}\right)^{2,5} = 2.44\left(\frac{0.008}{0.016}\right)^{2.5} = \mathbf{0.431\ m = 431\ mm}$$

- **5eme virole :**

$$h_{e,5} = h_5\left(\frac{t_{min}}{t_5}\right)^{2,5} = 2.44\left(\frac{0.008}{0.012}\right)^{2.5} = \mathbf{0.885\ m = 885\ mm}$$

- **6eme virole :**

$$h_{e,6} = h_6\left(\frac{t_{min}}{t_6}\right)^{2,5} = 2.44\left(\frac{0.008}{0.010}\right)^{2.5} = \mathbf{1.396\ m = 1396\ mm}$$

- **7eme virole :**

$$h_{e,7} = h_7\left(\frac{t_{min}}{t_7}\right)^{2,5} = 2.02\left(\frac{0.008}{0.008}\right)^{2.5} = \mathbf{2.02\ m = 2020\ mm}$$

- **8eme virole :**

$$h_{e,8} = h_8\left(\frac{t_{min}}{t_8}\right)^{2,5} = 2.02\left(\frac{0.008}{0.008}\right)^{2.5} = \mathbf{2.02\ m = 2020\ mm}$$

- **9eme virole :**

$$h_{e,9} = h_9\left(\frac{t_{min}}{t_9}\right)^{2,5} = 2.02\left(\frac{0.008}{0.008}\right)^{2.5} = \mathbf{2.02\ m = 2020\ mm}$$

$$H_e = \sum_{x=1}^{9} h_{e,x} = h_{e.1} + h_{e,2} + h_{e,3} + h_{e,4} + h_{e,5} + h_{e,5} + h_{e,6} + h_{e,7} + h_{e,8} + h_{e,9}$$

$$H_e = 0.174+0.247+0.321+0.431+0.885+1.396+(2.02 \text{ x } 3)$$

$$\Longrightarrow \mathbf{H_e = 9.514\ m}$$

➢ **Calcul de la hauteur maximale entre raidisseur :**

$$\mathbf{H_P = 0,46\left(\frac{E}{P_{Sd}}\right)\left(\frac{t_{min}}{r}\right)^{2,5} rk}$$

Avec :

Le module de Young, E = 2.1×10^5 N/mm^2

L'épaisseur minimale des viroles, t_{min} = 8.00 mm

Le rayon du réservoir, r = 19500 mm

La contrainte axiale Ϭx,d est en traction, k = 1.0

La pression dut au vent et au force du vide partiel, P_{Sd} = 8.621×10^{-4}N/mm^2

$$H_P = 0{,}46\left(\frac{2.1 \times 10^5}{8.621 \times 10^{-4}}\right)\left(\frac{8.00}{19500}\right)^{2,5} \times 19500 \times 1.0$$

$$\Longrightarrow H_p = 7448.91 \text{ mm} = 7.449 \text{ m}$$

D'où : $H_e > H_p$ il convient d'utiliser un raidisseur secondaire à mi-hauteur du réservoir c'est-à-dire à H = 10.35 m.

Donc le raidisseur secondaire sera soudé sur la 5eme virole.

La hauteur du bas de la 5eme virole, H = 9.76 m

La hauteur du haut de la 5eme virole, H = 12.2 m

12.2 – 10.35 = 1.85 m > 0.15 m

10.35 – 9.76 = 0.59 m > 0.15 m

$\Longrightarrow$donc le raidisseur est placée à plus de 150mm d'un joint circonférentiel.

Pour 36 m < D = 39 m < 48 m l'eurocode recommande pour les raidisseurs secondaires **une cornière de 150 x 100 x 10**

NOTA : il convient que la grande aile soit en position horizontale.

4.1.5 Vérification de la stabilité du réservoir au vent

$$\mathbf{M_r} = \boldsymbol{V}\left(\frac{\boldsymbol{h}}{\mathbf{2}}\right) < \mathbf{M_s} = \boldsymbol{W}\left(\frac{\boldsymbol{D}}{\mathbf{2}}\right)$$

Avec :

V: est la force du vent;

h : est la hauteur du réservoir ;

W : est le poids total du réservoir à l'état vide ;

D : est le diamètre du réservoir ;

M_r : est le moment renversant ;

M_s : est le moment stabilisant.

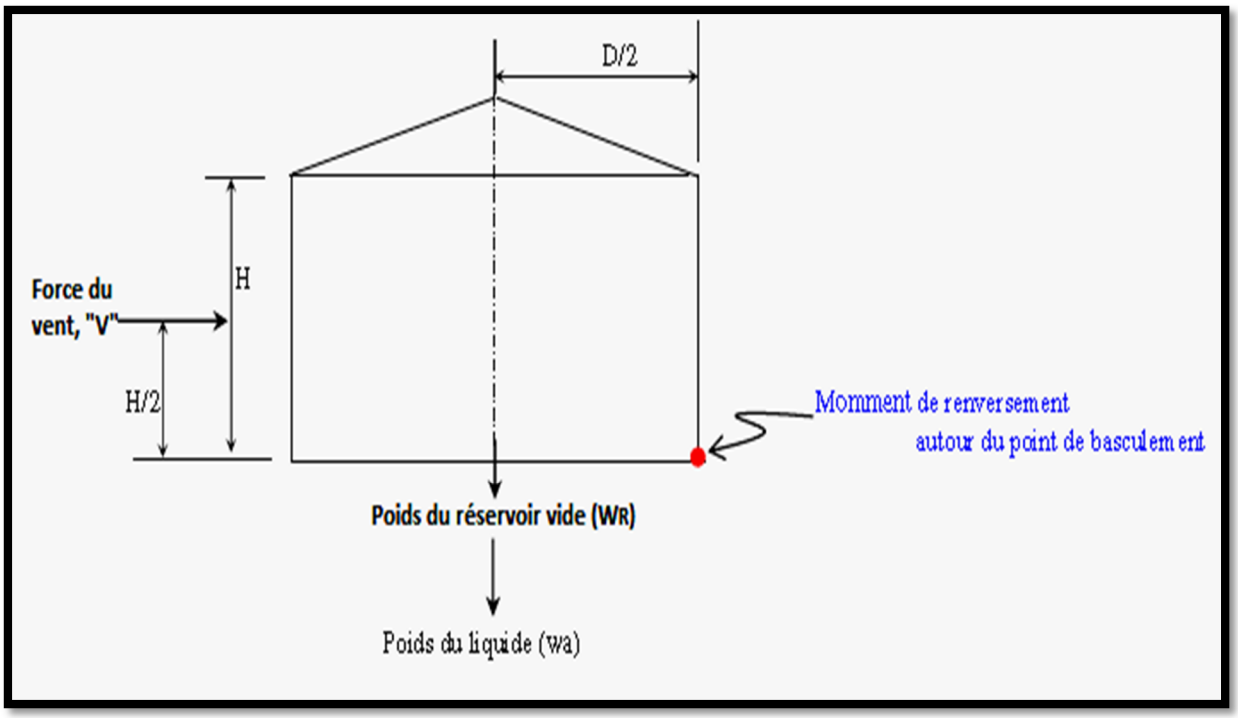


Figure 4.3 : Application de la force du vent, stabilisée par le poids propre du réservoir.

- **Calcul du moment renversant dut au vent « M_r » :**
  - **Calcul du maitre couple :**
    A = D x h = 39 x 20.70 = 39 000 x 20700 = 80.73 x 10^7 mm^2
  - **Calcul de l'action du vent :**
    V = P_{Sd} x A
    P_{Sd} = 8.621 x 10^{-4} N/mm^2
    V = 8.621 x 10^{-4} x 80.73 x 10^7 = 695973.33 N = 695.97 KN.

$M_r = V \times h/2 = 695.97 \times (20.7/2)$

$\Rightarrow$ **M_r = 7 203.28 KN.m**

- **Calcul du moment stabilisant du au poids propre totale (sans le liquede):**
  - **Calcul du poids total du réservoir à l'état vide :**

$W = W_R$

ρ = 77 KN/ m^2 : est le poids volumique de l'acier.

$W_R = W_{cyl} + W_{toit}$: poids propre du cylindre et du toit flottant.

$W_{cyl} = \rho \times V_c = \rho \times \pi D \times \sum h_j t_j$

$W_{cyl} = 77 \times \pi \times 39 \times [2.44(0.023 + 0.020 + 0.018 + 0.016 + 0.012 + 0.010) + 2.02(0.008 \times 3)]$

W_{cyl} = 2 734.91 KN.

Avec :

V_c : volume du cylindre ;

h_j : hauteur de la virole j ;

t_j : épaisseur de la virole j.

W_{toit} = 0 KN Car le toit flottant flotte sur le liquide alors son poids n'est pas comptabilisé.

Donc : $W = W_{cyl}$

$M_s = W (D/2) = 2734.91 (39/2)$

$\Rightarrow$ **M_s = 53 330, 75 KN.m**

$\Rightarrow$ **M_r = 7 203.28 KN.m < M_s = 53 330, 75 KN.m**

La stabilité au vent par le vent est vérifiée.

Il n'y a donc pas d'ancrer le bac.

Remarque : ***l'Eurocode 3 ne traite pas les toits flottants.***

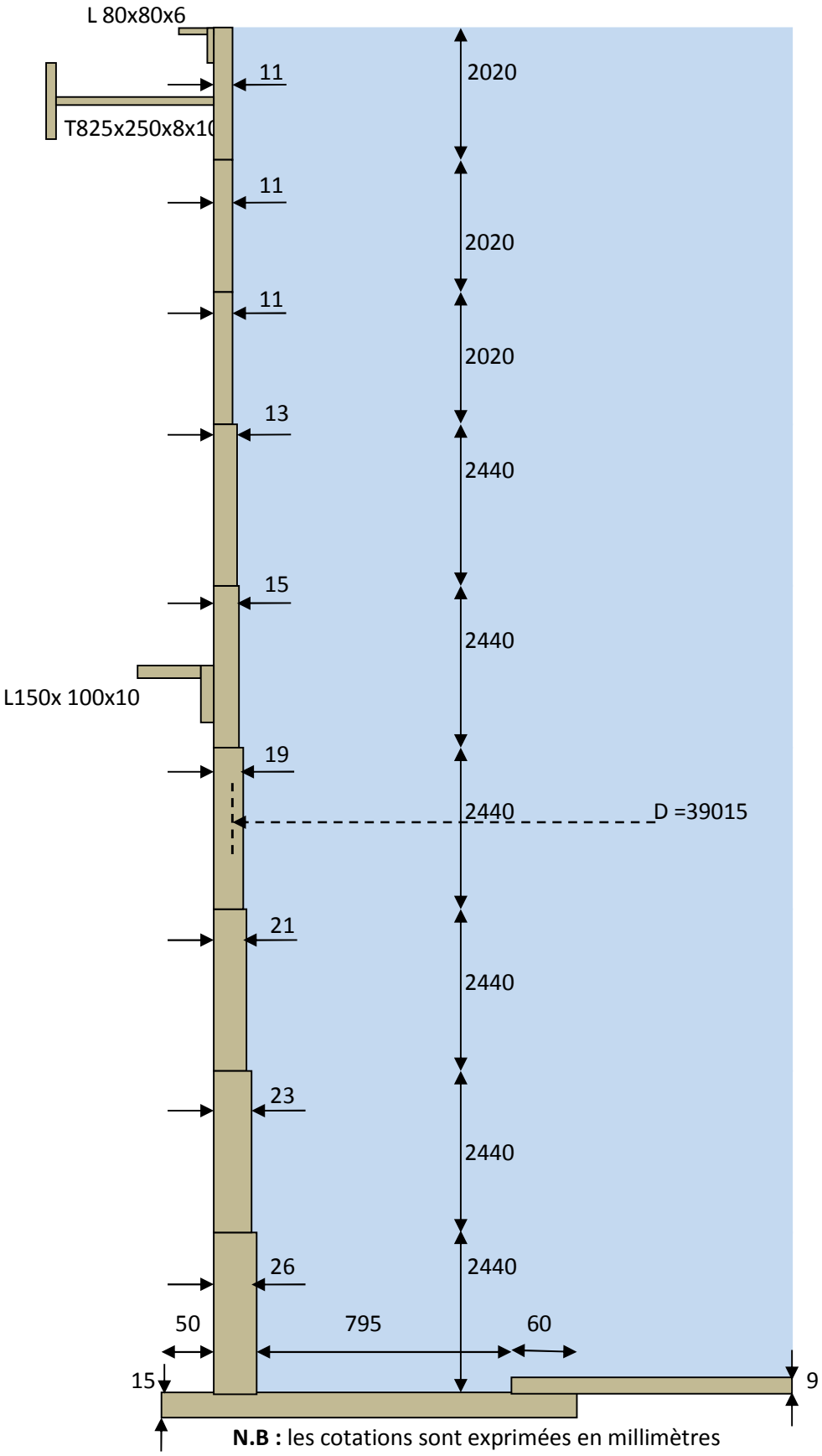


Figure 4.4 : Schéma regroupant les résultats du réservoir.

Partie II :

4.2 Calcul selon l'API 650

4.2.1 Données du réservoir

On traite le même réservoir avec les mêmes données que dans la partie **I**, en incluant certaines données supplémentaires pour le besoin de la méthode de calcul proposé par le règlement API 650.

Ces données seront définit pendant le calcul du réservoir suivant le besoin.

4.2.2 Calcul des épaisseurs de la robe : ONE FOOT METHOD

a) Epaisseur minimale de la tôle

Epaisseur minimale par API 650 clause 5.6.1.1 = 8.00 mm

Epaisseur minimale par PTS 34.51.01.31 = 11.00 mm

b) Calcul de l'épaisseur : ONE-FOOT METHOD (Clause 5.6.3.1)

- Epaisseur de calcul de la coque :

$$t_d = \frac{4.9D(H-0.3)G}{Sd} + C.A$$

- Epaisseur de la coque sous condition d'épreuve (test hydrostatique) :

$$t_t = \frac{4.9D(H-0.3)}{St}$$

Où

t_d : Epaisseur de calcul de la coque, en mm

t_t : Epaisseur de la coque de test hydrostatique, en mm

D : Diamètre nominal du réservoir, en m

H : Niveau de liquide de conception, en m

G : Gravité spécifique du liquide de conception à être stocké

C.A : Surépaisseur de corrosion, en mm

Sd : Contrainte admissible en service, en MPa

St : Contrainte admissible sous conditions d'épreuves (test hydrostatique), en MPa

On donne (pour toutes les viroles) :

Contrainte admissible en service, **Sd** = 160.67 MPa

Contrainte admissible sous conditions d'épreuves, **St** = 180.75 MPa

Surépaisseur de corrosion, **C.A** = 3.00 mm

Calcul et Résultats :

t_{min} = max (t_d ; t_t ; 11.00 mm)

t_{sc} : est l'épaisseur finale.

N° de la virole	Largeur (m)	Hauteur (m)	$t_{.design}$ (mm)	$t_{.hydro}$ (mm)	t_{min} (mm)	t_{sc} (mm)	Résultat
1	2.44	20.70	27.30	21.60	27.30	28.00	O.K
2	2.44	18.26	24.40	19.02	24.40	25.00	O.K
3	2.44	15.82	21.49	16.43	21.49	22.00	O.K
4	2.44	13.38	18.58	13.85	18.58	19.00	O.K
5	2.44	10.94	15.67	11.26	15.67	16.00	O.K
6	2.44	8.50	12.77	8.68	12.77	13.00	O.K
7	2.02	6.06	9.86	6.10	9.86	11.00	O.K
8	2.02	4.04	7.45	3.96	7.45	11.00	O.K
9	2.02	2.02	5.04	1.82	5.04	11.00	O.K

Tableau 4.4 : Résultats des épaisseurs de la robe selon l'API 650.

4.2.3 Calcul des plaques de fond et annulaires

a) Plaques de fond

Epaisseur minimale selon API 650 Clause 5.4.1 : = 6 mm

Surépaisseur de corrosion : = 3 mm

On opte pour une épaisseur de : **t_b = 9 mm**

Largeur minimale de recouvrement (cl. 5.1.3.5) = 25 mm

b) Plaque annulaire

Epaisseur minimale de la 1ère Virole, t_{sc1} = 28.00 mm

_ Contrainte de teste hydrostatique sur la 1^{ére} virole :

$$S_t = \frac{4.9Dn(H - 0.3)}{t_{SC1}}$$

Où

Dn = Diamètre Nominal, Dn (nouveau) (1ère virole) = 39.028 m

H = Hauteur de calcul du liquide = 20.700 m

t_{sc1} = Epaisseur Nominale (1ère virole) = 28.000 mm

$$\rightarrow S_t = 139.33\ N/mm^2$$

Donc on a:

S_t = 139.33 N/mm² < 190

25mm < t_{sc1} = 28mm < 32mm

Du tableau 5-1a de l'API 650, t_{min} = 6.00 mm

Surépaisseur de corrosion, C.A = 3.00 mm

On opte pour une épaisseur de: **ta = 16.00 mm**

Largeur minimale projetée à l'extérieur du réservoir (cl. 5.5.2) = 50 mm

Distance minimale entre le bord de la tôle de fond

et le bord inférieur de la tôle de coque = 600 mm

4.2.4 Vérification de la stabilité sous le vent (Calcul du renfort annulaire)

a) Cornière de rive

Si le raidisseur primaire est situé à 600 mm du top, une cornière de rive est exigée.

Location du raidisseur primaire / au top, L = 1000 mm

Etant donné que L est > 600mm du sommet, la cornière de rive est exigée

Exigences minimales

La valeur minimale exigée d'après API 650 = 76 x 76 x 6.4

Module de section, Z_{min} = 8380 mm^3

Dimensions utilisées

Dimension actuelle = 75 x 75x 10

Module, Z_a = 13500 mm^3

$Z_a > Z_{min}$, la dimension de la cornière est: **satisfaisant**

b) Raidisseur primaire

Le module de section minimal exigée :

$$Z_{min} = \frac{Dc^2.H}{17}\left(\frac{V}{190}\right)^2$$

Où

Diamètre du réservoir (avec corrosion) (a partir de la 1ére rangée de virole), Dc = 39.031 m

Hauteur du réservoir, H = 20.7 m

Vitesse du vent, V = 140.00 km/h

Z_{min} = 1007 cm^3 = 1 007 140 mm^3

Dimension des éléments

Module de résistance

On opte pour une poutre en T de dimensions suivante :

Poutre en T : T825x250x8x10

Long. De l'âme = 825 mm

Long. Semelle = 250 mm

Ep. De l'ame = 8 mm

Ep. Semelle = 10 mm

Ep. Minimale de la coque, $t_{sc.cor}$ = 8 mm

$t_{sc.cor}$: est l'épaisseur de la plaque sur la quelle le raidisseur primaire sera soudé sans prise en compte de la corrosion.

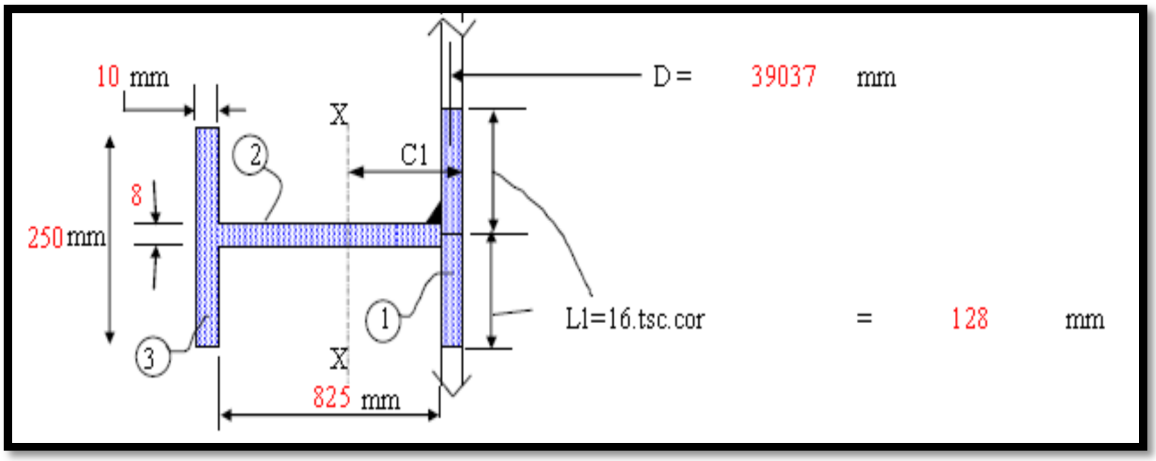


Figure 4.5 : Dimensions du raidisseur primaire (selon le règlement API 650).

	A (mm^2)	Y (mm)	A.Y (mm^3)	I = (bh^3)/12 (mm^4)
1	2048	4.00	8192	10 923
2	6600	420.5	2 775 300	374 343 750
3	2 500	838.00	2 095 000	20 833
TOTAL	11 148		4 878 492	374 375 506

Tableau 4.5 : Calcul des sections et moments d'inerties de chaque élément du raidisseur primaire selon l'API 650.

Axe neutre de la section, C1 : 438 mm

Moment d'inertie, I_{x-x} : 1 162 148 161 mm^4

Module de résistance, Z_A : 2 655 662 mm^3

$$\Longrightarrow Z_A > Z_{min}$$

$\Longrightarrow$ **Donc la section choisie est adéquate**

c) Raidisseurs intermédiaires (secondaires)

- **La hauteur maximale non raidie de la robe H_1 :**

$$H_1 = (9.47 t_{s.cor}) \sqrt{\left(\frac{t_{s.cor}}{Dc}\right)^3 \times \left(\frac{190}{V}\right)^2}$$

Où

Epaisseur de la virole du sommet, $t_{s.cor}$ = 8.00 mm

Diamètre nominal du réservoir, Dc = 39.03 mm

Vitesse du vent, V = 140 Km/h

H_1 = 9.182 m = 9 182 mm

- **La hauteur transformée de la robe H_{tr}**

$$H_{tr} = \sum W_{tr} = W \sqrt{\left(\frac{t_{uniform}}{t_{actuel}}\right)^5}$$

Avec :

W : largeur de la virole transformée ;

$t_{uniform}$: épaisseur de la dernière virole ;

t_{actuel} : épaisseur de la virole transformée.

Calcul et résultats :

Rangée	Epaisseur $t_{s.cor}$ (mm)	Largeur actuelle W (mm)	Largeur équivalente W_{tr} (mm)
1	**25.00**	**2 440**	**141**
2	**22.00**	**2 440**	**195**
3	**19.00**	**2 440**	**281**
4	**16.00**	**2 440**	**431**
5	**13.00**	**2 440**	**725**
6	**10.00**	**2 440**	**1 397**
7	**8.00**	**2 020**	**2 020**
8	**8.00**	**2 020**	**2 020**
9	**8.00**	**2 020**	**2 020**
Hauteur transformée du réservoir, H_{tr} = 9 230 mm			

Tableau 4.6 : Calculs et résultats des largeurs et hauteur équivalentes.

H_1 < H_{tr}, les raidisseurs intermédiaires sont **requis**

Le nombre minimum de raidisseurs requis : = **1**

Location du raidisseur secondaire a partir du sommet : = **4 615 mm**

- **Dimension du raidisseur secondaire**

i) Module de résistance minimal requis (clause 5.9.7.6)

$$Z_{min} = \frac{Dc^2 \times H_1}{17}\left(\frac{V}{190}\right)^2$$

Ou :

Diamètre nominal du réservoir, Dc = 39.031 m

Distance entre raidisseur secondaire et primaire, H_1 = 4.615 m

Vitesse du vent, V = 140 Km/h

$$\Rightarrow Z_{min} = 225.812\ cm^3 = 225\,812.032\ mm^3$$

ii) Dimensions du raidisseur secondaire

Poutre en T fabriquée : T 405 X 150 X 8 X 8

Longueur de l'âme de la plaque = 450 mm

Largeur de la semelle de la plaque = 150 mm

Epaisseur de l'âme = 8 mm

Epaisseur de la semelle = 8 mm

Epaisseur de la plaque sur la quelle le raidisseur secondaire sera soudé sans prise en compte de la corrosion, $t_{sc.cor}$ = 8 mm

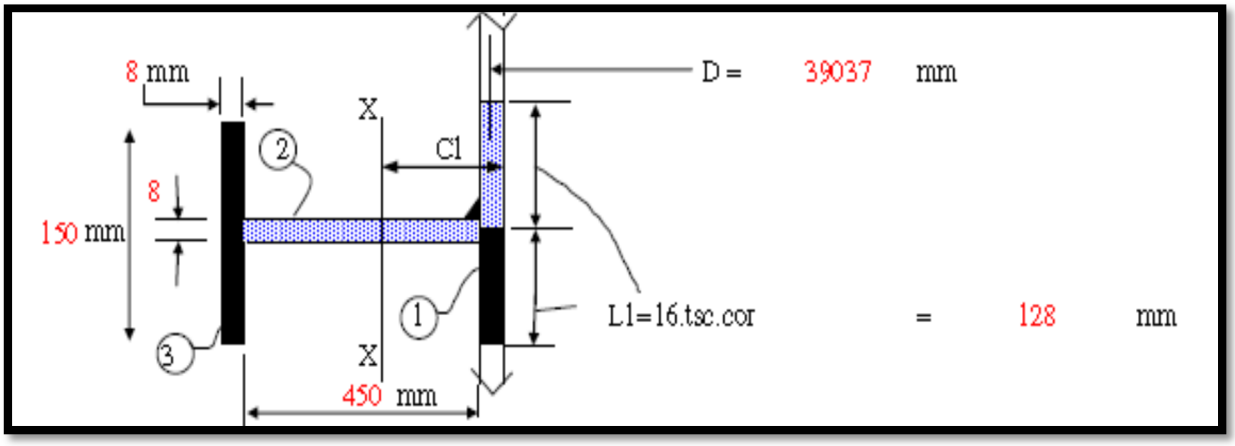


Figure 4.6 : Dimensions du raidisseur secondaire (selon le règlement API 650).

	A (mm^2)	Y (mm)	A.Y (mm^3)	I = (bh^3)/12 (mm^4)
1	2 048	4.00	8192	10 923
2	3 600	233	838 800	60 750 000
3	1 200	462.00	554 400	6 400
TOTAL	6 848		1 401 392	60 767 323

Tableau 4.7 : Calcul des sections et moments d'inerties de chaque élément du raidisseur secondaire selon l'API 650.

Axe neutre de la sectioncomposé, C1 : 205 mm

Moment d'inertie, I_{x-x} : 225 588 896 mm^4

Module de résistance, Z_A : 863 143 mm^3

$\Longrightarrow Z_A > Z_{min}$

$\Longrightarrow$ **Donc la section choisie est adéquate**

4.2.5 Vérification de la stabilité du réservoir au vent

a) Etude au vent

Pression de calcul interne, Pi	= 0 N/mm²
Epaisseur de l'isolant,	= 75 mm
Diametre nominal du réservoir	= 39 000 mm
Hauteur du réservoir, Hs	= 20 700 mm
Pente du toit, β°	= 0.00 °
Hauteur du toit, Hr	= 0 mm
Demie hauteur du réservoir, Ls	= 10 350 mm
Hauteur du fond du réservoir jusqu'au centre du toit, Lr	= 20 700 mm
Hauteur minimale du produit	
(toujours présent dans le réservoir), H_w	= 0 mm
Poids du réservoir, Wt (condition corrosive)	**550 045** kg = 5 395 939 N
Poids du produit (présent dans le réservoir), W_w	= 0 N
Poids de la coque + anneau de rive, W_{DL}	**327 512** kg = 3 212 898 N

b) Calcul de l'action du vent

Selon API 650 clause 5.2.1 (j), la pression du vent est comme suit:

Pression du vent sur la surface conique, Wr	= 0.0014369 N/mm²
Pression du vent sur les surfaces du cylindre, Ws	= 0.0008621 N/mm²
Facteur de correction du vent, k_w (= V /190)²	= 1.00
L'air projetée du toit, Ar (= 0.5.k.Do.Hr)	= 0 mm²
L'air de projection de la coque, As (= k.Do.Hs)	= 811 564 200 mm²
Charge du vent totale sur le toit, Fr (= wr.kw.Ar)	= 0 N
Charge du vent sur la coque, Fs (= ws.kw.As)	= 699 681 N
Moment total du au vent sur le réservoir, M*w* (= Fr.Lr + Fs.Ls)	= 7241700964 N.mm

c) Stabilité au déversement contre la charge du vent

Pour que le réservoir soit structuralement stable sans ancrage, les critères suivants doivent être satisfaits :

Critère 1 : 0.6 M*w* + Mpi < M_{DL} / 1.5

Critère 2 : M*w* + 0.4 Mpi < (M_{DL} + M_F)/2

Ou :

Mpi = Moment du à la pression interne au niveau du toit.

= Pression de soulèvement interne x 1/2 diamètre du réservoir

= (1/4 π. D^2. Pi). 1/2. D **= 0 N.mm**

M*w* = Moment de renversement du à la pression horizontale et verticale du vent

= Moment de renversement total sur le réservoir

= Fr.Lr + Fs.Ls **= 7 241 700 964 N.mm**

M_{DL} = Moment stabilisant du au poids propre de la coque et du toit supporté par la coque

= 0.5. D. W_{DL} **= 62 651 502 376 N.mm**

Poids du toit = 0 ; puisque il flotte sur le liquide

M_F = Moment stabilisant du au poids du liquide (Wa)

$= \frac{(Wa.\pi.D)}{1000}\frac{D}{2}$ **= 153 419 379 181 N.mm**

Wa = Poids du liquide = $59t_b\sqrt{F_{by}.H}$ = 64,214.21 N/m

H = Hauteur du liquide = 19.2 m

t_b = Epaisseur de la plaque du fond sous la coque = 16 mm

F_{by} = Limite d'élasticité de la plaque du fond sous la coque = 241 N/mm^2

Critère 1 : **0.6 M*w* + Mpi < M_{DL} / 1.5**

0.6 M*w* + Mpi **= 4 345 020 578 N.mm**

M_{DL} / 1.5 **= 41 767 668 251 N.mm**

Critère 2 : **$Mw + 0.4\ Mpi < (M_{DL} + M_F)/2$**

$Mw + 0.4\ Mpi$ **= 7 241 700 964 N.mm**

$(M_{DL} + M_F)/2$ **= 108 035 440 779 N.mm**

Puisque,

$0.6\ Mw + Mpi < M_{DL} / 1.5$

$Mw + 0.4\ Mpi < (M_{DL} + M_F)/2$

L'ancrage du réservoir n'est pas nécessaire

4.2.6 Géométrie du toit flottant

Il existe une procédure et règles limitées, prévues pour la conception du toit flottant comme la plupart de ces composants; en particulier le montage des accessoires dans celui-ci. La conception du toit se compose :

- de sélection du type de toit ;
- la conception de la flottabilité (du ponton) ;
- la conception des accessoires et leur fonctionnement.

a) Sélection du type de toit

Différents types de toit flottant ont été discutés dans le chapitre précédent -**Technologie des réservoirs à toit flottant**. Il n'est donc pas la peine de les répéter ici. Le type de toit flottant à simple pont est généralement utilisé pour des réservoirs de diamètre moins de 65 m en raison de la flexibilité de la plaque de pont, le double pont est utilisé pour les réservoirs de plus grand diamètre du fait que le double est plus rigide et stable. Compte tenu du diamètre du réservoir de 39 m, et l'efficacité des coûts, le toit flottant à simple pont a été sélectionné **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

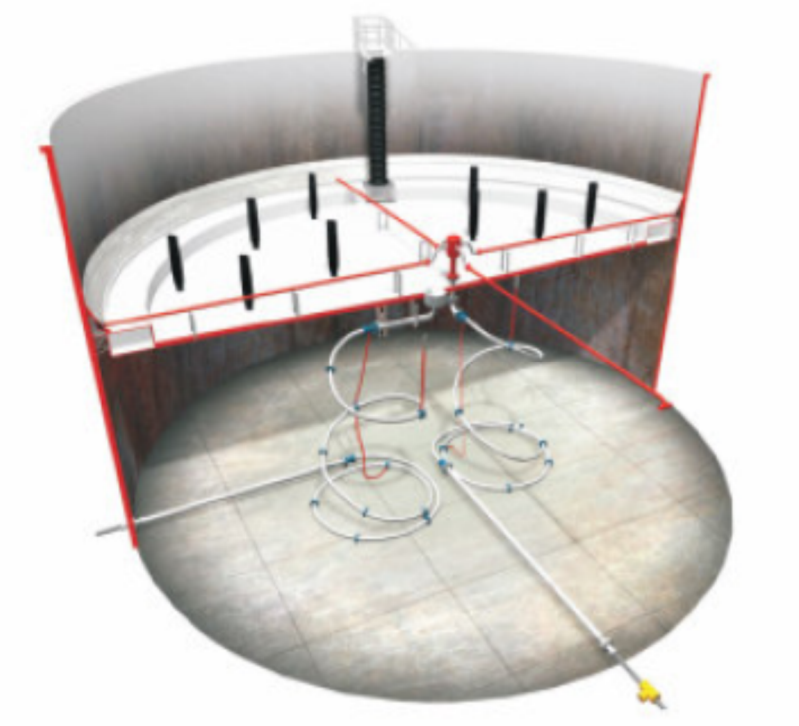


Figure 4.7 : Toit flottant a simple pont (Kuan Siew Yeng, 2009).

b) Conception du ponton et du pont central

L'exigence de base comme indiqué dans API 650 (2007) pour le modèle de ponton est que le ponton doit être conçu pour avoir une flottabilité suffisante pour rester sur le produit, une densité de conception de 0,7 ou moins avec le drain primaire inopérante pour les conditions suivantes:

- La plaque de pont et deux compartiments adjacents du ponton crevés et inonde le pont central comme le montre la figure **4.8**.
- Des précipitations de 250 mm dans une période de 24 heures sur la zone de toit **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

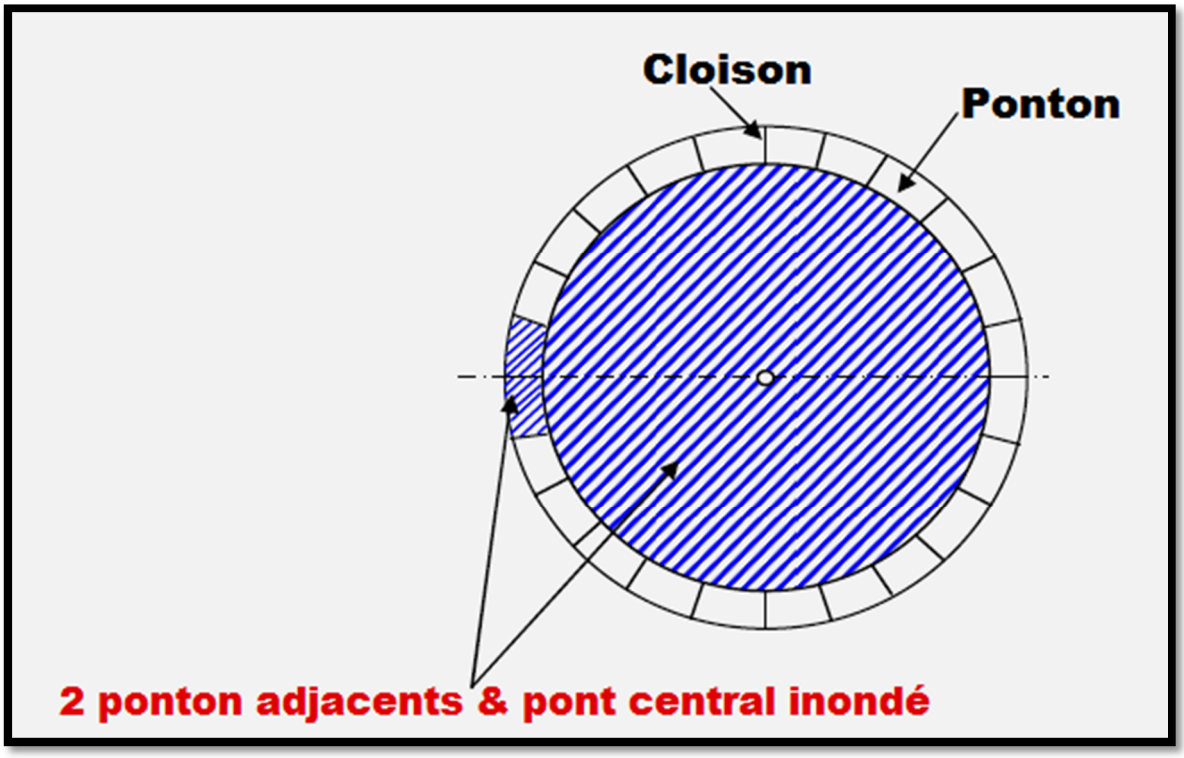


Figure 4.8 : Pont central et 2 compartiments adjacents percés (Kuan Siew Yeng, 2009).

i) L'ordre de grandeur du pont

L'API 650 (2007) exige que toutes les plaques de pont aient une épaisseur de conception minimale de 5mm et le pont du toit flottant à simple plate-forme doit être conçu pour être en contacte avec le liquide pendant le fonctionnement normal**.** La conception doit être en mesure d'accueillir la déflexion du pont causé par la vapeur piégée. Une épaisseur nominale de 8 mm a été utilisée dans la conception du pont central de ce projet **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

ii) L'ordre de grandeur du ponton (caisson de flottabilité)

Les dimensions du caisson de flottabilité (d'après la thèse de Kuan Siew Yeng, 2009) sont de l'ordre d'une :

- Hauteur de la cloison extérieur = 900 mm
- Hauteur de la cloison intérieur = 525 mm
- Largeur de la cloison basse = 2187 mm
- Largeur de la cloison haute = 2160 mm

- Epaisseur de la cloison extérieur = 9 mm
- Epaisseur de la cloison intérieur = 12 mm
- Epaisseur de la cloison basse = 8 mm
- Epaisseur de la cloison haute = 8 mm

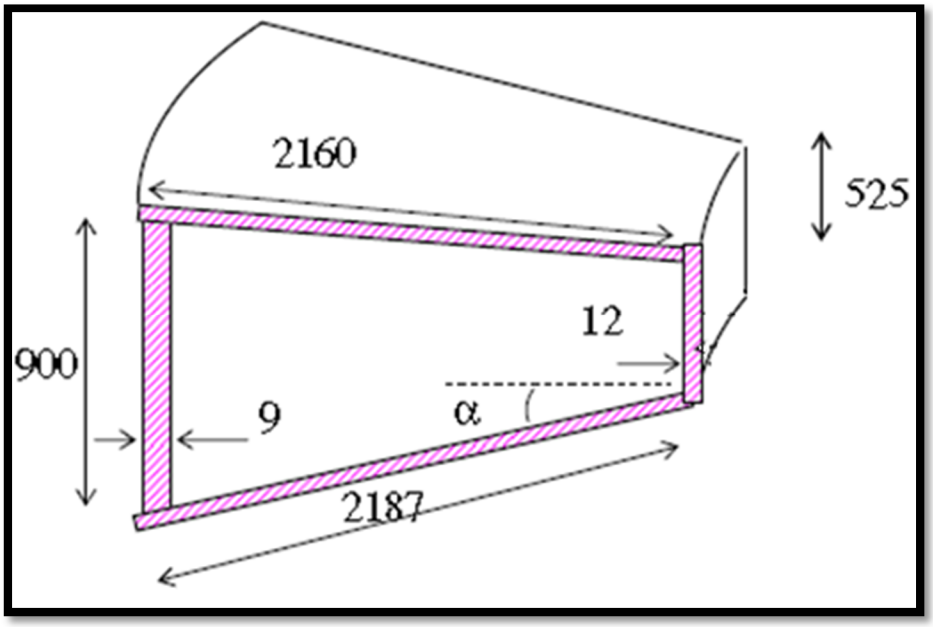


Figure 4.9 : Les sections détaillées du ponton (caisson de flottabilité) (Kuan Siew Yeng, 2009).

c) Conception et montage des accessoires

La figure **4.10** montre les accessoires standards typiques et approprié pour un toit flottant à simple pont qui sont essentiels pour le fonctionnement de ce réservoir. Chaque raccord et accessoires a sa propre importance unique; un dysfonctionnement d'une quelconque garniture causerait une défaillance du toit et pouvant conduire à sa ruine. L'exigence minimale pour le montage du toit avait été indiquée dans le Tableau **3.6(b)** mentionné dans **le chapitre -Technologie des réservoirs à toit flottant**.

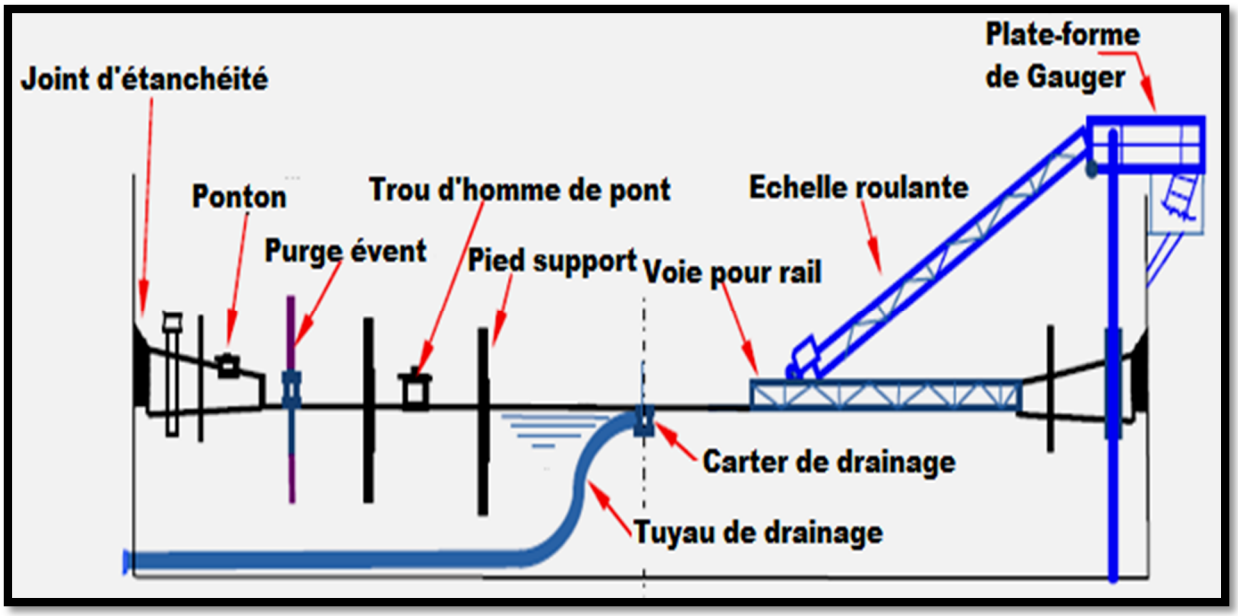


Figure 4.10 : Accessoires importants d'un toit flottant (Kuan Siew Yeng, 2009).

i) Systèmes d'étanchéité du toit

Comme indiqué dans **le chapitre 3.Paragraphe 2 : principes du toit flottant,** il y a 200 mm d'écart entre l'intérieur de la robe du réservoir et le bord extérieur du ponton du toit flottant. Le but principal des joints de toit sont de fermer l'écart entre ponton et paroi de la coque, donc empêcher la fuite de vapeur à partir du produit stocké dans le réservoir vers l'atmosphère et de minimiser la quantité de pluie et de polluants entrant dans le produit. Les joints sont également placés pour tenir compte des charges radiales ou mouvement latéral du toit à cause du vent et du séisme. Par conséquent, le joint doit être suffisamment flexible pour tenir dans toutes ces applications.

Habituellement, il existe deux types de joints installés dans le réservoir à toit flottant; ils sont 1) joint primaire et 2) joint secondaire. Il ya plusieurs différents types de joint primaire disponibles sur le marché aujourd'hui, et le joint approprié doit être sélectionné pour la poursuite de service du réservoir. La conception des joints sont la conception propriétaire de la société d'étanchéité, le plus que l'ingénieur ou le concepteur de réservoir peut apporter est d'étudier chacun des différents joint et sur la base de l'expérience précédente pour faire la sélection du joint.

1) Joint primaire

Les fonctions du joint primaire sont de minimiser la perte de vapeur, de centraliser le toit flottant et d'exclure la neige, la pluie formées au dessus de l'écart de la bordure. Le joint primaire pourrait être de type métallique (joint de patin mécanique) ou non métallique (joint rempli élastique).

- **Joint de patin mécanique (métallique)**

Le joint de patin mécanique qui est recommandé dans l'API 650 (2007) a deux types différents de joints, qui sont crochet Pantographe et crochet ciseaux.

Le crochet pantographe comme le montre la Figure **4.11** est le joints d'étanchéité mécaniques de convection, il se compose d'un anneau en acier galvanisé ou en acier inoxydable, étanche avec le fond situé en dessous de la surface du liquide, un joint étanche continu résistant au feu serre la vapeur pour fermer l'espace de bordure. Le joint d'étanchéité est pris en charge par le système de contrepoids du pantographe, les poids en acier activent le système de levier du réservoir, en appuyant sur le joint d'étanchéité contre la paroi du réservoir, assurant que le joint d'étanchéité est maintenu en contact permanent avec la paroi du réservoir. La plaque de patin est conçue avec des flexions intégrées dans la tôle à des intervalles d'environ 550mm pour assurer la conformité avec la robe du réservoir et permettre l'expansion et la contraction. Ce joint est capable de fournir une variation de l'espace de la bordure de ± 130 mm, dans un espace nominal du contour de 200 mm **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Le crochet ciseaux comme le montre la figure **4.12** a été introduit sur le marché dans les dernières années. Chaque fournisseur de joint pourrait avoir un nom différent pour lui. Les principes de conception sont essentiellement similaires au crochet pantographe; il est la barre

de poussée pour pousser la plaque de patin au lieu du contrepoids. Le crochet ciseaux est beaucoup plus simple à concevoir et économique par rapport au crochet pantographe, également l'installation plus facile et l'assemblage sans aucun travail de soudure à chaud.

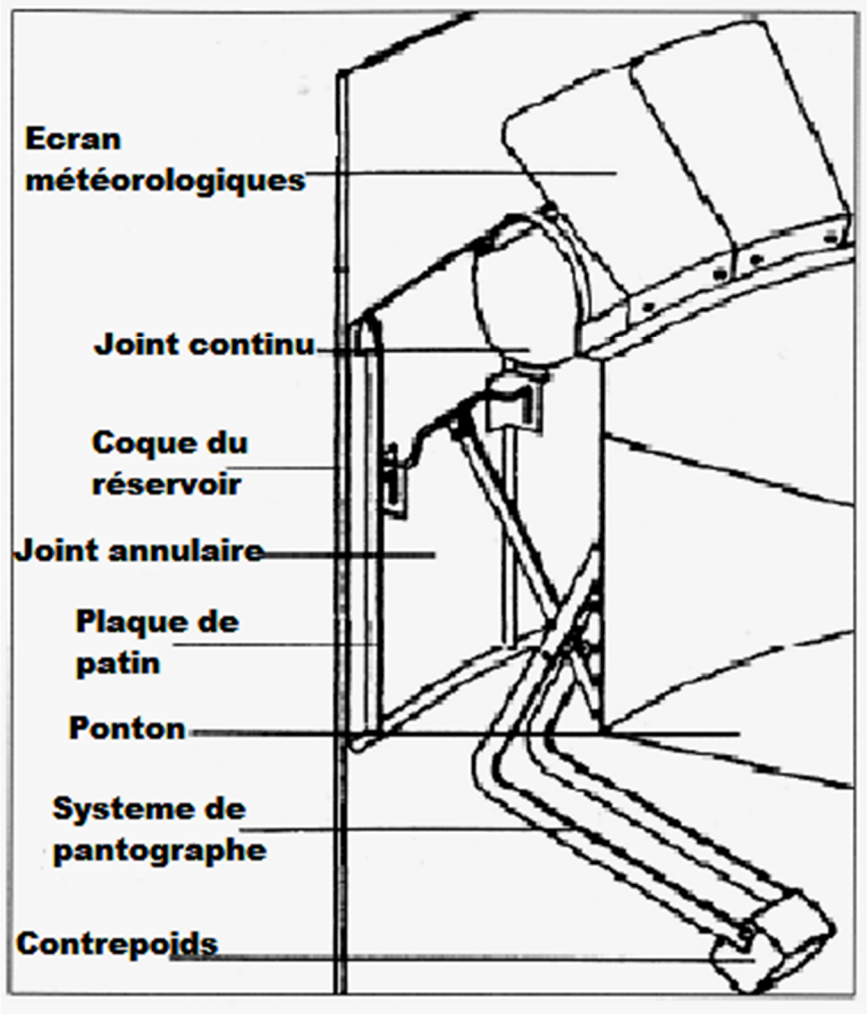


Figure 4.11 : Crochet pantographe (Kuan Siew Yeng, 2009).

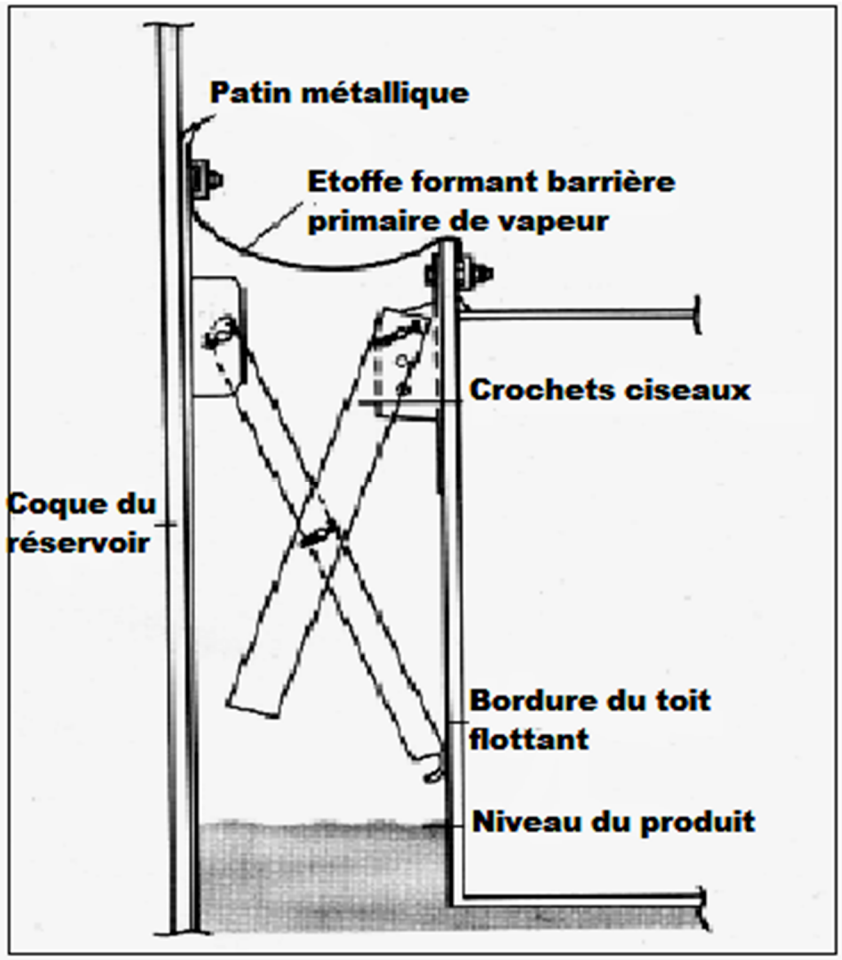


Figure 4.12 : Crochet ciseau (Kuan Siew Yeng, 2009).

Les Figures **4.13** et **4.14** montrent l'assemblage complet et la section d'extrémité du crochet pantographe respectivement.

Figure 4.13 : Assemblage complet du système pantographe (Kuan Siew Yeng, 2009).

Figure 4.14 : la section d'extrémité du crochet pantographe (Kuan Siew Yeng, 2009).

- **Joint rempli élastique (non métallique).**

Le joint rempli élastique peut être rempli de mousse ou rempli de liquide. Figure **4.15** montre le joint rempli mousse et la figure **4.16** montre le joint rempli liquide.

Dans le joint rempli en mousse, la force mécanique est obtenue en prenant un matériau en mousse compressible et en l'insérant entre la bordure du toit flottant et la robe du réservoir. La résistance à l'action d'éraflures des plaques rugueuses de la robe du réservoir est obtenue en enroulant la mousse élastique dans une enveloppe de feuille de matière plastique renforcée ou d'une feuille de caoutchouc. La mousse et l'enveloppe peuvent être montés dans de nombreuses variantes, où la partie inférieure du joint d'étanchéité est en contact avec le liquide stocké, alors le joint est dit **monté liquide**, et si elle est montée au-dessus du liquide, il est **monté vapeur**. Le joint monté liquide possède de meilleures caractéristiques de conservation de vapeur **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

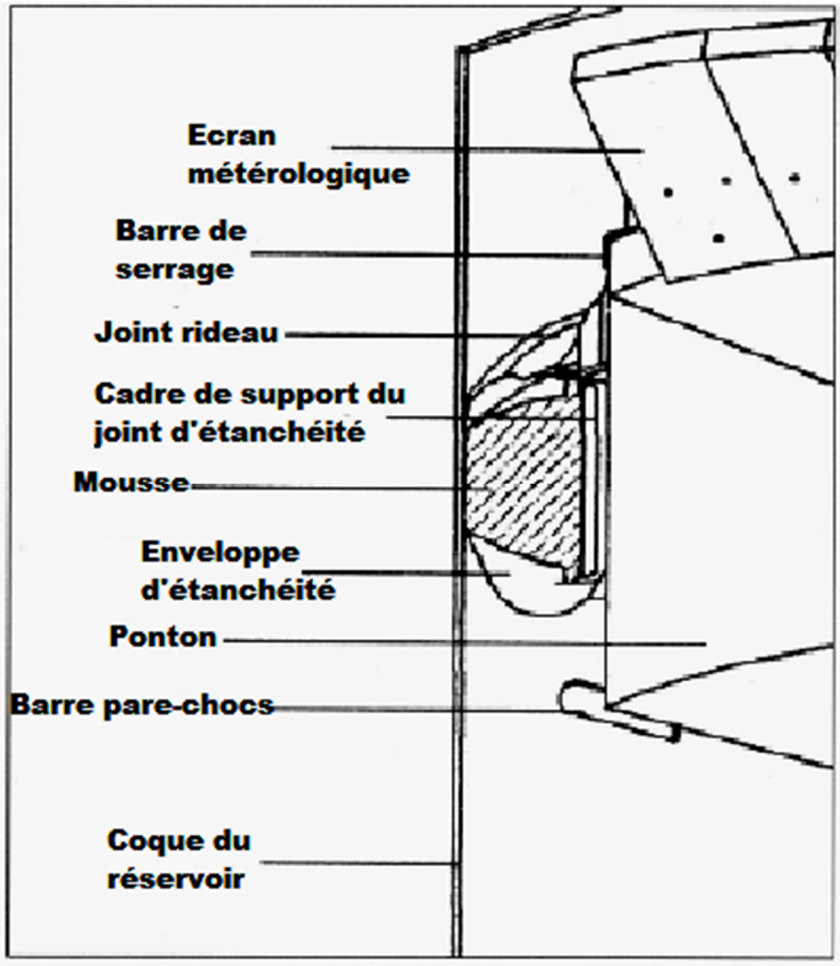


Figure 4.15 : Joint rempli mousse (Kuan Siew Yeng, 2009).

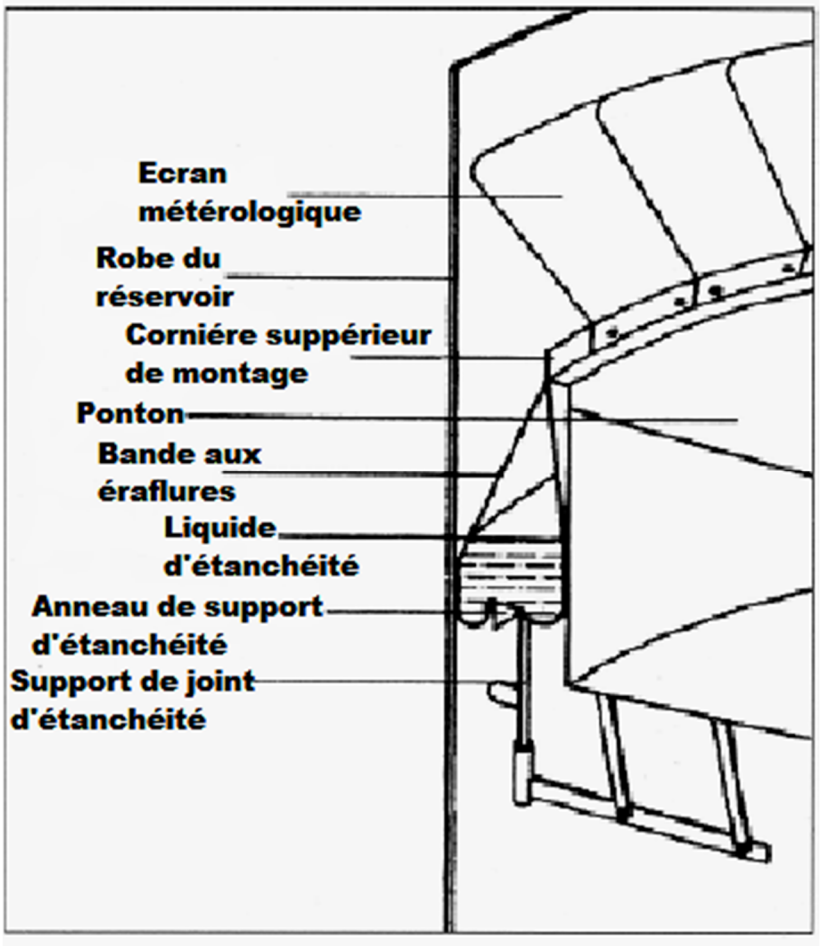


Figure 4.16 : Joint rempli liquide (Kuan Siew Yeng, 2009).

Dans le joint d'étanchéité rempli de liquide, une enveloppe en forme de boucle de tôle en caoutchouc renforcée est supportée dans l'espace de la bordure et l'enveloppe est remplie d'un liquide neutre tel que le kérosène. En vertu de sa profondeur et de la densité du liquide, l'enveloppe se propage et exerce une force contre la robe du réservoir. L'enveloppe est généralement un tube nervuré et peut être équipé à contenir le kérosène.

Après l'étude du système d'étanchéité ci-dessus, ils ont opté pour le joint de patin mécanique de type crochet ciseaux pour ses performances très réputé, le moindre coût et une installation simple. Il a été recommandé par l'API 650 (2007) et le joint rempli élastique a été interdit par certains groupes pétroliers **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

2) Joint secondaire

Le joint secondaire est monté au-dessus du joint primaire, il réduit la perte de vapeur qui a son tour réduit les coûts, le renforcement de la sécurité par la protection contre les incendies de bordure, la protection de l'environnement avec moins d'odeur et la conformité avec les normes de l'air et il réduit considérablement la quantité d'eau de pluie entrant dans le contenu du réservoir par couler sur la coque. Figure **4.17** montre un type de joint secondaire.

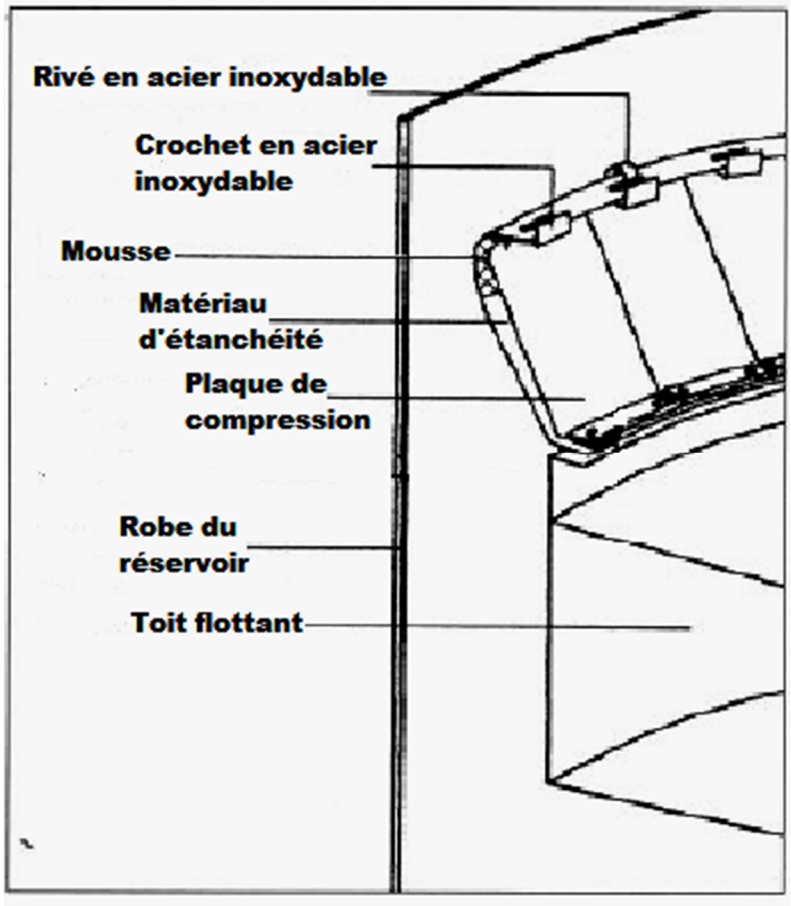


Figure 4.17 : Joint secondaire (Kuan Siew Yeng, 2009).

3) Matériaux du joint de toit

Il est essentiel de choisir le bon matériel pour les joints de la bordure primaires et secondaires. L'exigence de base du matériau d'étanchéité est la résistance chimique, qui est lié au produit stocké, la résistance aux ultraviolets, dans lequel le joint est exposer directement à la lumière et le matériau doit être ignifuge **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Les joints primaires devraient toujours être de résistance hydrocarbure, car ils sont en contact direct avec le produit et la vapeur de celui là et la couche de finition des joints secondaires doivent être résistants aux ultraviolets et retardateur de flamme. La structure des joints secondaires qui glisse le long de la paroi d'extrémité du réservoir sera de préférence constituée de deux types de matériaux, qui sont un matériau de résistance hydrocarbures à la partie inférieure et de résistance Ultraviolet à la partie supérieure.

ii) Pied support de toit

Les pieds support de toit sont prévus dans le réservoir à toit flottant pour soutenir le toit lors de la descente et de garder le toit loin des connexions d'entrées et de sorties de la cuve, des mélangeurs, des serpentin de chauffage et du système de drainage qui se situent au niveau ou prés du fond du réservoir. Les pieds supports sont réglables en hauteur pour fournir à la fois une position basse de fonctionnement et une position haute de nettoyage.

À la conception des Pieds support de toit, le nombre de pieds de soutien nécessaires pour un toit à simple pont peut être globalement approché avant qu'une vérification structurelle sur les pieds est effectuée. Il existe deux types de support de toit qui sont, le pied support du ponton et le pied support du pont. Pour le pied support du ponton, un pied par 6 m de la circonférence du réservoir a été estimés, et le pied support du pont central, a été estimés pour un diamètre de réservoirs jusqu'à 60 m, un pied par 34 m² du centre de la surface du pont et pour le diamètre des réservoirs de plus de 60 m un pied par 26 m² du centre de la surface du pont.

Les pieds supports doivent être dimensionnés pour supporter uniquement le poids du toit et une charge d'exploitation uniforme de 1,2 KN comme spécifiées dans l'API 650 (2007), mais pas le poids de l'eau de pluie accumulée sur le pont. C'est pourquoi il est important de veiller à vider toute l'accumulation de pluie avant la descente du toit **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Pour ce projet ils ont opté pour des tubes normalisés qui sont utilisés pour concevoir et fabriquer les pieds de soutien et la taille de pipes utilisés sont 3" série 80 qui ont une épaisseur de 7,62 mm. Le nombre et l'emplacement des pieds support pour le toit flottant a été choisi comme illustré dans la figure **4.18**.

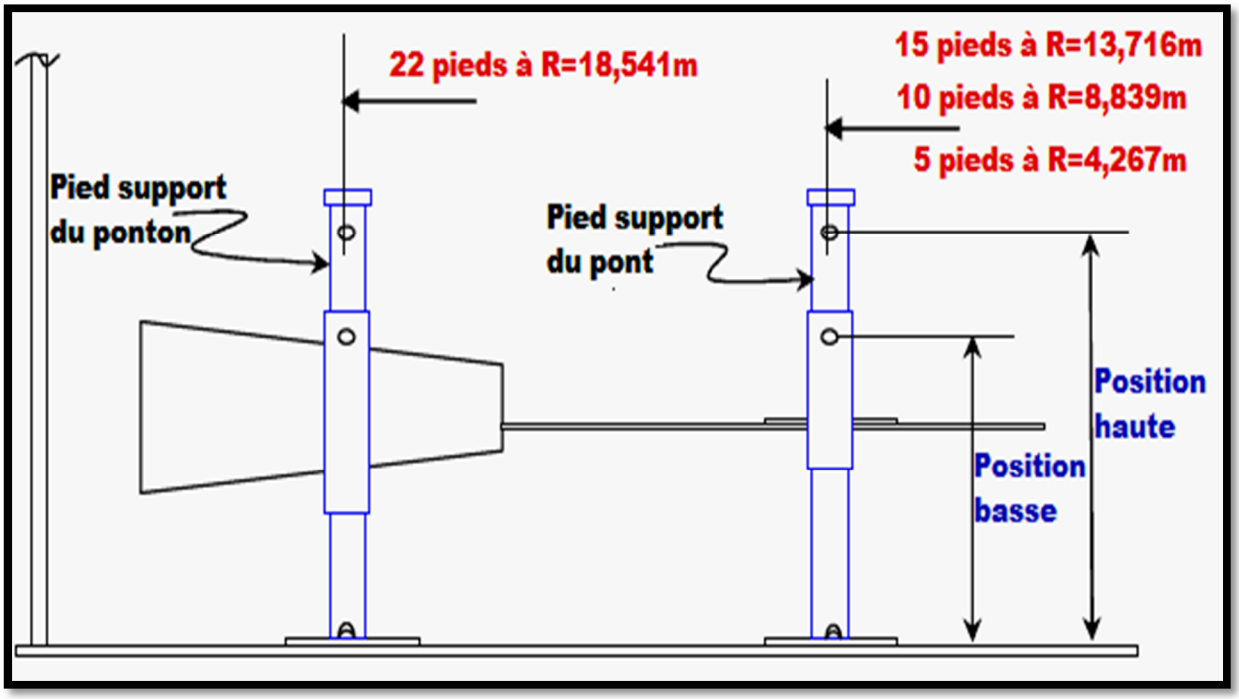


Figure 4.18 : Le nombre et l'emplacement des pieds support (Kuan Siew Yeng, 2009).

iii) Système de ventilation

Purgeur d'air automatique est le seul raccord de ventilation installé sur le toit flottant. Ils rejettent seulement l'air du dessous d'un toit flottant pendant le remplissage et la vidange. La purge évent est tout simplement une petite pièce de tuyau d'acier fabriqué avec une tige de poussée à l'intérieur fixé au couvercle supérieur ou au bouchon.

La purge évent est conçue conformément à l'API 2000 (1998) et dimensionné en place à l'aide de l'équation générale d'écoulement. Les exigences en matière de capacité de ventilation normale spécifiée dans l'API 2000 (1998) est que la capacité de ventilation normale totale doit être d'au moins la somme des exigences de ventilation pour le mouvement du pétrole et effet thermique [API 2000, 1998].

Pour ce projet, ils ont adopté une purge évent de caractéristiques suivante :

- Une taille d'évent de 8".
- Diamètre extérieur de la purge, d_e = 219 mm
- Diamètre intérieur de la purge, d_i = 202.64 mm
- Epaisseur du conduit d'évent, e = 8.18 mm
- Surface de section transversale = 32 251 mm²

Cependant, un total de 2 nombres sera installé dans l'un des cas ou un sera bloqué ou incapable de fonctionner.

iv) Système de drainage du toit

Le système de drain de toit doit être installé dans le réservoir à toit flottant à drainer efficacement l'eau de pluie du toit flottant sans causer l'entré d'eau de pluie et la contamination du produit stocker. Le cumul des précipitations sur la surface du toit flottant est drainé au centre ou se trouve le carter qui est placé dans le point le plus inférieur du pont. L'eau du carter est ensuite drainée à travers un tuyau fermé qui opère avec le réservoir. Il existe un clapet anti-retour monté sur la sortie du carter, afin d'empêcher le toit d'être inondé de produit dans le cas d'une défaillance dans le système de drainage. Le tuyau d'évacuation doit être démontable à des fins de maintenance, si nécessaire.

Comme le toit flottant se déplace le long de la hauteur du produit, l'exigence de base du système de vidange du toit doit être flexible pour permettre le mouvement du toit. La figure **4.19 (a)** et **(b)** montrent le système de drainage à l'intérieur de la cuve avec le mouvement du toit.

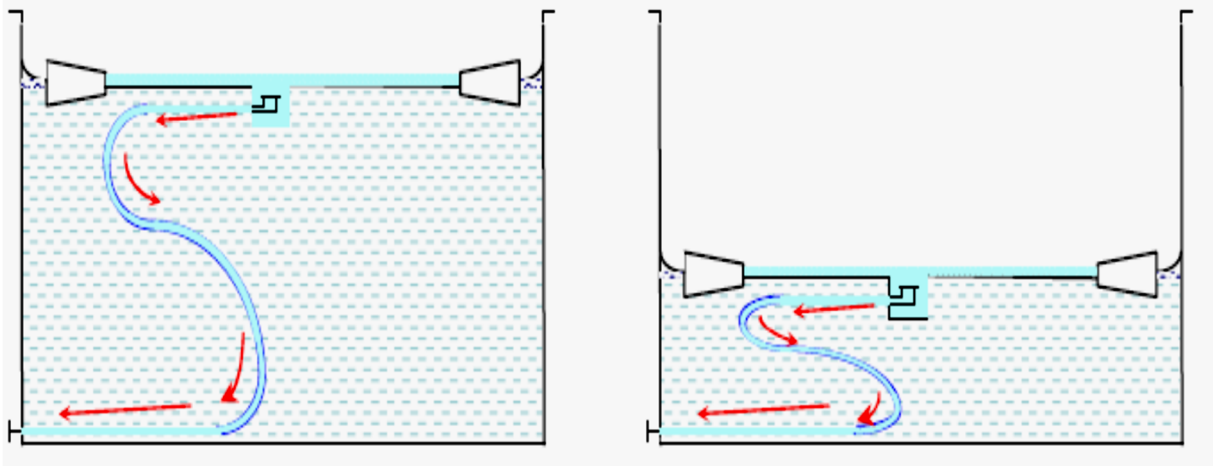


Figure 4.19a : System de drainage à la position haute(Kuan Siew Yeng, 2009).

Figure 4.19b : System de drainage à la position basse(Kuan Siew Yeng, 2009).

Il existe plusieurs systèmes de drainage différents disponibles, comme le système de tuyauterie articulé, tuyau flexible blindé et tuyau flexible hélicoïdal. Les tuyaux en caoutchouc sont strictement interdites à utilisé dans les réservoirs pétroliers et les deux systèmes couramment utilisés dans l'industrie pétrolière sont **le système de tuyauterie de vidange articulé et le système de tuyaux flexible**. Par conséquent, ces deux systèmes sont sélectionnés pour l'étude et l'évaluation de leurs avantages et inconvénients **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

1) Système de tuyau articulé

Ce système de vidange utilise des tuyaux d'acier solide avec des séries de raccords articulés tels que le joint pivotant flexible. La figure **4.20** montre la disposition typique d'un système de tuyauterie articulée à l'intérieur d'un réservoir à toit flottant.

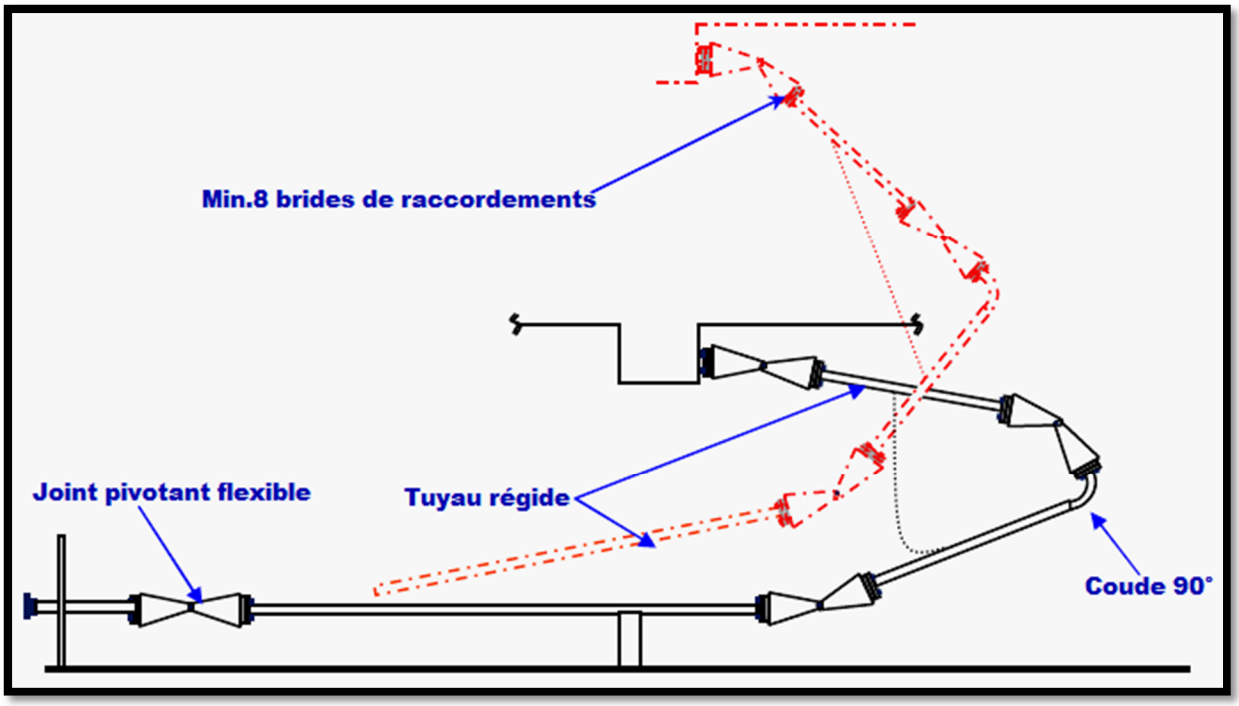


Figure 4.20 : Disposition d'un système de tuyauterie articulée (Kuan Siew Yeng, 2009).

Les conduites rigides dans le système sont très lourdes et ajoutent des contraintes supplémentaires risquant de déformer la plaque de pont dans le toit flottant. Il est également possible de provoquer des forces horizontales sur le toit qui conduit à l'usure du joint d'étanchéité de toit. Les conduites rigides sont reliées par des joints articulés, comme on peut le voir sur la figure **4.20**, il y a huit (8) connexions à brides, et deux pour chacune des articulations et chacune de ces connexions sont susceptibles de fuiter et provoque également un effet sur le débit d'écoulement. Il y a un court coude de 90° dans le système et ce rayon de courbure court serait capable d'accumuler les matières étrangères et bloqué le drain **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Bien que ce système de vidange est moins chère par rapport au système de conduite flexible, mais l'installation de ce système est considérablement plus compliquée et nécessite

plus de temps qui à son tour entraîne un coût de main-d'œuvre élevés. Les rotules ne sont pas facilement accessibles, ce qui entraîne des difficultés pour effectuer toute opération de maintenance préventive. La figure **4.21 (a)** et **(b)** montrent un schéma d'un joint pivotant typique et son assemblage. Le système articulé réelle installé à l'intérieur d'un réservoir flottant peut être vu dans la figure **3.28** et **3.29** dans le chapitre -**Technologie des réservoirs à toit flottant**.

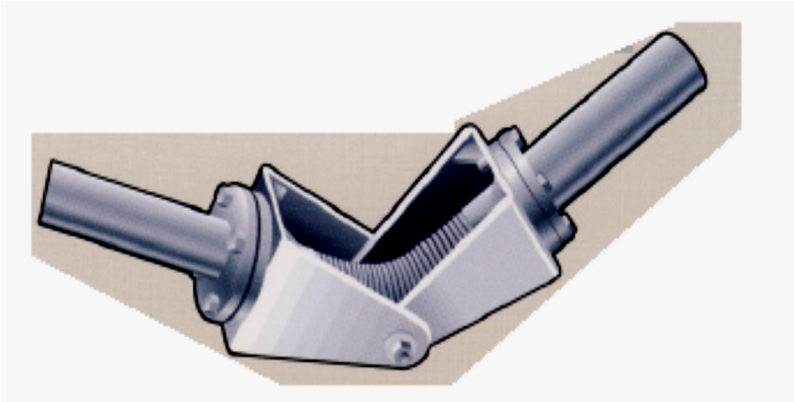


Figure 4.21a : Joint pivotant flexible (Kuan Siew Yeng, 2009).

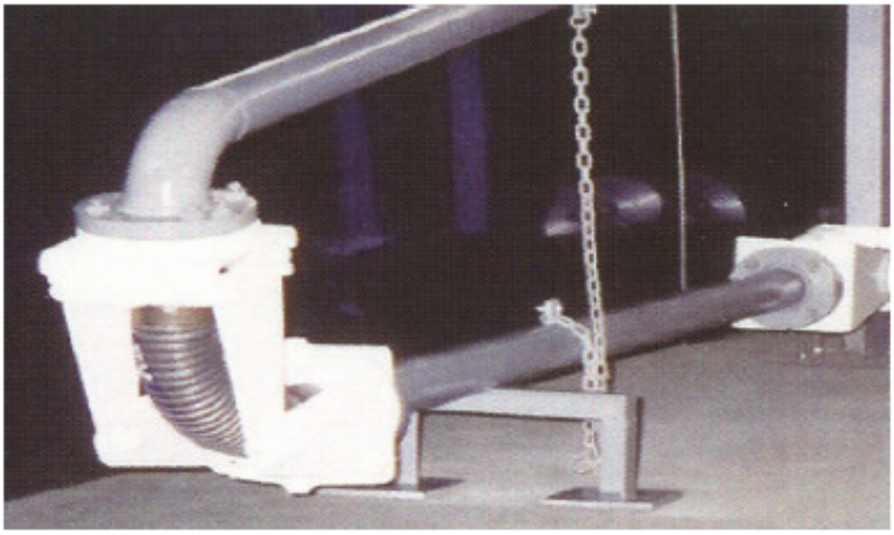


Figure 4.21b : Joint pivotant assemblé (Kuan Siew Yeng, 2009).

2) Système de drain de tuyau flexible

Le système flexible se compose uniquement d'un tuyau continu unique, qui dilate et se contracte avec la montée et la descente du toit flottant. La longueur totale de la conduite est souple et uniforme sans aucun joint. La figure **4.22** montre la disposition typique du système de vidange flexible à l'intérieur du réservoir à toit flottant.

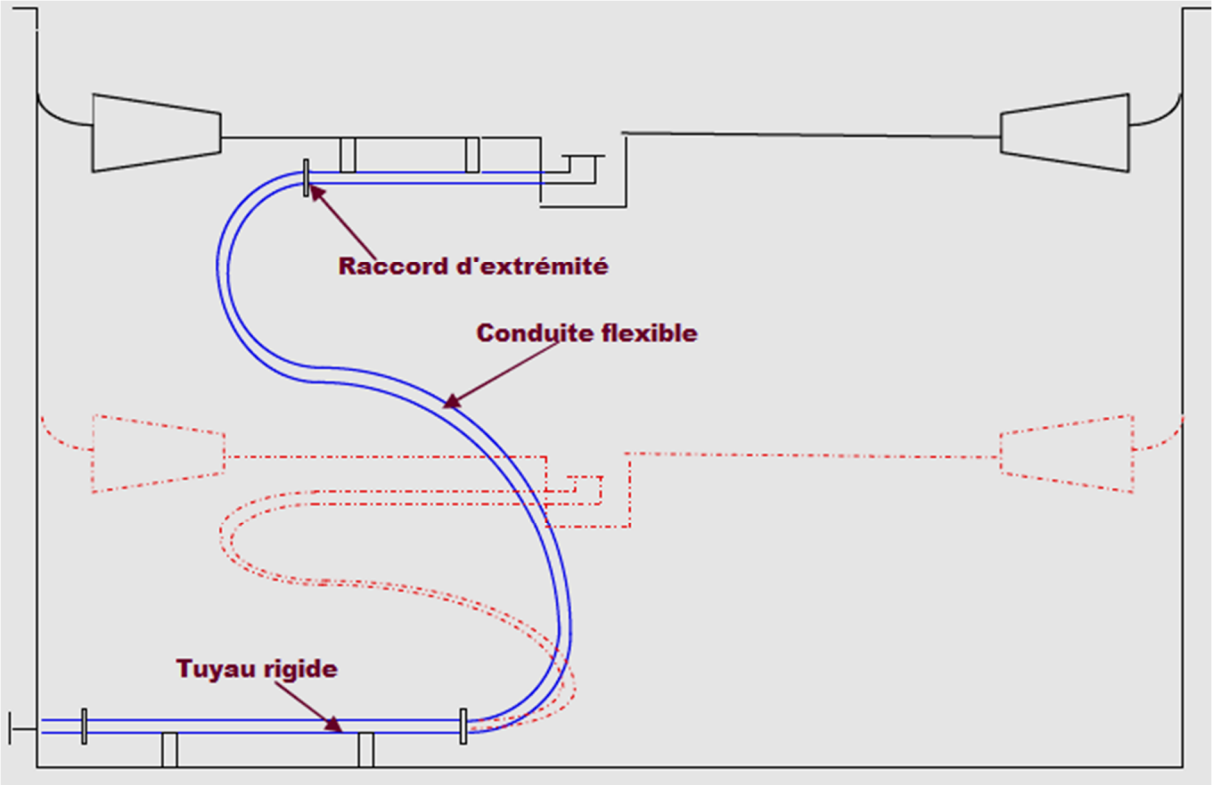


Figure 4.22 : Système de drain de tuyau flexible (Kuan Siew Yeng, 2009).

Il n'y a pas de joints à la longueur de la conduite flexible, le seul lien est à la fin des raccords où le tuyau flexible rejoint la conduite rigide haute et basse. Les raccords d'extrémité sont une partie intégrante de la conduite flexible et donc la possibilité de fuite est éliminée. La maintenance préventive est également éliminée. Le tuyau flexible est considérablement plus léger que le tuyau rigide, dans le système de tuyau flexible le montage et l'installation sont beaucoup plus simple, donc le coût de la main-d'œuvre inférieure. Cependant, le coût de la matière souple est coûteux **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

3) Sélection du système de drainage

Il est évident que le système de tuyau de drain flexible a plus d'avantage par rapport au système de tuyauterie articulé, à l'exception du coût de la matière plus élevé. En regardant dans les économies de coûts de l'entretien futur et la durée de vie, le tuyau de vidange flexible a été choisi pour le système de drain de toit de ce projet. Figure **3.26** montre quelques exemples de système réel de tuyau flexible de drainage installé dans des réservoirs différents.

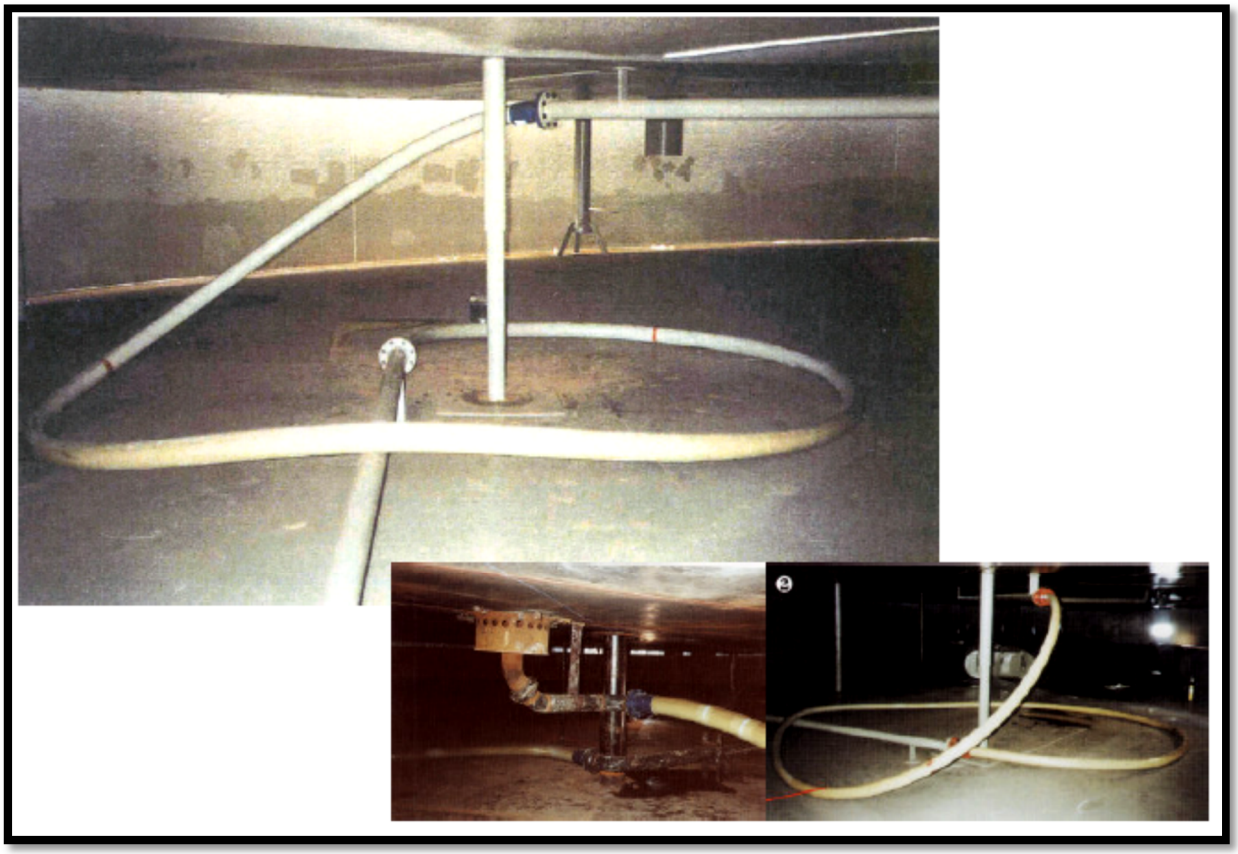


Figure 4.23 : Système de drain de tuyau flexible dans différents réservoirs (Kuan Siew Yeng, 2009).

Pour le tuyau de drainage ils ont opté pour deux tuyaux d'une taille de 4"série 80.

v) Echelle roulante & la plate-forme de Gauger

L'échelle roulante est installée sur le réservoir à toit flottant pour fournir un accès sécurisé sur le toit flottant. L'échelle est constitué de semelles auto-nivelant et il glisse le long de la piste quand le toit monte et descend. La piste et la longueur de l'échelle sont adaptées à la hauteur maximale et minimale du toit. L'extrémité supérieure de l'échelle est fixé à la plate-forme par des supports à charnière Gauger et l'extrémité inférieure est munie d'un essieu d'une roue de chaque côté de l'échelle. Les roues fonctionnent sur une piste en acier monté sur un support de structure de piste sur le toit **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

La plate-forme de Gauger est une petite zone d'accès qui surplombe la coque. Elle permet l'accès du personnel de maintenance. La figure **4.24** montre le croquis de l'échelle roulante et la plate-forme de Gauger. La figure **4.25** montre une échelle roulante avec la plate-forme de roue et Gauger installé dans un réservoir à toit flottant **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

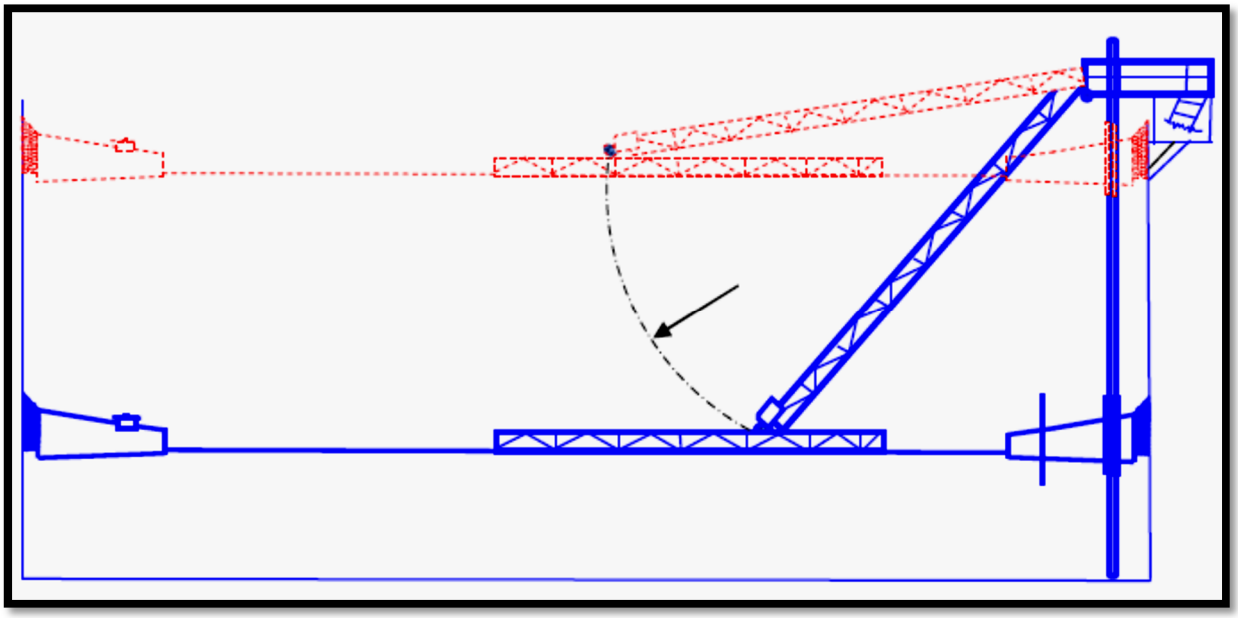


Figure 4.24 : Croquis d'une échelle roulante et plate-forme de Gauger (Kuan Siew Yeng, 2009).

Figure 4.25 : Echelle roulante avec la plate-forme de roue et Gauger installé dans un réservoir à toit flottant (Kuan Siew Yeng, 2009).

vi) Système de lutte contre l'incendie et mousse barrage

Le feu sur les réservoirs à toit flottant sont fréquents et il arrive souvent dans l'espace de bordure où la vapeur s'échappe, cela est appelé comme les feux de bordure. Le système de lutte contre l'incendie doit être conçu et installé sur le toit flottant afin d'éteindre le feu de bordure. Il existe plusieurs chambres de mousse autour de la circonférence du réservoir qui sont placées à égale distance **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Lorsque les incendies sont détectés, un composé de mousse sera injecté dans le système d'eau d'incendie menant au point de la cuve de production de mousse. Les générateurs de mousse sont conçus de telle manière à aspirer de l'air dans le mélange, ce qui provoque la mousse à expansion, comme elle est injectée dans le réservoir par l'intermédiaire des verseurs. Les verseurs injectent la mousse sur la surface intérieure de la coque du réservoir, provoquant son écoulement vers le bas de la coque et ainsi elle est diffusée autour de l'espace de bordure. La figure **4.26** montrer une chambre de mousse réelle installé sur un réservoir à toit flottant **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

La mousse est contenue et concentrée à l'intérieur de l'espace de bordure par un barrage de mousse appelé mousse barrage. Mousse barrage est une plaque verticale courte soudée au ponton à courte distance du joint. Sa hauteur doit être supérieure à la pointe supérieure du joint, permettant à l'ensemble de la zone d'étanchéité d'être inondé de mousse afin d'éteindre le feu efficacement **(Kuan Siew Yeng, 2009)**.

Figure 4.26 : Une chambre de mousse réelle installé sur un réservoir à toit flottant (Kuan Siew Yeng, 2009).

4.3 Comparaison et commentaires

Le tableau **4.8** ci-dessous récapitule toutes les valeurs trouvées avec les deux règlements, Eurocode et API 650 (2007), afin de procédé à une simple comparaison entres ces deux derniers.

		Eurocode 3	**API 650 (2007)**
Epaisseurs des viroles	**1ére virole**	26 mm	28 mm
	2éme virole	23 mm	25 mm
	3éme virole	21 mm	22 mm
	4éme virole	19 mm	19 mm
	5émé virole	15 mm	16 mm
	6éme virole	13 mm	13 mm
	7éme virole	11 mm	11 mm
	8éme virole	11 mm	11 mm
	9éme virole	11 mm	11 mm
Epaisseur de la plaque de fond		9 mm	9 mm
Epaisseur de la plaque annulaire		15 mm	16 mm
Cornière de rive (au sommet du réservoir)		L 80×80×6	L 75×75×10
Raidisseur primaire		T 825×250×8×10	T 825×250×8×10
Raidisseur secondaire		L 150×100×10	T 405×150×8×8
Largeur exposée minimale (Wa)		795 mm	600 mm
Largeur de recouvrement annulaire		60 mm	25 mm
Distance de la plaque annulaire projetée à l'extérieure		50 mm	50 mm
Stabilité au vent		- Le réservoir est stable au vent. - L'ancrage n'est pas nécessaire.	- Le réservoir est stable au vent. - L'ancrage n'est pas nécessaire.

Tableau 4.8 : Tableau résumant tous les résultats des deus règlements « Eurocode 3 » et « API 650 (2007) » à titre comparatif.

Du tableau **4.8**, on constate que le règlement API 650 (2007) aboutie à des épaisseurs un peu plus importantes que celles trouvé par les règles de l'Eurocode 3, mais elles restent dans une même fourchette de trois (3) millimètres prés, comme l'illustre l'épaisseur de la première (1ére) virole qui est d'un écart de deux (2) millimètres de celle trouvé par l'API 650.

Donc le règlement API 650 (2007) aboutie a des résultats plus sécuritaires. En revanche, le règlement Eurocode 3 propose des règles de calcul beaucoup plus simple et moins compliquées que celles proposées par l'API 650.

Conclusion générale

La recherche que j'ai menée dans le cadre de cette thèse, ma permet d'identifié les règles, les procédures de base, les préoccupations dans la conception, la construction et l'exploitation d'un réservoir métallique, en particulier avec un toit flottant pour le stockage des produits pétroliers.

La réalisation de ce genre de bac est basée surtout sur les calculs des épaisseurs des parois qui forment le réservoir (robe, plaques de fond et annulaires...etc.). Les différences des caractéristiques hydrocarbures d'un produit à un autre, fait que l'épaisseur de ces réservoirs varie d'un produit à un autre et varie au sien même d'un bac de stockage d'un seul produit.

Dans ce travail de recherche, j'ai constaté aussi que le règlement API 650 est plus précoce et plus sécurisant que le règlement Eurocode, pour cela il demeure le plus utilisé même en Europe.

Ce projet ma servi à bien comprendre qu'est exactement un toit flottant, mais également comment fonctionne et quels sont les accessoires nécessaires pour un bon fonctionnement de celui-ci, tout en offrants une sécurité optimale.

Il ma aussi aidé à interpréter les performances de ces réservoirs métallique à toit flottant et de distinguer les avantages que présente se genre d'ouvrage, et on site :

- ✓ L'avantage d'offrir une meilleure qualité de protection de l'environnement :
    - en supprimant toute espace vapeur grâce au toit qui flotte directement sur le liquide, une élimination de toute possibilité d'une atmosphère inflammable est obtenue.
    - en réduisant les pertes par évaporation et donc la diminution de la pollution atmosphérique comme l'exige la réglementation.
- ✓ Une meilleur préservation de stock, ce qui économise des sommes très importantes pendant la duré de vie de l'ouvrage.
- ✓ Ils offrent une meilleure conservation des liquides volatiles et toxiques qui peuvent nuire à l'écosystème où l'être humain en fait partie.
- ✓ Des délais de réalisation assez cours.

En revanche, ils présentent quelques inconvénients tels que le cout surélevé de la réalisation du projet, dut au fait qu'il nécessite une main-d'œuvre qualifiée et une mobilisation importante de moyens matériels et humains.

En résumé, ce mémoire de fin d'étude a pour but de vulgariser les réservoirs métalliques avec toit flottant et donner des indications sur leur conception et performances.

Enfin, je souhaite que ce modeste travail soit intéressant et bénéfique.

BIBLIOGRAPHIE

- **Eurocode 3 :** *Calcul des structures en acier. Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canlisations – Réservoirs.*

- **API 650:** *Welded steel tanks for oil storage, by Authority of the United States of America.*

- **Kuan Siew Yeng, 2009:** *Design, construction and operation of the floating tank in Turkmenistan (University of Southern Queensland, Australia).*

- **Dr.Krishanaiyengar Rajagoplan, 1990:** *Storage structures.*

- **Regis Chamayou, 1997 :** *Réservoirs métalliques : Stockage des liquides à température ambiante.*

- **Isabelle Vuidart :** *Etude sur les équipements de réservoirs de stockages de liquides et de gaz liquéfiés –INERIS- 1996.*

- **Marc Caumont :** *Etude sur les équipements de réservoirs de stockages de liquides et de gaz liquéfiés –INERIS- 1998.*

- **DT 94, Octobre 2011 :** *Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs aériens cylindriques verticaux.*
- **DT 97, Février 2012 :** *Guide d'inspection et de maintenance des réservoirs cryogéniques.*

- **www.astanks.com/Tanks.**

- **Chapitre 16 : Réservoirs en zone sismique.**

GLOSSAIRE

Hydrocarbure : Un **hydrocarbure** (**HC**) est un composé organique constitué exclusivement d'atomes de carbone (**C**) et d'hydrogène (**H**). Leur formule brute est donc de la forme : C_nH_m, où n et m sont deux entiers naturels.

Sous forme de carbone fossile, ils constituent une ressource énergétique essentielle pour l'économie depuis la révolution industrielle, mais sont aussi source de gaz à effet de serre issus de leur utilisation massive.

La chaudronnerie : La chaudronnerie est une branche industrielle qui couvre l'ensemble des activités de mise en œuvre des métaux en feuilles, des tubes et des profilés entrant dans la réalisation d'équipements destinés aux secteurs des industries de l'alimentaire, de la chimie, de l'énergie (pétrole, gaz, nucléaire), de l'aéronautique et de l'espace, de la charpente (bâtiments, ouvrages d'art, ponts, structures métalliques terrestres et marines), de la manutention et du traitement des gaz et des liquides (canalisations terrestres et marines, équipement sous pression) et de leurs stockages (cuves et réservoirs de stockages aériens, semi enterrés ou enterrés), de la navale, de l'automobile, de la menuiserie et du mobilier métalliques.

La condensation : La **condensation** est le nom donné au phénomène physique de changement d'état de la matière d'un état gazeux à un état condensé (solide ou liquide).

Emulsion : Une émulsion est un mélange intime de deux substances liquides. Ce sont toujours deux liquides qui en situation normale sont non miscibles (qui normalement ne se mélangent pas), comme l'eau et l'huile, mais qui vont par des opérations spécifiques (agitation, mélange, ajout de quelques principes actifs) réussir à avoir un aspect macroscopiquement homogène, mais microscopiquement hétérogène. L'une des substances sera donc dispersée dans la seconde substance sous forme de petites gouttelettes.

La mousse polyuréthane : La mousse de Polyuréthane est un isolant alvéolaire, composé de fines cellules emmagasinant un gaz à faible conductivité thermique.
On distingue deux applications :

- Le polyuréthane SOUPLE (matelas, industrie automobile...).
- Le polyuréthane RIGIDE (panneaux isolants pour le secteur du Bâtiment, blocs pour l'industrie).

Ecosystème : un écosystème est l'ensemble formé par une association ou communauté d'êtres vivants (ou biocénose) et son environnement biologique, géologique, édaphique, hydrologique, climatique, etc. (le biotope). Les éléments constituant un écosystème développent un réseau d'échange d'énergie et de matière permettant le maintien et le développement de la vie.

Combustible : On dit qu'une matière est combustible lorsqu'elle peut prendre feu et bruler. Les termes combustible et inflammable décrivent tous deux des matières qui peuvent bruler. En général, les matières combustibles prennent feu moins facilement que les matières inflammables.