République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou

• Faculté génie du la construction Département génie civil





Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de Master II Académique en Génie civil OPTION : Structures

Thème : Dimensionnement et étude sismique d'un réservoir de stockage de 35000 m³

Réalisé par : Mr AZZOUG Tahar.

Encadré par : Mr : ALICHE Amar.

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu avoir lieu sans l'aide et l'encadrement de Mr Aliche, je le remercie pour la qualité de son encadrement, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant ma préparation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Mes vifs remerciements vont aux membres du jury pour avoir accepté de juger mon présent travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire:

A mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé pour aller vers l'avant et qui m'ont soutenue le long de mon parcours scolaire.

A mon frère qui m'a toujours soutenue dans les moments difficiles.

A tous mes amis qui m'ont soutenue le long de ce mémoire.

Sommaire

I. Chaj	pitre I : Etude bibliographique	2
l.1 (Généralités sur les réservoirs	3
l.1.1	Introduction	3
l.1.2	Différents types de réservoirs de stockage	3
l.1.3	Choix du type de réservoir de stockage	7
l.1.4	Terminologie concernant les réservoirs de stockage	8
I.2 I	Normes de calcul	8
I.2.1	L'EUROCODE	8
l.2.2	"Americain Petroleum institute 650" (API 650)	10
I.3 I	Matériaux	10
I.4 (Charges de calcul	11
I.4.1	Charges permanentes	11
1.4.2	Surcharges d'exploitations	11
1.4.3	Charges de vent	12
1.4.4	Charges sismiques	12
I.5 (Comportement des réservoirs sous chargement extérieur	12
I.5.1	Charges sismiques	12
I.6 F	Principaux modes d'endommagement des réservoirs soumis aux	
sollicita	ations sismiques	14
II. Chaj	pitre II : Dimensionnement d'un réservoir	16
II.1 F	Présentation de l'ouvrage	17
II.2 (Choix des matériaux	18
II.2.1	Critères de choix des matériaux	18
II.3 (Calcul selon l'EUROCODE	20
II.3.1	Toiture	20
II.3.2	2 La robe	21

II.3.3	Vérification de la stabilité au vent	26
II.4 C	alcul selon l'API 650	
II.4.1	Dimensionnement de la robe	
II.4.2	Conception du fond	32
II.4.3	Stabilité du réservoir	34
II.4.4	Renversement du réservoir dû à la charge du vent	
II.4	4.1 Conclusion	41
II.5 C	comparaison et commentaires	42
III. Chap	itre III : Etudes sismiques	44
III.1 Ir	ntroduction	45
III.2 C	hoix de la méthode de calcul	47
III.3 P	résentation de la méthode D'HOUSNER	48
III.3.1	Hypothèse de calcul	48
III.3.2	Organigramme de calcul	48
III.4 A	PPLICATION DE LA METHODE DE CALCUL	50
III.4.1	Calcul des actions d'impulsions	50
III.4.2	Calcul des actions d'oscillations	56
III.4.3	Calcul des moments de flexion	58
111.4.4	Calcul des moments de renversement	58
III.4.5	Vérifications de la stabilité de l'ouvrage	59
III.4.6	Vérification au flambement	62
III.4.7	Vérifications de la stabilité de l'ouvrage selon EC 8	63
III.5 C	comparaisons et commentaires	65

Liste des figures

- Figure I.1 réservoir de stockage de GNL
- Figure I.2 réservoir de stockage sous pression
- Figure I.3 Réservoir à toit flottant
- Figure I.4 Réservoir à toit fixe
- Figure I.5 Déformation d'un réservoir sous effets sismiques
- Figure I.6 modèle masses-ressorts simple d'un réservoir plein
- Figure I.7.a 'Flambement en losange' réservoirs en acier inoxydable pleins
- Figure I.7.b Flambement en pied d'éléphant
- Figure I.8 Réservoirs d'oxygène liquide et d'azote Usine d'Habas, Izmit
- Figure II.1 Recouvrement des tôles de fond
- Figure II.2 Vue en plan Fond
- Figure II.3 Cornière de rive
- Figure II.4 Poutre secondaire
- Figure III.1 Système physique et mécanique équivalent des pressions d'impulsion
- **Figure III.2** Système physique et mécanique équivalent des pressions d'oscillations sur les parois.
- **Figure III.3** Modèle à une masse passive Mi (impulsion) et une masse active Mo (oscillation).
- **Figure III.4** Système physique et mécanique équivalent des pressions d'oscillation actions sur les parois et sur la basse.
- **Figure III.5** Organigramme de l'étude hydrodynamique approchée par la méthode de Housner.

Liste des tableaux

Tableau II.1 Caractéristiques géométriques

Tableau II.2 : Composition chimique

Tableau II.3 : Composition mécanique

Tableau II.4 Composition chimique

Tableau II.5 Caractéristiques mécaniques

 Tableau II.6 Résultats des épaisseurs des viroles selon l'EUROCODE 3.

Tableau II.7 hauteur équivalente

Tableau II.8 Dimensions minimales des raidisseurs secondaires

Tableau II.9 hauteurs des liquides µ

Tableau II.10 épaisseurs des viroles selon l'API 650

Tableau II.11 Les tailles équivalentes approximatives qui peuvent être utilisées pour tenir compte de la disponibilité locale des matériaux d'après API 650

Tableau II.12 Calcul des hauteurs transformées de la robe

Tableau II.13 Calcul des sections et moments d'inertie de chaque élément duraidisseur secondaire selon l'API 650

Tableau II.14 : Tableau résumant tous les résultats des règlements EUROCODE 3 etAPI650 (2013)

Tableau III.1 Caractéristiques Géométriques du Réservoir

Tableau III.2 : Coefficient d'accélération des zones

Tableau III.3 : Valeur de ξ (%)

Tableau III.4 : Valeur de Pénalités

Tableau III.5 Périodes caractéristiques

Tableau III.6 les contraintes de membrane circonférentielles

Tableau III.7 Les contraintes critiques de flambement pour les viroles

Tableau III.8 Coefficients Ci et Cc (s/m^{1/2})

Tableau III.9 Tableau résumant tous les résultats des règlements EUROCODE 8 etl'RPA

Notations

Wt: Poid de la toiture

Wrb: Poid de la robe

Wf: Poid du fond

Fw: force exercées par le vent

qp (Ze) : pression dynamique de pointe à la hauteur z_e

Cf: est le coefficient de force applicable à la construction ou à l'élément de construction.

Vréf : La vitesse de référence du vent

Vb: la vitesse de vent de base

Hmin: Hauteur minimale.

H : hauteur considérer

Pt: La masse du toit avec tous ses accessoires

ρ : la masse volumique de liquide en (t/m3) donné par l'API 650.

q (toit): charge du toit

R= Rayon du réservoir

S (pont inférieur) : surface du pond inférieur

he1 = la hauteur de flottabilité nécessaire (L'enfoncement de toit)

htoit : hauteur du toit

q sable : La charge de sable

De: diamètre extérieur

Di: diamètre intérieur

e : épaisseur

 ε : la limite élastique

lr: longueur de flambement

Nc.Rd: résistance de calcul a la compression de la section transversale

Nb.Rd: résistance de calcul de la section brute au voilement

Mfmax: Le moment fléchissant maximal

 σ_{max} : La contrainte maximal

q exp : Charge d'exposition

D : diamètre du réservoir

ta: Epaisseur de la tôle annulaire

ts : épaisseur de la plaque de la 1 ére virole

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

Wa: est la largeur exposée minimal

Po: est la surpression de calcul au-dessus de niveau de liquide

γF= 1,2

 ρ : : densité du liquid

g : La gravité

tcal : l'épaisseur calculée

tmin : l'épaisseur minimale à prendre en tenant compte de tcal et tmin du règlement

tsc: l'épaisseur finale à prendre.

Wmin : est le module résistant élastique minimal (en cm3)

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

la corrosion.

X_G : centre d'inertie

- ly: l'inertie de la section
- He: Hauteur équivalente
- E : Le module de Young
- $\sigma_{x,}$: La contrainte axiale
- 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 ;
- Mr : est le moment de renversement ;
- Ms: est le moment stabilisant
- A : Le maitre couple
- Vc: Volume du cylindre ;
- h_j : Hauteur de la virole j ;
- tj: Épaisseur de la virole j ;
- S_d : Contrainte admissible théorique.
- St: Contrainte admissible hydrostatique
- CA: surépaisseur de corrosion, en mm

H th: Niveau du liquide de conception ou hauteur du fond d'assise considéré à la hauteur de remplissage limité par débordement du réservoir.

- Fs: charge du vent la coque
- Ls : Demi-hauteur du réservoir

M_{DL}: moment au fond de la robe dû au poids propre de la robe et du toit qui s'appuie sur la robe (s'il

existe).

- MF: moment au fond de la robe dû au poids du liquide avec poids du liquide
- F_{by}: limite élastique des tôles annulaires du fond.
- Me: masse du condensat
- Mi: la masse d'inertie

A : coefficient de la zone pris suivant la zone sismique et le groupe d'usage de l'ouvrage

R : coefficient de comportement global de la structure, il est donné en fonction du système de contreventement

D : Facteur d'amplification dynamique moyen ; il prend en compte les variations de la structure lorsqu'elle est soumis à un séisme.

η:Facteur d'amortissement

 ξ (%) : est le pourcentage d'amortissement critique en fonction du matériau constitutif du

type destructure et de l'importance de remplissages

Q : Facteur de qualité de la structure

Pq: Pénalité à retenir selon que la critère de qualité «q» est satisfait ou non

Ix: Moment d'inertie de la paroi par rapport à l'axe horizontale

Ri: Rayon intérieur du réservoir

Re: Rayon extérieur du réservoir

Mo: La masse oscillante du condensat

 ω : la pulsation fondamentale de vibration du liquide

Ø0: L' angle maximal d'oscillation

Mfo: Le moment de flexion sur les parois sous l'action d'impulsion

hi:le niveau d'application des pressions d'impulsion par rapport au radier exprimé par

 \mathbf{h}_{i}' : Le niveau d'application des pressions d'impulsion

 $h_{0'}$: Le niveau d'application des pressions d'oscillations incluant l'effet de la pression sur la base .

Mrenv: moment de renversement

Mstab: moment stabilisateur

D_{max}: la hauteur des vagues maximaux

σ_H: Contrainte circonférentielle

 σ_{cr} : Contrainte critique

INTRUDUCTION GENERALE

Le stockage massif des liquides, pour les différents produits rencontrés dans différents domaines l'industrie du pétrole, de la pétrochimie et de la chimie, s'effectue principalement dans des réservoirs métalliques, de construction soudée, installés à l'air libre et reposant sur le sol.

Ces réservoirs ont des capacités très variables. Elles n'excèdent pas quelques centaines de mètres cubes pour de nombreux produits chimiques, tandis que, dans le domaine pétrolier, les réservoirs de pétrole brut par exemple dépassent de beaucoup ces limites.

En Algérie, classé comme zone de forte sismicité, ces ouvrages sont utilisés à grand échelle dans le stockage de produits pétroliers. Or, l'un des problèmes majeurs qui conduisent à la ruine de ce type d'ouvrage sont les tremblements de terre. Ainsi, vue 'importance et la nature du produit stocker, la ruine d'un ouvrage peut entrainer des dégâts et des réactions socio-économique incontournables plus le séisme luimême.

Cependant, pour répondre à l'aspect sécurité, qui est d'une grande importance, une évaluation du comportement sismique de ce type d'ouvrage est plus qu'importante.

Par ailleurs, le code parasismique algérien ne prend en considération ce type d'ouvrage, ce qui met les ingénieurs des bureaux d'étude dans l'obligation de recourir a des codes de dimensionnement étrangers (API 650, Eurocode...).

L'objectif de ce manuscrit, au premier lieu, consiste à dimensionner un réservoir métallique à toit fixe, de 35000 m³ de capacité, selon les réglementations de l'EUROCODES et de l'API 650. En y ajoutant des comparaisons des commentaires.

Par la suite, on a mené une étude sismique selon les règles de l'RPA et l'EUROCODE 8.

Et au final, on a vérifié les résultats des calculs de l'étude sismique avec les règles et les indications de l'RPA et de l'EUROCODE.

1

I. Chapitre 1 : Etude bibliographique

I.1 Généralités sur les réservoirs

I.1.1 Introduction

Stockage massif des liquides, pour les différents produits rencontrés dans l'industrie du pétrole, de la pétrochimie et de la chimie, s'effectue principalement dans des réservoirs métalliques, de construction soudée, installés à l'air libre et reposant sur le sol.

Ces réservoirs ont des capacités très variables. Elles n'excèdent pas quelques centaines de mètres cubes pour de nombreux produits chimiques, tandis que, dans le domaine pétrolier, les réservoirs de pétrole brut par exemple dépassent de beaucoup ces limites. C'est ainsi que, sur le parc de certains terminaux de chargement du Moyen-Orient, il existe des réservoirs de 240 000 m³ et qu'il n'est pas rare, sur les terminaux de réception européens de compter des réservoirs de 100 000 à 150 000 m³.

Les produits stockés sont nombreux et différents. Pour chacun d'eux existe une capacité de stockage fonctionnellement et économiquement adaptée aux caractéristiques de stock envisagé.

I.1.2 Différents types de réservoirs de stockage

La production, la fabrication et le raffinage dans l'industrie chimique et pétrochimique reposent sur des réservoirs de stockage. Un réservoir de stockage adapté protège le produit ainsi que l'équipement, l'environnement et le personnel.

Construits pour contenir des liquides, des vapeurs et des gaz, les réservoirs de stockage sont conçus pour contenir les déversements et réduire les risques et les dommages liés aux ruptures et aux fuites. En choisissant le type de réservoir de stockage adapté, vous améliorez l'efficacité des réchauffeurs de réservoir et vous préservez mieux l'intégrité de votre produit.

• Réservoirs de GNL

Les réservoirs de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL) sont de conception spécialisée, construits pour contenir des produits comme le méthane. Les GNL sont stockés à des températures surfondues, ce qui transforme le gaz en un état liquide. Le résultat est un produit qui occupe 1/600e de l'espace qu'il occupe à l'état naturel, tout en réduisant les risques de transport et de stockage.

À cette fin, les réservoirs de stockage de gaz naturel liquéfié sont capables de contenir des produits dont la température peut atteindre 323 °F (162 °C). La température est maintenue grâce à l'isolation du réservoir et à l'utilisation d'une double paroi pour éviter les fuites ou la contamination. Les réservoirs sont généralement fixes ou mobiles.



Figure I.1 réservoir de stockage de GNL

Les réservoirs fixes de stockage de GNL peuvent être des réservoirs hors sol ou souterrains. En fonction de leur conception et de leur taille, les réservoirs fixes de GNL vont généralement de 1000 m3 à 160 000 m3. Même si des réservoirs de 200 millions de litres ont déjà été fabriqués.

Les réservoirs mobiles de GNL sont construits pour être transportés par camion, train ou bateau. Ils sont dotés de dispositifs de sécurité, tels que des dispositifs d'arrêt, et doivent respecter les réglementations du département des transports ou d'autres organes directeurs nationaux ou internationaux.

Réservoirs sous pression

Ces réservoirs, contrairement aux réservoirs de GNL, sont construits pour contenir des produits sous pression. Les réservoirs sous pression présentent un risque potentiel plus élevé en cas d'explosion de vapeurs en expansion d'un liquide en ébullition (BLEVE) résultant d'un excès de chaleur ou de dommages.

Pour atténuer ces risques, les réservoirs de stockage sous pression doivent respecter le code ASME Boiler and Pressure Vessel. Les réglementations de l'ASME aident à sélectionner les matériaux, les formes et les utilisations appropriés des réservoirs sous pression.

Les fluides à haute pression sont généralement stockés dans des réservoirs sous pression sphériques. La forme répartit uniformément les contraintes sur le conteneur, ce qui évite que la structure ne présente des points faibles. Cette forme réduit également la surface, ce qui réduit le transfert de chaleur depuis l'environnement extérieur.

Pour les fluides à basse pression, les réservoirs de stockage sous pression cylindriques sont plus couramment utilisés. Bien qu'ils n'aient pas l'intégrité structurelle de la sphère, ils sont également moins chers. Il importe de savoir s'ils



Figure I.2 réservoir de stockage sous pression

constituent ou non un réservoir approprié pour votre produit.

Réservoirs à toit flottant

Les réservoirs à toit flottant sont conçus pour réduire les émissions de vapeur et le volume à l'intérieur du réservoir. Pour ce faire, le toit flotte à la surface du liquide à l'intérieur du réservoir. Le toit s'élève et s'abaisse avec le niveau du liquide, ce qui empêche l'accumulation de vapeur à l'intérieur.

• Interne

Un réservoir à toit flottant interne possède deux toits. Le toit flottant est le composant interne, flottant sur le liquide. Au-dessus, il y a un toit fixe au sommet de la cuve de stockage.

• Externe

Les réservoirs à toit flottant externe n'ont qu'un seul toit. Le sommet de la cuve est ouvert et le pont à toit simple flotte sur le liquide ou sur des pontons au niveau du liquide.

Certains réservoirs à toit flottant sont conçus en forme de dôme. Cette conception est utilisée pour bloquer le vent, plutôt que la vapeur.



Figure I.3 Réservoir à toit flottant

Réservoirs à toit fixe



Figure I.4 Réservoir à toit fixe

Le toit d'une citerne à toit fixe ne bouge pas. Il s'agit d'un couvercle solide qui est fixé directement sur la robe. Selon leur âge et leur conception, ces réservoirs peuvent ou non être étanches aux vapeurs et aux liquides. Ces réservoirs répondent aux exigences minimales pour le stockage de la plupart des liquides et sont les moins chers à construire.

I.1.3 Choix du type de réservoir de stockage

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

Conditions du site

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

Condition de service

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

> Géométrie du réservoir

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

Produit stocké

I.1.4 Terminologie concernant les réservoirs de stockage

- Robe : partie cylindrique de l'enveloppe.
- Fond : partie inférieure de l'enveloppe formant la base de la robe.
- Toit-couverture : partie supérieure de l'enveloppe (couverture et charpente qui la porte)
- Virole : de la robe correspondant à la hauteur d'une tôle. Le numérotage des viroles s'effectue du bas vers le haut Cornière de tête (ou de rive) : liaison entre robe et couverture.
- Joint : liaison entre 2 tôles, entre profilé et tôle et 2 profilés
- Soudure : apport de métal assurant le joint.

I.2 Normes de calcul

Les normes de calcul qu'on a utilisé dans cette étude sont :

I.2.1 L'EUROCODE

Les EUROCODES sont des normes européennes de conception et de calcul des bâtiments et des structures de génie civil. Elles ont pour objet d'harmoniser les règles de conception et de calcul au sein des différents états européens –membre de l'Union européenne (UE) et de l'association européenne de libre-échange (AELE)- et de contribuer ainsi à la création de marché unique de la construction et au renforcement de la compétitivité de l'ingénierie européenne.

Ces normes forment un ensemble cohérent et homogène de textes et constituent une culture technique commune pour les concepteurs européens.

Elles sont basées sur une approche semi-probabiliste de sécurité des constructions (méthode coefficients partiels) avec des méthodes de dimensionnement fondées sur le concept des états limites ultimes). Elles s'appliquent à différents

matériaux (béton, acier, bois maçonnerie, aluminium...) et à différents types de construction (bâtiments, ponts, silos réservoirs ...).

Elles permettent de calculer la stabilité, la résistance mécanique et la sécurité incendie des structures en conformité avec les exigences essentielles de la directive sur les produits de construction CEE 89/106 (DPC).

Les EUROCODES définissent des exigences fondamentales pour atteindre des niveaux de performances appropriés en matière de fiabilité de constructions dont les 4 composantes sont :

- La sécurité structurale pour les personnes et les animaux domestiques ;
- L'aptitude au service, fonctionnement, confort...;
- La robustesse en cas de situation accidentelle ;
- La durabilité, compte tenu des conditions environnementales traduites par les classes d'exposition auxquelles sont soumis les ouvrages pendant leur durée d'utilisation.

Les normes "EUROCODE" permettent une optimisation de la durabilité des structures. Elle suppose que :

- Le choix du système structural et le dimensionnement sont réalisés par un personnel suffisamment qualifié et expérimenté ;
- L'exécution est confiée à un personnel suffisamment compétant et expérimenté ;
- Une surveillance et une maitrise de la qualité adéquates sont assurées au cours de la réalisation dans les bureaux d'études les usines, les entreprises et sur le chantier ;
- Les matériaux utilisés sont conformes aux normes appropriées ;
- La structure bénéficiera de la maintenance adéquate ;
- L'utilisation de la structure sera conforme aux hypothèses admises dans le projet.

Les EUROCODES sont un peu moins directifs que les règlements antérieurs, ils laissent au concepteur et au calculateur plus de liberté dans le choix des méthodes de calcul et un plus haut niveau de responsabilité. Le concepteur peut choisir ses méthodes de calcul en fonction de la complexité du problème à traiter. (BA-CORTEX)

I.2.2 "Americain Petroleum institute 650" (API 650)

L'Americain Petroleum institute (API) est l'un des organismes de normalisation présents aux Etats-Unis. Celui-ci regroupe les industriels américains du gaz et du pétrole.

L'institut se prononce sur des questions comme l'exploitation de gisements minéraux, la consommation de pétrole, les taxes, le commerce, l'environnement et la sécurité. Un domaine important est l'élaboration de directives et normes techniques émises pas l'API sont relativement complexes et exigeantes. Les lignes directrices sont élaborées non pas par des institutions indépendantes, mais par des spécialistes des entreprises industrielles dans l'association. D'autres lignes directrices traitent de la conception des machines, des navires de transport du pétrole, de la maintenance des équipements et la mise en œuvre des dispositifs de sécurité.

La demande de l'élaboration de L'API 650, et qu'elle inclue des régles de conception pour les réservoirs à pression externe provenait du Process Industry Practices (PIP), un consortium de nombreuses sociétés pétrolières et chimiques.

En réponse à la demande de PIP, API a accepté de développer les règles de demandées et de les intégrer dans une annexe à la norme API 650. A la fin de 1998, Un groupe de travail spécial API a été formé pour développer l'annexe.

I.3 Matériaux

Les réservoirs sont habituellement construits avec des tôles en acier enrichi en carbone pur (traditionnellement désigné sous le nom d'acier doux) de nuance S235 ou S275 (selon EN 10 025) ou équivalent. Un tel acier est facilement soudable. L'utilisation de plus fortes nuances d'acier faiblement allié est moins commune, bien que son utilisation se développe.

La résilience pour la température de service la plus basse est obtenue avec des matériaux d'épaisseur supérieure à 13 mm en précisant le minimum requis aux tests d'impact. Elle est normalement atteinte en spécifiant une sous-nuance appropriée (selon EN 10 025 [3].

10

A l'intérieur, les réservoirs d'huiles ne sont généralement pas peints. Les réservoirs d'eau doivent être pourvus d'un enrobage (à condition qu'il soit inerte si l'eau est potable) ou doté d'une protection cathodique. A l'extérieur, les réservoirs sont généralement protégés. Si l'acier n'est pas recouvert, une compensation de matière doit être faite au stade de la conception, pour prévenir les pertes d'épaisseur avec la corrosion.

I.4 Charges de calcul

Un réservoir est conçu pour résister à la plus sévère des combinaisons de charges.

I.4.1 Charges permanentes

Les charges permanentes sont issues du poids propre de toutes les parties du réservoir.

I.4.2 Surcharges d'exploitations

Une charge minimum d'exploitation de 1,2 kN/m² (surface projetée horizontalement) est appliquée sur le toit du réservoir. Cette charge est plus communément appelée : charge de neige, mais en fait, elle représente aussi bien une charge de neige nominale que toute autre charge d'exploitation telle que des charges de maintenance qui pourraient être appliquées sur la toiture ou de dépression créée par un vide présent dans le réservoir. Cette charge est également applicable dans des régions où la neige n'est jamais tombée.

Les réservoirs non pressurisés sont souvent équipés de soupapes qui s'ouvrent lorsque le vide atteint une valeur de 2,5 mbar (0,25 kN/m²) et ceci pour contenir les pertes de vapeur. Mais avant que la soupape ne se soit entièrement ouverte, un vide de 5 mbar (0,5 kN/m²) a pu se développer. Même sans la présence de ces soupapes, un réservoir doit être conçu pour résister à un vide de 5 mbar (0,5 kN/m²), pour fournir une pression différentielle sous charges de vent.

Dans les réservoirs pressurisés, les soupapes peuvent se déclencher lorsque le vide atteint 6 mbar (0,6 kN/m²) et dans ce cas, une pression différentielle de 8,5 mbar (0,85 kN/m²) peut se développer.

11

I.4.3 Charges de vent

Les charges de vent sont déterminées sur la base d'une vitesse de calcul. La vitesse maximale du vent dépend de la région où le réservoir est construit. Dans la plupart des cas, une valeur de 45 m/s est retenue. Elle représente la vitesse d'une rafale de trois secondes qui est dépassée en moyenne seulement une fois tous les 50 ans.

I.4.4 Charges sismiques

Dans certaines régions, un réservoir doit être prévu pour résister aux charges sismiques. Bien que quelques directives soient données dans les normes BS 2654 et API 650 sur le calcul des réservoirs, des connaissances particulières doivent être appliquées en vue de déterminer les charges sismiques.

I.5 Comportement des réservoirs sous chargement extérieur

I.5.1 Charges sismiques

Lors d'un séisme, le produit stocké dans un réservoir cylindrique vertical est soumis à des effets inertiels dus aux mouvements du sol, effets qui engendrent des surpressions ou dépressions hydrodynamiques sur la robe et sur le fond du réservoir (Figure I.5).



Figure I.5 Déformation d'un réservoir sous effets sismiques

Les procédures mathématiques complètes permettant une description précise de ces phénomènes ainsi que l'évaluation de leurs conséquences étant extrêmement complexes, différentes méthodes simplifiées analytiques (calculs par formules) ou numériques (calculs par éléments finis) ont fait l'objet de différents développements depuis de nombreuses années.

De manière générale, les modèles simplifiés retenus pour décrire le comportement des réservoirs et auxquels il est fait référence dans la présente étude sont composés de deux champs de pressions : l'un correspondant au ballotement de la surface libre du produit stocké (pression convective), l'autre correspondant au produit oscillant en phase avec la paroi du réservoir (pression impulsive).

Ces pressions vont notamment permettre de vérifier le comportement du réservoir vis-à-vis de la défaillance par déformation excessive (vérification des contraintes circonférentielles).

Par ailleurs, l'intégration des champs de pressions permet de définir des modèles masses-ressorts simples (Figure I.6) utilisables pour déterminer un effort horizontal et un moment résultant utilisés pour évaluer la stabilité de l'équipement (vérification des contraintes verticales/longitudinales vis-à-vis des risques de flambement élastique

Figures I.7 ou de flambement élastoplastique Figures I.8 en pied du réservoir en partie courante de la robe du réservoir).

Ces modèles masses-ressorts ont été initialement développés dans l'hypothèse de réservoirs « rigides » c'est-à-dire pour lesquels la masse totale de produit associée au comportement impulsif est soumise à l'accélération maximum au sol, c'est-à-dire sans amplification dynamique due au comportement « flexible » du réservoir.

Afin de tenir compte de manière conservative de cet effet potentiel, les procédures décrites au [Réservoir « rigide »] proposent que la masse totale de produit associée au mode impulsif soit soumise à l'accélération spectrale correspondant au mode impulsif à la place de l'accélération maximum au sol.

Toutefois, alternativement et de manière moins conservative, les procédures décrites proposent que les masses de produit associées au comportement impulsif « rigide » d'une part et au comportement impulsif « flexible » d'autre part ; soit

13

respectivement soumises à l'accélération maximum au sol et à l'accélération spectrale correspondant au mode impulsif. Cette seconde possibilité n'offre d'intérêt que pour un ratio $H/R \ge 1$, où H est la hauteur de remplissage maximale et R le rayon du réservoir.



Au titre du présent guide, l'une ou l'autre de ces procédures est acceptable.

Figure I.6 modèle masses-ressorts simple d'un réservoir plein

I.6 Principaux modes d'endommagement des réservoirs soumis aux sollicitations sismiques

Les principaux modes d'endommagement des réservoirs soumis au séisme sont illustrés ci-dessous. Toutefois, il est rappelé qu'en Algérie, aucun séisme, en métropole, n'a entrainé de tels désordres sur des réservoirs de stockage couverts par la présente version du mémoire.



Figure I.7.a 'Flambement en losange' réservoirs en acier inoxydable pleins



Figure I.7.b Flambement en pied d'éléphant



Figure I.8 Réservoirs d'oxygène liquide et d'azote - Usine d'Habas, Izmit

Les supports en béton armé des réservoirs de gauche et du milieu (pleins au moment du séisme) se sont effondrés. Celui de droit, remplie au quart de sa capacité n'a pas bougé.

II. Chapitre 2 : Dimensionnement d'un réservoir.

II.1 Présentation de l'ouvrage

Le réservoir étudié dans ce projet sera de construction en acier soudé, destiné pour le stockage de 35000 m³ de gasoil. Forme du réservoir :

- Fond convexe en acier rectangulaire muni d'une couronne périphérique également en acier et une pente 1 à 2% pour la vidange.
- Robe cylindrique verticale constituée de toles virolées, en acer.
 pour maintenir la forme circulaire de la robe contre les efforts du vent, on une poutre au vent et raidisseurs intermédiaires.
- Toiture sphérique fixe muni d'un anneau de rive pour la jonction coquetoit.
- Accessoires (escalier échelle roulante, barrage de mousse, trous d'homme, tubulures, etc... exécutés en acier).

La conception et la construction du réservoir sera entièrement conforme à la spécificité technique de la Norme EUROCODE et API 650.

Caractéristiques Géométriques									
Elément	Elément Valeur Unité								
Diamètre	57	М							
Rayon du réservoir	28,5	М							
Hauteur du réservoir	15,85	М							
Capacité nominale	35000	M ³							
Hauteur max du liquide	13,72	Kg/m ³							
Gravité du liquide	8,70	М							
Hauteur de chaque virole	2,264	М							
Le nombre de virole	7								
Pression de conception	Atmosphère ATM								
Pression externe	Atmosphère ATM								
Pression interne	7,5	Mbar							
Pression du vent	7,53 X 10 ⁻⁴	N/mm ²							

Tableau II.1 Caractéristiques géométriques

II.2 Choix des matériaux

Les matériaux utilisés dans la construction de ce type de réservoir doivent satisfaire les normes spécifiées par l'ASTM.

Ils peuvent être utilisés que s'ils subissent avec succès les essais tel que :

- 1. L'analyse de composition chimique.
- 2. Les essais de caractérisation mécanique.

II.2.1 Critères de choix des matériaux

Les principaux critères de choix d'un matériau sont :

- La capacité du matériau de subir sans détérioration notable, les sollicitations de service.
- La fiabilité de mise en œuvre.
- La disponibilité sur me marché.
- Le respect des exigences réglementaires.

Basant sur ces critères de choix, l'acier utilisés pour les réservoirs de pétrole et condensat à pression contrôlée et à température ambiante sera le **A 283 Gr C** et le **A 573 Gr 70** (d'après les normes ASTM)

Choix des aciers de tôles

Pour les tôles te toits : l'acier utilisé est le A 283 Gr C

Pour la robe : A 573 Gr 70

Pour les tôles de fond : l'acier utilisé est le A 283 Gr C

> A 573 Gr 70

Tableau II.2	:	Composition	chimique
--------------	---	-------------	----------

Nuance	C%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Cu%	Mn%
A 573 Gr 70	0,24	0,5	0,035	0 ,035	0,25	0,25	0,08	0,35	0,8

Nuance	Limite d'élasticité minimale Fy (MPA)	Résistance à la traction minimale Fu(MPA)	Allongement %
A 573 Gr 70	290	485	22

Tableau II.3 : Composition mécanique

• La vérification de soudabilité de matériau A573 Gr70

Avant d'entamer le soudage il faut vérifier est-ce que le matériau est soudable ou non en utilisant la formule suivante : (carbone équivalent)

 $C_{E} + C_{C} + M_{N} / 20 + N_{J} / 15 + (M_{r} + M_{0} + V) / 10$

- CE < 0,3 bonne soudabilité
- $0,3 < C_E < 0,6$ préchauffage
- C_E > 0,6 problème très particulier

 $C_{E} + C_{C} + M_{N} / 20 = 0.24 + 0.8 / 20 = 0.28$

On trouve $C_E < 0,3$, donc : le matériau a une bonne soudabilité et il ne nécessite pas de préchauffage.

> A 283 Gr C

Nuance	C%	Si%	P%	S%	Mn%
A 573 Gr 70	0,21	0,5	0,055	0 ,055	0,9

Tableau II.4 Composition chimique

Limite d'élasticitNuanceminimaleFy (MPA)		Résistance à la traction minimale Fu(MPA)	Allongement %
A 573 Gr 70	205	380	22 à 29

• Vérification de soudabilité du matériau A573 Gr70

Avant d'entamer le soudage il faut verifier est-ce que le matériau est soudable ou non en utilisant la formule suivante : (carbone equivalent)

 $C_{E} + C_{C} + M_{N} / 20 + N_{J} / 15 + (M_{r} + M_{0} + V) / 10$

- C_E < 0,3 bonne soudabilité
- $0.3 < C_E < 0.6$ préchauffage
- CE > 0,6 problème très particulier

 C_{E} +%c+ M_{N} / 20 = 0,21 + 0,9 / 20 = 0,255

On trouve $C_E < 0,3$, donc : le matériau a une bonne soudabilité et il ne nécessite pas de préchauffage.

II.3 Calcul selon l'EUROCODE

II.3.1 Toiture

Généralités

Les couvertures des réservoirs cylindriques sont formées de tôles d'acier et ont au choix une forme de cône ou de dôme (courbure sphérique). Les tôles d'acier peuvent être entièrement autoporteuses (par effet membrane) ou peuvent s'appuyer sur plusieurs formes de supports.

Les tôles de la toiture sont généralement soudées avec des cordons d'angle ou à recouvrement. Pour les réservoirs à basse pression, les tôles n'ont pas l'obligation d'être soudées aux poutres qui les supportent, mais doivent normalement être soudées à la jonction du toit et de la coque verticale.

Dans notre cas nous allons utiliser des tôles d'acier autoporteuses sous forme sphériques.

Calcul l'épaisseur de la toiture

L'épaisseur du toit est donnée selon l'EUROCODE, par la relation de vérification de stabilité au flambement du toit sous pression externe de calcul qui est :

$$p_{i,Sd} \le 0.05 \left\{ 1.21E \left(\frac{t}{r_s}\right)^2 \right\}$$

Pour, E=2,1X10⁴ Kn/cm²

$$Pi, sd \le 1270, 50 \left(\frac{t}{r_s}\right)^2$$
$$t \ge rs \sqrt{\frac{Pi, sd}{1270, 50}}$$
$$t \ge 3000 \sqrt{\frac{7,53 \times 10^{-4}}{1270, 50}} = 2,31 \ cm$$

On prend t = 24 mm

Avec

rs: rayon de courbure du toit sphérique.

II.3.2 La robe

Généralités

Les cylindres verticaux des réservoirs reprennent la pression hydrostatique par de simples tensions circonférentielles sans qu'aucun raidisseur ne soit nécessaire. La traction circonférentielle dans la coque variera directement suivant la direction verticale en fonction de la hauteur du fluide contenu, depuis la surface du liquide jusqu'à la profondeur maximale. Pour une épaisseur constante de la coque, le calcul des efforts est donc simple.

Calcul l'épaisseur de la robe

La pression hydrostatique est résistée par la contrainte circonférentielle $\sigma \Theta$.

$$\sigma_{\theta} = \frac{pr}{t} \le f_{y.d}$$

$$t \ge \frac{pr}{f_{y.d}}$$
$$p = \gamma_{F}. \rho. g. (Hj - 0.3) + p_0$$

P₀=7,5 Mbar : pression interne au-dessus du niveau du liquide

$$t \ge \frac{[\gamma_{F}, \rho, g, (Hj - 0.3) + P0]r}{f_{v,d}}$$

Pour :

 $\gamma_{F} = 1.2$; $\rho = 870 kg/m^3$;

 $G \approx 10m/s2$;

$$f_{y.d} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{290}{1.1} = 263.64N/mm2$$

$$\gamma_{\text{F}}.\rho.G = 1,2 \times \rho \times G = 10,44 \times \frac{10^3 \text{N}}{\text{mm}^2} = 10,44 \text{KN/m}^3$$

 $t \ge \frac{[10,44 \text{ Hj} - 0.3) + 0,75]\text{r}}{2(2.64 \times 10^3)}$

$$\geq$$
 263,64 × 10³

D'où :

t={3,96×10⁻⁵ × (H_I - 0,3)+2,85×10⁻⁶}.r

- Calcul l'épaisseur de la 1^{ere} rangée (virole 1) : H= 15,86m t= $\{3,96 \times 10^{-5} \times (15,86-0.3)+2,85 \times 10^{-6}\}$ X 28,5 =0,0176m

Soit : t₁=18mm

Calcul l'épaisseur de la 2^{eme} rangée (virole 2) : H= 13,596m t= $\{3,96 \times 10^{-5} \times (13,596-0.3)+2,85 \times 10^{-6}\}$ X 28,5 =0,015m

Soit : t₂=16mm

t= $\{3,96 \times 10^{-5} \times (11,332-0.3)+2,85 \times 10^{-6}\} \times 28,5 = 0,0125 \text{m}$

Soit : t₃=14mm

- Calcul l'épaisseur de la 4^{eme} rangée (virole 4) : H= 9,068m

t= $\{3,96 \times 10^{-5} \times (9,068-0.3)+2,85 \times 10^{-6}\} \times 28,5 = 0,00989 \text{m}$

Soit : t₄=10mm

- Calcul l'épaisseur de la 5^{eme} rangée (virole 5) : H= 6,804m

t= $\{3,96 \times 10^{-5} \times (6,804-0.3)+2,85 \times 10^{-6}\}$ X 28,5 = 0,0734m

Soit : t₅=8mm

- Calcul l'épaisseur de la 6^{eme} rangée (virole 6) : H= 4,54m

t= $\{3,96 \times 10^{-5} \times (4,54-0.3)+2,85 \times 10^{-6}\}$ X 28,5 = 0,0048m

Soit : t₆=8mm

- Calcul l'épaisseur de la 7^{eme} rangée (virole 7) : H= 2,276m t= $\{3,96 \times 10^{-5} \times (2,276-0.3)+2,85 \times 10^{-6}\} \times 28,5 = 0,0022m$

Soit : t7=8mm

Remarque : Le règlement préconise les épaisseurs minimales suivantes :

t > 6mm	si	D ≤ 33m
---------	----	---------

t > 8mm si $33 < D \le 60m$

t > 10mm si D > 60m

Dans notre cas, $33 < D \le 60m$, on prend t_{min} > 8mm

N°	Largeur	Hauteur	Tcal	tmin	Surépaisseur	tsc(mm)
virole	d'assise	(m)	(mm)		de corrosion	
					(mm)	
1	2,264	15,86	17,6	18	3	21
2	2,264	13,596	15,3	16	3	19
3	2,264	11,332	12,5	14	3	17
4	2,264	9,068	9,9	10	3	13
5	2,264	6,804	7,3	8	3	11
6	2,264	4,54	4,8	8	3	11
7	2,264	2,276	2,2	8	3	11

 Tableau II.6 Résultats des épaisseurs des viroles selon l'EUROCODE 3.

Avec :

tcal: l'épaisseur calculée.

tmin : l'épaisseur minimale à prendre en tenant compte tcal et tmin du règlement.

tsc : l'épaisseur finale à prendre.

II.3.2 Calcul des plaques de fonds et annulaires

Le fond du bac est construit en plaques de tôles se recouvrant aux extrémités ou elles sont soudées entre elles. Certains fonds de bacs sont protégés par une peinture bitumineuse interne.

Le fond du bac doit être conçu pour permettre une vidange aussi complète que possible, ainsi que les purges d'eau et de dépôts. Pour cela on lui donne une pente d'environ 1 à 2 % qui est dirigée vers le centre (fond concave) soit vers la périphérie (fond convexe).

Les bacs de grands diamètres sont munis de fond convexe afin de faciliter les opérations de nettoyage ou d'extraction de dépôts au voisinage des trous d'hommes.
Les repose souvent sur une galette de gravier ou de sable revêtu d'un enrobé bitumineux permettant une étanchéité et une adaptation au contact de l'assemblage des tôles de fond.

Plaques de fonds

Pour le cas de la plaque du fond, l'épaisseur minimale est donnée par l'EUROCODE3.

Epaisseur minimale pour l'acier Carbone est 6mm

Surépaisseur de corrosion est 3mm

On opte pour une épaisseur de 9mm.



Figure II.1 Recouvrement des tôles de fond

Plaque annulaire

On a

Surépaisseur de corrosion est de 3mm

Epaisseur de la tôle annulaire ta = 13mm

Avec :

ta : épaisseur de la tôle annulaire.

ts : épaisseur de de la plaque de la première virole.

II.3.3 Vérification de la stabilité au vent

Le réservoir peut perdre sa stabilité sous deux directions principales :

- Direction radiale : sous l'effet du vent
- Direction axiale : sous l'effet de son poids

La pression du vent, dont on ne connait pas sa fonction de répartition le long de la périphérie du réservoir, provoque une dissymétrie de chargement, de ce fait l'étude revient à traiter un problème de flexion non symétrique de coque cylindrique, qui conduit à des formules très compliquées à résoudre sans faire des approches numériques.

La pression longitudinale des parois due au poids de la structure peut provoquer des déformations axiales importantes, de cette compression peut en résultera un phénomène qui s'appelle <patte d'éléphant>.

Raidisseurs primaires

Les réservoirs à toit fixe avec structure peuvent être considérés comme suffisamment raidis au sommet de coque par la structure du toit. Il n'est pas nécessaire d'utiliser un raidisseur primaire.

Raidisseurs secondaires.

Dans le cas où l'épaisseur du réservoir est variable, il convient de transformer la hauteur du réservoir à une hauteur équivalente ayant l'épaisseur tmin.

$$he = h [tmin / t]^{2.5}$$

tmin : épaisseur de la virole la plus faible.

t : épaisseur de la virole prise en compte.

h : est la hauteur de la virole prise en compte.

N° de virole	Hauteur équivalente he(m)
1	1,42
2	1,6
3	1,72
4	2,72
5	3,07
6	2,04
7	0,99

Tableau II.7 hauteur équivalente

 $He = \sum_{X=1}^{7} H_{ex} = h_{e.1} + h_{e.2} + h_{e.3} + h_{e.4} + h_{e.5} + h_{e.6} + h_{e.7} + h_{e.8} + h_{e.9}$

He=13,56m

He correspond à la hauteur sur laquelle le voilement peut se produire. La hauteur maximale entre raidisseurs est donnée par la relation :

$$Hp=0,46\times \left(\frac{E}{Psd}\right)\left(\frac{tmin}{r}\right)^{2,5}\times r\times k$$

Avec:

Le module de Young, E = 2,1 x 10^5 N/mm²

L'épaisseur minimale des viroles tmin= 8mm

Le rayon du réservoir r=28500 mm

La contrainte axiale est en traction k=1

La pression due au vent et à la force du vide partiel

Hp=0,46×
$$\left(\frac{210000}{0,000752}\right)\left(\frac{8}{28500}\right)^{2,5}$$
 × 28500 × 1

Hp= 4833mm = 4,33m

D'ou :

He > Hp il convient d'utiliser un raidisseur secondaire ami-hauteur du réservoir c'està-dire à H=7,925 m

Les dimensions minimales à donner aux raidisseurs secondaires pour éviter le voilement local de la coque sont donnés dans le tableau ci-dessous d'après les eurocodes.

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

Tableau II.8 Dimensions minimales des raidisseurs secondaires

D'apres le tableau II.8 on opte pour des raidisseurs secondaires de 200×100×12.

Il convient que la grande aile soit en position horizontale.

> Vérification de la stabilité au vent

Mr = V(h/2) < Ms = (D/2)

Avec:

V : est la force du vent ;

h : hauteur du réservoir ;

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

D : diamètre du réservoir ;

Mr : le moment de renversement ;

Ms : le moment stabilisant ;

Calcul du moment renversant due au vent <Mr>

Calcul du maitre couple

A=D x h= 57 x 15,85 = 57000 x 15850= 903450000 mm²= 90,345 x 10⁷

Calcul de l'action du vent

Psd= 7,42 x 10⁻⁴ N/mm²

V = Psd x A= 7,42 x 10⁻⁴ x 90,345 x 10⁷ =679,394 Kn

V=679,394 Kn

Mr= V x h/2= 679,394 x 15,85 / 2 = 5384,197 KN.m

Mr =5384,197 KN.m

Calcul du moment stabilisant du au poids propre totale

 $\rho = 77 \text{ KN/ m}^2$

W = Wr = Wcyl + Wtoit poids propre du cylindre et du toit.

$$Wcyl = \rho \times Vc = \rho \times \pi D \Sigma Hj tj$$

Wcyl= 77 x π x 57 x (2,264 (0,018 + 0,016 + 0,014 + 0,010 + 0,008 + 0,008) + 2,266 x 0,008)

Wcyl=2560,02 KN.m

Avec :

Vc : volume du cylindre ;

Hj : hauteur de la virole j ;

Tj : épaisseur de la virole j ;

Donc :

Ms=72960,57 KN.m

Mr =5384,197 KN.m < Ms=72960,57 KN.m..... Condition vérifiée.

II.4 Calcul selon l'API 650

II.4.1 Dimensionnement de la robe

> Calcul du nombre de viroles

 $V=\pi$. R².H_{th} donc H_{th}= V / π .R²= 13,72m

H_{th}=13,72m

H_{th}: Niveau du liquid de conception ou hauteur du fond d'assise considéré à la hauteur de remplissage limité par débordement du réservoir.

Nviroles=H/h virole= 13,72 / 2,264= 6,06

On prend le nombre de viroles 7

> Calcul de la hauteur du liquide dans chaque virole

Ils sont définis dans ce tableau :

Hauteur	Hauteur de chaque virole	Hauteur du liquide pour chaque virole
1 ^{ère} virole	2,264m	13,72m
2 ^{ème} virole	2,264m	11,456m
3 ^{ème} virole	2,264m	9,192m
4 ^{ème} virole	2,264m	6,928m
5 ^{ème} virole	2,264m	4,664m
6 ^{ème} virole	2,264m	2,4m
7 ^{ème} virole	2,266m	0,136m

Tableau II.9 hauteurs des liquides µ

Hauteur d'étude : H= 13,72 m.

> Calcul de l'épaisseur <ONE-FOOT-METHOD (5.6.3.1)>

La méthode de one-foot calcul les épaisseurs exigés au point de conception 0,3 m audessous de fond de chaque virole.

Le calcul des épaisseurs des tôles de la robe s'établi à l'aide de la formule suivante d'après l'API 650, on choisit la plus grande valeur entre l'épaisseur théorique et hydraulique.

- Formule établie par un calcul théorique approché

td = [4.9 x D x (H + He - 0.3) x G] / Sd + CA

- Formule établie par les essais hydrauliques

Avec :

H : hauteur, en m, entre la partie inférieure de la virole considérée et la partie supérieure de la cornière de rive ou la hauteur de remplissage limitée par le tropplein.

D: diamètre nominale du réservoir

G: 0,87 densité du liquide

Sd= 193 MPA contrainte admissible théorique

St = 208 MPA Contrainte admissible hydrostatique

CA : surépaisseur de corrosion en mm

Fableau II.10 épaisseurs	des	viroles	selon	l'API	650
--------------------------	-----	---------	-------	-------	-----

Condition de conception			Condition des essais			Epaisseur	
				I	nydrauliq	ues	utilisée
N°	Largeur	Н	Td	Largeur	Ht	Tt	(mm)
virole	d'assise	(m)	(mm)	d'assise	(m)	(mm)	
1	2,264	13,72	18,90	2,264	15,86	20,90	22
2	2,264	11,456	16,05	2,264	13,596	17,86	18
3	2,264	9,192	13,19	2,264	11,332	14,82	16
4	2,264	6,928	10,35	2,264	9,068	11,78	12
5	2,264	4,664	7,49	2,264	6,804	8,73	10
6	2,264	2,4	4,64	2,264	4,54	5,69	8
7	2,264	0,136	1,79	2,264	2,276	2,65	8

II.4.2 Conception du fond

> Tôle centrale du fond

Épaisseur minimale = 6 + CA = 8.0 mm. Épaisseur utilisée = 8.0 mm.

> Tôle annulaire de fond (tôle marginale)

Les tôles annulaires de fond auront une largeur radiale de 600 mm entre l'intérieur de la robe et n'importe quel joint soudé dans le reste du fond. Une plus grande largeur radiale des tôles annulaires est exigée et calculé comme suit :

b=215 x tb / (h x g)^{0,5} (API 650 5.5.2)

Avec :

tb : épaisseur de la tôle annulaire

h : niveau maximal du liquide = 13,72 m

g : densité du produit stocké = 0,87

- Calcul de tb

L'épaisseur des tôles annulaires ne sera pas moins de l'épaisseur la plus grande déterminée en utilisant le tableau 5-2 d l'API 650.

Le matériau A283 Gr C a une contrainte de calcul Sd= 137MPA et une contrainte de tes hydrostatique St= 154 MPA donc à partir du tableau de l'API 650.

Pour : Sd= 137MPA

On a l'épaisseur des tôles de la 1^{ère} virole de la robe du réservoir sans surépaisseur de corrosion pour l'état de service de réservoir égale 20,9 mm.

Donc à partir du tableau

t= 20,9mm > 19 mm et Sd= 137 MPA < 190 MPA

D'où l'épaisseur des tôles annulaires de fond avec surépaisseur de corrosion :

tb= tbr+ca=6+2= 8mm

POUR : Sd= 137MPA

On & l'épaisseur des tôles de la 1^{ere} virole de la robe t=20,09 – 2= 18,09 mm donc à partir du tableau 5_1 de l'API 650, ON a :

t=18,09mm < 19

St= 154MPA < 190 MPA

D'où : l'épaisseur des tôles annulaires de fond est supérieure à la plus grande épaisseur déterminée en utilisant le tableau 5_1 Pour l'état de conception ou pour l'état d'essai hydraulique (sans surépaisseur de corrosion).

Donc :

tbr > Max (tbr,d ; tbr,t) = 6mmcondition minimale

D'où

On prend tbr= 6mm

Donc :

Tb = tbr + CA = 6+2 = 8mm

D'après API 650 5.1.5.7

La gorge du cordon de soudure entre la 1^{ère} virole et la tôle annulaire :

Inférieur à 12,5 mm

Supérieur ou égale à l'épaisseur nominale du plus fin élément.

Tb=8<12,5Condition vérifiée

Donc

b=215 x 8 / (13,72 x 0,87)^{0,5} = 497,84 mm

Alors on adopte une largeur de b= 500mm.



Figure II.2 Vue en plan - Fond

II.4.3 Stabilité du réservoir

Cornière de rive

- Constitution

La robe du réservoir sera pourvue d'une cornière de rive en acier. la cornière de rive, de taille normalisée, sera placée à la partie supérieure de la robe. La cornière de rive joue un rôle pour la rigidité de la robe comme la montre la figure cidessous.



Figure II.3 Cornière de rive

- Préparation

La cornière de rive sera découpée aux dimensions spécifiées sur les plans d'exécution et cintrées selon le diamètre extérieur de la virole supérieure de la robe. les travaux de préparation seront exécutés en atelier.

- Assemblage

L'assemblage de la cornière de rive avec la robe sera exécuté par doubles soudage à recouvrement avec des joints de soudure d'angle.

L'assemblage des tronçons de la cornière de rive sera exécuté par un soudage bout à bout.

- Recommandations

L'aile en saillie de la cornière de rive sera orientée vers l'extérieur de la robe. la robe du réservoir sera munie d'une cornière de rive, conformément aux exigences de la norme API 650.Std, cité dans le tableau suivant :

Tableau II.11 Les tailles équivalentes approximatives qui peuvent être utilisées pourtenir compte de la disponibilité locale des matériaux d'après API 650

Diamètre du réservoir (m)	L'angle minimal exigé (mm)
D<11m	50x50x5
11m <d<18m< th=""><th>50x50x6</th></d<18m<>	50x50x6
D>18m	75x75x10

On opte pour une corniére de rive L80x80x8

Calcul de la hauteur transformée de la robe (Htr)

$$H_1=9,47\times t\times \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3}\times \left(\frac{190}{V}\right)^2$$

Avec :

H1 : Distance vertical admissible entre :

- Pour raidisseur intermédiaire (s'il y en a) et poutre raidisseur supérieure.
- La tôle annulaire du fond (si la robe est non raidie).

t : l'épaisseur de la virole supérieure de la robe sans surépaisseur de corrosion admissible (mm).

D : diamètre nominale du réservoir.

V : étude vitesse du vent.

H₁=9,47×8×
$$\sqrt{(\frac{8}{57})^3}$$
× $(\frac{190}{180})^2$ = 4,43 m

Selon l'API 650 paragraphe (3.9.7.2) On a Htr=∑Htri ; i=1......7

Tel que :

Htri=
$$Hi \sqrt{\left(\frac{Tuniforme}{Tactual}\right)^5}$$

Avec :

Wi : largeur de la virole transformée.

Tuniforme : épaisseur de la dernière virole.

T_{actuel} : épaisseur de la virole transformée.

D'où on obtient les résultats suivants suivant, cités dans le tableau qui suit

N° de virole	Hauteur transformée (mm)
1	180,53
2	298,14
3	400,22
4	821,57
5	1295,99
6	2264
7	2266
TOTAL	7526,45

Tableau II.12 Calcul des hauteurs transformées de la robe

Htri=7526,45mm > H1=4430mm

La robe nécessite un raidisseur intermédiaire.

Il faut installer une poutre raidisseurs intermédiaire de vent (paragraphe 5.9.7.3.1)

La position de la poutre intermédiaire de vent est égale à :

W / 2 = 3763,225 mm

$$W / 2 = 3763,225 \text{ mm} < H_1;$$

Donc, il n'y a pas de deuxième poutre intermédiaire.

La poutre intermédiaire se situe sur la même virole dans la robe réelle.

> Calcul de la poutre secondaire

- Moment résistant exigé

Selon le code API 650 paragraphe 5.9.7.6 :

Le module d'inertie requis de la section (raidisseur intermédiaire) est donné par la formule suivante :

$$Z=D^2 \times \frac{H1}{17} \times (\frac{180}{190})^2$$

Avec :

D : diamètre du réservoir= 57 m.

H₁: distance entre raidisseur intermédiaire et la cornière de rive= 4,56371 m.

V : vitesse du vent= 180 Km/h.

$$Z=57^2 \times \frac{4,43}{17} \times (\frac{180}{190})^2 = 759,86 \text{ cm}^3$$

Z=759,86 cm³

La partie de la robe au-dessus et au-dessous qui doit être inclue dans le moment de résistance de la poutre intermédiaire.

On opte pour une poutre en T de dimensions T500x225x8x8

Longueur de l'âme 250mm

Longueur de la semelle 500mm

Epaisseur de l'âme 8mm

Epaisseur de la semelle 8mm

Epaisseur de la coque t_{sc,cor} 8mm

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



Figure II.4 Poutre secondaire

- Calcul du centre d'inertie de la poutre

 $X_{G} = \frac{(250 \times 8)(4 + 508) + (500 \times 8)(250 + 8) + (8 \times 250)(4)}{2000 + 4400 + 2048} = 256,66 \text{ mm}$

X_G=25,66cm

Tableau II.13 Calcul des sections et moments d'inertie de chaque élément du raidisseur secondaire selon l'API 650

	A (mm²)	Y(mm)	A.Y(mm ³)	L'inertie	ly=l+A
				(mm ⁴)	(X _G -Y) ²
1	2000	512	1024000	10666,667	13513104,9
2	4400	258	1135200	83333333,3	83342497,54
3	2048	4	8192	10922,67	10922,67
Total	8448		2167392	83354922,67	213866525,1

 $Z_{min} = \frac{213866525,1}{256,66} = 833602,96 \text{ mm}^3$

Donc :

Z_{min}= 833,602cm³ > z= 694,388 cm³Condition vérifiée.

II.4.4 Renversement du réservoir dû à la charge du vent

Il faut satisfaire les deux critères de soulèvement pour ne pas ancrer le réservoir selon L'article 5.11.2 API 650. Les deux critères sont :

- O,6 Mw + Mpi < Mdl / 1,5

- Mw + 0,4 Mpi < (MdI + Mf) / 2

Mpi : moment au fond de la robe dû à la pression intérieure = 0 KN.m

Fs : charge du vent la coque

Ls : Mi-hauteur du réservoir

MW =264,96 x (15,85/2)= 2099,808 kN.m

M_{DL} : moment au fond de la robe dû au poids propre de la robe et du toit qui s'appuie sur la robe (s'il existe).

Q1 = Qcorniére de rive = 1,73 t

Q2 = Qcoque = 467,97t

Q=Q1+Q2= 4599 KN

M_{DL}= 131071, 5 KN.m

Mf : moment au fond de la robe dû au poids du liquide avec poids du liquide

$$Mf = F \times D/2$$
$$F = Wa \times P$$

Wa - (poids spécifique 0,72 et comme hauteur la moitié de la hauteur du liquide utilisé dans l'étude).

Wa = 59 tb
$$\sqrt{H \text{ fby}}$$

f_{by} : limite élastique des tôles annulaires du fond.

tb : Epaisseur de la tôle annulaire, (moins la surépaisseur de la corrosion).

$$tb = 8 - 2 = 6 \text{ mm}$$

H : semi hauteur de liquide (13,72 / 2).

$$Wa = 59 \times 6 \times \sqrt{6,86} \times 205$$

Wa = 13275,236 N/m

Poids de fluide :

$$F = Wa \times P = 13275,236 \times \pi \times 57$$

F = 2376 Kn

$$Mf = F \times D/2 = 2376 \times 28,5$$

- O,6 Mw + Mpi < Mdl / 1,5

0,6. 2099,808 + 0 < 8618,628/1,5

1259,88 < 5745,752 Condition vérifier

- Mw + 0,4 Mpi < (MdI + Mf) / 2 Mf = 67716 kN.m

2099,808 < (8618,628 +67716) / 2

2099,808 < 38167,314..... Condition vérifiée.

II.4.4.1 Conclusion

Par conclusion les deux critères de soulèvement sont satisfaits. Donc on ne va pas ancrer le réservoir.

II.5 Comparaison et commentaires

Dans cette partie nous allons mener une simple comparaison entre les deux règlements **API 650** et **EUROCODE 3** cependant on procèdera au tableau II.14 cidessous afin de récapituler toutes les valeurs trouvées avec les deux règlements et déterminer la différence entre ces deux derniers.

Tableau II.14 : Tableau résumant tous les résultats des règlements EUROCODE 3 etAPI650 (2013)

		EUROCODE 3	API 650	
	Numéro de virole	Tcal(mm)	Tcal(mm)	
	1 ^{ère} virole	17,6	18,9	
	2 ^{ème} virole	15,3	16,05	
Epaisseurs des	3 ^{ème} virole	12,5	13,19	
viroles	4 ^{ème} virole	9,9	10,35	
	5 ^{ème} virole	7,3	7,49	
	6 ^{ème} virole	4,8	4,64	
	7 ^{ème} virole	2,2	1,79	
Epaisseur de la	plaque de fond	9	8	
Epaisseur de la	plaque annulaire	13	8	
Largeur expos	é minimal (Wa)	784	500	
Largeur de recou	vrement annulaire	60	60	
Distance de la p projetée à	blaque annulaire l'extérieur	50	50	
Cornièr	e de rive	L80x80x8	L80x80x8	
Poutre au ve	nt secondaire	L200x100x12	T500x225x8x8	
		-Le réservoir est	-Le réservoir est	
Stabilité	au vent	stable au vent	stable au vent	
		-L'ancrage n'est	-L'ancrage n'est	
		pas nécessaire	pas nécessaire	

D'après le Tableau II.14 on constate que le règlement API 650 (2013) à des épaisseurs pour les viroles plus importantes que celle obtenue dans l'EUROCODE 3, aussi le règlement API650 abouti à des règlements plus sécuritaires que l'EUROCODE.

D'autre part l'EUROCODE3 propose des règles de calcul beaucoup plus simple et moins compliquer que celle appliquer par l'API 650.

III. Chapitre 3 : Etudes sismiques

III.1 Introduction

Lors d'une excitation sismique, un réservoir plein et couvert ne subit pas mouvement du liquide par rapport au réservoir.

En fait tout se passe comme si ces derniers constituent une seule masse. Par contre, dans les réservoirs à moitié plein, l'excitation sismique provoque la formation des vagues en surface entrainant ainsi la naissance des contraintes sur les parois.

L'approche développée par Housner (Housner, 1963), utilisée pour étudier l'action du liquide sur les parois du réservoir dans laquelle l'action du liquide est décomposée en une action passive provoquant des efforts d'impulsion et une action active provoquant des efforts d'oscillation.

L'action passive provoque des efforts d'impulsion qui proviennent de la réaction, d'une partie de la masse du liquide.

On obtient un système mécanique en considérant une masse Mi liée à la paroi du réservoir d'une hauteur Hi de façon à ce qu'elle exerce les mêmes efforts horizontaux que la masse de gasoil équivalente.

L'action active provoque des efforts d'oscillations qui proviennent du mouvement d'oscillation de l'autre masse du mouvement qui est provoquée par l'action sismique.

On obtient un système mécanique en considérant une masse M0 retenue par des ressorts de raideurs K0 à un niveau H0 dont les oscillations horizontales exerçant les mêmes efforts de vibrations que la masse active du liquide.

Les actions sur la paroi sont les seules qu'on prend en considération pour le calcul du moment de flexion des parois. Tandis que l'action des surpressions sur le fond du réservoir est prise en compte pour le calcul du moment de renversement de l'ensemble comme le montre les figures ci-dessous :

45



Figure III.1 Système physique et mécanique équivalent des pressions d'impulsion



Figure III.2 Système physique et mécanique équivalent des pressions d'oscillations sur les parois.







Figure III.4 Système physique et mécanique équivalent des pressions d'oscillation actions sur les parois et sur la basse.

III.2 Choix de la méthode de calcul

Quatre méthodes de calcul ont été développées ; considérant des hypothèses différentes selon

La dépendance de la surpression par rapport au temps.

Méthode de JACOBSON :

Cette méthode ne considère que la surpression d'impulsion avant que ne commencent l'oscillation du liquide. De plus le champ de vitesse dans le réservoir est directement proportionnel à la vitesse du sol ; ceci a pour première conséquence de pouvoir évoluer la surpression sans préjuger de la forme de l'accélération.

Méthode de HUNT et PRIESTLEY :

Cette méthode tient compte à la fois des phénomènes d'impulsion et d'oscillations ; conduit à une relation entre les champs de vitesse du temps et l'accélération du sol.

Méthode de HOUSNER :

Housner sépare les deux phénomènes ; impulsion et oscillation et n'est applicable que pour un taux de remplissage h/r \leq 1,5.

Les deux méthodes de calcul de HUNT et PRIESTLEY et de HOUSNER donnent des résultats comparables dans le cas des réservoirs ayant un taux de remplissage h/r < 1,5 ; par contre pour les réservoirs ayant un taux de remplissage h/r >1,5, la méthode de HOUSNER donne des résultats approchés à 10 % prés. Donc dans le cas des réservoirs pour lesquels une meilleure précision est requise ; on utilise de préférence la méthode de HUNT et PRIESTLEY.

Avec

h: hauteur du liquide

r: rayon du réservoir

D'où

 $\frac{h}{r} = \frac{15,86}{28,5} \le \mathbf{0}, \mathbf{5565} < \mathbf{1}, \mathbf{5}$

D'où la méthode de HOUSNER est applicable.

III.3 Présentation de la méthode D'HOUSNER

Suivants l'énoncé de la méthode de HOUSNER, l'action de liquide est décomposée en deux types d'action : - Une action passive provoquant des efforts d'impulsion. - Une action active provoquant des efforts d'oscillations.

III.3.1 Hypothèse de calcul

- La dissipation d'énergie due à la viscosité du fluide dans les réservoirs sera négligée.

- Le liquide dans les réservoirs sera considère comme incompressible - Les réservoirs sont lies rigidement à leurs sols de fondation, ce qui leurs confère la même accélération que celle du sol.

III.3.2 Organigramme de calcul

L'étude hydrodynamique approchée par la méthode analytique de Housner, souvent méconnue par les ingénieurs civils de bureaux d'études, se prête bien à la programmation.



Figure III.5 Organigramme de l'étude hydrodynamique approchée par la méthode de Housner.

III.4 APPLICATION DE LA METHODE DE CALCUL III.4.1 Calcul des actions d'impulsions

Soit un réservoir cylindrique à base horizontale et parois verticales soumis à une accélération maximale am.

Caractéristiques Géométriques					
Elément Valeur Unité					
Diamètre	57	М			
Rayon du réservoir	28,5	Μ			
Hauteur du réservoir	15,85	М			
Capacité nominale	35000	M ³			
Hauteur max du liquide	13,72	М			
Gravité du liquide	8,70	Kg/m ³			
Hauteur de chaque virole	2,264	М			
Le nombre de virole	7				

Tableau III.1 Caractéristiques Géométriques du Re	₹éservoir
---	-----------

En considérant le liquide incompressible et en exprimant le principe de conservation de masse et le principe fondamental de la dynamique, on détermine l'expression de la résultante des pressions hydrodynamique horizontales d'impulsion Pi :

$$Pi = am \times Mi$$

2

Avec

$$Mi = Me \times \frac{\tanh \sqrt{3 \times \frac{Ri}{Hi}}}{\sqrt{3 \times \frac{Ri}{Hi}}}$$

Calcul de masse du gasoil

 $Me = Vc \gamma = 35000 \times 0.87 = 30450$

Me = 30450 KN

Calcul de la masse d'inertie Mi

$$Ri = \frac{57 - (0.018 \times 2)}{2}$$
$$Ri = 28,482 \text{ m}$$

À Hi= 13,72 m

$$Mi = 30450 \times \frac{\tanh\sqrt{3 \times \frac{28,481}{13,72}}}{\sqrt{3 \times \frac{28,481}{13,72}}}$$

Mi = 12036, 87 KN

Calcul de l'accélération am selon la méthode dynamique d'analyse modale spectrale.

L'accélération am est l'accélération du sol à l'excitation sismique elle est donné par les différents codes selon la sismicité de la zone et certains paramètres. Selon le R.P.A. elle est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\text{am}}{\text{g}} = \begin{bmatrix} 1,25 \text{ A} \left(1+\frac{T}{T_{1}}\left(2,5 \eta \frac{Q}{R}-1\right)\right) & si & 0 \le T \le T1 \\ (2,5 \eta(1,25 \text{ A})\left(\frac{Q}{R}\right) & si & T1 \le T \le T2 \\ (2,5 \eta(1,25 \text{ A})\left(\frac{Q}{R}\right)\left(\frac{T2}{3}\right)^{2/3} & si & T2 \le T \le 3s \\ (2,5 \eta(1,25 \text{ A})\left(\frac{Q}{R}\right)\left(\frac{T2}{3}\right)^{2/3}\left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & si & T \ge 3.0s \end{bmatrix}$$

Coefficient d'accélération A

A : coefficient de la zone pris suivant la zone sismique et le groupe d'usage de l'ouvrage

Pour notre cas on a :

- Un ouvrage d'importance virale son groupe d'usage est : 1A

-Zone sismique :III

Zone sismique					
Groupe	I II IIb III				
	Sismicité	Sismicité	sismicité	sismicité	
	faible	moyenne	moyenne	élevé	
1A	0,15	0,27	0,3	0,4	
1B	0,12	0,2	0,25	0,3	
2	0,1	0,25	0,2	0,25	
3	0,07	0,1	0,14	0,18	

Tableau III.2 : Coefficient d'accélération des zones

On trouve A= 0,4

> Coefficient de comportement R

R : coefficient de comportement global de la structure, il est donné en fonction du système de contreventement

Notre cuve est supportée par les parois en acier R= 2 (Tableau4,3P28......RPA2003)

> Facteur d'amplification dynamique D

D : Facteur d'amplification dynamique moyen ; il prend en compte les variations de la structure lorsqu'elle est soumise à un séisme.

Puisque les réservoirs sont liés rigidement à leur sol de fondation ; ce qui leur confère

la même accélération que le sol. $1,25 \text{ A} \left(1 + \frac{T}{T1} \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1\right)\right)$ $si \quad 0 \le T \le T1$ $2,5\eta \left(\frac{T2}{T}\right)^{2/3}$ $si \quad T2 \le T \le 3s$ $si \quad T \ge 3.0s$

Donc :

D=2.
$$5\eta \rightarrow 0 \leq T \leq T1$$

T2= $0.5 \rightarrow Site 3$

η: Facteur d'amortissement donné par la formule :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\varepsilon}} \ge 0.7$$

 ξ (%) : est le pourcentage d'amortissement critique en fonction du matériau constitutif du type de structure et de l'importance de remplissages.

Dans notre cas $\xi = 5\%$

D'où : η=1

Tableau III.3 : Valeur de ξ (%)

	Port	Voiles ou murs	
Remplissage	Béton	Acier	Béton
			armé/maçocnnerie
Léger	6	4	1
Dense	7	5	0

D= 2,5 x 1 = 2,5

Facteur de qualité Q

Q : Facteur de qualité de la structure il est fonction de :

- Redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent
- La régularité en plan et en élévation
- La qualité du contrôle de la construction

La valeur Q est déterminée par la formule : Q=1+ $\sum Pq$

Pq : Pénalité à retenir selon que le critère de qualité « q » est satisfait ou non, sa valeur est donnée dans le tableau suivant :

Critère q	Pq	
Condition minimale sur les files de	0	
contreventement		
Redondance en plan	0	
Régularité en plan	0	
Régularité en élévation	0	
Contrôle de qualité des matériaux	0	
Contrôle de qualité de l'exécution	0	
Total	0	

Tableau III.4 : Valeur de Pénalités

La force sismique totale V, appliquée à la base de la structure, doit être calculée successivement dans deux directions horizontales orthogonales selon la formule :

$$V = \frac{ADQ}{R} W$$

D'où : W : Poids totale du réservoir = 354272 Kn

V= 177136 Kn

V= T1, T2 sont les périodes caractéristiques associées à la catégorie du site Si.

Tableau III.5 Périodes caractéristiques

Site	S1	S2	S3	S4
T1(s)	0,15	0,15	0,15	0,15
T2(s)	0,3	0,4	0,5	0,7

> Calcul de la période fondamentale T

La formule à utiliser est :

$$\mathsf{T=1,79H}_t^2 \sqrt{\frac{P}{gEIx}}$$

Avec :

P : le poids de l'ouvrage. P= 9172KN

Ht : Hauteur de la structure. Ht = 15,85 m

E : Module d'élasticité de l'acier. E=2,1 x 10⁵ MPa

Ix : Moment d'inertie de la paroi par rapport à l'axe horizontale Ix :

$$\mathsf{Ix} = \frac{\pi}{4} \left(R_e^4 - R_i^4 \right)$$

Avec :

Ri : Rayon intérieur du réservoir. R = 28,481 m

Re : Rayon extérieur du réservoir. Re = 28,5 m

Ix =
$$\frac{\pi}{4}$$
 (28,5⁴ - 28,482⁴) = 1307,81 m⁴

$$Ix = 1307, 81 m^4$$

Avec : T = 0.02599 s

$$\frac{am}{g} = 1,25 \text{ A} \left(1 + \frac{T}{T1} \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1\right)\right)$$

$$si \quad 0 \le T \le T1$$

$$\frac{am}{g} = 1,25 \times 0,4 \times (1 + \frac{0,025}{0,15} \left(2,5 \times \frac{1}{2} - 1\right))$$
$$\frac{am}{g} = 0,521$$
$$am = 5,21$$

D'où :

$$Pi = Mi \times am$$

 $Pi = 12036,87 \times 5,21$
 $Pi = 62711,94 KN$

III.4.2 Calcul des actions d'oscillations

En partant de même hypothèse que précédemment en exprimant d'une part l'énergie potentielle acquise par la formation de vague en surface et d'autre part l'énergie cinétique de l'ensemble du système, on établit l'expression de distribution surpression hydrodynamiques.

La résultante de pression hydrodynamique horizontale d'oscillation (P0) sera donnée par la formule suivante :

 $P_0 = 1,2 M_0 g \theta$

- Calcul de la masse oscillante M₀

La masse oscillante du GASOIL est donnée par la formule :

$$M_0 = Me \ 0.318 \ \frac{Ri}{He} tanh(1.84 \ \frac{He}{Ri})$$

 $M_0 = 14263,75 \ KN/m^3$

Calcul de la pulsation fondamentale de vibration du liquide ω :

$$\omega_0^2 = \frac{g}{Ri} 1,84 \tanh(1,84 \frac{He}{Ri})$$
$$\omega_0^2 = 0,433 \text{ rad/s}$$

L'angle maximal d'oscillation ϕ_0 de la surface libre est donné par la relation suivante :

$$\Phi \mathbf{0} = 0,83 \frac{am}{g}$$
$$\Phi_0 = 0,433$$

D'où :

- Action d'oscillations

Le moment de flexion sur les parois sous l'action d'impulsion est donné par la formule suivante :

Mf $_{0} = P_{0} x h_{0}$

Avec :

h₀: Le niveau d'application des pressions d'impulsion par rapport au radier exprimé par :

$$h_{0} = \text{He} \left(1 - \frac{1}{1,84 \tanh\left(1,84 \frac{\text{He}}{\text{Ri}}\right)} + \frac{1}{1,84 \sinh\left(1,84 \frac{\text{He}}{\text{Ri}}\right)}\right)$$
$$h_{0} = 13,72 \left(1 - \frac{1}{1,84 \tanh\left(1,84 \frac{13,72}{28,485}\right)} + \frac{1}{1,84 \sinh\left(1,84 \frac{13,72}{28,485}\right)}\right)$$
$$h_{0} = 8,03 \text{ m}$$

D'où :

$$Mf_0 = P_0 x h_0$$

Mf₀ = 595157,058 KN.m

III.4.3 Calcul des moments de flexion

- Action d'impulsion

Le moment de flexion sur les parois sous l'action d'impulsion est donné par la formule suivante :

hi : le niveau d'application des pressions d'impulsion par rapport au radier exprimé par :

III.4.4 Calcul des moments de renversement

> Action d'impulsion

Le moment de renversement d'ensemble, sous l'action d'impulsion, est donné par :

Avec : hi' : Le niveau d'application des pressions d'impulsion, incluant l'effet de la pression sur la base s'écrit :

$$Hi' = \frac{3}{8} He + \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{Ri}{He} \sqrt{3}}{th(\frac{Ri}{He} \sqrt{3})} \right]$$
$$Hi' = \frac{3}{8} 13,72 + \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{28,485}{13,72} \sqrt{3}}{th(\frac{28,485}{13,72} \sqrt{3})} \right]$$

D'où :

Mri = 436117,599 KN.m

Action d'oscillations

Le moment de renversement d'ensemble, sous l'actions d'impulsion, est donné par :

$$Mr_0 = P_0 x h_0'$$

Avec :

ho': Le niveau d'application des pressions d'oscillations incluant l'effet de la pression sur la base est tel que :

$$h'_{0} = \text{He} \left(1 - \frac{\cosh\left(1,84 \frac{\text{He}}{\text{Ri}}\right) - 2}{1,84 \sinh(1,84 \frac{\text{He}}{\text{Ri}})}\right)$$
$$h'_{0} = 13,72 \left(1 - \frac{\cosh\left(1,84 \frac{13,72}{28,482}\right) - 2}{1,84 \sinh(1,84 \frac{13,72}{28,482})}\right)$$

D'où :

$$Mr_0 = 30\ 039,06\ x\ 18,02$$

Mr₀ = 1335663,955 KN.m

III.4.5 Vérifications de la stabilité de l'ouvrage

Etat limite ultime de stabilité

Sous l'effet de l'actions sismique à l'ELU, la stabilité d'ensemble de réservoir vis-à-vis l'effondrement doit être satisfaire. La stabilité d'ensemble se rapportant à un comportement de corps rigide peut-être perdue par glissement ou renversement. A cet effet il y'a lieu de satisfaire la condition suivante :

 $\frac{\text{Moment stabilisant}}{\text{Moment renversant}} \ge 1.5$

Pour le moment renversement, nous considérons, la somme des deux moments de renversement ; précédemment calculés (d'impulsion et d'oscillations). Quant à la résultante des forces horizontales, nous considérons la somme de la force d'impulsion et de la force d'oscillations.

Le moment de renversement max :

Mrenv= Mri + Mro

M_{renv}= 436117,599 + 1335498,955

M_{renv}= 1771616,554 KN.m

Le moment stabilisateur :

. Poids du réservoir Me=354272 KN

. Rayon extérieur du réservoir Rext= 28,5 m

Mstab=Me x Rext

Mstab=10096752 KN.m

Rapports $\frac{Ms}{Mr}$ = 41,90

Pas de risque de renversement.

Etat limite de service de niveau de fonctionnement minimal

Il ya lieu de s'assurer que sous l'effet de l'actions sismique de dimensionnement approprié, le réservoir peut subir un endommagement de certains de ces composant, dans la mesure ou toutefois, après les opérations de contrôle des dommages.

La hauteur maximale des vagues, après oscillations est donnée par la relation suivante :
$$\mathsf{D}_{\max} = \frac{0,408}{\left(\frac{g}{\omega_0^2 \,\phi_0 \,Ri}\right) th(1,84 \,\frac{He}{Ri})}$$

La pulsation fondamentale de vibration du liquide en mouvement est :

D'où :

Calcul poids de l'ouvrage
 Poids de toiture Wt = 4599 kN
 Poids de robe Wrb = 2683 kN
 Poids du fond Wf = 1890,008 kN
 Poids du liquide WI = 345100 kN
 Poids total du réservoir à l'état vide W1 = 9172 kN
 Poids total du réservoir W4 = 354272 KN

Calcul des contraintes circonférentielles

Les cylindres verticaux des réservoirs reprennent la pression hydrostatique par de simple tentions circonférentielles sans qu'aucun raidisseur ne soit nécessaire. La traction circonférentielle dans la coque variera directement suivant la direction verticale en fonction de la hauteur du fluide contenu, depuis la surface du liquide jusqu'à 'a la profondeur maximale. A une profondeur H, la contrainte est donnée par la formule suivante : « cours silos et réservoir DAHMANI »

$$\sigma_{H} = \frac{H \phi g D}{2 t}$$

Elément	Valeurs des contraintes	Contrainte admissible	Unités
1	206,84	190	MPA
2	177,30	190	MPA
3	147,75	190	MPA
4	118,21	190	MPA
5	88,66	190	MPA
6	59,12	190	MPA
7	29,57	190	MPA

Tableau III.6 les contraintes de membrane circonférentielles

III.4.6 Vérification au flambement

Parmi les risques d'endommagement d'un réservoir, lors d'un séisme, figure le flambement des coques qui est le phénomène d'instabilité le plus complexe. Il s'agir d'une déformation d'une partie de la robe il pourrait s'agir de n'importe quelle virole. Aussi, les différents codes de dimensionnement proposent des normes à respecter afin d'éviter ce genre de déformations l'expression à vérifier pour les structures en acier est donné pas la relations :

Elément	Valeur	Unité	
La contrainte critique de flambement pour la virole 1	84,7	MPA	
La contrainte critique de flambement pour la virole 2	75,78	MPA	
La contrainte critique de flambement pour la virole 3	62,41	MPA	
La contrainte critique de flambement pour la virole 4	53,49	MPA	
La contrainte critique de flambement pour la virole 5	35,66	MPA	
La contrainte critique de flambement pour la virole 6	35,66	MPA	
La contrainte critique de flambement pour la virole 7	35,66	MPA	

Tableau III.7 Les contraintes critiques de flambement pour les viroles

III.4.7 Vérifications de la stabilité de l'ouvrage selon EC 8

Les effets hydrodynamiques dans un réservoir sont évalués par la superposition des deux composantes suivantes : (1) La composante impulsive, qui représente l'action du liquide près de la base du réservoir qui bouge de manière solidaire avec la paroi flexible du réservoir ; et (2) la composante de convection, qui représente l'action du liquide qui subit le mouvement de ballottement en proximité de la surface libre. Dans ce calcul, le système réservoir-liquide est modélisé par deux systèmes à un seul degré de liberté, l'un correspondant à l'action impulsive, l'autre à l'action par convection. Les réponses impulsive et par convection sont combinées en prenant leur somme numérique, plutôt que leur valeur moyenne quadratique.

Périodes naturelles :

Les périodes naturelles des réponses impulsive et par convection, en secondes, sont :

Timp = Ci
$$\frac{\sqrt{\rho} * H}{\sqrt{\frac{s}{R}} * \sqrt{E}}$$

$$\mathrm{Tcon} = \mathrm{Cc}\,\sqrt{R}$$

où

H = hauteur du liquide pris en compte dans le calcul, R = rayon du réservoir.

s = épaisseur uniforme équivalente de la paroi du réservoir.

 ρ = masse volumique du liquide.

E = module d'élasticité de YOUNG du matériau du réservoir.

Les coefficients Ci et Cc sont obtenus dans le tableau suivant :

H/R	Ci	Сс	mi/m	mc/m	hi/H	hc/H	h'i/H	h'c/H
0,3	9,28	2,09	0,176	0,824	0,400	0,521	2,640	3,414
0,5	7,74	1,74	0,3	0,7	0,400	0,543	1,460	1,517
0,7	6,96	1,6	0,414	0,586	0,401	0,571	1,009	1,011
1	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,875
1,5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,690	0,555	0,734
2	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,500	0,764
2,5	6,56	1,48	0,81	0,190	0,452	0,794	0,480	0,796
3	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

Tableau III.8 Coefficients Ci et Cc (s/m1/2)

Donc :

Timp = 0,298 s

Tcon = 8,92 s

> Effort tranchant à la base :

L'effort tranchant à la base est :

V=(mi + wrb + wt) * a_{imp} + mc * a_{con}

Poids de toiture Wt = 4599 kN

Poids de robe Wrb = 2683 kN

mi = 2751 KN

mc = 5897,6 KN

a_{imp} = 1,15

a_{con} = **32,94**

D'où

V = 205814,21 KN

> Moment de renversement juste au-dessous de la base

$$M_{ren} = (mi * hi + Wrb * hrb + wt * ht) + mc * hc * a_{con}$$

Mren = (2751 * 6,34 + 2683 * 4,55 + 4599 * 14,9)* 1,15 + 5897,6 * 8,61 * 32,94

M_{ren} = 1785619,29 KN.m

III.5 Comparaisons et commentaires

Pour la comparaison entre les deux règlements **RPA** et **EUROCODE 8**, on procèdera au tableau III.9 ci-dessous afin de récapituler les valeurs trouvées avec les deux règlements et déterminer la différence entre ces deux derniers.

 Tableau III.9 Tableau résumant tous les résultats des règlements EUROCODE 8 et

 l'RPA

	RPA	EC 8
Effort tranchant à la base	177136 Kn	205814,21 KN
Moment de renversement	1771616,554 KN.m	1785619,29 KN.m

Pour les deux règlements, les résultats sont presque les mêmes, avec des valeurs un petit peu plus élevés pour l'EUROCODE 8.

Conclusion générale

La réalisation de ce mémoire nous a permis d'identifié les règles, les procédures, la construction et l'exploitation d'un réservoir métallique destiner à stocker du gasoil.

La réalisation de ce genre de réservoir est surtout basée sur le calcul des épaisseurs des parois qui forment le réservoir (robe, plaque du fond et annulaires ...etc.).La nature et la quantité du produit à stocker font que l'épaisseur de ces réservoirs varie d'un produit à un autre.

Des deux règlements les plus utilisés de par le monde l'API 650 permis un dimensionnement plus strict que l'EUROCODE 3 qui utilise des règles beaucoup plus simple que l'API 650.

Durant la réalisation de ce mémoire on a observés les avantages qu'apporte un réservoir métallique a toit fixe, on site :

- La simplicité de ce genre de toits qui nécessite beaucoup moins d'entretien.
- La fiabilité de ce système qui utilise une mécanique basique qui tombe rarement en panne.
- L'économie de l'espace contrairement à un réservoir a toit flottant qui nécessite un fond de sécurité.
- Le cout de réalisation qui reste beaucoup plus faible que les autres types de toits.

En résumé, ce mémoire de fin d'études a pour but d'étudier la fiabilité et de donner des indications sur la conception et les performances des réservoirs métalliques à toit fixe.

Référence bibliographique.

- _Ministre de l'habitat « Règlement neige et vent(version 2013), D.T.R.C2-47 CNERIB 2014
- _Ministre de l'habitat « Document d'accompagnement du DTR RNV (version 2013)», D.T.R.C2-47 CNERIB 2014
- _DTR-B-C 2.2 : « Charges permanentes et charges d'exploitation » Centre National de Recherche Appliquer en Génie-Parasismique CGS.
- _DTR.B.C 2.48 :« Règlement Parasismique Algériennes (RPA99/ version 2003)» Centre National de Recherche Appliquer en Génie-Parasismique CGS.

_EUROCODE 1 : « Action du vent et de neige (NF EN 1991-1-4 :2005)»

_EUROCODE 3 : « Calcul des structures métallique et document d'application»

_EUROCODE 8 : «Calcul des réservoirs en zone sismique».

- _Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publique N0 (Calcul pratique des réservoirs en zone sismique)
- _API STANDARD 650 : Welded Tanks for Oil Storage
- _Ouvrage Toumi Chahinaz: Dimensionnement d'un réservoir de stockage de 35000 m3

_CTICM, guide eurocode, « Vérification des barres comprimées et fléchies d'après l'eurocode 3 », CSTB, aout 2009

_ API STANDARD 650 TENTH EDITION, NOVEMBER 1998 _ API STANDARD 650 TWELFTH EDITION, MARCH 2013