

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Ouvrages Chaudronnés et Piping

THEME

Etude et conception d'un réservoir à toit fixe autoportant
d'une capacité de 35000 m^3 pour le stockage de l'essence
super muni d'un écran flottant

Présenté par :
ADJAL SIDALI
OUKKAL FAOUZI

Promoteur : M.MESKINE
Co-promoteur : S.BOUKERBOUT

Promotion 2019- 2020

REMERCIEMENT

*Toute la gratitude et le merci
à Dieu notre créateur qui
nous a donné*

*La force pour effectuer et
achever ce travail*

*Ainsi nos parents qui nous
aident*

*Nous tenons à remercier en
premier lieu et très
chaleureusement*

Notre Promoteur Mr :

M.MESKINE

*Pour avoir accepté de diriger
notre travail, pour ses
précieux conseils*

*Pour son esprit d'ouverture et
sa disponibilité grâce à lui*

Notre travail c'est déroulé.

*Nous remercions toutes
personnes qui nous ont aidés
de près ou de loin à la
finalisation de ce travail*

*Enfin nous remerciments
s'adressent aux membres de
jury qui nous feront*

*L'honneur de juger notre
travail.*

DIDICACE

*A ceux qui m'ont donné
la vie, symbole de beauté,
et de fierté, de sagesse et
de patiente.*

*A ceux qui sont la source
de mon inspiration et de
mon courage, à qui je
dois de l'amour et la
reconnaissance.*

♥ *A mes parents*

♥ *A mes frères, je vous
réserve toujours une
place dans mon cœur et
mes pensées.*

♥ *A toute ma famille.*

♥ *A tous mes amis Khirou
Kadirou et Raouf*

♥ *A tous le groupe
MOCP18 ainsi qu'A tous
les amis de l'INGM.*

O.FAOUZI

DIDICACE

- ♥ *A mes parents et
ma famille*
- ♥ *A tout mes amis de
quartier et partout*
 - ♥ *A tous ceux qui
nous ont aidé à
complété ce travail*
- ♥ *A tous mes amis de
groupe pipiing*
 - ♥ *A tous le groupe
MOCP18 ainsi qu'A
tous les amis de
l'INGM.*

A. SIDALI

Sommaire

Introduction générale :	1
CHAPITRE I : présentation de sujet	
I.1. Introduction :	2
I.2. Présentation du sujet :	2
CHAPITRE II : Etude climatique	
II.1.1. Introduction :	3
II.1.2. Données de calcul :	3
II.2. Pression dynamique :	3
II.2.1. Définition :	3
II 2.2 Pression dynamique normale et extrême :	3
II 2.2.1 Pression dynamique de base :	3
II.2.3. Effet de la hauteur au dessus du sol :	4
II.3. Effet de site :	4
II.4. Effet de masque :	4
II.5. Effet des dimensions :	4
II.5.1. Rapport de dimension λ :	5
II.6. Coefficient global de traînée :	5
II.7. Amplification dynamique :	6
II.8. Coefficient de repense :	6
II.9. Coefficient de pulsation :	6
II.10. Actions statistiques exercées par le vent :	6
II.10.1. Actions extérieurs :	6
II.10.2. Actions intérieurs de vent C_i :	8
II.11. Charge de vent :	9
II.12. Effet de la neige :	9
II.12.1. Donnés de calcul :	9
II.12.2. Charge de neige sur la toiture :	9
II.13. Conclusion:	9
III. Choix des matériaux :	10
III.1. Introduction :	10
III.2. Aciers utilisés :	10
III.3. La vérification de soudabilité des matériaux :	11

CHAPITRE IV : Dimensionnement de réservoir

IV.1. Introduction :	12
IV.2. Calcul de fond :	12
IV.2.1. L'épaisseur des tôles centrales :	12
IV.2.2. Calcul de nombre de tôles centrales:	12
IV.2.3. la masse des tôles centrales :	13
IV.2.4. Tôles annulaires :	13
IV.2.5. Calcul de nombre des tôles annulaire :	14
IV.2.6. La masse des tôlés marginal :	14
IV.2.7. la masse totale du fond :	14
IV.3. Calcul de la robe :	15
IV.3.1. Introduction :	15
IV.3.2. Donnés de calcul :	15
IV.3.3. Calcul de nombre des viroles :	15
IV.3.3.1. Calcul de la hauteur théorique :	15
IV.3.3.2 Calcul de la hauteur du volume more :	16
IV.3.3.3. Calcule de la hauteur global du la robe :	16
IV.3.4. Nombre des tôles par virole :	16
IV.3.5. Calcul des épaisseurs des viroles :	17
IV.3.5.1. Méthode de 1-foot :	17
IV.3.5.2. Formule établie par un calcul théorique approché :	17
IV.3.5.3. Formule établie par les essais hydrostatiques :	17
IV.3.5.4. Application numérique :	18
IV.3.6. Les épaisseurs adoptées pour les tôles de la robe :	19
IV.3.7. Calcul de la masse totale de la robe :	19
IV.3.8.La masse totale de la robe :	19
IV.4. Cornière de rive :	20
IV.4.1. Constitution :	20
IV.4.2. Préparation :	21
IV.4.3. Assemblage :	21
IV.4.4. Recommandation :	21
IV.5. Calcul de toit:	21
IV.5.1. Calcul initial de toit conique autoportant :	21

IV.5.1.1. Calcul de l'épaisseur des tôles de toit :	21
IV.5.1.2. Calcul le poids total de toit :	22
IV.5.1.2.1. Poids de couverture :	22
IV.5.1.2.2. Poids de charpente :	23
IV.5.1.2.3. Poids total de toit :	23
IV.6. Conclusion :	24

CHAPITRE V : Dimensionnement de la charpente du toit

V.1. Introduction :	25
V.2. Etude de Chevron :	26
V.3. Vérification des pannes :	30
V.3.1 Panne p_1 :	30
V.3.1.1. Résolution de 1 ^{er} système :	30
V.3.1.2. Résolution de 2 ^{ème} système :	32
V.3.1.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes1 et 2 :	33
V.3.1.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :	33
V.3.1.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe $z-z'$:	33
V.3.1.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe $y-y'$:	33
V.3.1.7. Vérification de résistance de panne 1 au déversement:	34
V.3.2. Panne p_2 :	35
V.3.2.1. Résolution de 1 ^{er} système	35
V.3.2.2. Résolution de 2 ^{ème} système :	37
V.3.2.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes1 et 2 :	37
V.3.2.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :	38
V.3.2.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe $z-z'$:	38
V.3.2.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe $y-y'$:	38
V.3.3. Panne p_3 :	38
V.3.3.1. Résolution de 1 ^{er} système :	39
V.3.3.2. Résolution de 2 ^{ème} système :	40
V.3.3.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes1 et 2 :	41
V.3.3.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :	41

V.3.3.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :.....	42
V.3.3.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :.....	42
V.3.4. Panne p ₄ :.....	42
V.3.4.1. Résolution de 1 ^{er} système :.....	42
V.3.4.2 Résolution de 2 ^{ème} système :	44
V.3.4.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes1 et 2 :.....	45
V.3.4.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :.....	45
V.3.4.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :.....	45
V.3.4.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :.....	45
V.3.5 .Panne p ₅ :	45
V.3.5.1. Résolution de 1 ^{er} système :.....	46
V.3.5.2. Résolution de 2 ^{ème} système :	47
V.3.5.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes1 et 2 :.....	48
V.3.5.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :.....	48
V.3.5.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :.....	48
V.3.5.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :.....	49
V.3.6. Panne p ₆ :.....	49
V.3.6.1. Résolution de 1 ^{er} système :.....	49
V.3.6.2. Résolution de 2 ^{ème} système :	51
V.3.7. Panne p ₇ :.....	52
V.3.7.2. Résolution de 2 ^{ème} système :	54
V.3.7.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes1 et 2 :.....	55
V.3.7.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :.....	55
V.3.7.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :.....	55
V.3.7.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :.....	55
V.4. Contreventements :	55
V.4.1. Charge du vent :	56

V.4.2. Choix de profile:	56
V.4.3. Vérification de diagonale :.....	56
CHAPITRE VI : Accessoires de réservoir	
VI.1. Introduction :	57
VI.2. Trou d’homme sur la robe et le toit :	57
VI.3. La porte visite :	58
VI.4. Tubulures :	58
VI.5. Echelle roulante :	59
VI.6. L’escalier hélicoïdal :.....	59
VI.6.1. Condition pour les escaliers :.....	59
VI.6.2. Dimensionnement des escaliers hélicoïdaux :.....	60
VI.6.3. Etude de vent :.....	60
VI.6.3.1. Charge du au vent :	61
VI.6.4. Evaluation des charges :.....	61
VI.6.5. Vérification des marches :.....	61
VI.6.5.1. La flèche :	61
VI.6.5.2. La résistance :.....	61
VI.6.6. Calcul de limon :	62
VI.6.6.1 Evaluation des charges :.....	62
VI.6.6.2. La vérification :.....	62
VI.6.7. Calcul de palier de repos : μ :	63
VI.6.7.1. Evaluation des charges :.....	63
VI.6.7.2. La vérification :.....	63
VI.6.7.3. La vérification :.....	64
VI.6.7.4. Calcul de la console :	65
VI.7. Ecran flottant :	66
VI.7.1. Définition :.....	66
VI.7.2. Equipements :.....	67
VI.7.3. Ecran Flottant Soudé :	67
VI.7.4. Vérification de flottabilité :.....	67
VI.7.4.1. Volume nécessaire de flottabilité :.....	67
VI.7.5. Efficacité multiple des joints pour les écrans flottants internes :.....	67
VI.7.6. Les béquille de l’écran :.....	67
VI.7.6.1. Donnée de calcul :.....	68

VI.7.6.2. Masse des tôles :	68
VI.7.6.3. Vérification de flambement des béquilles :	68
VI.7.6.4. Conclusion :	69
VI.8. Conclusion :	69

CHAPITRE VII : Stabilité de réservoir

VII.1. Poutre au vent :	70
VII.1.1. Moment résistant exigé :	70
VII.1.2. Stabilité de la robe sous le vent :	72
VII.1.2.1. Calcul de la hauteur transformée de la robe (Htr) :	72
VII.2. Stabilité de Réservoir :	73
VII.2.1. Introduction :	73
VII.2.2. Stabilité radial :	73
VII.2.2.1. Vérification au renversement :	73
VII.2.2.2. Vérification de glissement :	74
VII.2.2.3. Vérification de cisaillement :	74
VII.2.3. Stabilité dans la direction axiale :	75
VII.2.4. Conclusion :	78
VII.3. Stabilité du réservoir au séisme :	78
VII.3.1. Introduction :	78
VII.3.2. Données du site et de l'ouvrage :	78
VII.3.3. Conditions pour un réservoir auto-ancré :	84
VII.3.3.1. Vérification de la 1 ^{ère} condition (calcul du rapport d'ancrage J) :	85
VII.3.3.2. Vérification de la 2 ^{ème} condition :	86
VII.3.3.3. Vérification de la 3 ^{ème} condition :	86
VII.3.3.4. Vérification de la 4 ^{ème} condition.....	87
VII.3.4. Calcul de la résistance du réservoir Résistance à la rupture fond-robe.....	87
VII.3.5. Conclusion :	89

CAPITRE VIII : Fabrication et Montage

VIII.1. Introduction :	90
VIII.2. Ordre de montage :	90
VIII.3. Fabrication en atelier :	90
VIII.3.1 Procédure de fabrication :	91
VIII.4. Traitement thermique :	91
VIII.5. Préparation des tôles :	92

VIII.5.1. Mise en forme des tôles de robe :	92
VIII.6. Gamme de montage :.....	93
VIII.6.1. Exécution :.....	93
VIII.6.2. Explication de méthode de montage "tôle par tôle" :	93
VIII.6.3. Montage du fond :.....	93
VIII.6.4. Montage de la robe :.....	95
VIII.6.5. Montage et soudage de la cornière :.....	99
VIII.6.6. Montage du toit :.....	99
VIII.6.6.1. Préparations avant le montage :.....	99
VIII.6.7. Montage des accessoires :.....	99
VIII.7. Conclusion :.....	99

CHAPITRE IX : Soudage et contrôle des soudures

IX.1. Introduction :	100
IX.2. Choix du procédé de soudage :	100
IX.3. Choix d'électrode de soudage :	101
IX.3.1. Caractéristiques de l'électrode :.....	101
IX.3.2. Etuvage des électrodes de soudage :.....	101
IX.4. Soudage SAW: (submerged Arc welding)	102
IX.4.1. Définition :.....	102
IX.4.2. Principe de soudage (SAW) :	102
IX.4.3. Avantage du procédé :.....	103
IX.5. Procédés et détails de soudage :.....	103
IX.5.1. Les joints de soudure :.....	104
IX.5.2. Joints bout à double soudure	104
IX.5.3. Joints à recouvrement à double soudure	104
IX.5.4. Joint à recouvrement à simple soudure	104
IX.5.5. Soudure d'angle	105
IX.5.6. Soudure d'angle normale	105
IX.5.7. Soudure de pointage	105
IX.6. Tableaux récapitulatifs de soudage :.....	106
IX.6.1. Joints de soudure de fond :	106
IX.6.2. Tôles marginales :	107
IX.6.3. Joints de soudure de la robe :	108
IX.6.4. Joints de soudure verticaux de la robe :	109

IX.6.5. Du 2ème Virole jusqu'a la 9ème virole	110
IX.6.6. Joints de soudure de toit :	111
IX.7. Les déferlants contrôles de soudage :.....	112
IX.7.1. Contrôle avant le soudage :.....	112
IX.7.2. Contrôle en cours de soudage :.....	112
IX.7.3. Contrôle après le soudage :	112
IX.7.3.1. Contrôle des cordons de soudures :.....	112
IX.7.3.2. Contrôle d'Etanchéité :	113
IX.7.3.3. Contrôle de toit :	113
IX.8. Conclusion :	113
Conclusion générale :	114
Références bibliographiques :	115

Liste des figures

Figure II. 1: Action extérieur de vent pour $\gamma = 1$ et $\gamma = 1,3$	7
Figure II. 2: Action intérieur de vent pour $C_i = -0,4015$ « réservoir plein »	8
Figure II. 3: Action intérieur au vent pour $C_i = -0,3$ « réservoir vide »	8
Figure IV. 1 : Disposition des véroles de la robe	20
Figure IV. 2 : Vue dessus de la toiture	22
Figure V. 1: Présentation de la ferme.....	25
Figure V. 2 : Disposition des pannes et des chevrons sur le toit	25
Figure VI. 1 : Schéma de trou d'homme	57
Figure VI. 2 : Schéma de tubulure.....	58
Figure VI. 3 : Schéma de l'escalier hélicoïdal.....	60
Figure VI. 4 : Ecran flottant de toit fixe.....	66
Figure VII. 1 : Poutre au vent-vue de dessus.....	70
Figure VII. 2 : Raidisseur principal (poutre au vent).....	71
Figure VII. 3 : Patte d'éléphant	75
Figure VIII. 1 : Courbe de traitement thermique	92
Figure VIII. 2 : développement des tôles de la première vérole.....	93
Figure VIII. 3 : Recouvrement des tôles du fond	94
Figure VIII. 4 : Vue intérieur d'une tôle préparer pour montage	95
Figure VIII. 5 : Dispositif de réglage des tôles.....	96
Figure VIII. 6 : Disposition des carrés	97
Figure VIII. 7 : Montage de la première vérole vue de l'intérieur	97
Figure VIII. 8 : Montage de deuxième virole.....	98
Figure IX. 1 : Circuit de soudage à l'arc.....	100
Figure IX. 2 : électrode enrobé.....	101

Liste des tableaux

Tableau II 1 : Les valeurs d'actions extérieures.....	7
Tableau III.1 : Tableau des nuances d'acier utilisé	10
Tableau III. 2: Caractéristique chimique des matériaux selon l'ASTM	11
Tableau IV. 1 : Tableau des épaisseurs des tôles de la robe.....	19
Tableau IV. 2 : Poids de chaque vérole de la robe	19
Tableau IV. 3 : Tableau récapitulatif du poids de la charpente	23
Tableaux VII. 2 : Coefficient de réduction en fonction du rapport R/t_i.....	75
Tableaux VII. 3 : Paramètres pour le calcul du moment de renversement	84
Tableau IX. 1 : Caractéristique de l'électrode	101
Tableau IX. 2 : Joints de soudure des tôles centrales	106
Tableau IX. 3 : Joints de soudure des tôles marginale	107
Tableau IX. 4 : Joints de soudure pied de la robe.....	108
Tableau IX. 5 : Joints de soudure verticaux de 1 ère virole	109
Tableau IX. 6 : Joints de soudure verticaux des viroles 2 à 9	110
Tableau IX. 7 : Joints de soudure de toit	111

Introduction générale

L'industrie des hydrocarbures connaît un progrès considérable dans le monde les dernières années, pour cela le stockage des produits est un secteur stratégique dans l'industrie pétrolière.

Dans l'industrie pétrolière, les réservoirs sont très importants pour le stockage, il permet d'assurer une pérennité de la production malgré les interruptions accidentelles.

Le choix des réservoirs dépend à plusieurs facteurs pour assurer des bon conditions de stockage, c'est facteur est :

- Le domaine d'utilisation de réservoir.
- La nature de produit stockée et les services à effectué.
- Le matériau de construction.
- Les dimensions, position et le type de couvercle (fixe, ouvert, à toit flottant).
- Les tubulures et autres connexions exigés.

Notre produit à stocké est volatile pour sella en à ajouté un écran flottant au réservoir pour assurer la conservation préserver la pureté et limiter l'émission des vapeurs toxiques vers l'atmosphère.

Le réservoir étudié dans le cadre de ce mémoire sera réalisé conformément aux recommandations techniques de la norme **API 650 Std.**

Cette norme est basée sur l'ensemble des connaissances et expériences acquises par les fabricants de réservoirs de stockage en acier soudé, de différentes tailles et capacités

Les procédures de soudage et détails correspondants, seront établis conformément au code **ASME** section IX.

Chapitre I

Présentation de sujet

I. présentation de sujet :

I.1. Introduction :

Le stockage des produits pétroliers, de pétrochimie et chimique s'effectue principalement dans des réservoirs métalliques, qui nécessitent une étude approfondie afin d'assurer la réservation et la simplicité d'utilisation de ces produits qui sont par fois dangereux.

Le but de ce projet est de réaliser l'étude et la conception et réalisation d'un réservoir à toit fixe auto portant avec un écran flottant pour le stockage de l'Essence super.

I.2. Présentation du sujet :

Etude globale d'un réservoir cylindrique à toit fixe autoportant muni d'un écran flottant :

- Capacité nominale du réservoir.....35000m³.
- Diamètre nominal du réservoir.....D=56,95m.
- Hauteur de la robe.....H=16,47m.
- Hauteur théorique du liquide.....H=13,75m.
- Produit de stockage.....Essence Super.
- Densité maximale du produit.....G=0,8.
- La masse volumique du produit $\rho=770 \text{ kg/m}^3$.
- La masse volumique de l'acier..... $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$.
- Température.....ambiante.
- Pression.....atmosphérique.
- Format des tôles.....9420 X 1830mm.
- La vitesse maximale de vent.....V= 160 Km/h.
- Zone de l'implantation.....Berraki (Alger)
- Séisme.....Oui (zone III).
- VentOui (zone I).
- Neige.....Oui.
- Surépaisseur de corrosion :
- Fond 3 mm.
- Robe :
- ❖ 1^{ère} vérole à 3^{ème} virole : 3mm.
- ❖ Autres vérole : 2mm.
- Toit : 1mm
- Code d'étude : API650 2013 Welded Tanks for Oil Storage (American Petroleum Institute).
- Règlements :
- ❖ ASTM (American society for Testing and material).
- ❖ ASME (American society of mechanical Engineers).
- ❖ API 650(American Petroleum Institute).
- ❖ Eurocode3.
- ❖ NV65.
- ❖ RNV99.

Chapitre II

Etude climatique

II-Etude climatique :

II.1.1. Introduction :

Dans ce chapitre, il s'agit de faire une étude globale des effets du vent exercé sur le réservoir en déterminant les actions climatiques du vent intérieur et extérieur résultantes agissant sur les parois de la structure, et pour cela on a utilisé les normes RNV65.

II.1.2. Données de calcul :

- Zone d'implantation Beraki (Alger) : zone I.
- Vitesse de vent : 160 km/h \Leftrightarrow 44,44m/s.
- Diamètre de Réservoir : 57 m.
- Hauteur de réservoir : 20.03 m.
- Catégorie de construction : 6. (NV65 pages 91-92)

II.2. Pression dynamique :

II.2.1. Définition :

La pression dynamique q en daN/m^2 est donnée en fonction de la vitesse V du vent en m/s par la formule suivante : (NV65-P07) :

$$q = \frac{v^2}{16,3} = \frac{44,44^2}{16,3} = 121,16 \text{ daN/m}^2$$

II 2.2 Pression dynamique normale et extrême :

Lors de calcul la pression dynamique normal et la pression dynamique extrême, le rapport de la seconde à la première et :

$$\frac{q_{\text{extrême}}}{q_{\text{normale}}} = 1.75$$

II 2.2.1 Pression dynamique de base :

Les pressions dynamiques de base normale et extrême sont celles qui s'exercent à une hauteur de 10 mètre au dessus du sol, pour un site normale, sans effet de masque sur un élément dont la plus grande dimension est égale à 0.5 m

$$q_{10} (\text{extrême}) = \frac{(v^2 (\text{extrême}))}{16,3} = \frac{44,44^2}{16,3} = 121,16 \text{ daN/m}^2$$

$$q_{10} (\text{normale}) = \frac{q_{10} \text{ extrême}}{1.75} = \frac{121,16}{1.75} = 69.23 \text{ daN/m}^2$$

II.2.3. Effet de la hauteur au dessus du sol :

Pour les valeur de la pression dynamique agissent à la hauteur h au-dessus du sol q_H , et la pression dynamique q_{10} de base à 10 m de hauteur, et pour H compris entre 0 et 500

Le rapport entre q_H et q_{10} est définis par la formule :

$$\frac{q_H}{q_{10}} = 2.5 \frac{H+18}{H+60}$$

H comptée à partir du sol

On a : H = 20.03 m

$$q_H \text{ (normale)} = 2.5 q_{10} \text{ (normale)} \frac{H+18}{H+60}$$

$$q_H \text{ (normale)} = 2.5 (69,23) \cdot \frac{20.03+18}{20.03+60} = 82,24 \text{ daN/m}^2$$

$$q_H \text{ (extrême)} = 2.5 q_{10} \text{ (extrême)} \frac{H+18}{H+60}$$

$$q_H \text{ (extrême)} = 2.5 (121,16) \frac{20.03+18}{20.03+60} = 143,93 \text{ daN/m}^2$$

$$q_H \text{ (normale)} = 82,24 \text{ daN/m}^2$$

$$q_H \text{ (extrême)} = 143,93 \text{ daN/m}^2$$

II.3. Effet de site :

A l'intérieur d'une région à laquelle correspondent des valeurs déterminées par des pressions dynamiques de base il faut tenir compte de la nature de site d'implantation de la construction. Les valeurs des pressions dynamiques de base normale et extrême définies précédemment doivent être multipliées par un coefficient de site k_s : on a un site exposé, d'après le tableau (8 Page45) $k_s = 1.35$

II.4. Effet de masque :

il ya effet de masque lorsqu'une construction est masqué partiellement ou totalement par d'autres construction ayant une grande probabilité de durée.

Ce coefficient est très difficile à définir et est favorable dans la majorité des cas, donc le coefficient de masque $K_m = 1$.

II.5. Effet des dimensions :

Le coefficient de réduction δ tient compte de la variation des pressions dynamiques moyennes en fonction de la dimension de la surface frappé par le vent dont la plus grande dimension

La hauteur du réservoir H est $20.03 < 30$.

A partir de figure R-2 (NV 65 P 84) :

Le coefficient de réduction $\delta = 0.74$.

II.5.1. Rapport de dimension λ :

Pour une construction fermée catégorie VI (cylindre lisse à base circulaire sans nervure et possédant un poli spéculaire et durable), cylindre reposant sur sol :

$$H = 20.03 \text{ m}$$

$$D = 57 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{H}{D} = \frac{20.03}{57} = 0.35$$

$$\lambda = 0.35 \quad \text{alors} \quad \gamma = 0.9$$

II.6. Coefficient global de trainée :

Pour un rapport dimension quelconque, le coefficient global de trainée a pour valeur:

$$C_t = \gamma \times C_{t0} \quad \dots\dots\dots \text{(NV 65 P17)}.$$

Le coefficient C_{t0} dépend :

- de la rugosité de surface.
- du nombre de REYNOLDS (Re).

D'après NV65 (p 92) :

$$Re : \text{nombre de Reynolds} = 4,17 \cdot 10^5$$

$$V : \text{vitesse de vent} = 44,44 \text{ m/s}$$

$$\nu : \text{Coefficient de viscosité cinématique} = 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{On a : } Re = \frac{Vd}{\nu} .$$

$$\text{Donc : } d = \frac{Re \cdot \nu}{V} = \frac{4,17 \cdot 10^5 \times 14,4 \times 10^{-6}}{44,44} = 0,135$$

$$d = 0,135 < 0,28$$

$$d\sqrt{q_{10}} = 0.135 \sqrt{121,16} = 1,486 < 1,5$$

$$\text{alors : } C_{t0} = 0,90 - 0,30 \times d\sqrt{q_{10}}$$

$$C_{t0} = 0.90 - 0.30 \times 0.135 \sqrt{121,16} = 0,545$$

$$\text{D'où : } c_t = \gamma \times C_{t0} = 0,9 \times 0,545 = 0,4905$$

II.7. Amplification dynamique :

Dans la direction du vent, il existe une interaction dynamique entre les forces engendrées par les rafales de vent et la structure elle-même.

La connaissance du mode fondamental d'oscillation de la structure dans la direction de vent étudiée est primordiale pour la prise en compte de ce phénomène. Plus la structure sera flexible (grande période d'oscillation à et plus les amplifications des déformations, et donc des efforts dans la structure, seront importantes.

Pour tenir compte de cet effet, il faut pondérer les pressions dynamiques de base par un coefficient d'amplification dynamique « β »

$$\beta = \theta(1 + \xi T)$$

Avec :

β : Coefficient de réponse en fonction de la période T du mode fondamental d'oscillation de la structure donné sur les diagrammes de la figure 13 NV65.

T : Coefficient de pulsation déterminé à chaque niveau de la structure en fonction de sa Hauteur H au-dessus du sol et donné par l'échelle fonctionnelle de la figure 14 de NV65.

θ : Coefficient global dépendant du type de construction dans notre cas égal à 1.

II.8. Coefficient de repense :

$$T = 0,1 \cdot \frac{H}{\sqrt{D}} = 0,1 \cdot \frac{20,03}{\sqrt{57}} = 0,265$$

Donc suivant le règlement NV65

$$\xi = 0,3$$

II.9. Coefficient de pulsation :

On a : H = 20.03 m Aparté de le Règlement NV65 :

D'où

$$\beta = \theta(1 + \xi T) = 1 \cdot (1 + 0,3 \cdot 0,265) = 1,0795$$

II.10. Actions statiques exercées par le vent :

II.10.1. Actions extérieures :

Pour un cylindre de catégorie 6 les actions extérieures sont données sous forme polaire
Le coefficient de pression C_e est donné en fonction de γ et de l'angle d'inclinaison α du plan tangent à la surface courbe sur la direction du vent.

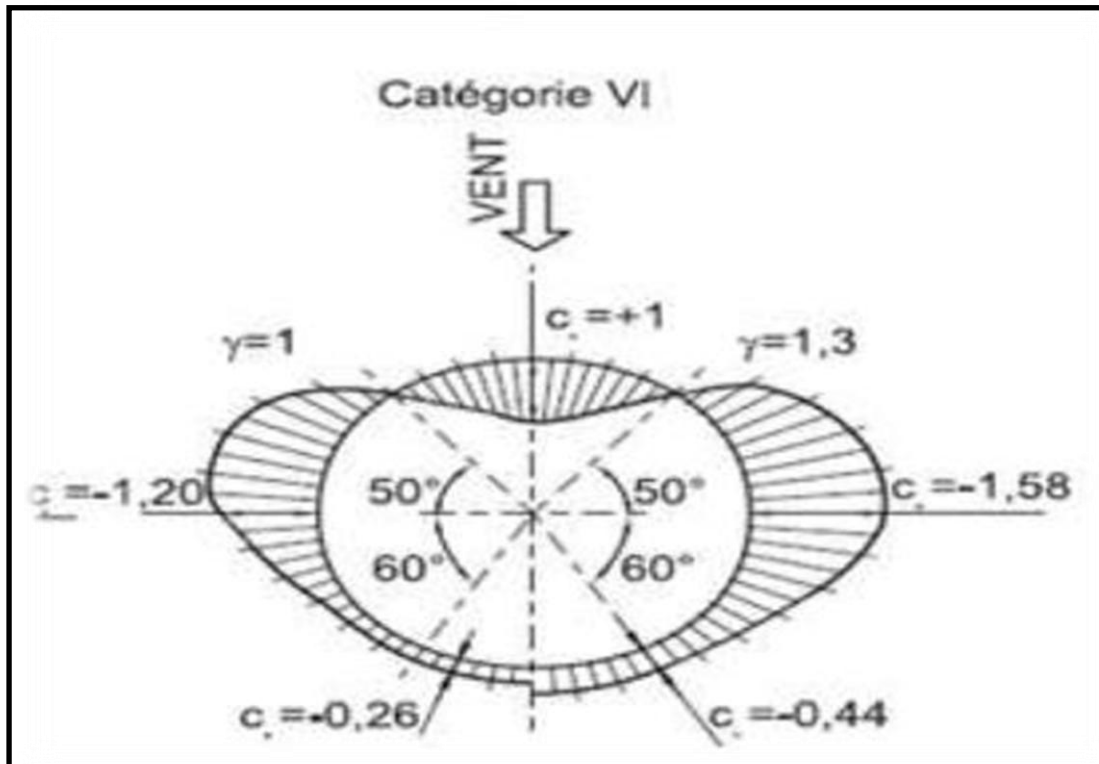


Figure II. 1: Action extérieure de vent pour $\gamma = 1$ et $\gamma = 1,3$

Pour $\alpha = 0$ on a :

$$\gamma = 1 \quad C_e = -1,2 \quad -1,2 = 1 a + b \quad (1)$$

$$\gamma = 1,3 \quad C_e = -1,6 \quad -1,56 = 1,3 a + b \quad (2)$$

$$(1) - (2) \quad a = -1,3 \quad b = 0,13 \quad \text{donc} \quad C_e = -1,3 \gamma + 0,13$$

Pour $\gamma = 0,9$; $C_e = -1,3 (0,9) + 0,13$

$$C_e = -1,06$$

2^{ème} on fait des répétitions pour $\alpha = (50, 90, -60, -90)$:

Tableau II 1 : Les valeurs d'actions extérieures

α	Γ	C_e
0	0,9	-1,06
50	0,9	0
90	0,9	1
-60	0,9	-0,26
-90	0,9	-0,2

II.10.2. Actions intérieures de vent C_i :

On a deux cas :

Cas1 : Réservoir plein :

Construction fermée les parois ont une perméabilité : $\mu \leq 5\%$.

Surpression :

$$C_i = 0,6(1,10 - C_t)$$

$$C_i = -0,6(1,10 - 409)$$

$$C_i = 0,4015$$

Dépression :

$$C_i = -0,6(1,10 - C_t)$$

$$C_i = -0,6(1,10 - 0,409)$$

$$C_i = -0,4015$$

Avec C_t : coefficient global de trainée.

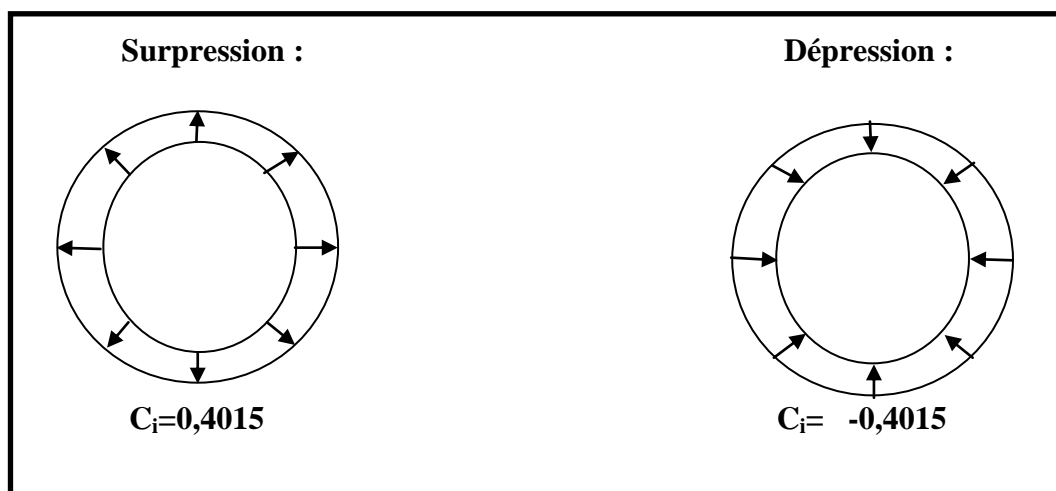


Figure II. 2 : Action intérieur de vent pour $C_i = -0,4015$ « réservoir plein »

Cas 2 : Réservoir vide ou moitié plein :

Pour les constructions ouverts à leurs parties supérieures, on applique une dépression uniforme égale à : $-0,3 q$.

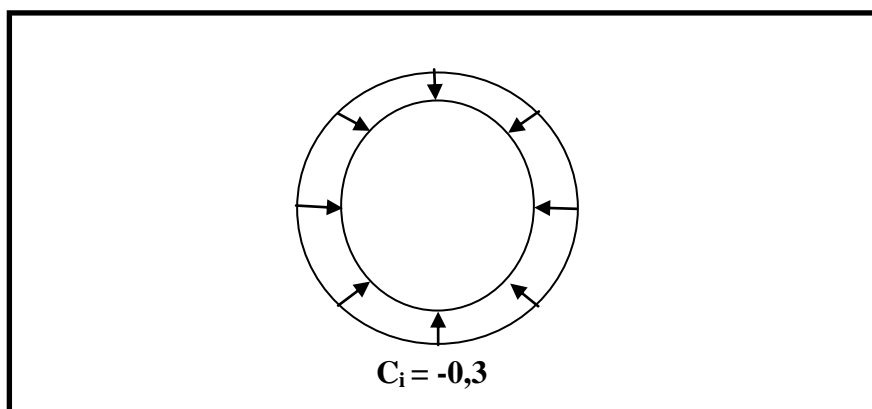


Figure II. 3: Action intérieur au vent pour $C_i = -0,3$ « réservoir vide »

Remarque :

Le cas le plus défavorable, lorsque le réservoir est vide ou moitié remplis le toit joue un rôle de raidisseur. De ce fait les contraintes de compression sont moins importantes.

$$C_{\max} = 1.485$$

II.11. Charge de vent :

$$Q = q_h \cdot k_s \cdot k_m \cdot C_{\max} \cdot \delta \cdot \beta$$

- ❖ $K_S=1,35$ (coefficient de site)
- ❖ $K_m=1$ (coefficient de masque)
- ❖ $\beta=1,104$ (coefficient de majoration)
- ❖ $\delta=0,74$ (coefficient de réduction des pressions dynamique)
- ❖ $C_{\max}=1,485$ (coefficient de résultant)
- ❖ $q_h=143,93 \text{ daN/m}^2$ (la pression dynamique agissant a hauteur H)

$$Q = 143,93 \times 1,35 \times 1 \times 1,485 \times 0,74 \times 1,104$$

$$Q = 223.14 \text{ daN/m}$$

II.12. Effet de la neige :**II.12.1. Données de calcul :**

- Zone de neige : B.
- Altitude: 33 m.

II.12.2. Charge de neige sur la toiture :

$$S = \mu \cdot S_k \text{ daN /m}^2$$

μ : est un coefficient d'ajustement des charges ,fonction de la forme de la toiture .appelé coefficient de forme est donné au paragraphe 6.RNV.

$$\mu = 0,8 \text{ car } 0 \leq \alpha \leq 30$$

S_k : charge de neige sur le sol, donné au paragraphe 4.RNV, fonction de l'altitude et de la zone de neige.

$$\text{Zone B donc } S_k = \frac{0,04 \cdot H \cdot 10}{100} = \frac{0,04 \cdot 33 \cdot 10}{100} = 0,132 \text{ daN/m}^2$$

D'où

$$S = \mu \cdot S_k = 0,8 \cdot 0,132$$

$$S = 10.56 \text{ daN/m}^2$$

II.13. Conclusion:

L'étude climatique nous a permis de déterminer les charge du vent et de neige les plus défavorable sur notre réservoir.

Chapitre III

Choix des matériaux

III. Choix des matériaux :

III.1. Introduction :

La décision de choisir un matériau pour la construction est dépend à des facteurs suivants :

- Epaisseur des tôles.
- La disponibilité sur le marché.
- D'après les exigences réglementaires et de maître d'ouvrage et en plus le cout.

III.2. Aciers utilisés :

- La robe et les tôles centrale du fond : **A283gr C**.
- Les tôles marginales : **A283gr C**.

Les nuances d'acier pour les tôles destinées à être utilisées pour la construction de réservoir cylindrique répondants à la Norme API std650 et selon le code américain ASTM, sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau III.1 : Tableau des nuances d'acier utilisé

Désignation des éléments	Matériaux utilisés	Spécification pour : (selon ASTM)	Limite élastique (f_y)	Resistance de traction (f_u)	Effort d'essai hydrostatique (S_d)	Effort Theorique (S_t)
UUPN de chevron UPN panne cornière de rive	S235 JR	/	235	340	137	144
Tôles de fond Tôle de robe Tôle du toit Tôle annulaire	Acier A283 Gr C	Tôles en acier au carbone, à faible et moyenne résistance à la traction.	205	380	137	154

f_y : Limite élastique des matériaux (en MPA).

f_u : Résistance à la traction limite (en MPA).

S_d : Effort théorique limite (en MPA).

S_t : Effort d'essai hydrostatique limite (en MPA).

III.3. La vérification de soudabilité des matériaux :

Tableau III. 2: Caractéristique chimique des matériaux selon l'ASTM

ASTM	NUANCE GRADE	COMPOSITION CHIMIQUE				
		C max%	M _N %	P max %	S max %	Si max %
A283 GR C	C	0.24	0.9	0.035	0.04	0.4

Remarque :

Avant d'entamer le soudage il faut vérifier est-ce que les matériaux sont soudable ou non en utilisant la formule suivante:

$$C_E = \%C + \frac{M_N}{20} + \frac{N_I}{15} + \frac{N_r + M_0 + V}{10}$$

- $C_E < 0,3$ bonne soudabilité.
- $0,3 < C_E < 0,6$ préchauffage.
 - $C_E > 0,6$ problème très particuliers **A 283gr 70.**

$$C_E = \%C + \frac{M_N}{20} = 0,24 + \frac{0,9}{20} = 0,28$$

On trouve que $C_E < 0,3$, donc : les matériaux a une bonne soudabilité

Chapitre IV

Dimensionnement de réservoir

IV. Dimensionnement de réservoir :

IV.1. Introduction :

Afin de faire la construction d'un bon produit qui possède un bon rapport de qualité, une satisfaction à l'utilisateur, et qui fonction bien, il va falloir de prendre en compte l'étude de dimensionnement, qui est pour minimiser les chutes dans les normes d'une bonne production, ce qui démine le cout du prix.

Ce chapitre de dimensionnement est pour l'étude de :

- Fond concave.
- Robe cylindrique verticale.
- Toit conique autoportant.

IV.2. Calcul de fond :

IV.2.1. L'épaisseur des tôles centrales :

D'après l'API 650 (5.4.1) l'épaisseur minimale de toutes les tôles centrales du fond est **6mm**

Epaisseur nominal= 6 mm.

Surépaisseur de corrosion= 3 mm.

$$t_t = t_n + C_a = 6 + 3 = 9\text{mm}$$

IV.2.2. Calcul de nombre de tôles centrales:

$$N_{\text{tôles}} = \frac{S_{\text{fond}}}{S_{\text{tôle}}}$$

$$S_{\text{tôle}} = (9,424 - L_r) \times (1,83 - L_r) = (9,424 - 0,05) \times (1,83 - 0,05) = 16,69 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{marginale}} = (\pi \times R_{\text{max}}^2) - (\pi \times R_{\text{min}}^2)$$

Avec :

$$R_{\text{max}} = R_{\text{nom}} + \text{épaisseur de 1}^{\text{er}} \text{vérol} + \text{partie extérieur de la tôle marginale}$$

$$R_{\text{min}} = R_{\text{max}} - b \text{ (largeur de la tôle marginale)}$$

$$S_{\text{marginale}} = (3,14 \times 28,6^2) - (3,14 \times 27,8^2) = 141,61 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{fond}} = \pi \times R_{\text{max}}^2 - S_{\text{marginale}} = (3,14 \times 28,6^2) - 141,61 = 2427,95 \text{ m}^2$$

Avec :

$N_{\text{tôles } F}$: nombre de tôles.

S_{fond} : la surface du fond.

$S_{\text{tôle}}$: la surface de tôle utilisée.

$S_{\text{marginale}}$: la surface à l'intérieure du bac occupée par les tôles annulaire.

L_r : largeur de recouvrement des tôles de fond.

$$N_{\text{tôles F}} = \frac{S_{\text{fond}}}{S_{\text{tôle}}} = \frac{2427,95}{16,69} = 145,47 \text{ tôles}$$

Donc on prend $N_{\text{tôles F}} = 146$ tôles.

IV.2.3. la masse des tôles centrales :

$$\begin{aligned} M_{\text{tôles C}} &= 9,424 \times 1,83 \times 0,009 \times 7850 \times 146 \\ &= 177890 \text{ Kg} \end{aligned}$$

IV.2.4. Tôles annulaires :

Les tôles annulaires du fond auront une largeur radiale minimale de **600** millimètres de l'intérieur de la 1^{er} virole vers le centre du fond. Une plus grande largeur radiale des tôles annulaires est exigée d'après l'API 650 (article 5.5.2) et calculé comme suit :

$$b = \frac{215t_b}{(H \times G)^{0,5}}$$

Avec :

b : la largeur de tôle annulaire.

T_b : l'épaisseur des tôles annulaire.

H : Niveau maximal de liquide.

G : la densité du liquide.

$$\begin{aligned} S_{\text{dmax}} &= ((t_d - CA) / \text{épaisseur adopté}) \cdot S_d \\ &= ((26,92 - 3) / 28) \cdot 137 \\ &= 117 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{tmax}} &= (t_t / \text{épaisseur nominal}) \cdot S_t \\ &= (26,6 / 27) \cdot 154 \\ &= 151,71 \text{ MPa} \end{aligned}$$

D'après l'API 650 (tableau 5.1a) le choix d'épaisseur se réalise par rapport aux caractéristiques de la 1^{er} virole. L'épaisseur de cette dernière est de 28 millimètre en acier A283 Gr C avec une contrainte de théorique maximal $S_{\text{dmax}} = 117$ MPa et une contrainte de test hydrostatique maximal $S_{\text{tmax}} = 151,71$ MPa.

- Pour $S_{\text{dmax}} = 117$ MPa < 190 MPa avec $t = 28$ mm implique que $t_{b1} = 6$ mm.
- Pour $S_{\text{tmax}} = 151,71$ MPa < 190 MPa avec $t = 28$ mm implique que $t_{b2} = 6$ mm.

$$t_{bc} = \text{Max}(t_{b1}; t_{b2}) = 6 \text{ mm.}$$

$$\text{Donc } t_b = t_{bc} + Ca = 6 + 3 = 9 \text{ mm}$$

Alors :

$$b = \frac{215t_b}{(H \times G)^{0,5}} = \frac{215 \times 9}{(14,97 \times 0,8)^{0,5}} = 559,15 \text{ mm}$$

Avec :

t_b : la largeur des tôles annulaire.

Ce qui implique l'adoption de la largeur $b = 600 \text{ mm}$ de l'intérieur de la virole inférieur vers le centre du fond, et 100 mm de plus comme mesure de sécurité.

Les recouvrements des tôles de fond devront avoir une largeur de 50 mm à l'extérieur de la robe selon l'API 650 (5.4.2), mais on prendra 100 mm comme mesure de sécurité.

Donc : $b = 800 \text{ mm}$.

IV.2.5. Calcul de nombre des tôles annulaire :

On a format de la tôle : (9424 × 1830 × 9).

$$N_{\text{tôles M}} = \frac{P_{\text{fond}}}{2L_{\text{tôle M}}} = \frac{\pi D}{9,424 \times 2} = \frac{179,52}{9,424 \times 2} = 9,53 \text{ tôles}$$

Donc on prend $N_{\text{tôles}} = 10 \text{ tôles}$.

Avec :

P_{fond} : le périmètre de fond (m).

$L_{\text{tôle M}}$: La longueur de la tôle marginale (m).

IV.2.6. La masse des tôlés marginal :

$$\begin{aligned} M_{\text{tôles M}} &= 9,424 \times 1,83 \times 0,009 \times 7850 \times 10 \\ &= 12184,245 \text{ Kg} \end{aligned}$$

IV.2.7. la masse totale du fond :

$$\begin{aligned} M_{\text{fond}} &= M_{\text{tôles C}} + M_{\text{tôles M}} \\ &= 190074 \text{ kg} \end{aligned}$$

IV.3. Calcul de la robe :

IV.3.1. Introduction :

La robe est l'élément le plus important dans les réservoirs car elle est sollicitée aux différentes charges (internes et externes) à ce propos on a effectué des calculs.

Elle est construite par des rangées des tôles rectangulaires superposées, appelées « viroles », qui sont soudées bout à bout.

Sa valeur dépend des dimensions, 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.

IV.3.2. Données de calcul :

- Calcul selon API 650.
- Hauteur de la robe: 16,47 m.
- Hauteur du liquide adopté pour le calcul : 13,75 m.
- Surépaisseur de corrosion $e = 3$ mm dans 3 premières viroles, 2 mm dans les autres viroles
- Densité du liquide : $G=0,8$.
- Nuance de l'acier: A283 gr C.
- Diamètre nominal $\phi = 56,95$ m.
- Le débit $Q=500$ m³ / h.
- La vitesse de remplissage $V=1,4$ m/s.

IV.3.3. Calcul de nombre des viroles :

IV.3.3.1. Calcul de la hauteur théorique :

$$V_{Re} = \pi \cdot R^2 \cdot H_{th} \Rightarrow H_{th} = V / \pi \cdot R^2 = 35000 / 3,14 \cdot 28,47^2$$
$$\Rightarrow H_{th} = 13,75 \text{ m}$$

IV.3.3.2 Calcul de la hauteur du volume more :

On a $Q = S.V$

$$\Rightarrow Q = \pi R^2 \cdot V \Rightarrow R = \sqrt{\frac{Q}{V \cdot \pi}} \Rightarrow R = \sqrt{\frac{500/3600}{1,4 \cdot \pi}} \Rightarrow R = 177 \text{ mm}$$

$$D=2R \Rightarrow D=177 \times 2 \Rightarrow D = 334 \text{ mm}$$

Avec :

Q : le débit.

S : la surface intérieur de la tubulure.

V : vitesse de remplissage.

R : rayon intérieur de la tubulure.

D : diamètre de la tubulure.

$$D=2R \Rightarrow D = 177 \times 2 \Rightarrow D = 334 \text{ mm}$$

D'après l'API 650 (tableau 5.6a)

On prend $D = 14'' = 355,6 \text{ mm}$ et $H_{\text{mort}} = 481 \text{ mm}$

On prend aussi la hauteur de l'écran flottant avec ses accessoires au-dessus $H_{\text{écran}} = 1,5 \text{ m}$

IV.3.3.3. Calcul de la hauteur global du la robe :

$$H_{\text{global}} = H_{\text{th}} + H_{\text{mort}} + H_{\text{écran}} = 13,75 + 0,481 + 1,5 = 15,73 \text{ m}$$

$$\eta_{\text{viroles}} = H / h_{\text{virole}} = 15,73 / 1,83 = 8,60 \text{ viroles}$$

Donc on prend : $\eta_{\text{viroles}} = 9 \text{ viroles}$

$$\text{Donc } H_{\text{global}} = 9 \times 1,83 = 16,47 \text{ m}$$

On concéderait $16,47 - 15,73 = 0,74 \text{ m}$ comme mesure de sécurité ente le toit et l'écran flottant.

IV.3.4. Nombre des tôles par virole :

$$\text{Périphérique de réservoir : } p = \pi \times D_{\text{max}} = 3,14 \times 57 = 179 \text{ m}$$

Donc :

$$N = p / \text{longueur des tôles.}$$

$$N = 179 / 9,424 = 19$$

On trouve 19 tôles par virole.

IV.3.5. Calcul des épaisseurs des viroles :**IV.3.5.1. Méthode de 1-foot :**

La méthode de 1-foot calcule les épaisseurs exigées aux points de conception 0,3 m au dessus de fond de chaque virole.

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

IV.3.5.2. Formule établie par un calcul théorique approché :

$$t_d = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_d} + CA \quad \text{API 650 (5.6.3.2).}$$

IV.3.5.3. Formule établie par les essais hydrostatiques :

$$t_t = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_t} \quad \text{API 650 (5.6.3.2).}$$

Avec:

H : hauteur, en m. La hauteur de remplissage limitée par le trop-plein.

D : diamètre nominal de réservoirs, en m.

G : Densité théorique du liquide.

CA : Surépaisseur de corrosion, en mm.

S_d : Contrainte admissible dans la robe.

S_t : Contrainte hydrostatique dans la robe.

IV.3.5.4. Application numérique :**1^{ère} virole :**

$$t_{d1} = \frac{4,9 \cdot 56,95(14,97-0,3)0,8}{137} + 3 = 26,92 \text{ mm}$$

$$t_{t1} = \frac{4,9 \cdot 56,95(14,97-0,3)}{154} = 26,60 \text{ mm}$$

2^{ème} virole :

$$t_{d2} = \frac{4,9 \cdot 56,95(13,14-0,3)0,8}{137} + 3 = 23,94 \text{ mm}$$

$$t_{t2} = \frac{4,9 \cdot 56,95(13,14-0,3)}{154} = 23,28 \text{ mm}$$

3^{ème} virole :

$$t_{d3} = \frac{4,9 \cdot 56,95(11,31-0,3)0,8}{137} + 3 = 20,95 \text{ mm}$$

$$t_{t3} = \frac{4,9 \cdot 56,95(11,31-0,3)}{154} = 19,96 \text{ mm}$$

4^{ème} virole :

$$t_{d4} = \frac{4,9 \cdot 56,95(9,48-0,3)0,8}{137} + 2 = 16,97 \text{ mm}$$

$$t_{t4} = \frac{4,9 \cdot 56,95(9,48-0,3)}{154} = 16,64 \text{ mm}$$

5^{ème} virole :

$$t_{d5} = \frac{4,9 \cdot 56,95(7,65-0,3)0,8}{137} + 2 = 13,98 \text{ mm}$$

$$t_{t5} = \frac{4,9 \cdot 56,95(7,65-0,3)}{154} = 13,33 \text{ mm}$$

6^{ème} virole :

$$t_{d6} = \frac{4,9 \cdot 56,95(5,82-0,3)0,8}{137} + 2 = 11 \text{ mm}$$

$$t_{t6} = \frac{4,9 \cdot 56,95(5,82-0,3)}{154} = 10,01 \text{ mm}$$

7^{ème} virole :

$$t_{d7} = \frac{4,9 \cdot 56,95(3,99-0,3)0,8}{137} + 2 = 8,01 \text{ mm}$$

$$t_{t7} = \frac{4,9 \cdot 56,95(3,99-0,3)}{154} = 6,69 \text{ mm}$$

8^{ème} virole :

$$t_{d8} = \frac{4,9 \cdot 56,95(2,16-0,3)0,8}{137} + 2 = 5,03 \text{ mm}$$

$$t_{t8} = \frac{4,9 \cdot 56,95(2,16-0,3)}{154} = 2,70 \text{ mm}$$

9^{ème} virole :

$$t_{d9} = \frac{4,9 \cdot 56,95(0,33-0,3)0,8}{137} + 2 = 2,05 \text{ mm}$$

$$t_{t9} = \frac{4,9 \cdot 56,95(0,33-0,3)}{154} = 0,055 \text{ mm}$$

IV.3.6. Les épaisseurs adoptées pour les tôles de la robe :

Tableau IV. 1: Tableau des épaisseurs des tôles de la robe

N° de viroles	La hauteur de liquide	L'épaisseur par le calcul théorique « t_d » (mm)	L'épaisseur par le calcul hydrostatique « t_t » (mm)	L'épaisseur adoptée « t » (mm)
1 ^{ère} virole	14,97	26,92	26,60	28mm
2 ^{ème} virole	13,14	23,94	23,28	25mm
3 ^{ème} virole	11,31	20,95	19,96	21mm
4 ^{ère} virole	9,48	16,97	16,64	18mm
5 ^{ème} virole	7,65	13,98	13,33	15mm
6 ^{ème} virole	5,82	11	10,01	12mm
7 ^{ème} virole	3,99	8,01	6,69	10mm
8 ^{ème} virole	2,16	5,03	2,70	9mm
9 ^{ème} virole	0,33	2,05	0,055	9mm

Note :

D'après l'API 650 (5.6.1.1) l'épaisseur minimale nominale des tôles de la robe est **8mm**.

IV.3.7. Calcul de la masse totale de la robe :

Tableau IV. 2 : Poids de chaque vérole de la robe

Numéro de vérole	L'épaisseur de la vérole (m)	La masse de la vérole (Kg)
01	0,028	71999,89
02	0,025	64285,61
03	0,021	53999,92
04	0,018	46285,64
05	0,015	38571,37
06	0,012	30857,09
07	0,010	25714,25
08	0,009	23151,40
09	0,009	23151,40

IV.3.8. La masse totale de la robe :

$$M_{\text{totaleR}} = \sum M_v = 378017 \text{ Kg}$$

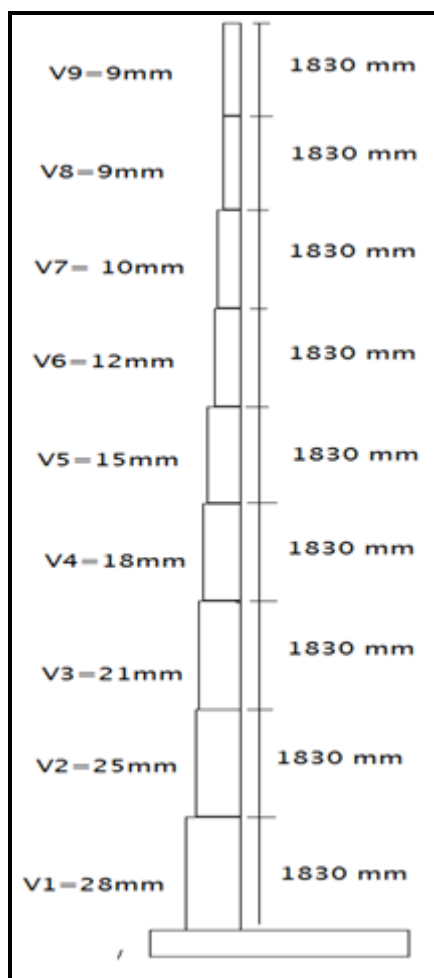


Figure IV. 1 : Disposition des véroles de la robe

IV.4. Cornière de rive :

IV.4.1. 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 deux fonctions :

- Rigidité de la robe.
- jonction entre le toit et celle-ci.

IV.4.2. Préparation :

La cornière sera découpée aux dimensions spécifiées sur les plans d'exécution et cintrées selon le diamètre extérieure de la virole supérieure de la robe.

Les travaux de préparation seront exécutés en atelier.

IV.4.3. Assemblage :

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

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

IV.4.4. Recommandation :

L'aile de projection 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, de taille L : 150.150.12 (D > 48).

IV.4.5. Hauteur de la cornière :

On a

$$\begin{aligned} W_C &= 0,6 \sqrt{R \times t} \\ &= 0,6 \sqrt{28,472 \times 0,009} = 0,304\text{m} \\ &= 304\text{mm} \end{aligned}$$

IV.5. Calcul de toit:**IV.5.1. Calcul initial de toit conique autoportant :****IV.5.1.1. Calcul de l'épaisseur des tôles de toit :**

- Toit conique autoportant : le toit est constitué par des fermes, chevrons et pannes sur poutre en treillis sans poteaux.
- Distance entre axe ne soit pas supérieure à 2pd (1915mm) mesuré sur la circonférence de réservoir.
- Je choisis un angle de 9,4737° donc il y'a 38 fermes
- D'après L'API 650 l'épaisseur des tôles de toit de devraient pas être inférieures à 5mm. API 650 (5.10.6)*
- En tenant compte de surépaisseur de corrosion qui égale à 1mm. Donc en prend une épaisseur pour les tôles de toit égal à : $e_t = t_{\min} + CA$

$$e_t = 5 + 1 = 6\text{mm}$$

Épaisseur adoptées est : **E (tôles de toit) = 6mm.**

- **On adopte une épaisseur de 6mm, avec un recouvrement de 30mm.**

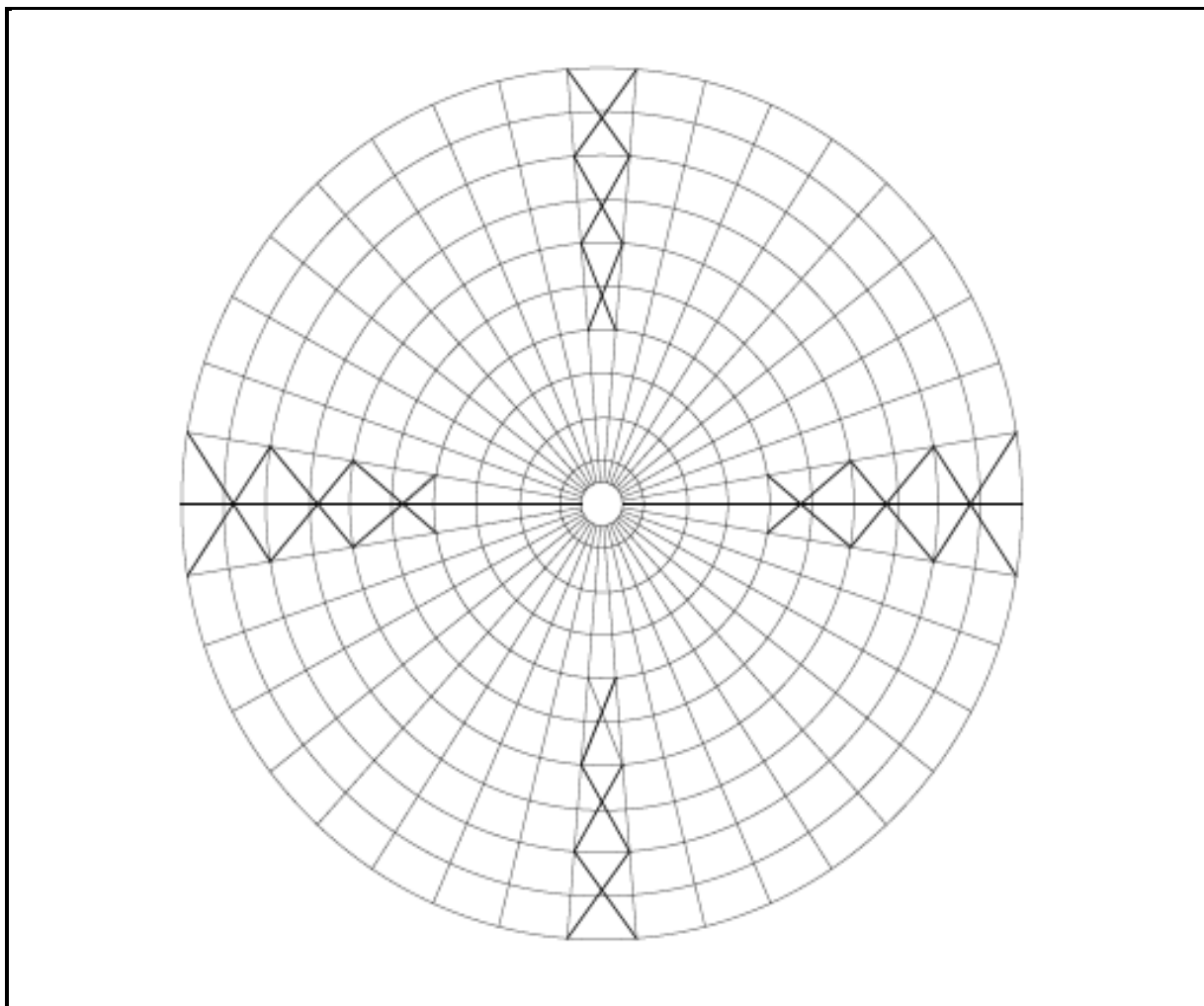


Figure IV. 2: Vue dessus de la toiture

IV.5.1.2. Calcul du poids total de toit :

IV.5.1.2.1. Poids de couverture :

$$\text{Surface de c\^one : } S = \pi \times R (R^2 + h^2)^{0,5}$$

$$S = \pi \times 28,5 (28,5^2 + 3,5625^2)^{0,5} = 2571,62\text{m}^2$$

$$\text{On 'a } S_{\text{T\^oles}} = (9,424 - Lr) \times (1,83 - Lr)$$

$$S_{\text{T\^oles}} = (9,424 - 0,03) \times (1,83 - 0,03) = 16,91\text{m}^2$$

$$\text{Donc } N_{\text{T\^oles}} \text{ du toit} = \frac{S}{S_{\text{T\^oles}}} = \frac{2571,62}{16,91} = 152 \text{ t\^oles}$$

$$P_{\text{couvertures}} = \rho \times e \times S$$

$$P_{\text{couvertures}} = 7850 \times 0,006 \times 2571,62 = \mathbf{121123\text{kg}}$$

IV.5.1.2.2. Poids de charpente :

Tableau IV. 3: Tableau récapitulatif du poids de la charpente

Type	Désignation	Nombre	Longueur (m)	Poids unitaire (kg/m)	Poids pièce (kg)	Poids total (kg)
UUPN380	Chevron	342	3,03	130	393 ,9	134713,8
UUPN380	Chevron	342	3,00	130	390	133380
UUPN260	Diagonal	38	3,57	78	278,46	10581,48
UUPN260	Diagonal	38	3,18	78	248,04	9425,52
UUPN260	Diagonal	38	2,79	78	217,62	8269,56
UUPN260	Diagonal	38	2,40	78	187,2	7113,6
UUPN260	Diagonal	38	2 ,00	78	156	5928
UUPN260	Diagonal	38	1,60	78	124,8	4742,4
UUPN260	Diagonal	38	1,20	78	93,6	3556,8
UUPN260	Diagonal	38	0,80	78	62,4	2371,2
UUPN260	Diagonal	38	0 ,40	78	31,2	1185,6
UUPN200	Arbalétrier	38	4.37	52	227,24	8635,12
UUPN200	Arbalétrier	38	4,10	52	213,2	8101,6
UUPN200	Arbalétrier	38	3,84	52	199,68	7587,84
UUPN200	Arbalétrier	38	3,4	52	176,8	6718,4
UUPN200	Arbalétrier	38	3,23	52	167,96	6382,48
UUPN200	Arbalétrier	38	3,11	52	161,72	6145,36
UUPN200	Arbalétrier	38	3,03	52	157,56	5987,28
UPN 240	Entretoise	38	4,284	34	145,656	5534,928
UPN 220	Entretoise	38	3,856	30	115,68	4395,84
UPN 200	Entretoise	38	3,428	26	89,128	3386,864
UPN 180	Entretoise	38	3,000	22,5	67,5	2565
UPN 160	Entretoise	38	2,572	19,3	49,6396	1886,3048
UPN 140	Entretoise	38	2,144	16,4	35,1616	1336,1408
UPN 120	Entretoise	38	1,716	13,7	23,5092	893,3496
UPN 120	Entretoise	38	1,288	13,7	17,6456	670,5328
UPN 120	Entretoise	38	0,860	13,7	11,782	447,716
Total nets:						391943

IV.5.1.2.3. Poids total de toit :

$$P_T = P_{\text{couverture}} + P_{\text{charpente}}$$

$$AN : P_T = 121123 + 391943 = 513066 \text{ Kg}$$

IV.6. Conclusion:

Le fond, la robe et le toit sont les parties du réservoir les plus sollicitées aux charges engendrées par le produit stocké et aux effets extérieurs, ils doivent par conséquent être soigneusement conçus.

Chapitre V

Dimensionnement de la charpente

V. Dimensionnement de la charpente du toit :

V.1. Introduction :

Dans ce chapitre, notre travail consiste à choisir les éléments structurales et les vérifier afin d'assurer la stabilité et la résistance de l'ouvrage aux différentes sollicitations auxquelles il est soumis en utilisant les valeurs des charges pondérées (ELU). La vérification relative à la flèche sera effectuée sous charges non pondérées (ELS). Les éléments que nous avons étudiés dans ce chapitre sont : les pannes, les chevrons, les poutres en treilles (la ferme) et les poutres au vent. Le règlement utilisé c'est L'EUROCODE 3.

Pour assurer la stabilité de toit, il est nécessaire de vérifier tout les éléments secondaires qui contiennent la charpente autoportée.

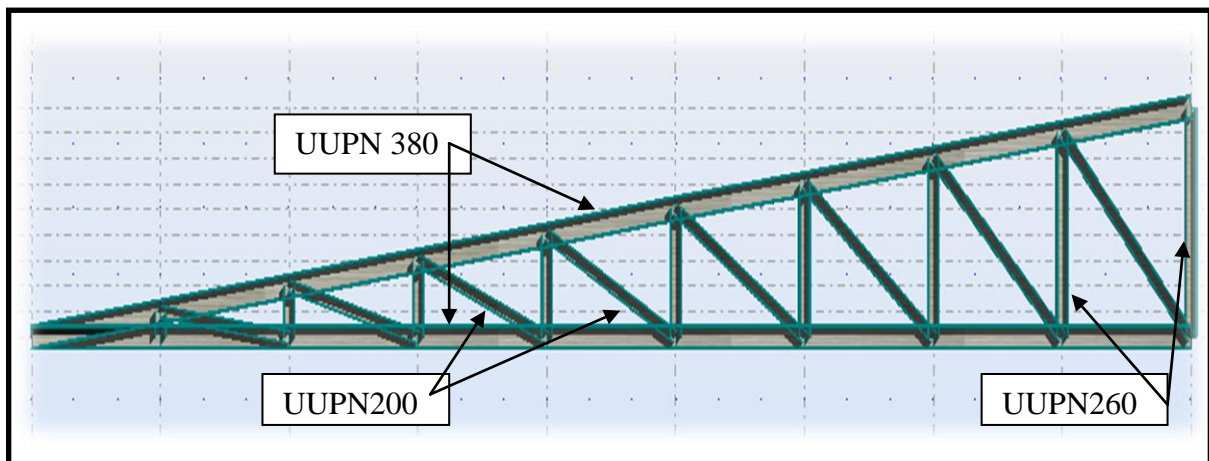


Figure V. 1: Présentation de la ferme

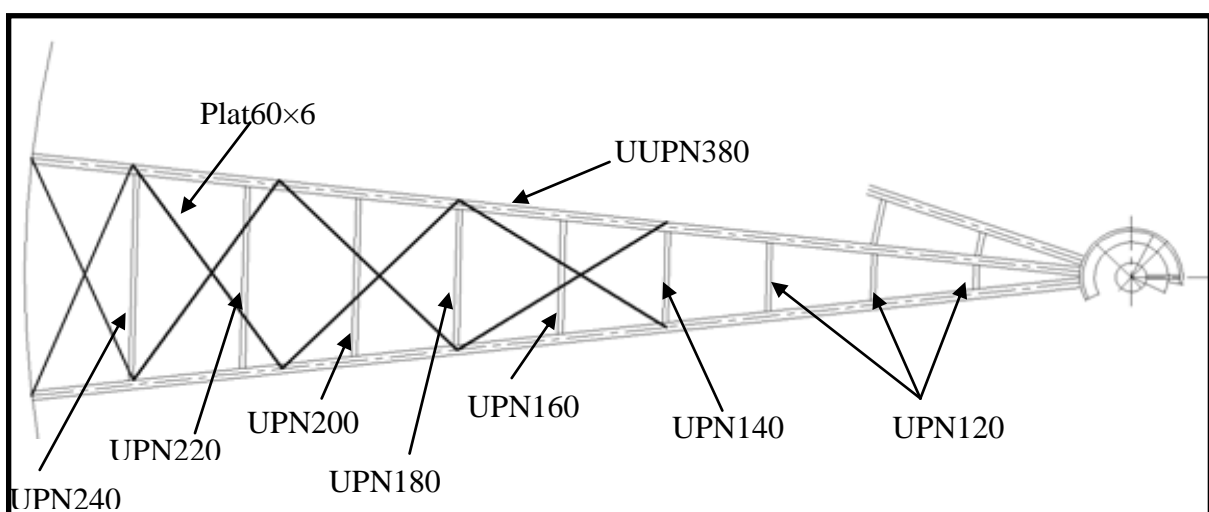


Figure V. 2 : Disposition des pannes et des chevrons sur le toit

V.2. Etude de Chevron :

On vérifie les chevrons avec logiciel robot.

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME: **CM66**

TYPE D'ANALYSE: **Vérification des pièces**

FAMILLE: **1 Barres**

PIECE: **1 Barrel**

POINT: **2**

COORDONNEE: **x = 1.00 L = 3.00 m**

CHARGEMENTS:

Cas de charge décisif: **5 ELU 1*1.35+(3+4)*0.90**

MATERIAU:

ACIER E28 $f_y = 275.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION: **UUPN 380**

ht=38.0 cm

bf=20.4 cm

ea=1.4 cm

es=1.6 cm

$A_y=32.64$ cm²

$I_y=31520.00$ cm⁴

$W_{ely}=1658.95$ cm³

$A_z=102.60$ cm²

$I_z=2109.00$ cm⁴

$W_{elz}=206.76$ cm³

$A_x=157.91$ cm²

$I_x=294.50$ cm⁴

CONTRAINTES:

$\text{SigN} = -269.42/157.91 = -17.06$ MPa

$\text{SigFy} = -124.97/1658.95 = -75.33$ MPa



PARAMETRES DE DEVERSEMENT:

PARAMETRES DE FLAMBEMENT:



en y:



en z:

FORMULES DE VERIFICATION:

$\text{SigN} + \text{SigFy} = -17.06 + -75.33 = -92.39 < 275.00$ MPa (3.521)

$1.54 * \text{Tauz} = 1.54 * 5.00 = 7.71 < 275.00$ MPa (1.313)

DEPLACEMENTS LIMITES



Flèches

$u_y = 0.0$ cm < $u_y \text{ max} = L/200.00 = 1.5$ cm

Vérifié

Cas de charge décisif: 1 PERM1

$u_z = 1.4$ cm < $u_z \text{ max} = L/200.00 = 1.5$ cm

Vérifié

Cas de charge décisif: 1 PERM1



Déplacements Non analysé

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME: CM66

TYPE D'ANALYSE: Vérification des pièces

FAMILLE: 1 Barres

PIECE: 10 Barre_10

POINT: 3

COORDONNEE: x = 1.00 L = 3.03 m

CHARGEMENTS:

Cas de charge décisif: 5 ELU 1*1.35+(3+4)*0.90

MATERIAU:

ACIER E28 $f_y = 275.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION: UUPN 380

ht=38.0 cm

bf=20.4 cm

ea=1.4 cm

es=1.6 cm

$A_y=32.64$ cm²

$I_y=31520.00$ cm⁴

$W_{ely}=1658.95$ cm³

$A_z=102.60$ cm²

$I_z=2109.00$ cm⁴

$W_{elz}=206.76$ cm³

$A_x=157.91$ cm²

$I_x=294.50$ cm⁴

CONTRAINTES:

$\text{SigN} = -29.07/157.91 = -1.84$ MPa

$\text{SigFy} = -29.28/1658.95 = -17.65$ MPa



PARAMETRES DE DEVERSEMENT:

PARAMETRES DE FLAMBEMENT:



en y:



en z:

FORMULES DE VERIFICATION:

$\text{SigN} + \text{SigFy} = -1.84 + -17.65 = |-19.49| < 275.00$ MPa (3.521)

$1.54 * \text{Tau}_{uz} = |1.54 * -5.60| = |-8.63| < 275.00$ MPa (1.313)

DEPLACEMENTS LIMITES



Flèches

$u_y = 0.0$ cm < $u_y \text{ max} = L/200.00 = 1.5$ cm

Vérifié

Cas de charge décisif: 1 PERM1

$u_z = 0.8$ cm < $u_z \text{ max} = L/200.00 = 1.5$ cm

Vérifié

Cas de charge décisif: 1 PERM1



Déplacements Non analysé

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME: CM66

TYPE D'ANALYSE: Vérification des pièces

FAMILLE: 2 Diagonal

PIECE: 19 Diagonal_1

POINT: 2

COORDONNEE: x = 1.00 L = 3.57 m

CHARGEMENTS:

Cas de charge décisif: 5 ELU 1*1.35+(3+4)*0.90

MATERIAU:

ACIER E28 $f_y = 275.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION: UUPN 260

ht=26.0 cm

bf=18.0 cm

ea=1.0 cm

es=1.4 cm

Ay=25.20 cm²

Iy=9640.00 cm⁴

Wely=741.54 cm³

Az=52.00 cm²

Iz=1172.00 cm⁴

Welz=130.22 cm³

Ax=96.13 cm²

Ix=98.53 cm⁴

CONTRAINTES:

SigN = 41.07/96.13 = 4.27 MPa

SigFy = 122.41/741.54 = 165.08 MPa



PARAMETRES DE DEVERSEMENT:

PARAMETRES DE FLAMBEMENT:



en y:



en z:

FORMULES DE VERIFICATION:

SigN + kFy*SigFy = 4.27 + 1.00*165.08 = 169.35 < 275.00 MPa (3.521)

1.54*Tauaz = |1.54*-6.99| = |-10.76| < 275.00 MPa (1.313)

DEPLACEMENTS LIMITES



Flèches

uy = 0.0 cm < uy max = L/200.00 = 1.8 cm

Vérifié

Cas de charge décisif: 1 PERM1

uz = 0.7 cm < uz max = L/200.00 = 1.8 cm

Vérifié

Cas de charge décisif: 1 PERM1



Déplacements Non analysé

Profil correct !!!

CALCUL DES STRUCTURES ACIER

NORME: CM66

TYPE D'ANALYSE: Vérification des familles

FAMILLE: 3 Arbalétrier

PIECE: 28 Arbalétrier_CM66_28 **POINT:** 3

COORDONNEE: $x = 1.00$ $L = 4.37$ m

CHARGEMENTS:

Cas de charge décisif: 5 ELU $1 * 1.35 + (3+4) * 0.90$

MATERIAU:

ACIER E28 $f_y = 275.00$ MPa



PARAMETRES DE LA SECTION: UUPN 200

ht=20.0 cm

bf=15.0 cm

ea=0.9 cm

es=1.1 cm

$A_y = 17.25$ cm²

$I_y = 3820.00$ cm⁴

$W_{ely} = 382.00$ cm³

$A_z = 34.00$ cm²

$I_z = 556.18$ cm⁴

$W_{elz} = 74.16$ cm³

$A_x = 64.05$ cm²

$I_x = 46.09$ cm⁴

CONTRAINTES:

$\text{SigN} = 357.63/64.05 = 55.84$ MPa

$\text{SigFy} = 19.44/382.00 = 50.88$ MPa



PARAMETRES DE DEVERSEMENT:

PARAMETRES DE FLAMBEMENT:



en y:



en z:

$L_z = 4.37$ m

$L_{fz} = 4.37$ m

$\text{Lambda } z = 148.17$

$\text{Muz} = 1.69$

$k_{1z} = 1.77$

FORMULES DE VERIFICATION:

$k_1 * \text{SigN} + k_{Fy} * \text{SigFy} = 1.77 * 55.84 + 1.00 * 50.88 = 149.61 < 275.00$ MPa (3.521)

$1.54 * \text{Tau}_{uz} = |1.54 * -2.10| = |-3.23| < 275.00$ MPa (1.313)

Profil correct !!!

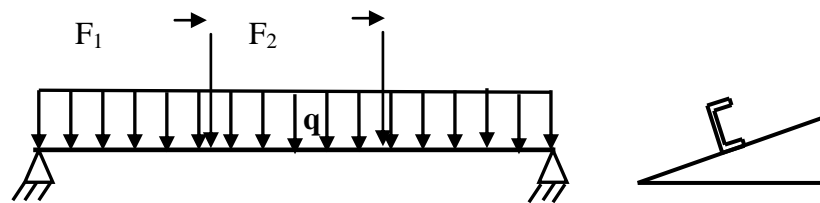
V.3. Vérification des pannes :

Pour assurer la stabilité de toiture, il est nécessaire de vérifier la résistance des pannes qui reçoivent des charges réparties donnant lieu à une flexion déviée, on dispose neuf pannes espacées de la même distance.

Par rapport à la disposition des chevrons et la variation de la longueur des pannes, on va vérifier la stabilité de toutes les pannes **p₁, p₂.....p₉**

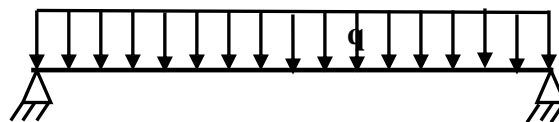
V.3.1 Panne p₁ :

On estime un profile UPN240.



Comme indiqué sur la figure ci-dessus la panne est chargée par deux types de charge, une charge répartie q et deux charges concentrées. Pour résoudre ce problème on utilise la méthode de superposition.

V.3.1.1. Résolution de 1^{er} système :



V.3.1.1.1 Charges permanentes G :

- Poids propre de toiture : $G_{\text{toiture}} = \rho \times E_p = 7850 \times 0,006 = 47,1 \text{ dan/m}^2$
- Poids propre de profil UPN240 : $G_p = 34 \text{ dan/m}$.
- Poids propre : $G = 34 + 47,1 \times 2,589 = 155,97 \text{ dan/m}$

V.3.1.1.2 Charges variables q :

- Charge de vent : $q_{\text{extrême}} = 223,14 \text{ dan/m}^2$.
 $d = 2,589 \text{ m}; \Rightarrow W = q \times d = 577,71 \text{ dan/m}$.
- Charge de neige : $q_s = 10,56 \text{ daN/m}^2$: charge uniformément répartie du neige
 $S = 10,56 \times 2,887 = 27,35 \text{ daN/m}$

V.3.1.1.3. La combinaison des charges :**V.3.1.1.3.1. L'état limite ultime :**

$$1,35G + 1,5S = 1,35 \times 155,97 + 1,5 \times 27,35 = 251,59 \text{ daN/m}$$

$1,35G + 1,5W = 1,35 \times 155,97 + 1,5 \times 577,71 = 1077,13$ daN/m c'est la charge la plus défavorable.

$$1,35G + 0,9(S+W) = 1,35 \times 155,97 + 0,9 \times (27,35 + 577,71) = 755,11 \text{ daN/m}$$

V.3.1.1.3.2. L'état limite de service :

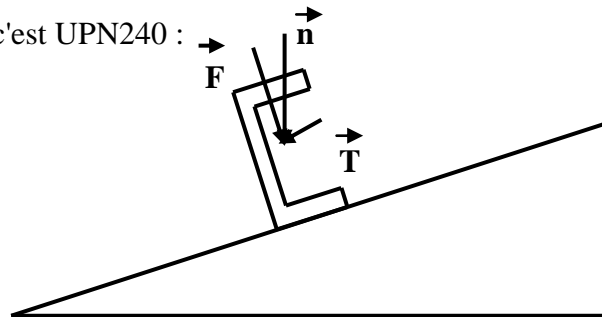
$$G + S = 155,97 + 27,35 = 183,32 \text{ daN/m}$$

$$G + W = 155,97 + 577,71 = 733,68 \text{ daN/m}$$

$G + (S+W) = 155,97 + (27,35 + 577,71) = 761,03$ daN/m c'est la charge la plus défavorable.

V.3.1.1.4. Vérification de la stabilité (la flèche) :

Le profile vérifié c'est UPN240 :



La vérification de la flèche se fait avec des charges non pondérés(ELS).

V.3.1.1.4.1 Projection de n suivant les axes y-y', z-z' :

Suivant z-z' :

$$F = n \times \cos \alpha = 761,03 \times \cos 7,125 = 755,15 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T = n \times \sin \alpha = 761,03 \times \sin 7,125 = 94,39 \text{ daN/m}$$

$$\delta_y = \frac{5 \times T \times L^4}{384 \times E \times I_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{94,39 \times 10^{-2} \times (428,4)^4}{2,1 \times 10^6 \times 248} = 0,795 \text{ Cm}, \quad I_z = 248 \text{ cm}^4$$

$$\delta_z = \frac{5 \times F \times L^4}{384 \times E \times I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{755,15 \times 10^{-2} \times (428,4)^4}{2,1 \times 10^6 \times 3600} = 0,438 \text{ cm}, \quad I_y = 3600 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{428,4}{200} = 2,142 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.1.1.5. Calcul du moment fléchissant suivant les deux axes :

- **Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

Suivant z-z' :

$$F = n \times \cos \alpha = 1077,13 \times \cos 7,125 = 1068,81 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T = n \times \sin \alpha = 1077,13 \times \sin 7,125 = 133,6 \text{ daN/m}$$

V.3.1.1.5.1. Le moment fléchissant sur l'axe y – y' :

La panne c'est une poutre appuyée sur 2 appuis, donc :

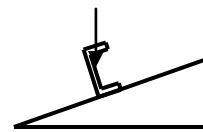
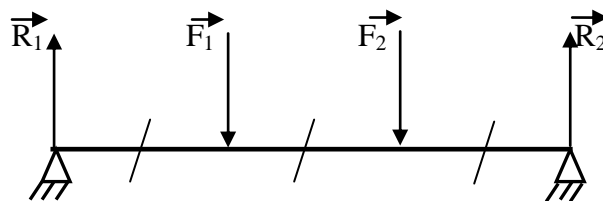
$$M_{y, sd} = F \frac{L^2}{8} = 1068,81 \frac{(4,284)^2}{8}$$

$$M_{y, sd} = 2451,94 \text{ dan.m}$$

V.3.1.1.5.2. Le moment fléchissant sur l'axe z – z' :

$$M_{z, sd} = T \frac{L^2}{8} = 133,6 \frac{(4,284)^2}{8}$$

$$M_{z, sd} = 306,49 \text{ dan.m}$$

V.3.1.2. Résolution de 2^{ème} système :**V.3.1.2.1. Vérification de la stabilité (la flèche) :**

$$F_1 = F_2 = G_p \times e = 34 \times 2,589 = 88,03 \text{ daN}$$

- **Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

suivant y-y' :

$$F_{1y} = F_1 \times \sin \alpha = 88,03 \times \sin 7,125 = 10,92 \text{ daN}$$

suivant z-z' :

$$F_{1z} = F_1 \times \cos \alpha = 88,03 \times \cos 7,125 = 87,35 \text{ daN}$$

$$\delta_z = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_y} = \frac{(87,35)^2 \times 10^{-2} \times (428,4)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 3600} = 1,323 \text{ cm}, \quad I_y = 3600 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_z} = \frac{(10,92)^2 \times 10^{-2} \times (428,4)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 248} = 0,300 \text{ cm}, \quad I_z = 248 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{428,4}{200} = 2,142 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.1.2.2. Calcul de moments fléchissant suivant les deux axes :

$$F_{1Y}=10,92 \text{ daN}$$

$$F_{1Z}= 87,35 \text{ daN}$$

Après le calcul RDM de moment fléchissant maximum on trouve :

$$M_{f_{\max}} = R_1 \cdot 2,856 - F_1(2,856 - 1,428) = 1,428 \cdot F_1, \text{ avec: } R_1 = F_1$$

V.3.1.2.2.1 Le moment fléchissant sur l'axe y – y' et l'axe z – z' :

$$M_{f_y} = 1,428 \times F_{1Z} = 1,428 \times 87,35 = 124,74 \text{ dan.m}$$

$$M_{f_z} = 1,428 \times F_{1Y} = 1,428 \times 10,92 = 15,59 \text{ dan.m}$$

V.3.1.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes 1 et 2 :

$$f_y = \delta_y + \delta_y' = 0,795 + 0,300 = 1,095 \text{ cm}$$

$$f_z = \delta_z + \delta_z' = 1,323 + 0,438 = 1,761 \text{ cm}$$

$$f_y \text{ et } f_z \leq \frac{l}{200} = \frac{428,4}{200} = 2,142 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.1.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :

Le profile vérifié est "UPN240":

V.3.1.4.1. Le moment fléchissant globale sur l'axe y – y' :

$$M_y = M_{y, sd} + M_{fy} = 2451,94 + 124,74 = 2576,68 \text{ dan.m}$$

V.3.1.4. 2. Le moment fléchissant globale sur l'axe z–z' :

$$M_z = M_{z, sd} + M_{fz} = 306,49 + 15,59 = 322,08 \text{ dan.}$$

V.3.1.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :

$$M_{pl.z.Rd} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M_0}, \text{ Avec : } f_y = 235 \text{ N/mm}^2 ; \text{ et } W_{pl,z} = 75,7 \text{ cm}^3, \gamma_{M_0} = 1,1$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 75,7 \times 23,5 / 1,1 = 1617,23 \text{ dan.m}$$

V.3.1.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :

$$M_{pl.y.Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M_0} \text{ Avec : } W_{pl,y} = 358 \text{ cm}^3.$$

$$\Rightarrow M_{pl.y.Rd} = 358 \times 23,5 / 1,1 = 8299,09 \text{ dan.m}$$

Alors : $\left(\frac{2576,68}{8299,09} \right) + \left(\frac{322,08}{1617,23} \right) = 0,510 < 1$ donc la panne 1 résiste à la flexion biaxiale.

V.3.1.7. Vérification de résistance de panne 1 au déversement: (eurocode3 p176)

A cause de la sollicitation de panne (flexion biaxiale), il y a le risque de déversement, donc la vérification de ce phénomène est nécessaire.

Pour que la panne résiste au diversement, on vérifie la formule suivante :

$$M_{y, sd} \leq \frac{\chi_{LT} \times \beta_w \times W_{pl, y} \times f_y}{\gamma_{M1}}$$

$\beta_w = 1$ (la classe de l'UPN240 est 1, voir l'Eurocode 3 page 139, 140,141).

χ_{LT} : est le coefficient de réduction pour le diversement. $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + (\phi_{LT}^2 - \overline{\lambda_{LT}})^{0.5}}$

V.3.1.7.1. Calcul de l'élancement géométrique $\overline{\lambda_{LT}}$

$$\overline{\lambda_{LT}} = \left[\beta_w \cdot W_{pl, y} \cdot f_y / M_{cr} \right]^{0.5}$$

V.3.1.7.2. Calcul de moment critique M_{cr} (Annexe F) :

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \left[\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{0.5}; L=1.428m$$

UPN240=>h=240mm, b=85mm, t_w=9,5mm, t_f=13mm, I_z=248cm⁴, I_t=20,9cm⁴
E=210000N/mm², G=80769,2307 N/mm²

V.3.1.7.3. Moment d'inertie de gauchissement:

$$I_w = I_z \left(\frac{h - t_f}{2} \right)^2 = 248 \left(\frac{24 - 1.3}{2} \right)^2 = 32230,08 \text{ cm}^6$$

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^2 \cdot 248}{(142,8)^2} \left[\frac{32230,08}{248} + \frac{(142,8)^2 \cdot 80769,23 \cdot 10^2 \cdot 20,9}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^2 \cdot 248} \right]^{0.5} = 2,06 \cdot 10^7 \text{ N.cm}$$

$$\Rightarrow \overline{\lambda_{LT}} = \left[1 \times 235 \times 358 / 2,06 \times 10^7 \right]^{0.5} = 0.064$$

$$\overline{\lambda_{LT}} = [\lambda_{LT} / \lambda_1] \beta_w^{0.5} \Rightarrow \lambda_{LT} = 0,064 \times 93,9 = 6,001, \text{ il y a risque de déversement.}$$

On utilise le tableau 5.5.1 (p171 de l'eurocode 3) pour trouver la valeur de χ_{LT}

- Profile laminé=> $\alpha = 0.21$ donc la courbe "a"; $\chi_{LT} = 1$

$$\text{D'où } Mb, Rd = \frac{1 \times 1 \times 358 \times 23.5}{1.1} = 7648.18 \text{ dan.m}$$

$$M_{y, sd} = 1393.07 \frac{(1.428)^2}{8} = 355,09 < Mb, Rd = 7648,18 \text{ dan.m}$$

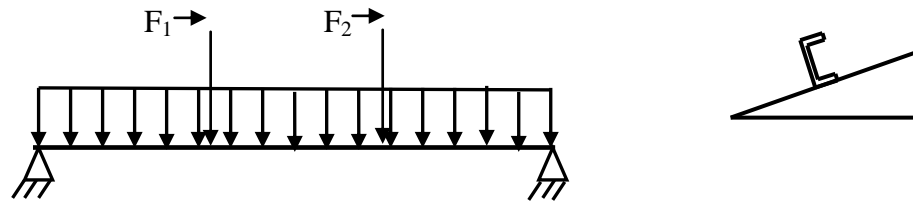
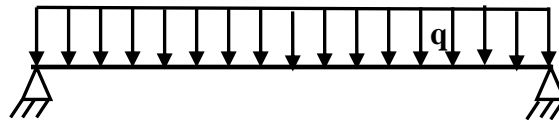
Donc pas de risque de diversement.

Remarque :

Pour mieux comprendre les détails, consultez l'eurocode03 (page 176 et l'annexe F de même ouvrage).

V.3.2. Panne p₂ :

On estime un profile UPN220.

**V.3.2.1. Résolution de 1^{er} système****V.3.2.1.1. Charges permanentes G :**

- Poids propre de toiture : $G_{\text{toiture}} = \rho \times E_p = 7850 \times 0,006 = 47,1 \text{ dan/m}^2$
- Poids propre de profil UPN220 : $G_p = 30 \text{ dan/m}$.
- Poids propre : $G = 30 + 47,1 \times 2,589 = 151,97 \text{ dan/m}$

V.3.2.1.2. Charges variables q :

- Charge de vent : $q_{\text{extrême}} = 223,14 \text{ dan/m}^2$.
 $d = 2,589 \text{ m}; \Rightarrow W = q \times d = 577,71 \text{ dan/m}$.
- Charge de neige : $q_s = 10,56 \text{ daN/m}^2$: charge uniformément répartie du neige
 $S = 10,56 \times 2,887 = 27,35 \text{ daN/m}$

V.3.2.1.3. La combinaison des charges :**V.3.2.1.3.1. L'état limite ultime :**

$$1,35G + 1,5S = 1,35 \times 151,97 + 1,5 \times 27,35 = 246,19 \text{ daN/m}$$

$$1,35G + 1,5W = 1,35 \times 151,97 + 1,5 \times 577,71 = \mathbf{1071,73} \text{ daN/m c'est la charge la plus défavorable.}$$

$$1,35G + 0,9(S+W) = 1,35 \times 151,97 + 0,9 \times (27,35 + 577,71) = 749,71 \text{ daN/m}$$

V.3.2.1.3.2. L'état limite de service :

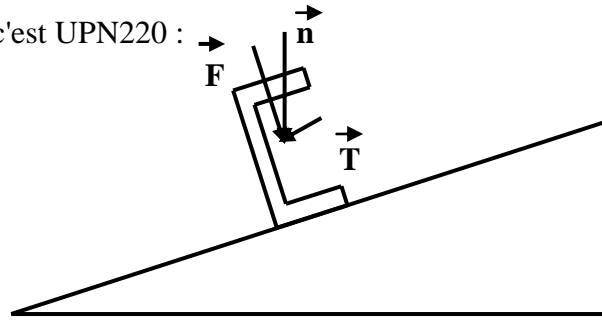
$$G + S = 151,97 + 27,35 = 179,32 \text{ daN/m}$$

$$G + W = 151,97 + 577,71 = 729,68 \text{ daN/m}$$

$$G + (S+W) = 151,97 + (27,35 + 577,71) = \mathbf{757,03} \text{ daN/m c'est la charge la plus défavorable.}$$

V.3.2.1.4. Vérification de la stabilité (la flèche) :

Le profile vérifié c'est UPN220 :



La vérification de la flèche se fait avec des charges non pondérés(ELS).

V.3.2.1.4.1 Projection de n suivant les axes y-y', z-z' :

Suivant z-z' :

$$F = n \times \cos \alpha = 757,03 \times \cos 7,125 = 751,18 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T = n \times \sin \alpha = 757,03 \times \sin 7,125 = 93,69 \text{ daN/m}$$

$$\delta y = \frac{5 \times T \times L^4}{384 \times E \times I_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{93,69 \times 10^{-2} \times (385,6)^4}{2,1 \times 10^6 \times 197} = 0,652 \text{ Cm}, \quad I_z = 197 \text{ cm}^4$$

$$\delta z = \frac{5 \times F \times L^4}{384 \times E \times I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{751,18 \times 10^{-2} \times (385,6)^4}{2,1 \times 10^6 \times 2690} = 0,348 \text{ cm}, \quad I_y = 2690 \text{ cm}^4$$

$$\delta y \text{ et } \delta z \leq \frac{l}{200} = \frac{385,6}{200} = 1,928 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.2.1.5. Calcul du moment fléchissant suivant les deux axes :

- **Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

Suivant z-z' :

$$F = n \times \cos \alpha = 1071,73 \times \cos 7,125 = 1063,45 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T = n \times \sin \alpha = 1071,73 \times \sin 7,125 = 132,93 \text{ daN/m}$$

V.3.2.1.5.1. Le moment fléchissant sur l'axe y – y' :

La panne c'est une poutre appuyée sur 2 appuis, donc :

$$M_{y, sd} = F \frac{L^2}{8} = 1063,45 \frac{(3,856)^2}{8}$$

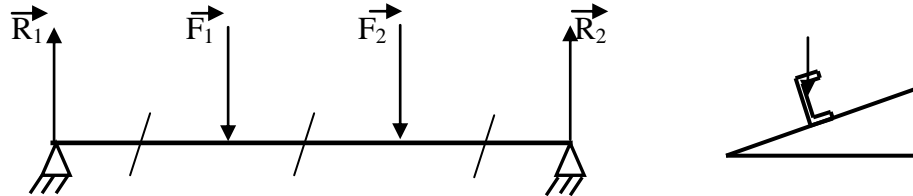
$$M_{y, sd} = 1976,52 \text{ dan.m}$$

V.3.2.1.5.2. Le moment fléchissant sur l'axe z – z' :

$$M_{z, sd} = T \frac{L^2}{8} = 132,93 \frac{(3,856)^2}{8}$$

$$M_{z, sd} = 247,07 \text{ dan.m}$$

V.3.2.2. Résolution de 2^{ème} système :



V.3.2.2.1. Vérification de la stabilité (la flèche) :

$$F_1 = F_2 = G_p \times e = 30 \times 2,589 = 77,67 \text{ daN}$$

- **Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

suivant y-y' :

$$F_{1Y} = F_1 \times \sin \alpha = 77,67 \times \sin 7,125 = 9,63 \text{ daN}$$

suivant z-z' :

$$F_{1Z} = F_1 \times \cos \alpha = 77,67 \times \cos 7,125 = 77,07 \text{ daN}$$

$$\delta_z = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_y} = \frac{(77,07)^2 \times 10^{-2} \times (385,6)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 2690} = 1,005 \text{ cm}, \quad I_y = 2690 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_z} = \frac{(9,63)^2 \times 10^{-2} \times (385,6)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 197} = 0,214 \text{ cm}, \quad I_z = 197 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{385,6}{200} = 1,928 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.2.2.2. Calcul de moments fléchissant suivant les deux axes :

$$F_{1Y} = 9,63 \text{ daN}$$

$$F_{1Z} = 77,07 \text{ daN}$$

Après le calcul RDM de moment fléchissant maximum on trouve :

$$M_{f_{\max}} = R_1 \cdot 2,570 - F_1(2,570 - 1,285) = 1,285 \cdot F_1, \text{ avec: } R_1 = F_1$$

V.3.2.2.2.1 Le moment fléchissant sur l'axe y – y' et l'axe z – z' :

$$M_{f_y} = 1,285 \times F_{1Z} = 1,285 \times 77,07 = 99,03 \text{ dan.m}$$

$$M_{f_z} = 1,285 \times F_{1Y} = 1,285 \times 9,63 = 12,38 \text{ dan.m}$$

V.3.2.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes 1 et 2 :

$$f_y = \delta_y + \delta_y' = 0,652 + 0,214 = 0,866 \text{ cm}$$

$$f_z = \delta_z + \delta_z' = 0,348 + 1,005 = 1,353 \text{ cm}$$

$$f_y \text{ et } f_z \leq \frac{l}{200} = \frac{385,6}{200} = 1,928 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.2.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :

Le profile vérifié est "UPN220".

V.3.2.4.1. Le moment fléchissant globale sur l'axe y - y' :

$$M_y = M_{y, sd} + M_{fy} = 1976,52 + 99,03 = 2075,55 \text{ dan.m}$$

V.3.2.4.2. Le moment fléchissant globale sur l'axe z-z' :

$$M_z = M_{z, sd} + M_{fz} = 247,07 + 12,38 = 259,45 \text{ dan.m}$$

V.3.2.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :

$$M_{pl.z.Rd} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M_0}, \text{ Avec : } f_y = 235 \text{ N/mm}^2 ; \text{ et } W_{pl,z} = 64,1 \text{ cm}^3, \gamma_{M_0} = 1,1$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 64,1 \times 23,5 / 1,1 = 1369,41 \text{ dan.m}$$

V.3.2.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :

$$M_{pl.y.Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M_0} \text{ Avec : } W_{pl,y} = 292 \text{ cm}^3.$$

$$\Rightarrow M_{pl.y.Rd} = 392 \times 23,5 / 1,1 = 6238,18 \text{ dan.m}$$

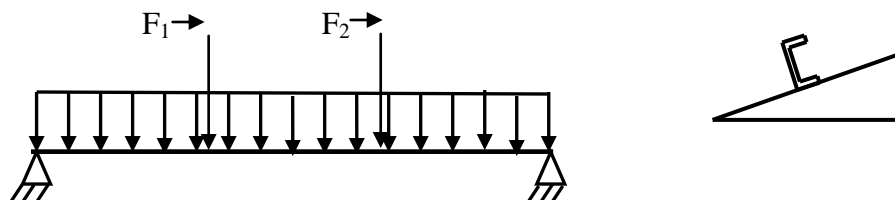
$$\text{Alors : } \left(\frac{2075,55}{6238,18} \right) + \left(\frac{259,45}{1369,41} \right) = 0,522 < 1 \text{ donc la panne 1 résiste à la flexion biaxiale.}$$

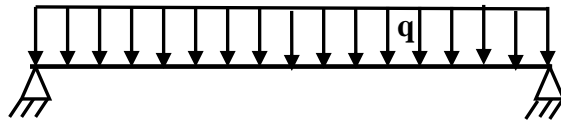
Remarque:

Pas de risque de déversement de la panne a cause de la disposition des chevrons qui empêche la panne de déverser.

V.3.3. Panne p₃ :

On estime un profile UPN200.



V.3.3.1. Résolution de 1^{er} système :**V.3.3.1.1. Charges permanentes G :**

- Poids propre de toiture : $G_{\text{toiture}} = \rho \times E_p = 7850 \times 0,006 = 47,1 \text{ dan/m}^2$
- Poids propre de profil UPN200 : $G_p = 26 \text{ dan/m}$.
- Poids propre : $G = 26 + 47,1 \times 2,589 = 147,97 \text{ dan/m}$

V.3.3.1.2. Charges variables q :

- Charge de vent : $q_{\text{extrême}} = 223,14 \text{ dan/m}^2$.
 $d = 2,589 \text{ m}; \Rightarrow W = q \times d = 577,71 \text{ dan/m}$.
- Charge de neige : $q_s = 10,56 \text{ daN/m}^2$: charge uniformément répartie du neige
 $S = 10,56 \times 2,887 = 27,35 \text{ daN/m}$

V.3.3.1.3. La combinaison des charges :**V.3.3.1.3.1. L'état limite ultime :**

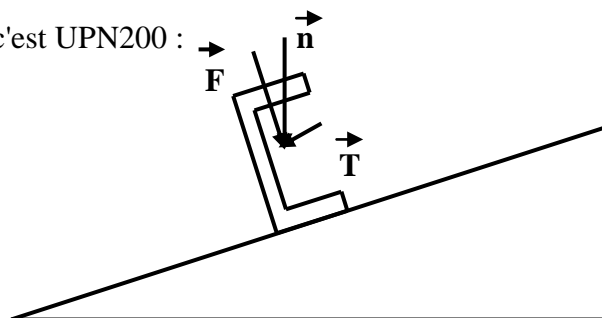
- $1,35G + 1,5S = 1,35 \times 147,97 + 1,5 \times 27,35 = 240,78 \text{ daN/m}$
- $1,35G + 1,5W = 1,35 \times 147,97 + 1,5 \times 577,71 = \mathbf{1066,32 \text{ daN/m}}$ c'est la charge la plus défavorable.
- $1,35G + 0,9(S+W) = 1,35 \times 147,97 + 0,9 \times (27,35 + 577,71) = n = 744,31 \text{ daN/m}$

V.3.3.1.3.2. L'état limite de service :

- $G + S = 147,97 + 27,35 = 175,32 \text{ daN/m}$
- $G + W = 147,97 + 577,71 = 725,68 \text{ daN/m}$
- $G + (S+W) = 147,97 + (27,35 + 577,71) = \mathbf{753,03 \text{ daN/m}}$ c'est la charge la plus défavorable.

V.3.3.1.4. Vérification de la stabilité (la flèche) :

Le profile vérifié c'est UPN200 :



La vérification de la flèche se fait avec des charges non pondérées(ELS).

V.3.3.1.4.1 Projection de n suivant les axes y-y', z-z' :

Suivant z-z' :

$$F=n \times \cos \alpha = 753,03 \times \cos 7,125 = 747,22 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T=n \times \sin \alpha = 753,03 \times \sin 7,125 = 93,40 \text{ daN/m}$$

$$\delta_y = \frac{5 \times T \times L^4}{384 \times E \times I_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{93,22 \times 10^{-2} \times (342,8)^4}{2,1 \times 10^6 \times 148} = 0,539 \text{ Cm}, \quad I_z = 148 \text{ cm}^4$$

$$\delta_z = \frac{5 \times F \times L^4}{384 \times E \times I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{747,22 \times 10^{-2} \times (342,8)^4}{2,1 \times 10^6 \times 1910} = 0,335 \text{ cm}, \quad I_y = 1910 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{342,8}{200} = 1,714 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.3.1.5. Calcul du moment fléchissant suivant les deux axes :

- **Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

Suivant z-z' :

$$F=n \times \cos \alpha = 1066,32 \times \cos 7,125 = 1058,09 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T=n \times \sin \alpha = 1066,32 \times \sin 7,125 = 132,26 \text{ daN/m}$$

V.3.3.1.5.1. Le moment fléchissant sur l'axe y – y' :

La panne c'est une poutre appuyée sur 2 appuis, donc :

$$M_{y, sd} = F \frac{L^2}{8} = 1058,09 \frac{(3,428)^2}{8}$$

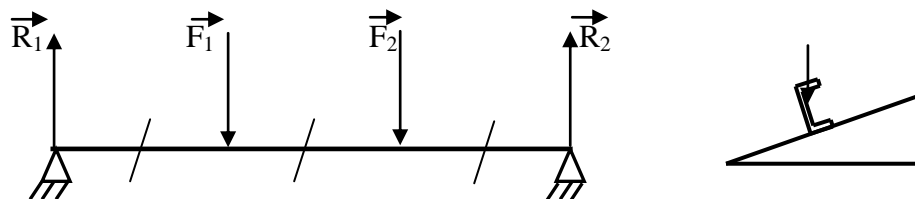
$$M_{y, sd} = 1554,23 \text{ dan.m}$$

V.3.3.1.5.2. Le moment fléchissant sur l'axe z – z' :

$$M_{z, sd} = T \frac{L^2}{8} = 132,26 \frac{(3,428)^2}{8}$$

$$M_{z, sd} = 194,28 \text{ dan.m}$$

V.3.3.2. Résolution de 2^{ème} système :



V.3.3.2.1. Vérification de la stabilité (la flèche) :

$$F_1=F_2=G_p \times e = 26 \times 2,589 = 67,32 \text{ daN}$$

• Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :

suivant y-y' :

$$F_{1Y} = F_1 \times \sin \alpha = 67,32 \times \sin 7,125 = 8,035 \text{ daN}$$

suivant z-z' :

$$F_{1Z} = F_1 \times \cos \alpha = 67,32 \times \cos 7,125 = 66,80 \text{ daN}$$

$$\delta_z = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_y} = \frac{(66,80)^2 \times 10^{-2} \times (342,8)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 1910} = 0,747 \text{ cm}, \quad I_y = 1910 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_z} = \frac{(8,035)^2 \times 10^{-2} \times (342,8)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 148} = 0,140 \text{ cm}, \quad I_z = 148 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{342,8}{200} = 1,714 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.3.2.2. Calcul de moments fléchissant suivant les deux axes :

$$F_{1Y} = 8,035 \text{ daN}$$

$$F_{1Z} = 66,80 \text{ daN}$$

Après le calcul RDM de moment fléchissant maximum on trouve :

$$M_{f_{\max}} = R_1 \cdot 2,286 - F_1(2,286 - 1,143) = 1,143 \cdot F_1, \text{ avec: } R_1 = F_1$$

V.3.3.2.2.1 Le moment fléchissant sur l'axe y – y' et l'axe z – z' :

$$M_{f_y} = 1,143 \times F_{1Z} = 1,143 \times 66,80 = 76,35 \text{ dan.m}$$

$$M_{f_z} = 1,143 \times F_{1Y} = 1,143 \times 8,035 = 9,18 \text{ dan.m}$$

V.3.3.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes 1 et 2 :

$$f_y = \delta_y + \delta_y' = 0,539 + 0,140 = 0,679 \text{ cm}$$

$$f_z = \delta_z + \delta_z' = 0,335 + 0,747 = 1,102 \text{ cm}$$

$$f_y \text{ et } f_z \leq \frac{l}{200} = \frac{342,8}{200} = 1,714 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.3.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :

Le profile vérifié est "UPN200".

V.3.3.4.1 Le moment fléchissant globale sur l'axe y – y' :

$$M_y = M_{y, sd} + M_{f_y} = 1554,23 + 76,35 = 1630,58 \text{ dan.m}$$

V.3.3.4.2 Le moment fléchissant globale sur l'axe z-z' :

$$M_z = M_{z, sd} + M_{f_z} = 194,26 + 9,18 = 213,34 \text{ dan.m}$$

V.3.3.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport à l'axe z-z' :

$$M_{pl.z.Rd} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M_0}, \text{ Avec : } f_y = 235 \text{ N/mm}^2 ; \text{ et } W_{pl,z} = 51,8 \text{ cm}^3, \gamma_{M_0} = 1,1$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 51,8 \times 23,5 / 1,1 = 1106,64 \text{ dan.m}$$

V.3.3.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport à l'axe y-y' :

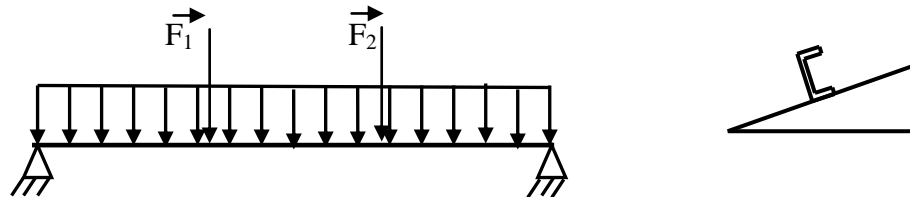
$$M_{pl.y.Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M_0} \text{ Avec : } W_{pl,y} = 228 \text{ cm}^3.$$

$$\Rightarrow M_{pl.y.Rd} = 228 \times 23,5 / 1,1 = 4870,91 \text{ dan.m}$$

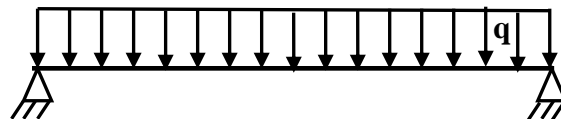
Alors : $\left(\frac{1630,58}{4870,91} \right) + \left(\frac{213,34}{1106,91} \right) = 0,527 < 1$ donc la panne 1 résiste à la flexion biaxiale.

V.3.4. Panne p₄ :

On estime un profilé UPN180.



V.3.4.1. Résolution de 1^{er} système :



V.3.4.1.1. Charges permanentes G :

- Poids propre de toiture : $G_{\text{toiture}} = \rho \times E_p = 7850 \times 0,006 = 47,1 \text{ dan/m}^2$
- Poids propre de profilé UPN180 : $G_p = 22,5 \text{ dan/m}$.
- Poids propre : $G = 22,5 + 47,1 \times 2,589 = 144,44 \text{ dan/m}$

V.3.4.1.2. Charges variables q :

- Charge de vent : $q_{\text{extrême}} = 223,14 \text{ dan/m}^2$.
- $d = 2,589 \text{ m}; \Rightarrow W = q \times d = 577,71 \text{ dan/m}$.
- Charge de neige : $q_s = 10,56 \text{ daN/m}^2$: charge uniformément répartie du neige
- $S = 10,56 \times 2,887 = 27,35 \text{ daN/m}$

V.3.4.1.3. La combinaison des charges :

V.3.4.1.3.1. L'état limite ultime :

$$1,35G + 1,5S = 1,35 \times 144,44 + 1,5 \times 27,35 = 236,02 \text{ daN/m}$$

$1,35G + 1,5W = 1,35 \times 144,44 + 1,5 \times 577,71 = 1061,56$ daN/m c'est la charge la plus défavorable.

$1,35G + 0,9(S+W) = 1,35 \times 144,44 + 0,9 \times (27,35 + 577,71) = 739,55$ daN/m

V.3.4.1.3.2. L'état limite de service :

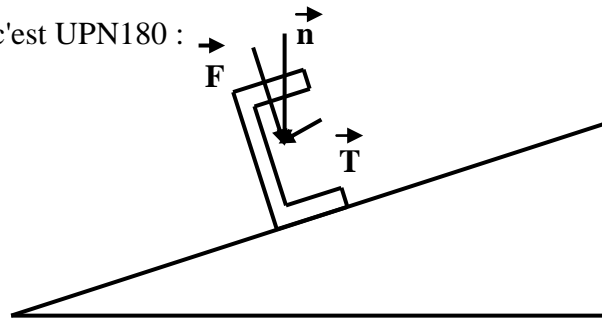
$G + S = 144,44 + 27,35 = 171,79$ daN/m

$G + W = 144,44 + 577,71 = 722,15$ daN/m

$G + (S+W) = 144,44 + (27,35 + 577,71) = 749,5$ daN/m c'est la charge la plus défavorable.

V.3.4.1.4. Vérification de la stabilité (la flèche) :

Le profile vérifié c'est UPN180 :



La vérification de la flèche se fait avec des charges non pondérées(ELS).

V.3.4.1.4.1 Projection de n suivant les axes y-y', z-z' :

Suivant z-z' :

$F = n \times \cos \alpha = 749,5 \times \cos 7,125 = 743,71$ daN/m

Suivant y-y' :

$T = n \times \sin \alpha = 749,5 \times \sin 7,125 = 92,96$ daN/m

$$\delta_y = \frac{5 \times T \times L^4}{384 \times E \times I_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{92,96 \times 10^{-2} \times (300)^4}{2,1 \times 10^6 \times 114} = 0,410 \text{ Cm}, \quad I_z = 114 \text{ cm}^4$$

$$\delta_z = \frac{5 \times F \times L^4}{384 \times E \times I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{743,71 \times 10^{-2} \times (300)^4}{2,1 \times 10^6 \times 1350} = 0,277 \text{ cm}, \quad I_y = 1350 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{300}{200} = 1,5 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.4.1.5. Calcul du moment fléchissant suivant les deux axes :

• Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :

Suivant z-z' :

$F = n \times \cos \alpha = 1061,56 \times \cos 7,125 = 1053,76$ daN/m

Suivant y-y' :

$T = n \times \sin \alpha = 1061,56 \times \sin 7,125 = 131,67$ daN/m

V.3.4.1.5.1. Le moment fléchissant sur l'axe y – y' :

La panne c'est une poutre appuyée sur 2 appuis, donc :

$$M_{y, sd} = F \frac{L^2}{8} = 1053,76 \frac{(3)^2}{8}$$

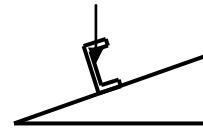
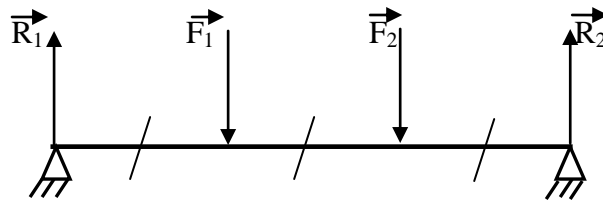
$$M_{y, sd} = 1185,48 \text{ dan.m}$$

V.3.4.1.5.2. Le moment fléchissant sur l'axe $z - z'$:

$$M_{z, sd} = T \frac{L^2}{8} = 131,67 \frac{(3)^2}{8}$$

$$M_{z, sd} = 148,13 \text{ dan.m}$$

V.3.4.2 Résolution de 2^{ème} système :



V.3.4.2.1. Vérification de la stabilité (la flèche) :

$$F_1 = F_2 = G_p \times e = 22,5 \times 2,589 = 58,25 \text{ daN}$$

• Projection de n suivant les axes $y-y'$ $z-z'$:

suivant $y-y'$:

$$F_{1Y} = F_1 \times \sin \alpha = 58,28 \times \sin 7,125 = 7,22 \text{ daN}$$

suivant $z-z'$:

$$F_{1Z} = F_1 \times \cos \alpha = 58,28 \times \cos 7,125 = 57,83 \text{ daN}$$

$$\delta_z = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_y} = \frac{(57,83)^2 \times 10^{-2} \times (300)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 1350} = 0,531 \text{ cm}, \quad I_y = 1350 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_z} = \frac{(7,22)^2 \times 10^{-2} \times (300)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 114} = 0,098 \text{ cm}, \quad I_z = 114 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{300}{200} = 1,5 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.4.2.2. Calcul de moments fléchissant suivant les deux axes :

$$F_{1Y} = 7,22 \text{ daN}$$

$$F_{1Z} = 57,83 \text{ daN}$$

Après le calcul RDM de moment fléchissant maximum on trouve :

$$M_{f_{\max}} = R_1 \cdot 2,66 - F_1(2,66 - 1,33) = 1,33 \cdot F_1, \text{ avec: } R_1 = F_1$$

V.3.4.2.2.1 Le moment fléchissant sur l'axe $y - y'$ et l'axe $z - z'$:

$$M_{f_y} = 1,33 \times F_{1Z} = 1,33 \times 57,83 = 76,91 \text{ dan.m}$$

$$M_{f_z} = 1,33 \times F_{1Y} = 1,33 \times 7,22 = 9,6 \text{ dan.m}$$

V.3.4.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes 1 et 2 :

$$f_y = \delta y + \delta y' = 0,410 + 0,098 = 0,508 \text{ cm}$$

$$f_z = \delta z + \delta z' = 0,277 + 0,531 = 0,808 \text{ cm}$$

$$f_y \text{ et } f_z \leq \frac{l}{200} = \frac{3}{200} = 1,5 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.4.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :

Le profile vérifié est "UPN180":

V.3.4.4.1. Le moment fléchissant globale sur l'axe y – y' :

$$M_y = M_{y, sd} + M_{fy} = 1185,48 + 76,91 = 1262,39 \text{ dan.m}$$

V.3.4.4.2. Le moment fléchissant globale sur l'axe z–z' :

$$M_z = M_{z, sd} + M_{fz} = 131,67 + 9,6 = 141,27 \text{ dan.m}$$

V.3.4.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :

$$M_{pl.z.Rd} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M_0}, \text{ Avec : } f_y = 235 \text{ N/mm}^2 ; \text{ et } W_{pl,z} = 42,9 \text{ cm}^3, \gamma_{M_0} = 1,1$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 42,9 \times 23,5 / 1,1 = 916,51 \text{ dan.m}$$

V.3.4.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :

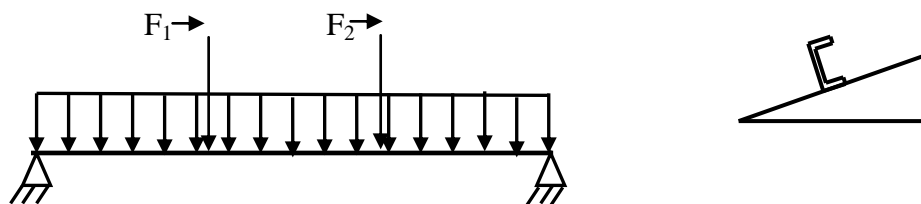
$$M_{pl.y.Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M_0} \text{ Avec : } W_{pl,y} = 179 \text{ cm}^3.$$

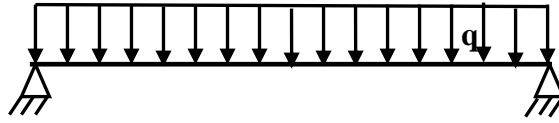
$$\Rightarrow M_{pl.y.Rd} = 179 \times 23,5 / 1,1 = 3824,09 \text{ dan.m}$$

$$\text{Alors : } \left(\frac{1262,39}{3824,09} \right) + \left(\frac{141,27}{916,51} \right) = 0,484 < 1 \text{ donc la panne 1 résiste à la flexion biaxiale.}$$

V.3.5 .Panne p5 :

On estime un profile UPN160.



V.3.5.1. Résolution de 1^{er} système :**V.3.5.1.1. Charges permanentes G :**

- Poids propre de toiture : $G_{\text{toiture}} = \rho \times E_p = 7850 \times 0,006 = 47,1 \text{ dan/m}^2$
- Poids propre de profil UPN160 : $G_p = 19,3 \text{ dan/m}$.
- Poids propre : $G = 19,3 + 47,1 \times 2,589 = 141,24 \text{ dan/m}$

V.3.5.1.2. Charges variables q :

- Charge de vent : $q_{\text{extrême}} = 223,14 \text{ dan/m}^2$.
 $d = 2,589 \text{ m}; \Rightarrow W = q \times d = 571,77 \text{ dan/m}$.
- Charge de neige : $q_s = 10,56 \text{ daN/m}^2$: charge uniformément répartie du neige
 $S = 10,56 \times 2,887 = 27,35 \text{ daN/m}$

V.3.5.1.3. La combinaison des charges :**V.3.5.1.3.1. L'état limite ultime :**

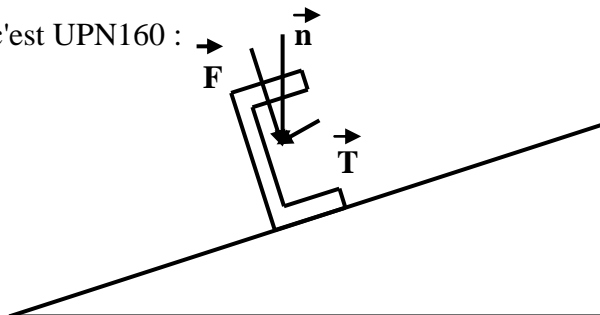
- $1,35G + 1,5S = 1,35 \times 141,24 + 1,5 \times 27,35 = 231,7 \text{ daN/m}$
- $1,35G + 1,5W = 1,35 \times 141,24 + 1,5 \times 577,71 = 1057,24 \text{ daN/m}$ c'est la charge la plus défavorable.
- $1,35G + 0,9(S+W) = 1,35 \times 141,24 + 0,9 \times (27,35 + 577,71) = 735,23 \text{ daN/m}$

V.3.5.1.3.2. L'état limite de service :

- $G + S = 141,24 + 27,35 = 168,99 \text{ daN/m}$
- $G + W = 141,24 + 577,71 = 719,35 \text{ daN/m}$
- $G + (S+W) = 141,24 + (27,35 + 577,71) = 746,7 \text{ daN/m}$ c'est la charge la plus défavorable.

V.3.5.1.4. Vérification de la stabilité (la flèche) :

Le profile vérifié c'est UPN160 :



La vérification de la flèche se fait avec des charges non pondérés(ELS).

V.3.5.1.4.1 Projection de n suivant les axes y-y', z-z' :

Suivant z-z' :

$$F=n \times \cos \alpha = 746,7 \times \cos 7,125 = 740,93 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T=n \times \sin \alpha = 746,7 \times \sin 7,125 = 92,62 \text{ daN/m}$$

$$\delta_y = \frac{5 \times T \times L^4}{384 \times E \times I_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{92,62 \times 10^{-2} \times (257,2)^4}{2,1 \times 10^6 \times 85,3} = 0,295 \text{ cm}, \quad I_z = 85,3 \text{ cm}^4$$

$$\delta_z = \frac{5 \times F \times L^4}{384 \times E \times I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{740,93 \times 10^{-2} \times (257,2)^4}{2,1 \times 10^6 \times 925} = 0,217 \text{ cm}, \quad I_y = 925 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{257,2}{200} = 1,376 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.5.1.5. Calcul du moment fléchissant suivant les deux axes :**• Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

Suivant z-z' :

$$F=n \times \cos \alpha = 1057,24 \times \cos 7,125 = 1049,08 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T=n \times \sin \alpha = 1057,24 \times \sin 7,125 = 131,13 \text{ daN/m}$$

V.3.5.1.5.1. Le moment fléchissant sur l'axe y – y' :

La panne c'est une poutre appuyée sur 2 appuis, donc :

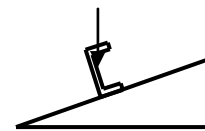
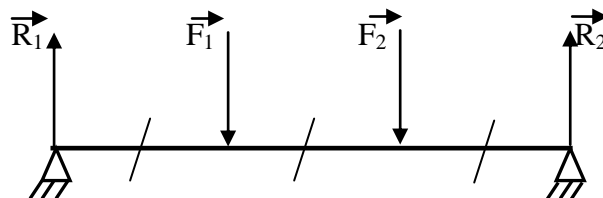
$$M_{y, sd} = F \frac{L^2}{8} = 1049,08 \frac{(2,572)^2}{8}$$

$$M_{y, sd} = 867,48 \text{ dan.m}$$

V.3.5.1.5.2. Le moment fléchissant sur l'axe z – z' :

$$M_{z, sd} = T \frac{L^2}{8} = 131,13 \frac{(2,572)^2}{8}$$

$$M_{z, sd} = 108,44 \text{ dan.m}$$

V.3.5.2. Résolution de 2^{ème} système :**V.3.5.2.1. Vérification de la stabilité (la flèche) :**

$$F_1 = F_2 = G_p \times e = 19,3 \times 2,589 = 49,97 \text{ daN}$$

• **Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

suivant y-y' :

$$F_{1Y} = F_1 \times \sin \alpha = 49,97 \times \sin 7,125 = 6,20 \text{ daN}$$

suivant z-z' :

$$F_{1Z} = F_1 \times \cos \alpha = 49,97 \times \cos 7,125 = 49,58 \text{ daN}$$

$$\delta_z = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_y} = \frac{(49,58)^2 \times 10^{-2} \times (257,2)^3}{6 \times 2.1 \times 10^5 \times 925} = 0,359 \text{ cm}, \quad I_y = 925 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_z} = \frac{(6,20)^2 \times 10^{-2} \times (257,2)^3}{6 \times 2.1 \times 10^5 \times 85,3} = 0,061 \text{ cm}, \quad I_z = 85,3 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{257,2}{200} = 1,286 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.5.2.2. Calcul de moments fléchissant suivant les deux axes :

$$F_{1Y} = 6,20 \text{ daN}$$

$$F_{1Z} = 49,58 \text{ daN}$$

Après le calcul RDM de moment fléchissant maximum on trouve :

$$M_{f_{\max}} = R_1 \cdot 1,714 - F_1(1,714 - 0,857) = 0,857 \cdot F_1, \text{ avec: } R_1 = F_1$$

V.3.5.2.2.1 Le moment fléchissant sur l'axe y – y' et l'axe z - z' :

$$M_{f_y} = 1,33 \times F_{1Z} = 0,857 \times 49,58 = 42,49 \text{ dan.m}$$

$$M_{f_z} = 1,33 \times F_{1Y} = 0,857 \times 6,20 = 5,31 \text{ dan.m}$$

V.3.5.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes 1 et 2 :

$$f_y = \delta_y + \delta_y' = 0,215 + 0,061 = 0,356 \text{ cm}$$

$$f_z = \delta_z + \delta_z' = 0,217 + 0,359 = 0,576 \text{ cm}$$

$$f_y \text{ et } f_z \leq \frac{l}{200} = \frac{257,2}{200} = 1,286 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.5.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :

Le profile vérifié est "UPN160".

V.3.5.4.1. Le moment fléchissant globale sur l'axe y – y' :

$$M_y = M_{y, sd} + M_{fy} = 867,48 + 42,49 = 909,97 \text{ dan.m}$$

V.3.5.4.2. Le moment fléchissant globale sur l'axe z-z' :

$$M_z = M_{z, sd} + M_{fz} = 108,44 + 5,31 = 113,75 \text{ dan.m}$$

V.3.5.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe

z-z' :

$$M_{pl.z.Rd} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M_0}, \text{ Avec : } f_y = 235 \text{ N/mm}^2; \text{ et } W_{pl,z} = 35,2 \text{ cm}^3, \gamma_{M_0} = 1,1$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 35,2 \times 23,5 / 1,1 = 752 \text{ dan.m}$$

V.3.5.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport à l'axe y-y' :

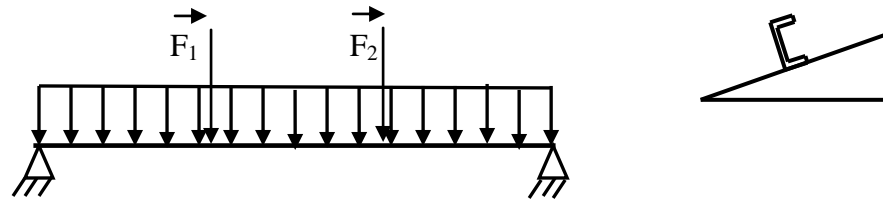
$$M_{pl.y.Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M_0} \text{ Avec : } W_{pl,y} = 138 \text{ cm}^3.$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 138 \times 23,5 / 1,1 = 2942,18 \text{ dan.m}$$

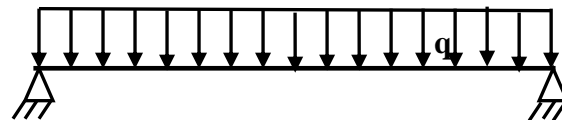
Alors : $\left(\frac{909,97}{2942,18} \right) + \left(\frac{113,75}{752} \right) = 0,461 < 1$ donc la panne 1 résiste à la flexion biaxiale.

V.3.6. Panne p₆ :

On estime un profilé UPN140.



V.3.6.1. Résolution de 1^{er} système :



V.3.6.1.1. Charges permanentes G :

- Poids propre de toiture : $G_{\text{toiture}} = \rho \times E_p = 7850 \times 0,006 = 47,1 \text{ dan/m}^2$
- Poids propre de profilé UPN140 : $G_p = 16,4 \text{ dan/m}$.
- Poids propre : $G = 16,4 + 47,1 \times 2,589 = 138,34 \text{ dan/m}$

V.3.6.1.2. Charges variables q :

- Charge de vent : $q_{\text{extrême}} = 223,14 \text{ dan/m}^2$.
 $d = 2,589 \text{ m}; \Rightarrow W = q \times d = 577,71 \text{ dan/m}$.
- Charge de neige : $q_s = 10,56 \text{ daN/m}^2$: charge uniformément répartie du neige
 $S = 10,56 \times 2,887 = 27,35 \text{ daN/m}$

V.3.6.1.3. La combinaison des charges :

V.3.6.1.3.1. L'état limite ultime :

$$1,35G + 1,5S = 1,35 \times 138,34 + 1,5 \times 27,35 = 227,78 \text{ daN/m}$$

$1,35G + 1,5W = 1,35 \times 138,34 + 1,5 \times 577,71 = 1053,324 \text{ daN/m}$ c'est la charge la plus défavorable.

$$1,35G + 0,9(S+W) = 1,35 \times 138,34 + 0,9 \times (27,35 + 577,71) = 731,31 \text{ daN/m}$$

V.3.6.3.1.2. L'état limite de service :

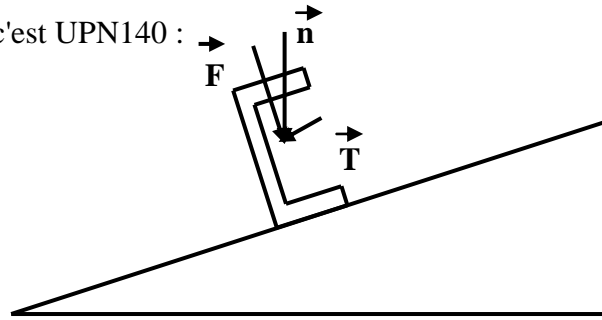
$$G + S = 138,34 + 27,35 = 165,69 \text{ daN/m}$$

$$G + W = 138,34 + 577,71 = 716,05 \text{ daN/m}$$

$G + (S+W) = 138,34 + (27,35 + 577,71) = 743,4 \text{ daN/m}$ c'est la charge la plus défavorable.

V.3.6.1.4. Vérification de la stabilité (la flèche) :

Le profile vérifié c'est UPN140 :



La vérification de la flèche se fait avec des charges non pondérées(ELS).

V.3.6.1.4.1 Projection de n suivant les axes y-y', z-z' :

Suivant z-z' :

$$F=n \times \cos \alpha = 743,4 \times \cos 7,125 = 737,66 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T=n \times \sin \alpha = 743,4 \times \sin 7,125 = 92,21 \text{ daN/m}$$

$$\delta_y = \frac{5 \times T \times L^4}{384 \times E \times I_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{92,21 \times 10^{-2} \times (214,4)^4}{2,1 \times 10^6 \times 62,7} = 0,193 \text{ cm}, \quad I_z = 62,7 \text{ cm}^4$$

$$\delta_z = \frac{5 \times F \times L^4}{384 \times E \times I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{737,66 \times 10^{-2} \times (214,4)^4}{2,1 \times 10^6 \times 605} = 0,160 \text{ cm}, \quad I_y = 605 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{214,4}{200} = 1,072 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.6.1.5. Calcul du moment fléchissant suivant les deux axes :**• Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

Suivant z-z' :

$$F=n \times \cos \alpha = 1053,324 \cos 7,125 = 1045,19 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T=n \times \sin \alpha = 1053,324 \times \sin 7,125 = 130,65 \text{ daN/m}$$

V.3.6.1.5.1. Le moment fléchissant sur l'axe y – y' :

La panne c'est une poutre appuyée sur 2 appuis, donc :

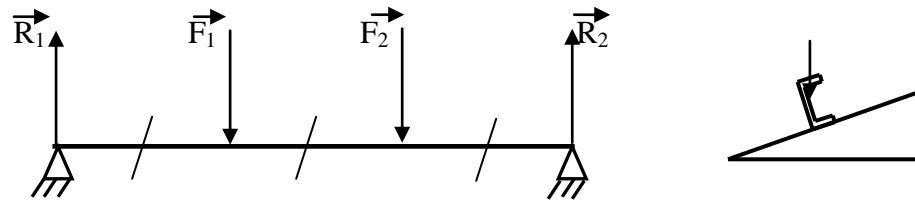
$$M_{y, sd} = F \frac{L^2}{8} = 1045,19 \frac{(2,144)^2}{8}$$

$$M_{y, sd} = 600,56 \text{ dan.m}$$

V.3.6.1.5.2. Le moment fléchissant sur l'axe z – z' :

$$M_{z, sd} = T \frac{L^2}{8} = 130,65 \frac{(2,144)^2}{8}$$

$$M_{z, sd} = 75,07 \text{ dan.m}$$

V.3.6.2. Résolution de 2^{ème} système :**V.3.6.2.1. Vérification de la stabilité (la flèche) :**

$$F_1 = F_2 = G_p \times e = 16,4 \times 2,589 = 42,46 \text{ daN}$$

• Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :

suivant y-y' :

$$F_{1Y} = F_1 \times \sin \alpha = 42,46 \times \sin 7,125 = 5,27 \text{ daN}$$

suivant z-z' :

$$F_{1Z} = F_1 \times \cos \alpha = 42,46 \times \cos 7,125 = 42,13 \text{ daN}$$

$$\delta_z = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_y} = \frac{(42,13)^2 \times 10^{-2} \times (214,4)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 605} = 0,230 \text{ cm}, \quad I_y = 605 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_z} = \frac{(5,27)^2 \times 10^{-2} \times (214,4)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 62,7} = 0,035 \text{ cm}, \quad I_z = 62,7 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{214,4}{200} = 1,072 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.6.2.2. Calcul de moments fléchissant suivant les deux axes :

$$F_{1Y} = 5,27 \text{ daN}$$

$$F_{1Z} = 42,13 \text{ daN}$$

Après le calcul RDM de moment fléchissant maximum on trouve :

$$M_{f_{\max}} = R_1 \cdot 1,430 - F_1(1,430 - 0,715) = 0,715 \cdot F_1, \text{ avec: } R_1 = F_1$$

V.3.6.2.2.1 Le moment fléchissant sur l'axe y – y' et l'axe z – z' :

$$M_{f_y} = 0,715 \times F_{1Z} = 0,715 \times 42,13 = 30,123 \text{ dan.m}$$

$$M_{f_z} = 0,715 \times F_{1Y} = 0,715 \times 5,27 = 3,77 \text{ dan.m}$$

V.3.6.2.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes 1 et 2 :

$$f_y = \delta_y + \delta_y' = 0,193 + 0,035 = 0,228 \text{ cm}$$

$$f_z = \delta_z + \delta_z' = 0,160 + 0,230 = 0,390 \text{ cm}$$

$$f_y \text{ et } f_z \leq \frac{l}{200} = \frac{214,4}{200} = 1,072 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.6.2.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :

Le profile vérifié est "UPN140":

V.3.6.2.4.1. Le moment fléchissant globale sur l'axe y – y' :

$$M_y = M_{y, sd} + M_{f_y} = 600,56 + 30,123 = 630,683 \text{ dan.m}$$

V.3.6.2.4.2. Le moment fléchissant globale sur l'axe z-z' :

$$M_z = M_{z, sd} + M_{fz} = 75,07 + 3,77 = 78,84 \text{ dan.m}$$

V.3.6.2.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :

$$M_{pl.z.Rd} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M_0}, \text{ Avec : } f_y = 235 \text{ N/mm}^2 ; \text{ et } W_{pl,z} = 28,3 \text{ cm}^3, \gamma_{M_0} = 1,1$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 28,3 \times 23,5 / 1,1 = 604,59 \text{ dan.m}$$

V.3.6.2.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :

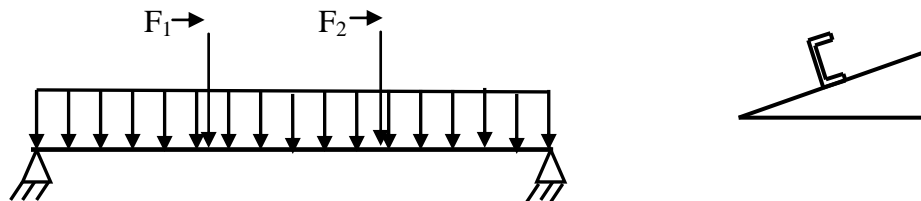
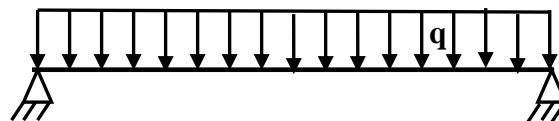
$$M_{pl.y.Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M_0} \text{ Avec : } W_{pl,y} = 103 \text{ cm}^3.$$

$$\Rightarrow M_{pl.y.Rd} = 103 \times 23,5 / 1,1 = 2200,46 \text{ dan.m}$$

$$\text{Alors : } \left(\frac{630,683}{2200,46} \right) + \left(\frac{78,84}{604,59} \right) = 0,417 < 1 \text{ donc la panne 1 résiste à la flexion biaxiale.}$$

V.3.7. Panne p7 :

On estime un profile UPN120.

**V.3.7.1. Résolution de 1^{er} système :****V.3.7.1.1. Charges permanentes G :**

- Poids propre de toiture : $G_{\text{toiture}} = \rho \times E_p = 7850 \times 0,006 = 47,1 \text{ dan/m}^2$
- Poids propre de profil UPN120 : $G_p = 13,7 \text{ dan/m}$.
- Poids propre : $G = 13,7 + 47,1 \times 2,589 = 121,94 \text{ dan/m}$

V.3.7.1.2. Charges variables q :

- Charge de vent : $q_{\text{extrême}} = 223,14 \text{ dan/m}^2$.
- $d = 2,589 \text{ m}$; $\Rightarrow W = q \times d = 577,71 \text{ dan/m}$.
- Charge de neige : $q_s = 10,56 \text{ daN/m}^2$: charge uniformément répartie du neige
- $S = 10,56 \times 2,887 = 27,35 \text{ daN/m}$

V.3.7.1.3. La combinaison des charges :**V.3.7.1.3.1. L'état limite ultime :**

$$1,35G + 1,5S = 1,35 \times 121,94 + 1,5 \times 27,35 = 205,64 \text{ daN/m}$$

$1,35G + 1,5W = 1,35 \times 121,94 + 1,5 \times 577,71 = 1031,184 \text{ daN/m}$ c'est la charge la plus défavorable.

$$1,35G + 0,9(S+W) = 1,35 \times 121,94 + 0,9 \times (27,35 + 577,71) = 709,173 \text{ daN/m}$$

V.3.7.1.3.2. L'état limite de service :

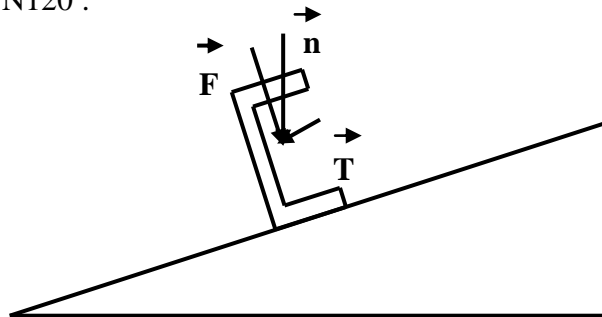
$$G + S = 121,94 + 27,35 = 149,29 \text{ daN/m}$$

$$G + W = 121,94 + 577,71 = 699,65 \text{ daN/m}$$

$G + (S+W) = 121,94 + (27,35 + 577,71) = 727 \text{ daN/m}$ c'est la charge la plus défavorable.

V.3.7.1.4. Vérification de la stabilité (la flèche) :

Le profile vérifié c'est UPN120 :



La vérification de la flèche se fait avec des charges non pondérés(ELS).

V.3.7.1.4.1 Projection de n suivant les axes y-y', z-z' :

Suivant z-z' :

$$F = n \times \cos \alpha = 727 \times \cos 7,125 = 721,39 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T = n \times \sin \alpha = 727 \times \sin 7,125 = 90,17 \text{ daN/m}$$

$$\delta_y = \frac{5 \times T \times L^4}{384 \times E \times I_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{90,17 \times 10^{-2} \times (171,6)^4}{2,1 \times 10^6 \times 43,2} = 0,112 \text{ Cm}, \quad I_z = 43,2 \text{ cm}^4$$

$$\delta_z = \frac{5 \times F \times L^4}{384 \times E \times I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{721,39 \times 10^{-2} \times (171,6)^4}{2,1 \times 10^6 \times 364} = 0,107 \text{ cm}, \quad I_y = 364 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{171,6}{200} = 0,858 \text{ Donc la condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.7.1.5. Calcul du moment fléchissant suivant les deux axes :**• Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :**

Suivant z-z' :

$$F = n \times \cos \alpha = 1031,184 \times \cos 7,125 = 1023,22 \text{ daN/m}$$

Suivant y-y' :

$$T = n \times \sin \alpha = 1031,184 \times \sin 7,125 = 127,9 \text{ daN/m}$$

V.3.7.1.5.1. Le moment fléchissant sur l'axe y – y' :

La panne c'est une poutre appuyée sur 2 appuis, donc :

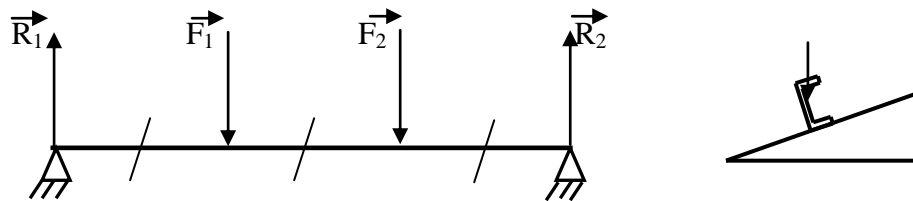
$$M_{y, sd} = F \frac{L^2}{8} = 1023,22 \frac{(1,716)^2}{8}.$$

$$M_{y, sd} = 376,63 \text{ dan.m}$$

V.3.7.1.5.2. Le moment fléchissant sur l'axe z – z' :

$$M_{z, sd} = T \frac{L^2}{8} = 132,99 \frac{(1,716)^2}{8}.$$

$$M_{z, sd} = 47,08 \text{ dan.m}$$

V.3.7.2. Résolution de 2^{ème} système :**V.3.7.2.1. Vérification de la stabilité (la flèche) :**

$$F_1 = F_2 = G_p \times e = 13,7 \times 2,589 = 35,47 \text{ daN}$$

• Projection de n suivant les axes y-y' z-z' :

suivant y-y' :

$$F_{1Y} = F_1 \times \sin \alpha = 35,47 \times \sin 7,125 = 4,40 \text{ daN}$$

suivant z-z' :

$$F_{1Z} = F_1 \times \cos \alpha = 35,47 \times \cos 7,125 = 35,20 \text{ daN}$$

$$\delta_z = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_y} = \frac{(35,20)^2 \times 10^{-2} \times (171,6)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 364} = 0,137 \text{ cm}, \quad I_y = 364 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y = \frac{F_1^2 \times L^3}{6 \times E \times I_z} = \frac{(4,40)^2 \times 10^{-2} \times (171,6)^3}{6 \times 2,1 \times 10^5 \times 43,2} = 0,018 \text{ cm}, \quad I_z = 43,2 \text{ cm}^4$$

$$\delta_y \text{ et } \delta_z \leq \frac{l}{200} = \frac{171,6}{200} = 0,858 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.7.2.2. Calcul de moments fléchissant suivant les deux axes :

$$F_{1Y} = 4,40 \text{ daN}$$

$$F_{1Z} = 35,20 \text{ daN}$$

Après le calcul RDM de moment fléchissant maximum on trouve :

$$M_{f_{\max}} = R_1 \cdot 1,44 - F_1(1,144 - 0,572) = 0,572 \cdot F_1, \text{ avec: } R_1 = F_1$$

V.3.7.2.2.1 Le moment fléchissant sur l'axe y – y' et l'axe z – z' :

$$M_{f_y} = 0,572 \times F_{1z} = 0,572 \times 35,20 = 20,13 \text{ dan.m}$$

$$M_{f_z} = 0,572 \times F_{1y} = 0,572 \times 4,40 = 2,52 \text{ dan.m}$$

V.3.7.3. Vérification de la flèche en superposant les deux systèmes 1 et 2 :

$$f_y = \delta y + \delta y' = 0,112 + 0,018 = 0,130 \text{ cm}$$

$$f_z = \delta z + \delta z' = 0,107 + 0,137 = 0,244 \text{ cm}$$

$$f_y \text{ et } f_z \leq \frac{l}{200} = \frac{171,6}{200} = 0,858 \text{ Donc La condition de la flèche est vérifiée.}$$

V.3.7.4. Vérification de la résistance de panne 1 (flexion bi-axiale) :

Le profile vérifié est "UPN120":

V.3.7.4.1. Le moment fléchissant globale sur l'axe y – y' :

$$M_y = M_{y, sd} + M_{fy} = 376,63 + 20,13 = 396,76 \text{ dan.m}$$

V.3.7.4.2. Le moment fléchissant globale sur l'axe z-z' :

$$M_z = M_{z, sd} + M_{fz} = 47,07 + 2,52 = 49,59 \text{ dan.m}$$

V.3.7.5. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe z-z' :

$$M_{pl.z.Rd} = W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M_0}, \text{ Avec : } f_y = 235 \text{ N/mm}^2; \text{ et } W_{pl,z} = 21,2 \text{ cm}^3, \gamma_{M_0} = 1,1$$

$$\Rightarrow M_{pl.z.Rd} = 21,2 \times 23,5 / 1,1 = 452,91 \text{ dan.m}$$

V.3.7.6. Calcul de moment de résistance plastique de la section brute par rapport a l'axe y-y' :

$$M_{pl.y.Rd} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M_0} \text{ Avec : } W_{pl,y} = 72,6 \text{ cm}^3.$$

$$\Rightarrow M_{pl.y.Rd} = 72,6 \times 23,5 / 1,1 = 1551 \text{ dan.m}$$

$$\text{Alors : } \left(\frac{396,76}{1551} \right) + \left(\frac{49,59}{452,91} \right) = 0,365 < 1 \text{ donc la panne 1 résiste à la flexion biaxiale.}$$

Remarque:

Les pannes 8 et 9 sont des UPN120.

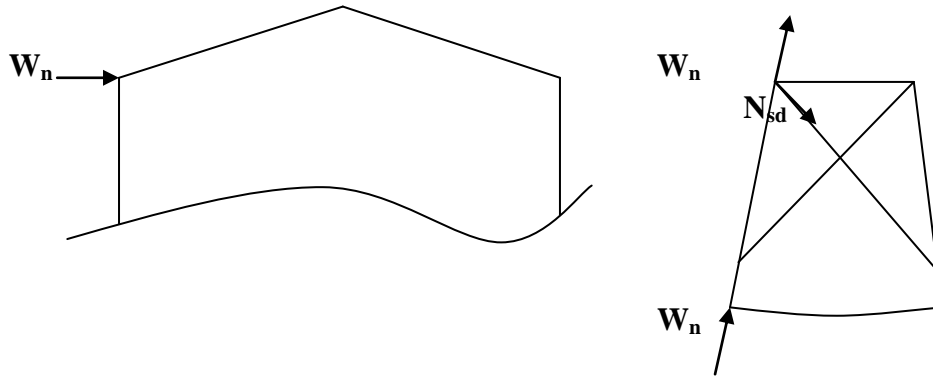
V.4. Contreventements :

Les dispositifs de contreventement contribuent à la stabilité générale d'une construction. Le système de contreventement de réservoir agit contre les sollicitations horizontales et plus particulièrement les efforts dus au vent, assurant la stabilité latérale.

V.4.1. Charge du vent :

$$q_n = 126,44 \text{ daN/m}^2 \Rightarrow W_n = q_n \times \text{entraxe} \times \text{demie hauteur}$$

$$W_n = 126,44 \times 4,712 \times (20,0325/2) = 5967,53 \text{ daN}$$

**V.4.2. Choix de profile:**

$$W_n = N_{sd} \times \cos \alpha \Rightarrow N_{sd} = W_n / \cos \alpha = 5967,53 / \cos 45 = 8438,61 \text{ daN}$$

$$\text{Où: } A = \frac{N_{sd}}{f_y} = \frac{8438,61}{23,5} = 359,09 \text{ mm}^2 \Rightarrow \text{on adopte un fer plat (60} \times \text{6)}.$$

V.4.3. Vérification de diagonale :

$$N_{rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M_0} = 400 \times 23,5 / 1 = 9400 \text{ daN} > N_{sd}, \text{ donc il est vérifié.}$$

V.5. Conclusion :

Les charpentes autoportées sont reconnues comme des structures économiques car leur conception permet un montage simple sur les sites. Ce type de charpente peut être employé sur le plus grand réservoir.

Chapitre VI

Accessoires du réservoir

VI. Accessoires de réservoir :

VI.1. Introduction :

Après la réalisation des éléments essentiels de réservoir, il faut ajouter des accessoires pour une meilleure utilisation de notre structure, tel que le trou d'homme et les ouvertures de la robe, les tubulures et la porte visite. Pour le fond il y a la cuvette, et sur le toit il y a les trous d'homme et les tubulures qui sont utilisés pour les essais hydrostatiques.

Pour assurer la circulation d'opérateur sur et autour de réservoir, on utilise l'escalier hélicoïdal.

VI.2. Trou d'homme sur la robe et le toit :

Le trou d'homme sur la robe est utilisé pour effectuer des travaux à l'intérieur de réservoir, acheminer les équipements nécessaires et accéder pour exécuter les opérations d'entretien et de nettoyage.

Le trou d'homme dans la robe est constitué d'une tôle de renforcement, d'un segment de tube, d'une bride, d'un couvercle (bride pleine), et des accessoires pour l'assemblage (joint d'étanchéité, boulons, écrou, rondelles....etc.).

La fabrication des éléments de trou sera effectuée en atelier, et l'assemblage de trou d'homme exécuté en chantier, par soudage approprié.

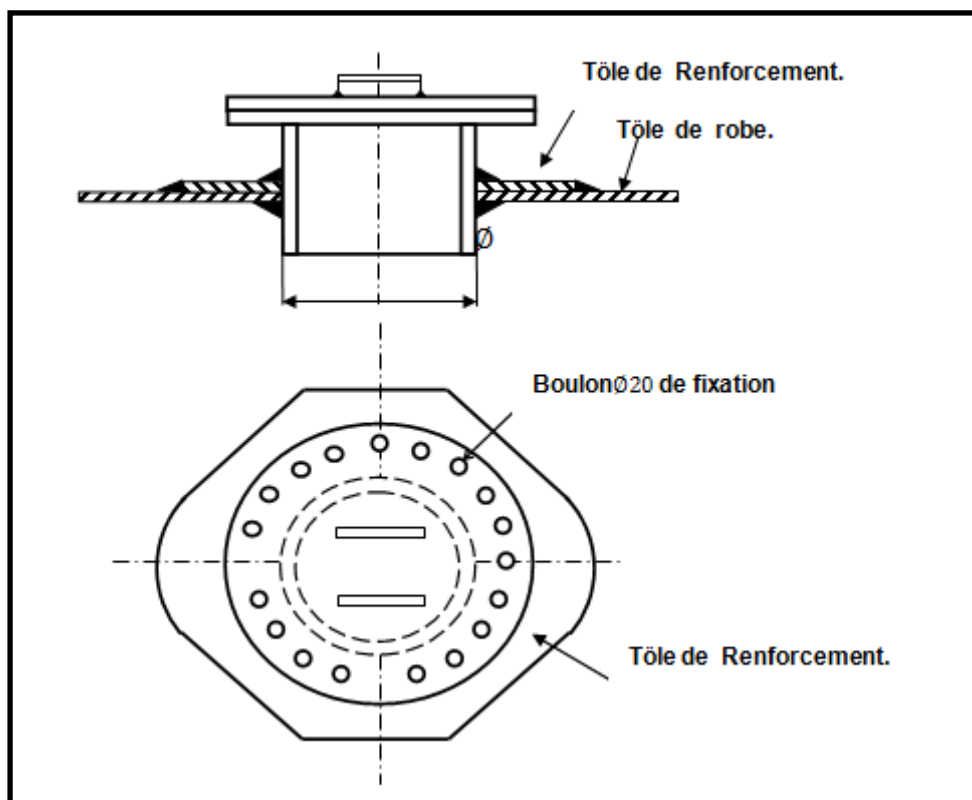


Figure VI. 1 : Schéma de trou d'homme

VI.3. La porte visite :

Appelé souvent (la porte boulonné) et renforcé par une tôle elle est unique dans le bac, sa démentions et plus important que le trou d'homme pour assuré l'accès des instruments et des matériel de grande taille.

VI.4. Tubulures :

Le réservoir sera menu d'un ensemble de tubulure, recommandé par la norme API 650 std, et d'autres tubulures exigées par le client pour satisfaire à son exploitation. Tous les éléments des tubulures seront préfabriqués.

Le montage des éléments de tubulure sera effectué en atelier, et le montage de tubulure sur réservoir sera exécuté sur site.

Les principales tubulures recommandées par la norme API650 Std :

- 03 tubulures de remplissage avec déversoir de 16".
- 01 tubulure de sortie de liquide 34".
- 02 tubulures de vidange avec puisard de soutirage 10".
- tubulures supplémentaire exigées par le client.

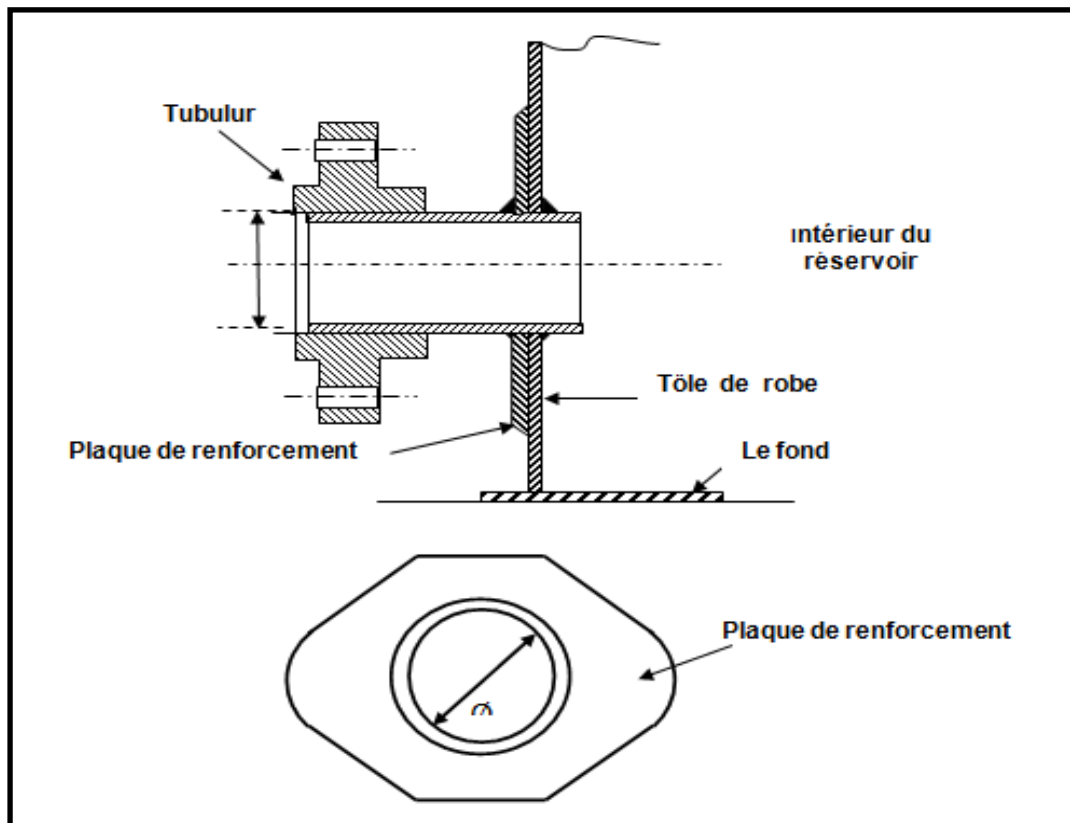


Figure VI. 2 : Schéma de tubulure

VI.5. Echelle roulante :

L'écran flottant menu d'une échelle s'ajustant automatiquement à n'importe quelle position de toit. De façon à en permettre l'accès a tout moment.

L'échelle devra être conçue pour le déplacement complet de l'écran .l'échelle roulante devra être munie sur toute sa longueur de mains courants des deux cotés et devra supporter une charge centrale de 454 kg quelle que soit sa position.

VI.6. L'escalier hélicoïdal :

Les escaliers permet a atteindre l a partie supérieure du réservoir, les escaliers utilisé dans notre projet est de type standard selon api 650.

VI.6.1. Condition pour les escaliers :

D'après API 650 std tableau 5.18.

- Toutes les pièces doivent être métalliques.
- Largeur des escaliers (minimum) sera 710 mm.
- L'angle max de l'escalier avec l'horizontale (maxi) 50°.
- Largeur des girons (minimum) 200 mm.

Le giron (défini comme la distance horizontale des nez de deux marches successives) et la hauteur de marche doivent être tels que la somme de 2 hauteurs + le giron ne doit pas être inférieure à 610 mm ou supérieur a 660 mm. La hauteur de marche doit être uniforme sur tout l'escalier.

- Marches en caillebotis ou en matériau antidérapant.
- La lisse supérieure doit se raccorder avec la main courante de la plateforme sans décalage, et la hauteur mesurée verticalement depuis le nez de la marche devra être de 762-863,6 mm.
- Distance entre les boutons de lisse (maximum) mesurée le long de la pente de la lisse 2438,4 mm.
- La structure terminée devra pouvoir supporter une charge vive concentrée de 1000 lb et la structure de la main courante devra pouvoir supporter une charge de 200 lb appliquée dans une quelconque direction en un point quelconque de la lisse supérieure.
- Les mains courantes devront régner des deux cotés des escaliers droits ainsi que des escaliers circulaires lorsque l'espace entre les robes de réservoir et le limon de l'escalier dépasse 203,2 mm.
- Les escaliers à quartier tournant devront être totalement supportés par la robe du réservoir et les extrémités de limon ne devront pas toucher le sol.

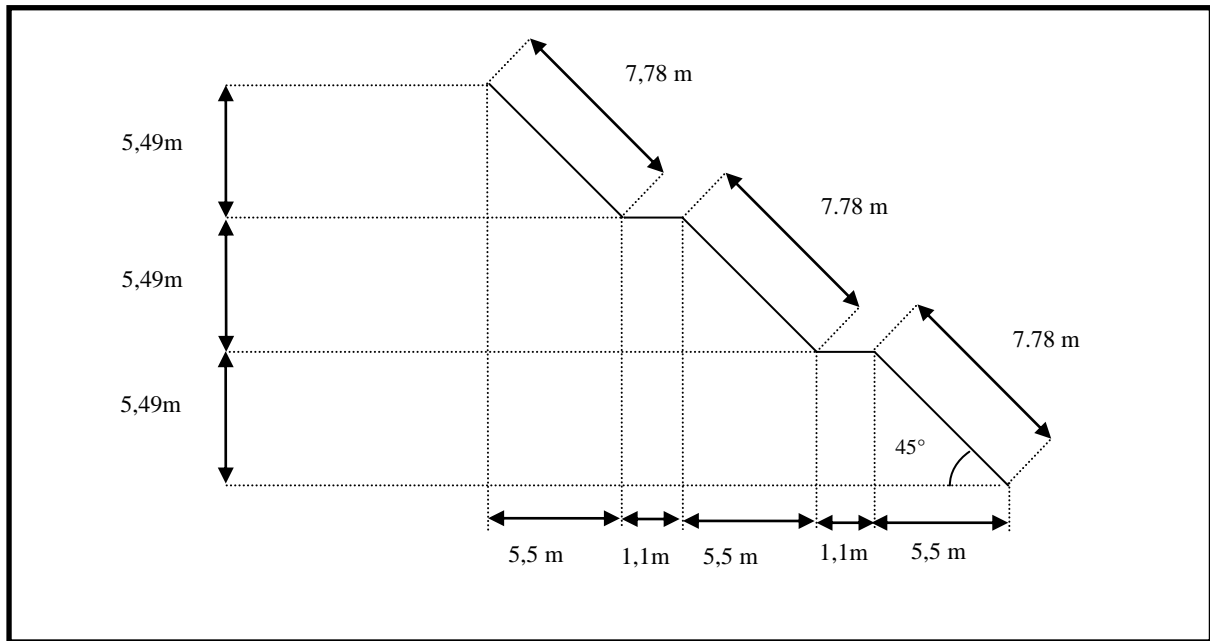


Figure VI. 3 : Schéma de l'escalier hélicoïdal

VI.6.2. Dimensionnement des escaliers hélicoïdaux :

D'après API 650.Std tableau 5.18

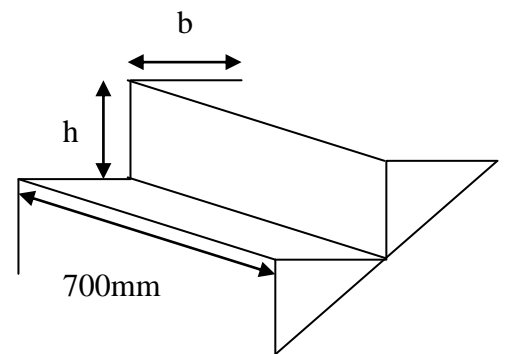
Donc : $610 < 2h + b < 660$ mm.

On prendre : $\begin{cases} b = 220\text{mm} \\ h = 219.6 \text{ mm} \end{cases}$

$2h + b = 659.2$ mm vérifier

Les marches sont construites par des tôles striées, D'épaisseur 5 mm, ces derniers sont boulonnés avec le limon.

$$\begin{cases} P = 44,3 \text{ Kg/m}^2 \\ W_y = 4,17 \text{ cm}^3 \\ e = 0,5 \text{ cm} \end{cases}$$



VI.6.3. Etude de vent :

Rapport de dimension λ : est le rapport de la dimension h_α suivant la ligne de plus grande pente du versant à la dimension horizontale /parallèle au bord de l'escalier : $\lambda = \frac{h_\alpha}{l}$

$$\lambda = \frac{7.78}{5.5} = 1,41 \quad \Rightarrow \gamma = 1,31$$

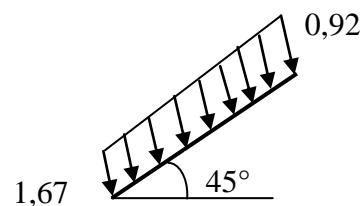
Actions résultantes sur l'escalier : C

$$C = c \cdot \gamma_\alpha$$

$$\gamma_\alpha = \frac{50-\alpha}{10} \gamma + \frac{\alpha-40}{10} \quad 40^\circ < \alpha < 50^\circ$$

$c = 1,675$ sur le bord d'attaque.

$c = 0,925$ sur le bord de fuit.



VI.6.3.1. Charge du au vent :

$$Q_v = q_h \cdot K_s \cdot K_m \cdot \delta \cdot c$$

$$q_h = 2,5 q_{10} \frac{h+18}{h+60}$$

$$q_{10} = 153,37 \text{ daN/m}^2 \cdot h = 16,47 \text{ m}$$

$$q_h = 2,5 \cdot 121,16 \frac{16,47+18}{16,47+60} = 136,53 \text{ daN/m}^2$$

$$k_m = 1 ; \quad k_s = 1,3 ; \quad \delta(5,847) = 0,86 ; \quad c = 1,675 ;$$

$$Q_v = 136,53 \cdot 1,3 \cdot 1 \cdot 0,86 \cdot 1,675 = 220 \text{ daN/m}$$

VI.6.4. Evaluation des charges :

La marche est soumise aux charges et surcharges suivantes :

- la charge permanente :

$$\text{Poids de la marche : } G = 44,3 \cdot 0,220 = 9,746 \text{ daN/ml}$$

$$\text{Charge du vent : } Q_v = 274,59 \cdot 0,220 = 60,41 \text{ daN/ml}$$

- la sur charge d'exploitation :

$$P = 100 \cdot 0,22 = 22 \text{ daN/ml. (Poids d'une seule personne + les accessoires)}$$

$$\text{Total : } G = 70,15 \text{ daN/ml}$$

$$\text{- la charge non pondérée : } Q_1 = G + P = 92,15 \text{ daN/ml}$$

$$\text{- la charge pondérée : } Q_2 = 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot P = 127,70 \text{ daN/ml}$$

VI.6.5. Vérification des marches :**VI.6.5.1. La flèche :**

Les marches striées doivent satisfaire la condition de la flèche suivante :

$$\frac{5Q_1 L^4}{384 E I_x} \leq \frac{L}{200}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} L : \text{ la longueur des cornières, } L = 0,7 \text{ m} \\ I_y : \text{ l'inertie des marches striées, } I = 474,61 \text{ cm}^4 \\ W_y = 4,17 \text{ cm}^3 \end{array} \right.$$

$$AN : \frac{5 \cdot 92,15 \cdot 10^{-3} \cdot 700^4}{384 \cdot 21000 \cdot 474,61 \cdot 10^4} = 0,0028 \text{ mm} \leq \frac{700}{200} = 3,5 \text{ mm} \quad (\text{Condition vérifiée})$$

VI.6.5.2. La résistance :

La condition de la résistance est la suivante $M_{sd} \leq M_{Rd}$.

$$M_{sd} = \frac{Q_2 l^2}{8} = \frac{127,7 \cdot 0,7^2}{8} = 7,82 \text{ daN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} = \frac{f_y \cdot W_y}{\gamma_0} = \frac{235 \cdot 4,17}{1,1} = 89,08 \text{ daN} \cdot \text{m}$$

$$M_{sd} = 7,82 \text{ daN} \cdot \text{m} \leq M_{Rd} = 89,08 \text{ daN} \cdot \text{m} \quad (\text{Condition vérifiée})$$

VI.6.6. Calcul de limon :

Après une succession des calculs, nous avons abouti que le profilé UPN140, convient comme un limon.

Les caractéristiques de l'UPN140 :

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 8,0485 \text{ m} \\ I_y = 1367,67 \text{ cm}^4 \\ W_y = 103 \text{ cm}^3 \\ A = 20,4 \text{ cm}^2 \\ P = 16 \text{ Kg/m} \end{array} \right.$$

VI.6.6.1 Evaluation des charges :

Une volée contient deux limons, et chaque limon doit supporter la moitié des charges et des surcharges exercées sur la volée.

la charge permanente :

La marche : $G = \frac{1}{2} (44.3 \cdot 0,7) = 15,505 \text{ daN/ml}$.

Le limon (UPN140) : $G_1 = 16 \text{ daN/ml}$.

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{La longueur d'une marche : } 0,7 \text{ m.} \\ \text{Le nombre des marches : } 25. \\ \text{La longueur totale du limon : } 7,78 \text{ m.} \end{array} \right.$$

Total : $G = 31,505 \text{ daN/ml}$.

La sur charge d'exploitation : $P = 100 \cdot 0,22 = 22 \text{ daN/ml}$.

La charge non pondérée : $Q_1 = G + P = 53,505 \text{ daN/ml}$.

La charge pondérée : $Q_2 = 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot P = 75,53 \text{ daN/ml}$.

VI.6.6.2. La vérification :**VI.6.6.2.1. La flèche :**

Le limon doit satisfaire la condition de la flèche suivante :

$$\frac{5Q_1 \cos \alpha \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y} \leq \frac{L}{200}$$

Avec :

α : l'angle d'inclinaison de limon, $\alpha = 45^\circ$.

$$\text{AN : } \frac{5 \cdot 53,505 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 7780^4}{384 \cdot 21000 \cdot 1367,67 \cdot 10^4} = 6,86 \text{ mm} \leq \frac{7780}{200} = 38,9 \text{ mm} \quad (\text{condition vérifiée}).$$

VI.6.6.2.2. La résistance :

La condition de la résistance est la suivante : $M_{sd} \leq M_{rd}$.

$$M_{sd} = \frac{Q_2 \cos \alpha \cdot l^2}{8} = \frac{75,53 \cdot 0,7 \cdot 7,78^2}{8} = 400,025 \text{ daN.m}$$

$$M_{Rd} = \frac{f_y W_y}{\gamma_0} = \frac{235 \cdot 14,8}{1,1} = 4161,81 \text{ daN.m}$$

$$M_{sd} = 400,025 \text{ daN.m} \leq M_{rd} = 4161,81 \text{ daN.m} \quad (\text{condition vérifiée}).$$

VI.6.6.2.3. La compression :

Pour que le limon résiste à la compression, il faut que: $N \leq N_R$.

N: effort de compression.

N_R : effort normal de la plastification.

$$N = Q_2 \cdot \sin \alpha \cdot L = 57,53 \cdot 0,7 \cdot 7,78 \cdot 10^{-2} = 3,13 \text{ KN}$$

$$N_R = A f_y / \gamma_0 = 20,4 \cdot 10^2 \cdot 235 / 1,1 = 435,81 \text{ KN}$$

$$N = 3,13 \text{ KN} \leq N_R = 435,81 \text{ KN} \quad (\text{condition vérifiée}).$$

VI.6.7. Calcul de palier de repos : μ :

Nous avons prévu pour le palier de repos, une tôle striée d'épaisseur 30 mm, posée sur des poutres UPN140.

VI.6.7.1. Evaluation des charges :

La charge permanente :

$$G = \rho \cdot e = 7850 \cdot 0,01 = 78,5 \text{ daN/m}^2.$$

La sur charge d'exploitation :

$$P = 250 \text{ daN/m}^2$$

La charge non pondérée :

$$Q_1 = G + P = 328,5 \text{ daN/m}^2.$$

La charge pondérée :

$$Q_2 = 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot P = 480,9 \text{ daN/m}^2.$$

VI.6.7.2. La vérification :**VI.6.7.2.1. La flèche :**

Selon aide mémoire –RDM- (p 201), on a pour une plaque rectangulaire uniformément chargée, encadrée sur 4 cotés (soudée) :

$$e = 1 \text{ cm}, a = 70 \text{ cm}, b = 110 \text{ cm} \Rightarrow b/a = 1,57$$

Supposant que le centre du repère (OXY) est confondu avec le centre de gravité de la plaque. La flèche maximale (quand $x=0, y=0$), est :

$$f = \frac{0,0277 \cdot Q_1 \cdot a^4}{E \cdot e^3} \leq \frac{700}{200}$$

$$AN : f = \frac{0,0277 \cdot 328,5 \cdot 10^{-6} \cdot 700^4}{21000 \cdot 10^3} = 0,103 \text{ mm} \leq \frac{700}{200} = 2,33 \text{ mm}$$

(Condition vérifiée).

On adopte un UPN 140.

Cette poutre des charges et surcharges de palier de repos.

La poutre a les caractéristiques suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_y = 605 \text{ cm}^4 \\ W_y = 103 \text{ cm}^3 \\ P = 16 \text{ Kg/m} \\ L = 0,7 \text{ m} \end{array} \right.$$

VI.6.7.2.2. Evaluation des charges :

La charge permanente :

La tôle : $G = 78,5 \cdot 0,7 = 54,95 \text{ daN/ml}$.

La masse de profil (UPN140) : $G_1 = 16 \text{ daN/ml}$.

Total: $G = 70,95 \text{ daN/ml}$.

La sur charge d'exploitation : $P = 250 \cdot 0,7 = 175,5 \text{ daN/ml}$

La charge non pondérée : $Q_1 = G + P = 246,45 \text{ daN/ml}$.

La charge pondérée : $Q_2 = 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot P = 359,03 \text{ daN/m}^2$.

VI.6.7.3. La vérification :**VI.6.7.3.1. La flèche :**

On doit satisfaire la condition de la flèche suivante :

$$\frac{5Q_1 \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y} \leq \frac{L}{200}$$

$$\text{AN : } \frac{5 \cdot 246,45 \cdot 10^{-3} \cdot 700^4}{384 \cdot 21000 \cdot 605 \cdot 10^4} = 0,006 \text{ mm} \leq \frac{700}{200} = 2,33 \text{ mm} \quad (\text{condition vérifiée}).$$

VI.6.7.3.2. La résistance :

La condition de la résistance est la suivante :

$$M_{sd} \leq M_{Rd}$$

$$M_{sd} = \frac{Q_2 \cdot l^2}{8} = \frac{359,03 \cdot 0,7^2}{8} = 21,99 \text{ daN.m}$$

$$M_{Rd} = \frac{f_y \cdot W_y}{\gamma_0} = \frac{235 \cdot 103}{1,1} = 220,004 \text{ daN.m}$$

$$M_{sd} = 21,99 \text{ daN.m} \leq M_{Rd} = 220,00 \text{ daN.m} \quad (\text{condition vérifiée}).$$

VI.6.7.4. Calcul de la console :

On a choisi pour les console un profile L70*70*7.

L=1 m longueur de console.

On a :

$$Q = G_{\text{marche}}/2 + Q_{\text{Exploitation}} + Q_{\text{limon}}/2$$

Tel que :

$$G_{\text{marche}} = \gamma \cdot e \cdot a \cdot b = 7850 \cdot 0,005 \cdot 0,22 \cdot 0,7 = 6,04$$

$$Q_{\text{Exploitation}} = 250 \text{ daN}$$

$$Q_{\text{limon}} = L \cdot \text{POID linière} = 7,78 \cdot 22 = 171,16$$

$$Q = (6,04/2) + 250 + (171,16/2) = 338,6$$

$$Q_{\text{braquant}} = \frac{Q}{\cos \alpha} = \frac{338,6}{0,7} = 483,71 \text{ daN}$$

VI.6.7.4.1. Vérification :**VI.6.7.4.1.1. Vérification de compression :**

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h}{t} = \frac{70}{7} = 10 \leq 15\varepsilon$$

$$\frac{b+h}{2t} = \frac{70+70}{2 \cdot 7} = 10 \leq 11,5 \varepsilon = 11,5$$

Dou la section est de classe 1.

$$\text{Donc : } N_{C,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma \cdot M0} = \frac{20,41 \cdot 235}{1,1} = 4360 \text{ daN}$$

$$N_{sd} = 483,71 \text{ daN} \leq N_{C,Rd} = 4360$$

La console 70/70/7 résisté bien a la compression.

VI.6.7.4.1.2. Vérification au flambement :

On a : $N_{sd} = 483,71 \text{ daN}$

Ou : $\beta = 1$ pour section .

Il faut vérifier : $N_{sd,y} \leq N_{b,Rd,y}$

Tel que la résistance de calcul au flambement d'un élément comprimé doit être prise égale à :

$$N_{b,Rd,y} = \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

On à choisie IPE 140 \Rightarrow section de classe 1 :

$$\begin{cases} \gamma_{M1} = 1,1 \\ f_y = 235 \text{ N/mm}^2 \\ \beta_A = 1 \end{cases}$$

Calcul de χ : $\chi = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{0,5}}$ mais $\chi \leq 1$

$$\text{Ou : } \phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

α est un facteur d'imperfection.

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1} \right) [\beta_A]^{0,5} =$$

Avec : $L_y = 0,5 \cdot L = 100$

λ : est l'élanement pour le mode de flambement considéré.

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{100}{1,36} = 73,53$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right) [\beta_A]^{0,5} = 0,78 \geq 0,2 \text{ il ya risque de flambement.}$$

On a une cornière donc la courbe de flambement.

$$\alpha = 49$$

$$\text{Ou : } \phi = 0,5[1 + 0,49(0,78 - 0,2) + 0,78^2] = 0,79$$

$$\chi = \frac{1}{0,79 + (0,79^2 - 0,78^2)^{1/2}} = 0,91$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,91 \cdot 1,94 \cdot 235}{1,1} = 18274 \text{ daN}$$

$$N_{Sd,y} < N_{b,Rd,y} \quad \text{condition vérifié}$$

Donc la console résiste au flambement.

VI.7. Ecran flottant :



Figure VI. 4: Ecran flottant de toit fixe

VI.7.1. Définition :

Un écran flottant est un toit flottant interne, à l'intérieur d'un réservoir à toit fixe. Les réservoirs sont bien adaptés pour le stockage des produits volatiles qu'il faut préserver où dont il faut limiter l'émission de vapeurs. Un tel système est aussi avantageux pour se préserver des importantes chutes de pluie ou de neige, en comparaison avec les réservoirs à toit flottant. Les écrans flottants peuvent être des deux types suivants :

- **Ecran flottant soudé.**
- **Ecran flottant boulonné.**

VI.7.2. Equipements :

Des événements sont installés, à intervalles réguliers sur la partie supérieure fixe du réservoir, pour permettre une circulation d'air entre l'écran flottant et le toit fixe du réservoir. Les écrans flottants peuvent être de deux types suivants.

« Pour notre projet nous avons choisie un écran flottant soudé de 5mm d'épaisseur »

VI.7.3. Ecran Flottant Soudé :

Ces écrans sont réalisés avec des tôles d'acier, de 4 à 5 mm d'épaisseur, soudées entre elles par recouvrement de leur face supérieure, qui forme un pont continu et étanche en contact avec le liquide. Une couronne verticale soudée en dessous, borde le périmètre de l'écran et permet d'installer le joint annulaire d'étanchéité. La flottaison n'est assurée que par l'enfoncement de cette structure dans le liquide. Mais au de là d'un diamètre de 50m et jusqu'à 100 m, la flottaison est aidée par des compartiments annulaires placés au dessus du pont. Grâce au principe de construction soudée, ces écrans sont résistants et durables. Ils ont une bonne stabilité avec les produits émulsionnés ou gazeux et sont bien étanches aux vapeurs.

La conception simple ne permet pas au produit d'être piégé, et le dégazage avant une intervention est facile et sûr.

VI.7.4. Vérification de flottabilité :

Le toit flottant interne doit avoir une flottabilité sur le produit stocké.

VI.7.4.1. Volume nécessaire de flottabilité :

$$V = \frac{G}{\rho} \quad \text{avec } G = 178,13 \text{ T et } \rho = 770 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{nf}} = \frac{178,13 \times 10^3}{770} = 231,17 \text{ m}^3$$

G : masse de toit avec ces accessoires.

ρ : masse volumique de produit.

V_{nf} : volume nécessaire de flottabilité.

VI.7.5. Efficacité multiple des joints pour les écrans flottants internes :

La construction des systèmes de joint s'ajuste à celle des écrans flottants. Un maximum d'efficacité du joint pour une hauteur de toit la plus faible possible (perte d'espace dans le réservoir).

Les pièces métalliques sont en acier inoxydable. Toutes les jupes de joint sont choisies selon le produit à stocker, antistatique des deux côtés et étanche à la diffusion.

VI.7.6. Les béquille de l'écran :

L'écran flottant comporte une série de pieds supports tubulaire disposé régulièrement sur le toit.

Ils servent à poser l'écran flottant sur le fond de réservoir. ces pieds sont réglables en altitude par l'intermédiaire de fourreaux soudé au toit. il permet de placer l'écran soit en position base de service, soit en position de nettoyage, les fourreaux des pieds supports doivent avoir une longueur suffisante sous le toit.

VI.7.6.1. Donnée de calcul :

Densité de produit : 770 kg / m³.

Épaisseur de toit : 6.5 mm (épaisseur adopté 5+ surépaisseur de corrosion 1,5) .

Type de tôle : (9420.1830.6,5).

Matière des tôles : A283 Gr C.

Base d'étude : API 650.

VI.7.6.2. Masse des tôles :

$$P = e \times 7850 \times S_{\text{écran}}$$

$$P = 125934.51 \text{ k}$$

VI.7.6.3. Vérification de flambement des béquilles :

La béquille utilisée contient deux tubes l'un à l'intérieur de l'autre.

VI.7.6.3.1. Calcul de rayon de giration :

$$\text{On a } r = \frac{I}{A}$$

Tel que :

I : le moment d'inertie.

A : la section plein de béquille.

Tube intérieur Ø 3in

$$D_{\text{ex}} = 88.9 \text{ mm} \quad e = 7.62 \text{ mm} \quad D_{\text{in}} = 73.66 \text{ mm}$$

Tube extérieur Ø 4 in

$$D_{\text{ex}} = 114.3 \text{ mm} \quad e = 8.56 \text{ mm} \quad D_{\text{in}} = 97.18 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times (88.9^2 - 73.66^2) = 1945.756 \text{ mm}^2$$

$$I = \frac{\pi}{4} \times (88.9^4 - 73.66^4) = 1620937.64 \text{ mm}^4$$

Donc:

$$r = \frac{I}{A} = 28086 \text{ mm}$$

VI.7.6.3.2. Calcul des charges :

Nombre des béquilles : N = 30

$$G = 178,13 \text{ T}$$

$$Q = \frac{178,13}{30} = 5.93 \text{ T}$$

VI.7.6.3.3. Calcul de l'élanement :

$$\lambda = \frac{l}{r} \text{ avec } l = 3400 \quad r = 28.86 \text{ mm}$$

Tel que :

l : longueur libre de flambage.

$$\lambda = \frac{3400}{28.86} = 117.81$$

VI.7.6.3.4. Calcul de compression :

$$\sigma_c = \frac{Q}{A} \text{ avec } Q = 178 \text{ A} = 1945.76 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c = \frac{59300}{1945.76} = 30.48 \text{ N/mm}^2$$

VI.7.6.3.5. Contrainte admissible :

$$\sigma_{adm} = \left(1 - \frac{\lambda^2}{34700}\right) \left(\frac{33000y}{F_x}\right) \quad \text{car } \lambda < 120$$

tel que

λ : l'élanement.

y : coefficient déterminé en fonction de rapport $\frac{e}{I}$

I : rayon de giration.

$$\frac{e}{I} = 0.264 > 0.0015 \quad y = 1$$

F_x : coefficient de sécurité déterminé d'après la formule suivante :

$$F_x = (5/3) + (\lambda/350) + (\lambda^3/183.10^5) \quad \text{avec } \lambda = 117.81$$

$$F_x = 1.91$$

$$\sigma_{adm} = 10421.45 \text{ lb/pce}^2 = 71,85 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c < \sigma_{adm}$$

Alors le tube support est résiste le flambage.

VI.7.6.4. Conclusion :

D'après nos calculs on trouve que notre écran flottant choisie fait une bonne flottabilité, et les béquilles résistent bien au flambement. Les conditions pour la résistance et flottabilité et contrôlé selon API 650 STD.

VI.8. Conclusion :

On a utilisé les accessoires jugées important selon le code API650 pour facilite l'utilisation de bac.

Chapitre VII

Stabilité du réservoir

VII. Stabilité de réservoir :

VII.1. Poutre au vent :

Les réservoirs à toit fixe devront être pourvus d'anneaux raidisseurs destinés à maintenir la forme circulaire lorsque le réservoir est soumis aux efforts du vent. Les anneaux raidisseurs devront être placés au sommet ou au voisinage du sommet de la virole supérieure et de préférence à l'extérieur de la robe. L'épaisseur nominale minimum de la tôle utilisée pour les anneaux raidisseurs formés ou reconstitués devra être de 6,35mm. Et pour les anneaux raidisseurs utilisés comme passage, devra avoir une largeur au moins ou égale à 609,6mm de la cornière de bordure en porte à faux au sommet de la robe ; il devra être situé de préférence à 76,2 – 152,4mm au-dessous du sommet de la cornière de rive.

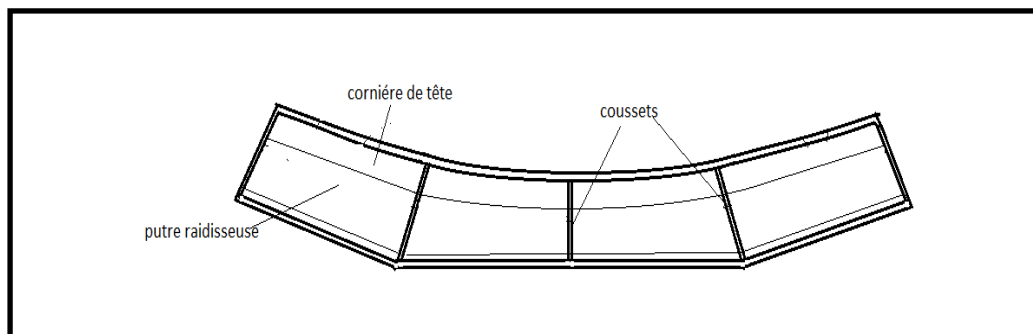


Figure VII. 1 : Poutre au vent-vue de dessus

VII.1.1. Moment résistant exigé :

Le moment résistant minimum exigé pour l'anneau raidisseur devra être déterminé par

$$\text{l'équation suivante : } Z = \frac{D^2 \times h_1}{17} \left(\frac{V}{190} \right)^2. \quad (\text{API650 5.9.6.6})$$

Z : Module de section, en cm^3 .

D : Diamètre nominale du réservoir = 57m.

h_1 : Hauteur de robe = 16.47m.

V : vitesse du vent = 160 km/h

$$\text{AN: } Z = \frac{57^2 \times 16,47}{17} \left(\frac{160}{190} \right)^2.$$

$$\text{Donc : } Z = 2232,17\text{cm}^3.$$

La poutre au vent doit vérifier la condition suivante :

$$W = J_t / Y_G > Z$$

Avec : J_t : moment d'inertie de la section choisie.

Y_G : la distance au centre de gravité.

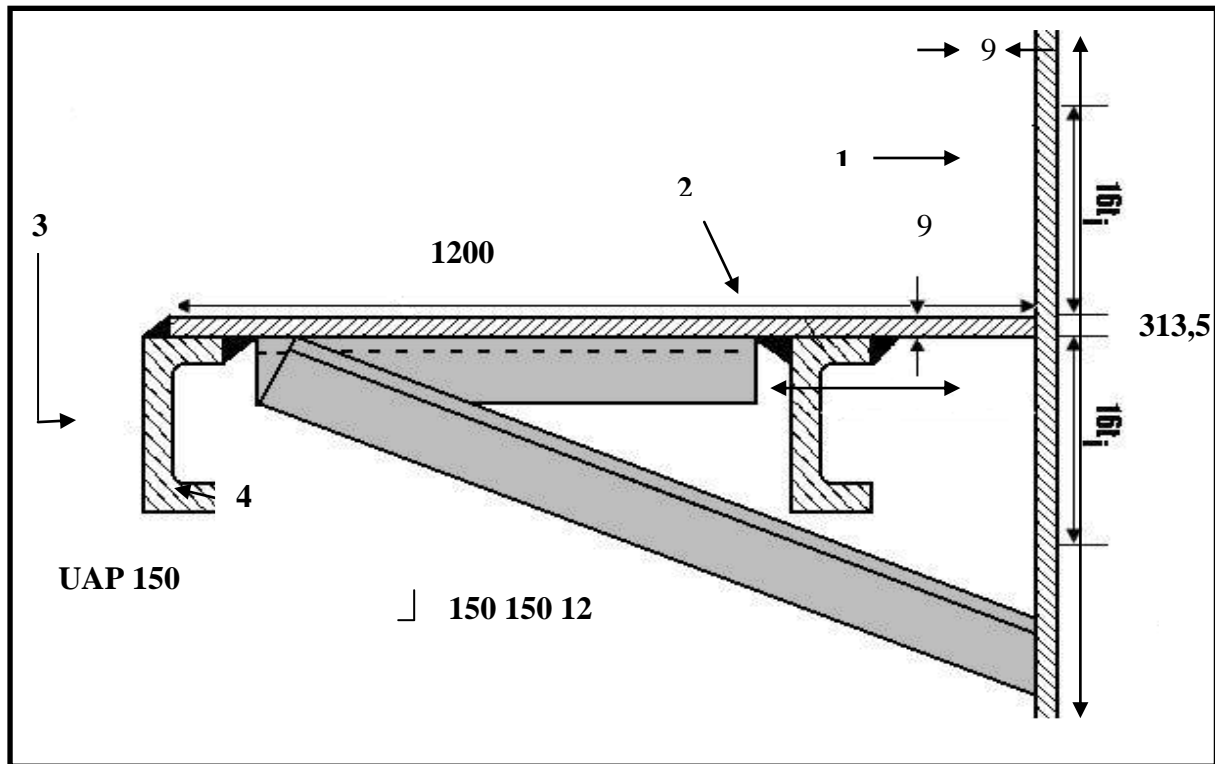


Figure VII. 2 : Raidisseur principal (poutre au vent)

Donné de calcul :

$$\text{Section 1 : } \begin{cases} S_1 = 313,5 \times 9 = 2821,5 \text{ mm}^2 \\ Y_1 = 4,5 \text{ mm} \\ J_1 = 22389,921 \text{ mm}^4 \end{cases}$$

$$\text{Section 2 : } \begin{cases} S_2 = 1200 \times 9 = 10800 \text{ mm}^2 \\ Y_2 = 609 \text{ mm} \\ J_2 = 1368000000 \text{ mm}^4 \end{cases}$$

$$\text{Section 3 : } \begin{cases} S_3 = 150 \times 9 = 1350 \text{ mm}^2 \\ Y_3 = 1204,5 \text{ mm} \\ J_3 = 10717,18 \text{ mm}^4 \end{cases}$$

$$\text{Section 4 : } \begin{cases} S_4 = 65 \times 9,5 = 585 \text{ mm}^2 \\ Y_4 = 1177 \text{ mm} \\ J_4 = 217411,45 \text{ mm}^4 \end{cases}$$

$$Y_g = \frac{\sum Y_i S_i}{\sum S_i} = 572,4 \text{ mm}$$

$$W_t = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + S_1(Y_g - Y_1)^2 + S_2(Y_g - Y_2)^2 + S_3(Y_g - Y_3)^2 + S_4(Y_g - Y_4)^2 = 2.338.10^9 \text{ mm}^4.$$

$$\text{Donc } W_t = \frac{2,338 \times 10^9}{572,4} \times 10^{-3} = 4085,35 \text{ cm}^3$$

$$W_t = \frac{J_t}{X_G} = 4085,35 \text{ cm}^3 > 2232,17 \text{ cm}^3$$

➤ la poutre au vent choisie vérifier la condition .

VII.1.2. Stabilité de la robe sous le vent :

La hauteur maximale de la robe non raidie, (H_1), Selon API 650 (5. 9. 7. 1.).

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

Avec :

t : Epaisseur de la dernière virole=9mm.

D : Diamètre du réservoir = 57m.

V : Vitesse du vent =160 km/h.

Donc, $H_1 \text{ max} = 7,54 \text{ m}$

VII.1.2.1. Calcul de la hauteur transformée de la robe (Htr) :

Selon API 650 (5. 9. 7. 2.) $H_{tr} = \sum H_{tri}$; $i=1 \dots \dots \dots 9$

$$\text{Tel que : } H_{tr} = W_i \cdot \sqrt{\left[\frac{t(\text{uniform})}{t(\text{actuel})}\right]^5}$$

Avec :

- W_i : largeur de la virole transformée.
- t (uniforme) : épaisseur de la dernière virole.
- t (actuel) : épaisseur de la virole transformée.

$H_{tr1}= 107,19\text{mm}$; $H_{tr2}=142,3\text{mm}$; $H_{tr3}=220,04$; $H_{tr4}= 323,5\text{mm}$; $H_{tr5}=510,30\text{mm}$;
 $H_{tr6}=891,46\text{mm}$; $H_{tr7}=1406,23\text{mm}$; $H_{tr8}=1830\text{mm}$; $H_{tr9}=1830\text{mm}$

D'ou : $H_{tr} = 6359 \text{ mm} = 6,36\text{m}$

$H_{tr} < H_1 \text{ max} \Rightarrow$ le raidisseur intermédiaire n'est pas nécessaire.

VII.2. Stabilité de Réservoir :

VII.2.1. Introduction :

Afin d'assuré la stabilité de réservoir il faut vérifier 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 connaît 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. Pour les résoudre, on a recours à des formules empiriques proposées par l'API650.Std.

La pression longitudinale des parois due au poids de la structure peut provoquer des déformations axiales importantes, de cette compression peut en découler un phénomène qui s'appelle «patte d'éléphant » (Figure VII. 3).

VII.2.2. Stabilité radial :

VII.2.2.1. Vérification au renversement :

La pression du vent, dont on ne connaît pas sa fonction de répartition le long de la périphérie du réservoir, provoque une dissymétrie de chargement, de se 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. Pour en remédier, on a recours à des formules empiriques proposées par l'API650.Std.

$$T = n (q_{10} + q_{20,033} + q_{16,47}) \cdot S \cdot C_t$$

n : coefficient de pondération, n= 1.75.

C_t : coefficient globale de traînée, C_t =0.405.

S : surface offert au vent.

$$H=20,033\text{m } D =57 \text{ m}$$

$$S= D.H = 20,033 \times 57 = 1141,88 \text{ m}^2$$

$$Q_{10} = 121,16 \text{ dan/m}^2$$

$$Q_{20,033} = 143,93 \text{ dan/m}^2$$

$$q_{16,47} = 136,54 \text{ dan/m}^2$$

$$T = 1,75 (121,16 + 143,93 + 136,54) 1141,88 \times 0,405 = 325042,15 \text{ dan.}$$

$$P_S = P_r + P_t + P_f + P_a$$

P_f : poids de tôle de fond.

(poids des tôles marginale + le reste des tôles de fond)= **194948 kg**

P_r : poids de la robe= **378017 kg**

P_t : poids du toit (charpente + couverture)= **513066kg**

P_a : poids des accessoires= **222054kg**

Donc :

Poids total de la structure est :

$$P_s = 194948 + 378017 + 513066 + 222054 = 1308085$$

$$P_s = \mathbf{1308085 \text{ kg}}$$

On considère le cas le plus défavorable de trois cas suivants:

1. le réservoir est plein.
2. le réservoir est demi plein.
3. le réservoir est vide.

On constate que le cas le plus défavorable est quand le réservoir est vide donc la masse de liquide n'est pas incluse dans les calculs:

$$\text{Condition de non renversement est } M(p)/A > M(T)/A$$

$$D = (q_{10} \times 5) + (q_{20,033} \times 10,16) + (q_{16,47} \times 8,235) / (q_{10} + q_{20,033} + q_{16,47}) = 7,95 \text{ m}$$

$$M(T)/A = T \cdot D = 325042,15 \times 7,95 = 2584085,093 \text{ kgm.}$$

$$M(p)/A = P_s \cdot R = 1308085 \times 28,5 = 37280422,5 \text{ kg.m.}$$

$M(p)/A > M(T)/A$ **Pas de risque de renversement** donc le renforcement par boulon d'ancrage n'est pas nécessaire.

VII.2.2.2. Vérification de glissement :

$$F_{ex} = 325042,15 \text{ daN}$$

Coefficient de frottement acier-béton ($\alpha = 0,4$).

Condition de non glissement : $PT \alpha > Q_h$.

$$1308085 \times 0,4 = 523234 > 325042,15. \text{ Pas de risque de glissement.}$$

VII.2.2.3. Vérification de cisaillement :

$$Q_H = 143,93 \times 10^3 \text{ daN}$$

$$\tau = \frac{Q_H}{S} = \frac{Q_H}{\pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}$$

$$S = 20046075,47 \text{ mm}^2.$$

$$\tau = \mathbf{0,0072 \text{ daN/mm}^2} < \mathbf{0,65 \sigma_e}$$
 pas de cisaillement.

VII.2.3. Stabilité dans la direction axiale :

La pression longitudinale des parois due au poids de la structure peu provoquer des déformations axiales importantes, et faire apparaître un phénomène qui s'appelle «patte d'éléphant ». Comme indiqué à la figure suivante.

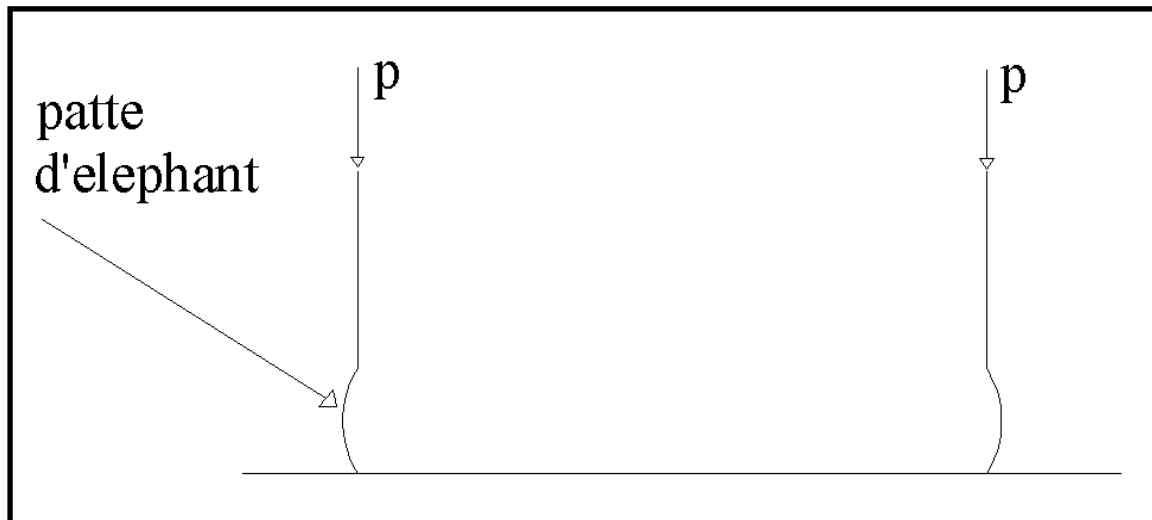


Figure VII. 4 : Patte d'éléphant

La stabilité axiale sera vérifiée par la formule suivante:

$$\sigma_m^i = \frac{p_i}{\pi t_i d} < \sigma_{cr}^i$$

$$\sigma_{cr}^i = \frac{A_i E t_i}{R} \text{ Avec: } R=28,5\text{m.}$$

σ_m^i : Contrainte méridienne due au charge supportée par les viroles (i).

σ_{cr}^i : Contrainte méridienne critique de la virole.

A_i : coefficient de réduction, déterminé expérimentalement en fonction du rapport R/t_i

Par le tableau suivant:

Tableaux VII. 1 : Coefficient de réduction en fonction du rapport R/t_i

R/t_i	500	750	1000	1500	2000	2500	3000
A	0.12	0.1	0.08	0.07	0.055	0.05	0.045

9^{eme} virole :

$$T_9=8 \text{ mm.} \quad R/T_9=28,5/0.008=3562,5. \quad A_9=0,045.$$

$$\sigma_{cr}^9 = \frac{(0.045 \times 28500 \times 8)}{28500} = 0,36 \text{ dan / m}^2$$

$$p_9 = 20571,4 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^9 = \frac{20571,4}{3,14 \times 8 \times 57000} = 0,0143 \text{ kg / m}^2$$

$$\sigma_{cr}^9 > \sigma_m^9 \dots \text{ok}$$

8^{eme} virole :

$$T_8=8 \text{ mm.} \quad R/T_8=28,5/0.008=3562,5 \quad A_8=0.045.$$

$$\sigma_{cr}^8 = \frac{(0.045 \times 28500 \times 8)}{28500} = 0,36 \text{ dan / m}^2$$

$$p_8 = 20571,4 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^8 = \frac{20571,4}{3,14 \times 8 \times 57000} = 0,0143 \text{ kg / m}^2$$

$$\sigma_{cr}^8 > \sigma_m^8 \dots \text{ok}$$

7^{eme} virole :

$$T_7=10 \text{ mm.} \quad R/T_7=28,5/0.01=2850. \quad A_7=0.05.$$

$$\sigma_{cr}^7 = \frac{(0.05 \times 28500 \times 10)}{28500} = 1.676 \text{ dan / m}^2$$

$$p_7 = 25714,25 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^7 = \frac{25714,25}{3,14 \times 10 \times 57000} = 0,0144 \text{ kg / m}^2$$

$$\sigma_{cr}^7 > \sigma_m^7 \dots \text{ok}$$

6^{eme} virole :

$$T_6=12 \text{ mm.} \quad R/T_6=28,5/0.012=2375 \quad A_6=0.055.$$

$$\sigma_{cr}^6 = \frac{(0.055 \times 28500 \times 12)}{28500} = 0,66 \text{ dan / m}^2$$

$$p_6 = 30857,07 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^6 = \frac{30857,07}{3,14 \times 12 \times 57000} = 0,0144 \text{ kg / m}^2$$

$$\sigma_{cr}^6 > \sigma_m^6 \dots \text{ok}$$

5^{eme} virole :

$$T_5=15 \text{ mm.} \quad R/T_5=28,5/0.015=1900. \quad A_5=0.07.$$

$$\sigma_{cr}^5 = \frac{(0.07 \times 28500 \times 15)}{28500} = 1,05 \text{ dan} / m^2$$

$$p_5 = 38571.37 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^5 = \frac{38571,37}{3.14 \times 15 \times 57000} = 0.0144 \text{ kg} / m^2$$

$$\sigma_{cr}^5 > \sigma_m^5 \text{ ...ok}$$

4^{eme} virole :

$$T_4=18 \text{ mm.} \quad R/T_4=28,5/0.018=1583,33. \quad A_4=0.07.$$

$$\sigma_{cr}^4 = \frac{(0.07 \times 28500 \times 18)}{28500} = 1,26 \text{ dan} / m^2$$

$$p_4 = 46285.64 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^4 = \frac{46285.64}{3.14 \times 18 \times 57000} = 0.0144 \text{ kg} / m^2$$

$$\sigma_{cr}^4 > \sigma_m^4 \text{ ...ok}$$

3^{eme} virole :

$$T_3=21 \text{ mm.} \quad R/T_3=28,5/0.021=1357,14. \quad A_3=0.08.$$

$$\sigma_{cr}^3 = \frac{(0.08 \times 28500 \times 21)}{28500} = 1.68 \text{ dan} / m^2$$

$$p_3 = 53999.92 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^3 = \frac{58106.34}{3.14 \times 21 \times 57000} = 0.0144 \text{ kg} / m^2$$

$$\sigma_{cr}^3 > \sigma_m^3 \text{ ...ok}$$

2^{eme} virole :

$$T_2=25 \text{ mm.} \quad R/T_2=28,5/0.025=1140. \quad A_2=0.08.$$

$$\sigma_{cr}^2 = \frac{(0.08 \times 28500 \times 25)}{28500} = 2 \text{ dan} / m^2$$

$$p_2 = 64285,61 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^2 = \frac{64285,61}{3.14 \times 25 \times 57000} = 0.0144 \text{ kg} / m^2$$

$$\sigma_{cr}^2 > \sigma_m^2 \text{ ...ok}$$

1^{ère} virole :

$$T_1=28 \text{ mm.} \quad R/T_1=28,5/0.028=1017,86. \quad A_1=0.08.$$

$$\sigma_{cr}^1 = \frac{(0.08 \times 28500 \times 28)}{28500} = 2,24 \text{ dan} / m^2$$

$$p_1 = 71999,89 \text{ kg}$$

$$\sigma_m^1 = \frac{71999,89}{3.14 \times 28 \times 57000} = 0.0144 \text{ kg} / m^2$$

$$\sigma_{cr}^1 > \sigma_m^1 \quad \dots \text{ok}$$

Donc la stabilité axiale de la robe est vérifiée.

VII.2.4. Conclusion :

On conclut alors que le réservoir est stable à vide et en charge et ne nécessite pas de système d'ancrage au sol.

VII.3. Stabilité du réservoir au séisme :**VII.3.1. Introduction :**

L'étude dynamique implique la détermination du moment de renversement appliqué à la robe du fait de la réponse des masses au déplacement latéral du sol afin de prendre les mesures nécessaires pour assurer la stabilité de l'enveloppe du réservoir contre le renversement et éviter son flambage sous la compression longitudinale.

Quant au comportement du toit flottant, lorsque le réservoir est soumis au séisme, n'est pas évident, car il implique l'étude des actions dynamiques réciproques qui se développent à la suite d'une excitation, entre le toit et la masse active du fluide d'une part, d'autre part entre le toit et la robe du réservoir. Ceci engendrera des divers problèmes, tel que à ces problèmes, on choisit un joint qui convient non seulement pour répondre à la condition d'étanchéité, mais aussi qu'il ait une bonne flexibilité afin d'amortir les chocs et absorber l'énergie développée par la force d'inertie.

VII.3.2. Données du site et de l'ouvrage :

Zone sismique : zone IIa selon rpa99 v2013 Pag116.

Identification de site : D selon api 650 v2013 Pag 254.

Groupe de site (importance de l'ouvrage): SUG III
selon api650 version 2013PargE.1.1 Pag249.

SUG III : Les réservoirs de SUG III sont ceux qui fournissent le service nécessaire aux équipements qui sont essentiels pour le rétablissement de poteau-tremblement de terre et essentiel à la vie et à la santé du public. Ou, réservoirs contenant des quantités substantielles de substances dangereuses.

VII.3.2.1. Calcul du moment de renversement :

Suivant API 650 Parg E.6.1.5 Pag 262.

Le moment de renversement du bac au niveau de la galette en béton est donné par :

$$Mrw = \sqrt{[Ai(WiXi + WsXs + WrXr)]^2 + [Ac(WcXc)]^2}$$

Où :

Ai : coefficient d'accélération de spectre de réponse impulsive, %g.

Ac : coefficient d'accélération de spectre de réponse convective, %g.

Wi : Poids effectif de la partie impulsive de produit, N.

Ws : poids total de la robe y compris accessoires, N.

Wr : poids total du toit de bac y compris accessoires plus 10% de la charge de conception de la neige, N.

Wc : poids effectif de la partie convective (agitée) de produit, N.

Xi : hauteur depuis le fond du bac jusqu'au centre des actions des forces sismiques latérales, correspondant à la force impulsive de produit, m.

Xs : hauteur depuis le fond du bac jusqu'au centre de gravité de la robe, m.

Xr : hauteur depuis le fond jusqu'au centre de gravité du toit et ses accessoires, m.

Xc : hauteur depuis le fond du bac jusqu'au centre des actions des forces sismiques latérales, correspondant à la force convective de produit, m.

Le calcul de moment de renversement est important pour avoir si le bac nécessite un ancrage mécanique ou il est auto-ancré.

Les paramètres du calcul :

$$Ws = 4000705,7 \text{ N}$$

$$Wr = Wrp + 0,1 \times Wn$$

Wrp : charge de toit y compris accessoires.

$$Wrp = 7351200,18 \text{ N}$$

Wnu : La charge unitaire de la neige par unité de surface du toit, elle est calculée suivant le Règlement de neige et vent « R.N.V 1999 ».

$$Wnu = 105,6 \text{ N/m}^2$$

Wn : charge de la neige sur toit.

$$Wn = Wnu \times S_{\text{toit}} = 105,6 \times 2571,62 = 271563,072 \text{ N}$$

$$Wn = 271563,072 \text{ N}$$

$$Wr = 7351200,18 + (0,1 \times 271563,072) = 7378356,487 \text{ N}$$

$$Wr = 7378356,487 \text{ N}$$

$$(D/H) = 3,46 \geq 1,333,$$

Donc : W_i Selon API 650 Parg E.6.1.1.2 Pag 258 est donnée par l'équation suivant :

$$W_i = W_p \frac{\tanh(0,866 \times (D/H))}{0,866 \times (D/H)}$$

W_p : le poids de produit contenu dans le bac, en N.

$$W_p = \pi \times R^2 \times H \times \rho \times g$$

$D = 56,95$ m: diamètre du bac.

$H = 16,47$ m : hauteur du bac.

$\rho = 770 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de produit.

$g = 9,81 \text{ N/kg}$: gravitation.

$$W_p = 3,14 \times 28,47^2 \times 16,47 \times 770 \times 9,81 = 316839379,7 \text{ N}$$

$$W_p = 316839379,7 \text{ N}$$

$$w_i = 316839379,7 \times \frac{\tanh\left(0,866 \times \left(\frac{56,95}{16,47}\right)\right)}{0,866 \left(\frac{56,95}{16,47}\right)} = 50760259,22 \text{ N}$$

W_c : Selon API 650 Parg E.6.1.1.3 Pag 259 est donnée par l'équation suivant :

$$W_c = 0,230 \frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3,67H}{D}\right) W_p$$

$$W_c = 0,230 \frac{56,95}{16,47} \times \tanh\left(\frac{3,67 \times 16,47}{56,95}\right) \times 316839379,7 = 4667246,506 \text{ N}$$

$$W_c = 4667246,506 \text{ N}$$

$(D/H) = 2,84 \geq 1,333$, donc X_i Selon API 650 Parg E.6.1.2.1.1 Pag 259 est donnée par l'équation suivant :

$$X_i = 0,375 H$$

$$X_i = 0,375 \times 16,47 = 6,28 \text{ m}$$

X_c : Selon API 650 Parg E.6.1.2.1.3 Pag 259 est donnée par l'équation suivant :

$$X_c = \left[1,0 - \frac{[\cosh(3,67 \times (H/D)) - 1]}{3,67 \times (H/D) \times [\sinh(3,67 \times (H/D))]} \right] \times H$$

$$X_c = \left[1,0 - \frac{[\cosh(3,67 \times (16,47/56,95)) - 1]}{3,67 \times (16,47/56,95) \times [\sinh(3,67 \times (16,47/56,95))]} \right] \times 16,47$$

$$X_c = 16,33 \text{ m}$$

X_s : selon api 650 Pag 248 égale $H/2$

$$X_s = 16,47/2 = 8,235 \text{ m}$$

X_r selon api 650 Pag 248 égale $(H - H_2)$.

$$X_r = (20,03 - 0,785) = 19,245 \text{ m}$$

VII.3.2.2. Les coefficients d'accélération de spectre de réponse impulsive et convective A_i et A_c :

A_i et A_c : Selon API 650 Parg E.4.6.2 Pag 256 est donnée par les équations suivants :

A_i : Coefficient d'accélération de spectre de réponse impulsive.

$$A_i = S_d S \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) = 2,5 \times Q \times F_a \times S_0 \times (I/R_{wi})$$

Et si: $A_i \geq 0,007$;

Et seulement dans les sites E et F, Donc:

$$A_i \geq 0,5 \times S_1 \times (I/R_{wi}) = 0.875 \times S_p \times (I/R_{wi})$$

A_c : Coefficient d'accélération de spectre de réponse convective.

Si $T_c \leq T_L$:

$$A_c = \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) = 2,5 \times K \times Q \times F_v \times S_0 \times \left(\frac{T_s}{T_c} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right)$$

Si $T_c > T_L$:

$$A_c = \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) = 2,5 \times K \times Q \times F_v \times S_0 \times \left(\frac{T_s \times T_L}{(T_c)^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right)$$

ASC7 : pour les régions définies dans les USA.

MCE : Considération pour un maximal tremblement de terre.

S_{d1} : Paramètre d'accélération de spectre de réponse, atténuée à 5%, à une (01) seconde, basé sur la méthode ASC7, %g.

S_{ds} : Paramètre d'accélération de spectre de réponse, atténuée à 5%, à 0,2 secondes, basé sur la méthode ASC7, %g.

S_0 : Paramètre d'accélération de spectre de réponse à zéro (0) seconde pour un maximal tremblement de terre considéré, atténuée à 5%, basé sur la carte géographique du site ($S_0 = S_p$ pour des structures rigides) , %g.

S_1 : Paramètre d'accélération de spectre de réponse à une période d'une (01) seconde pour un maximal tremblement de terre considéré, atténuée à 5%, basé sur la carte géographique du site, %g.

S_s : Paramètre d'accélération de spectre de réponse à une courte période de 0,2 seconde pour un maximal tremblement de terre considéré, atténuée à 5%, basé sur la carte géographique du site, %g.

S_p : coefficient d'accélération de zone pour les sites non adressés par ASC7).

I : coefficient de facteur d'importance basé sur l'identification de groupe (SUG III).

R_{wi} : facteur de réduction de force pour le mode impulsif, en utilisant les méthodes de conception de contrainte admissible.

R_{wc} : facteur de réduction de force pour le mode convectif, en utilisant les méthodes de conception de contrainte admissible.

Q : facteur d'échelle à partir de la méthode MCE jusqu'aux accélérations de conception de niveau de spectre = 1 pour les sites non définis en ASC7.

F_a : Coefficient d'accélération basée sur le site, à une période de 0,2 secondes.

F_v : Coefficient de vitesse basée sur le site, à une période d'une (01) seconde.

$K = 1,5$: Coefficient d'ajustement (d'amortissement) de l'accélération de spectre de 5% à 0,5%.

T_c : période naturelle de comportement du liquide pour le mode convectif, secondes

T_L : période de transition (dépanadant de la région) pour plus long période de tremblement de terre, secondes.

$$T_s = (F_v \times S_1) / (F_a \times S_s)$$

K_s : coefficient de période de tremblement.

Paramètres pour calculer A_i et A_c :

$S_p = 0,25$; selon rpa99 v2003 tableaux 4.2.3 Pag 112

$S_0 = S_p = 0,25$ (pour des structures rigides $S_0 = S_p$)

S_1 et S_s Selon API 650 Parg E.4.3. Pag 252 est donnée par les équations suivantes :

$$S_1 = 1,25 \times S_p$$

$$S_1 = 1,25 \times 0,25 = 0,3125 \%g$$

$$S_1 = 0,3125 \%g$$

$$S_s = 2,5 \times S_p$$

$$S_s = 2,5 \times 0,25 = 0,625 \%g$$

$$S_s = 0,625 \%g$$

$I = 1,5$ Selon API 650 tableaux E.5 Pag 258.

$K = 1,5$ Selon API 650 Pag 245.

$Q = 1$ Selon API 650 Parg E.4.6.1. Pag 256.

R_{wi} et R_{wc} et donné Selon API 650 tableaux E.4 Pag 257.

$R_{wi} = 4$ (Pour le cas le plus défavorable : Prévision pour ancrage).

$R_{wc} = 2$ (Pour le cas le plus défavorable : Prévision pour ancrage).

$T_L = 4\text{sec}$; Selon API 650 Parg E.4.6.1. Pag 256

K_s et T_c : Selon API 650 Parg E.4.5.2.a Pag 255 est donnée par les équations suivants :

$$K_s = 0,578 / [\tanh(3,68 \times (H/D))]^{0,5}$$

$$K_s = 0,578 / [\tanh(3,68 \times (18 / 42,3))]^{0,5} = 0,603$$

$$K_s = 0,603$$

$$T_c = 1,8 \times K_s \times (D)^{0,5}$$

$$T_c = 1,8 \times 0,603 \times (42,3)^{0,5} = 7,05 \text{ sec.}$$

$$T_c = 7,05 \text{ sec.}$$

F_a ; Selon API 650 tableaux E.1 Pag 25.

$$S_s = 0,50 \longrightarrow F_a = 1,4$$

$$S_s = 0,625 \longrightarrow F_a = x \quad \text{on a:} \quad \frac{1,2-1,4}{x-1,4} = \frac{0,75-0,50}{0,62-0,50} ; x = 1,304$$

$$S_s = 0,75 \longrightarrow F_a = 1,2$$

$$F_a = 1,304$$

Fv : Selon API 650 tableaux E.2 Pag 25

$$S1 = 0,3 \longrightarrow Fv = 1,8$$

$$S1=0,312 \longrightarrow Fv = x \quad \text{on a: } \frac{1,6-1,8}{x-1,8} = \frac{0,4-0,3}{0,312-0,3}; x = 1,78$$

$$S1 = 0,4 \longrightarrow Fv = 1,6$$

$$Fv = 1,78$$

$$Sds = 2,5 \times Q \times Fa \times S0$$

$$Sds = 2,5 \times 1 \times 1,304 \times 0,25 = 0,815 \%g$$

$$Sds = 0,815 \%g$$

$$Ts = (Fv \times S1) / (Fa \times Ss)$$

$$Ts = (1,78 \times 0,312) / (1,304 \times 0,625) = 0,650 \text{ sec.}$$

$$Ts = 0,650 \text{ sec}$$

$$Tc > TL$$

Donc :

$$Sd1 = 2,5 \times Q \times Fv \times S0 \times Ts$$

$$Sd1 = 2,5 \times 1 \times 1,78 \times 0,25 \times 0,650 = 0,723 \%g$$

$$Sd1 = 0,723 \%g$$

VII.3.2.2.2. Calcul des coefficients d'accélération de spectre de réponse impulsive et convective Ai et Ac sont comme suit:

$$Ai = 2,5 \times 1 \times 1,304 \times 0,25 \times \left(\frac{1,5}{4}\right) = 0,305 \%g$$

$$Ai = 0,305 \%g$$

$$Ac = 2,5 \times 1,5 \times 1 \times 1,78 \times 0,25 \times \left(\frac{2,6}{49,70}\right) \times \left(\frac{1,5}{2}\right) = 0,065 \%g$$

$$Ac = 0,065 \%g$$

Le moment de renversement est donné par :

$$Mrw = \sqrt{[Ai(WiXi + WsXs + WrXr)]^2 + [Ac(WcXc)]^2}$$

Tableaux VII. 2 : Paramètres pour le calcul du moment de renversement

Ai	0,305 %g
Ac	0,065 %g
Ws	4000705,7 N
Wr	7378356,487 N
Wi	5076259,22N
Wc	4667246,506N
Xi	6,28 m
Xc	16,33m
Xs	8,235m
Xr	19,245 m

Mrw=

$$\sqrt{[0,305(5076259,22 \times 6,28) + (4000705,7 \times 8,235) + (7378356,487 \times 19,245)]^2 + [0,065(4667246,509 \times 16,33)]^2}$$

Mrw = 184731788,5 N.

VII.3.3. Conditions pour un réservoir auto-ancré :

Pour un réservoir auto-ancré (qui ne nécessite pas d'ancrage) une partie de son poids doit résister au moment de renversement Mrw.

Un réservoir sera auto-ancré si les conditions suivantes sont réalisées:

- La force de résistance est suffisante pour assurer la stabilité du réservoir, (par exemple, le rapport d'ancrage, $J \leq 1,54$).
- la largeur maximale de la tôle marginale du fond de réservoir, pour la détermination des forces résistantes, est de 3,5% par rapport au diamètre du réservoir.
- la contrainte de compression de la robe doit satisfaire au (API 650 E.6.2.2).
- l'épaisseur de la tôle marginale de fond du réservoir ne doit pas être supérieure à l'épaisseur de la première virole de la robe.

VII.3.3.1. Vérification de la 1^{ère} condition (calcul du rapport d'ancrage J) :

$$J = \frac{Mrw}{D^2(Wt(1 - 0.4A_v) + Wa - 0.4 \times W_{int})} \quad \text{API650 (E.6.2.1.1-1)}$$

Wt : charges de toutes les parties (robe y compris accessoires, poids de toit supporté par la robe, et 10% de la charge de neige), qui font une contrainte sur les parties inférieures de la robe, N/m.

$$Wt = \frac{W_s}{\pi D} + \frac{W_{rs}}{\pi D}$$

W_s = 4000705,7 N : poids de la robe.

W_{rs} = 7378356,487 N : charge du toit sur la robe plus 10% de la charge de neige par unité de la longueur de la circonférence du réservoir.

$$Wt = \frac{4000705,7 + 7378356,487}{\pi \cdot 57} = 32925,7 \text{ N/m}$$

Wt = 134150,67 N/m

W_a = 99 × t_a × √(F_{by} × H × G_e) : la force résistante de contenu de réservoir.

F_{by} : 205 MPA : limite d'élasticité minimale du matériau de la tôle marginale du fond.

H = 16,47 m : hauteur de réservoir.

A_v : Coefficient d'accélération verticale de tremblement de terre [API 650(E.2.2)]

$$A_v = 0,14 \times S_{ds} = 0,47 \times Q \times F_a \times S_0 = 0,13\% g$$

$$G_e = (1 - 0,4 \times A_v) = (1 - 0,4 \times 0,13) = 0,95\% g$$

$$G_e = 0,95$$

W_{int} = soulèvement due à la pression du produit W_{int} = p × g × h / π × D [API 650 (E2.2)]

t_a = 6 mm : l'épaisseur de la tôle marginale du fond du réservoir (sans surépaisseur de corrosion).

$$W_a = 99 \times 6 \times \sqrt{(205 \times 16,47 \times 0,95)} = 33641,24 \text{ N/m.}$$

W_a = 33641,24 N/m

$$W_{int} = p \times g \times h / \pi \times D \quad [\text{API 650 (E2.2)}]$$

$$W_{int} = 770 \times 9,81 \times 16,47 / \pi \times 57 = 694,75 \text{ N/m.}$$

W_{int} = 694,75 N/m

Donc :

$$J = \frac{Mrw}{D^2(Wt(1 - 0.4A_v) + Wa - W_{int})} = \frac{184731788,5}{57^2(134150,67(0,95) + 33641,24 - 694,75)} = 0,47$$

J = 0,47 < 1,54 ; DONC CONDITION EST VERIFIEE

VII.3.3.2. Vérification de la 2^{ème} condition :

$$L = 0,01723 \cdot ta \cdot \sqrt{[F_{by}] / (H \cdot Ge)} \leq 0,035 \cdot D \quad \text{API650 (E.6.2.1.1.2)}$$

$F_{by} = 205 \text{ MPa}$: limite d'élasticité minimale de matériau de la tôle marginale.

$ta = 6 \text{ mm}$: l'épaisseur de la tôle marginale sans surépaisseur de corrosion.

$$L = 0,01723 \times 6 \times \sqrt{[205 / (16,47 \times 0,95)]} = 0,37 \text{ m}$$

$$L = 0,37 \text{ m.}$$

$L = 0,37 \text{ m} \leq 0,035 \times 57 = 1,995 \text{ m}$; Donc la deuxième condition est vérifiée.

VII.3.3.3. Vérification de la 3^{ème} condition :

selon (API 650 E.6.2.2) :

La contrainte longitudinale admissible de la compression sous la robe est donnée par F_c .

• Calcul de F_c :

On a :

$$G \cdot H \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^2 = 0,9 \times 16,47 \times (57/25)^2 = 77,06 > 44$$

Avec :

$t = 25 \text{ mm}$: épaisseur de la première virole de la robe sans la surépaisseur de corrosion

$G = 0,9$: gravité spécifique.

$$D = 57 \text{ m.}$$

Donc :

$$F_c = 77,06 \text{ ts} / D = 77,06 \times 25 / 57 = 36,40$$

$$\mathbf{F_c = 33,80 \text{ MPa}}$$

La contrainte longitudinale maximale de compression sous de la robe, pour un réservoir auto-ancré, est donnée par σ_c ;

$$\sigma_c = [Wt (1 + 0,4 \cdot Av) + \left(\frac{1,273 \cdot Mrw}{D^2}\right)] \left(\frac{1}{1000 \cdot ts}\right)$$

$T_s = 25 \text{ mm}$: épaisseur de la première virole de la robe (sans tenir compte au surépaisseur de corrosion).

AN :

$$\sigma_c = \left[(134150,67 \times (1 + 0,4 \times 0,95)) + \left(\frac{1,273 \times 184731788,5}{57^2}\right) \right] \left(\frac{1}{1000 \times 25}\right) = 3 \text{ N/mm}^2$$

$$\mathbf{\sigma_c = 10,3 \text{ MPa}}$$

Les deux conditions suivantes doivent être réalisées :

σ_c doit être inférieure à F_c .

$$1) \sigma_c = 10,3 \text{ N/mm}^2 \leq F_c = 33,80 \text{ N/mm}^2$$

$$2) F_c \text{ doit être inférieure à } 0,5 \cdot F_{by}$$

$F_{by} = 205 \text{ MPa}$: limite d'élasticité minimale de la tôle marginale.

$$F_c = 33,80 \text{ MPa} \leq 0,5 \cdot 205 = 102,5 \text{ MPa}$$

La 3^{ème} condition est vérifiée. Donc le réservoir résiste aux contraintes de compression, sous la robe

VII.3.3.4. Vérification de la 4^{ème} condition

Selon l'API650 (E.6.2.1.1.2)

L'épaisseur (sans surépaisseur de corrosion) de la tôle marginale de fond de réservoir ne doit pas être supérieure à l'épaisseur de la première virole de la robe (sans surépaisseur de corrosion)

$t_a = 6 \text{ mm}$: épaisseur de la tôle marginale de fond du bac (sans surépaisseur de corrosion)

$T_{s1} = 25 \text{ mm}$: épaisseur de la première virole de la robe (sans surépaisseur de corrosion)

Donc : $t_a \leq t_{s1}$

On a : $t_a = 6 \text{ mm} \leq t_{s1} = 25 \text{ mm}$; la 4^{ème} condition est vérifiée.

VII.3.4. Calcul de la résistance du réservoir Résistance à la rupture fond-robe selon

(E.7.6) et (E.7.7) API650.

Dans cet étape on étudie la résistance à la rupture entre le fond et la robe de réservoir, et on étudie également la résistance du réservoir aux forces de glissement causées par les charges de cisaillement de séisme.

VII.3.4.1. Résistance à la rupture fond-robe :

Pour ne pas avoir un cisaillement (rupture) au niveau du joint fond-robe, La contrainte de cisaillement au niveau de joint de soudure ne doit pas être supérieure à 80% de la limite d'élasticité minimale du métal de base F_{by} .

$$V_{max} / (A + B) < 0,8 F_{by}$$

V_{max} : force de cisaillement tangentiel par unité de longueur, N/m.

$F_{by} = 205 \text{ MPa}$: limite d'élasticité minimale du matériau de la tôle marginale du fond de réservoir.

$(A + B)$: la largeur du joint de soudure entre fond et robe (voir Figure 5-3C, API 650).

La force de cisaillement tangentiel par unité de longueur de joint de soudure fond-robe est donnée par l'équation suivante:

$$V_{max} = 2V / \pi D$$

V : forces de cisaillement dues au séisme, N.

Les forces de cisaillement entre fond - robe de bac sont données par:

$$V = \sqrt{(V_i)^2 + (V_c)^2}$$

V_i : force de cisaillement dû au mode impulsif des composantes des poids effectifs de réservoir bac et ses contenants, N.

V_c : force de cisaillement dû au mode convectif des composantes des poids effectifs de réservoir et ses contenants, N.

$$V_i = A_i (W_s + W_r + W_f + W_i)$$

$$V_i = 0,305(4000705,7 + 7378356,487 + 1900741,85 + 5076259,22) = 5598599,293 \text{ N}$$

$$V_c = A_c \cdot W_c = 0,065 \times 4667246,506 = 303371,02 \text{ N}$$

$$\mathbf{V_c = 303371,02 \text{ N}}$$

Tel que :

$$\mathbf{W_f = 1900741,85 \text{ N}}$$
 (poids du fond de réservoir)

Donc:

$$V = \sqrt{(5598599,293)^2 + (303371,02)^2}$$

$$\mathbf{V = 15606812,644 \text{ N}}$$

$$V_{\max} = 2V / \pi \cdot D$$

$$\mathbf{V_{\max} = 62621,19 \text{ N/m} = 6,26 \text{ kg/mm}}$$

$(A + B) \geq 8 \text{ mm}$: la largeur du cordon de soudeur entre fond-robe (voir Figure 5-3C, API 650).

$$F_{by} = 205 \text{ MPa} = 20,5 \text{ kg/mm}^2$$

Pour une valeur minimale $(A+B) = 8 \text{ mm}$, on aura:

$$[V_{\max} / (A + B)] = 0,783 \text{ kg/mm}^2 < 0,8 F_{by} = 16,4 \text{ kg/mm}^2$$

Le réservoir résiste aux contraintes dues aux forces de cisaillement de séisme, et il ne risque pas la rupture au niveau du joint de soudure fond-robe.

VII.3.4.2. Résistance aux glissements dus aux forces de cisaillement :

Pour que le réservoir soit stable (résiste aux forces du glissement) l'inéquation suivante doit être réalisée :

$$V_s > V$$

V : forces de cisaillement dues au séisme, N.

V_s : force de frottement, N.

Les forces de frottement V_s sont données par:

$$V_s = \mu (W_s + W_r + W_f + W_p)(1 - 0,4 A_v)$$

$$V_s = 0,35(4000705,7 + 7378356,49 + 1900741,85 + 316839379,7)(1 - 0,4 \times 0,13)$$

$$V_s = 109533545,2 \text{ N}$$

$$W_p = 316839379,7 \text{ N}$$

$$V_s = 109533545,2 \text{ N}$$

$\mu = 0,35$: Coefficient de frottement (selon API 650 la valeur ne doit dépasser 0,4) ;

$$V_s = 316839379,7 \text{ N et } V = 15606812,644 \text{ N}$$

$$\Rightarrow V_s > V$$

Donc le réservoir ne résiste aux forces de cisaillement dues au séisme.

VII.3.5. Conclusion :

- 1) Le réservoir est stable au renversement du séisme ; Donc il ne nécessite pas des ancrages.
- 2) Le réservoir résiste à la rupture et au glissement dus aux forces du cisaillement causées par un éventuel séisme.

Chapitre VIII

Fabrication et Montage

VIII. Fabrication et Montage :

VIII.1. Introduction :

Sauf indication contraire de la commande, un terre plein uniforme et de niveau, destiné à recevoir le fond du réservoir, devra être fourni par l'acheteur

Le constructeur devra fournir toute la main d'œuvre , les outils , les câble , et le matériel de soudage ,les cintre , échafaudage et tout autre matériel nécessaire au montage complet des réservoirs de façon à ce qu'ils soient prêt à être utilisé , L'énergie nécessaire au soudage devra être fournie par le constructeur ,sauf dispositions contraire de la commande

Code de règlement :

- API 650.
- Norme ASME.
- Norme ANSI.

VIII.2. Ordre de montage :

- Réalisation de la fondation.
- Montage de la tôle marginale.
- Montage de fond.
- Montage des véroles.
- Montage de la charpente.
- Montage de toit de réservoir.
- Montage des accessoires.

VIII.3. Fabrication en atelier :

Le débit c'est par la ce commence en atelier tout projet après avoir muri en étude, qu'il s'agit de bacs ou de charpente métallique tout prend forme de débits.

Tous les outils de coupe (cisailles hydraulique, scie mécanique, oxycoupeuse) sont à l'œuvre pour donner leur forme première aux éléments.

VIII.3.1 Procédure de fabrication :**VIII.3.1.1 Fabrication des tôles de la robe:**

Avant le découpage des tôles brutes, il faut qu'il ait une vérification dimensionnelle des tôles.

Les tolérances de découpage seront les suivantes :

Largeur : ± 1.5 mm

Longueur : ± 2 mm

En diagonale : ± 3 mm

Après découpage, la tôle sera chanfreinée selon les dimensions données sur les plans.

Le contrôle dimensionnel se fait au fur et à mesure du chanfreinage.

Le nettoyage des zones traitées, à savoir : meulage des bords, des scories etc...) S'effectuera en atelier d'assemblage, après cela la tôle sera mise sur rouleau cintreur, au rayon demandé.

La tôle une fois prête sera posée sur berceaux ayant le même rayon de cintrage dont la charge utile ne dépasse pas 20 T.

VIII.3.1.2 Les moyens de découpage utilisent :

L'oxycoupage pour les tôles d'épaisseurs supérieur et les profilées et les tubes...etc.

Lorsque les bords sont oxycoupés, la surface obtenue devra être uniforme et lisse et débarrassée des scories avant soudage.

Une fois les bords coupés, passent à la brosse métallique, la fine pellicule des rouilles adhérant au bord pas lieu éliminer avant soudage.

Les bords de la circonférence de tôle de fond et de toit peuvent être oxycoupés manuellement.

Après découpage, la tôle sera chanfreinée selon les dimensions données sur les plans.

Le contrôle dimensionnel se fait au fur et à mesure du chanfreinage.

Le nettoyage des zones traitées, à savoir : meulage des bords, des scories s'effectuera en atelier d'assemblage, après cela la tôle sera mise sur rouleau cintreur, au rayon demandé.

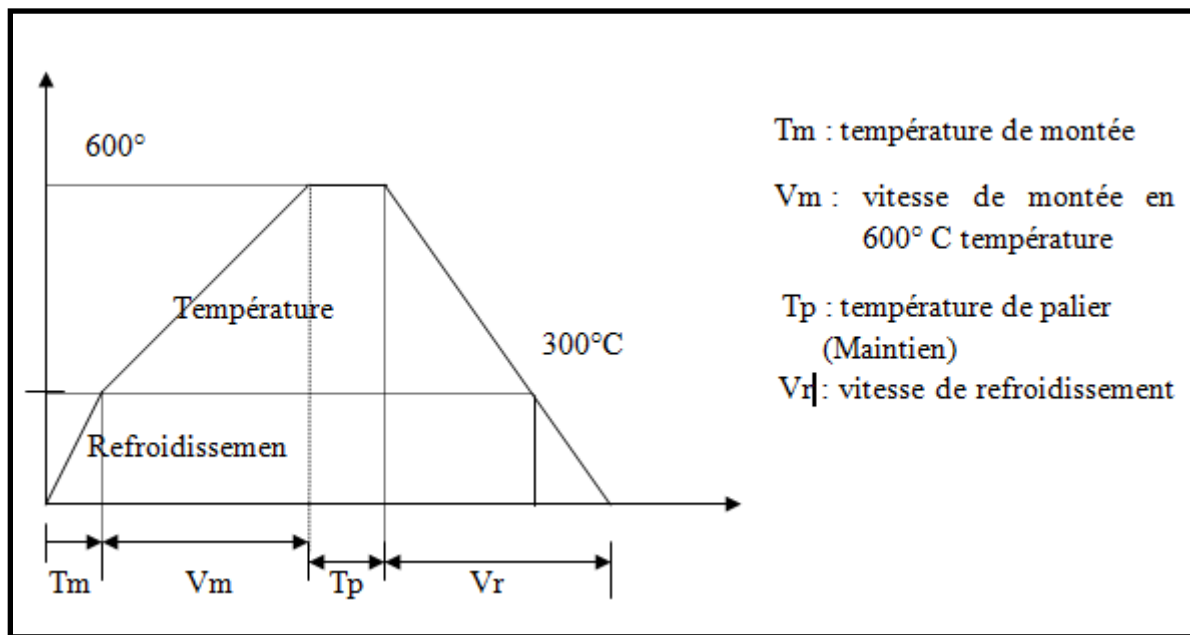
Une fois la tôle prête, elle sera posée sur le berceau qui ayant le même rayon de cintrage à l'aide de rouleau cintreur.

VIII.4. Traitement thermique :

Le traitement thermique après soudage est réalisé pour les tôles d'épaisseur supérieure à 25,4 mm ou sur les tôles où sont soudées des tubulures de diamètre supérieur ou égal à 12 pouces (CODE API 650 paragraphes 3.74.2 & 3.7.4.3).

Le traitement thermique des éléments de virole sera réalisé en atelier dans des fours.

Le contrôle de température se fera par thermocouples et les valeurs doivent être enregistrées sur le diagramme façon continu et automatique sauf lors de la montée en température partir de 300 °C et pendant le refroidissement en dessous de 300°C.

Courbe de traitement thermique :**Figure VIII. 1 : Courbe de traitement thermique**

La vitesse de montée en température en °C/Heure est égale à $5500/E$ (mm)

E : épaisseur de la tôle ; $55 < V_m < 220^\circ\text{C}/\text{H}$

La température de palier et le temps de maintien de cette température est de $600^\circ\text{C} - 1\text{Heure}/25,4 \text{ mm d'épaisseur}$;

La vitesse de refroidissement est égale à $5500 / E(\text{mm})$; $55 < V_r < 220^\circ\text{C}/\text{H}$

VIII.5. Préparation des tôles :

- Pour faciliter le montage, il est nécessaire de procéder aux opérations suivantes:
- Effectuer le cintrage et le chanfreinage des tôles.
- Repérage des tôles suivant leur ordre de montage.
- Repérage et traçage des tôles pour la fixation des accessoires de montage.
- Préparation de tous les accessoires de montage tel que (dés d'accostage [carré], Chicago, oreille de levage,...).
- Préparation de l'échafaudage.

VIII.5.1. Mise en forme des tôles de robe :

Les tôles de robe et les tôles de renforts pour les tubulures sur robe devront être mises à la forme convenant à la courbure du réservoir, au moyen d'une cintreuse à 3 ou 4 rouleaux. Après le cintrage, les tôles seront posées sur des socles en bois épousant leur forme pour ne pas déformer la courbure comme indique la figure suivante :

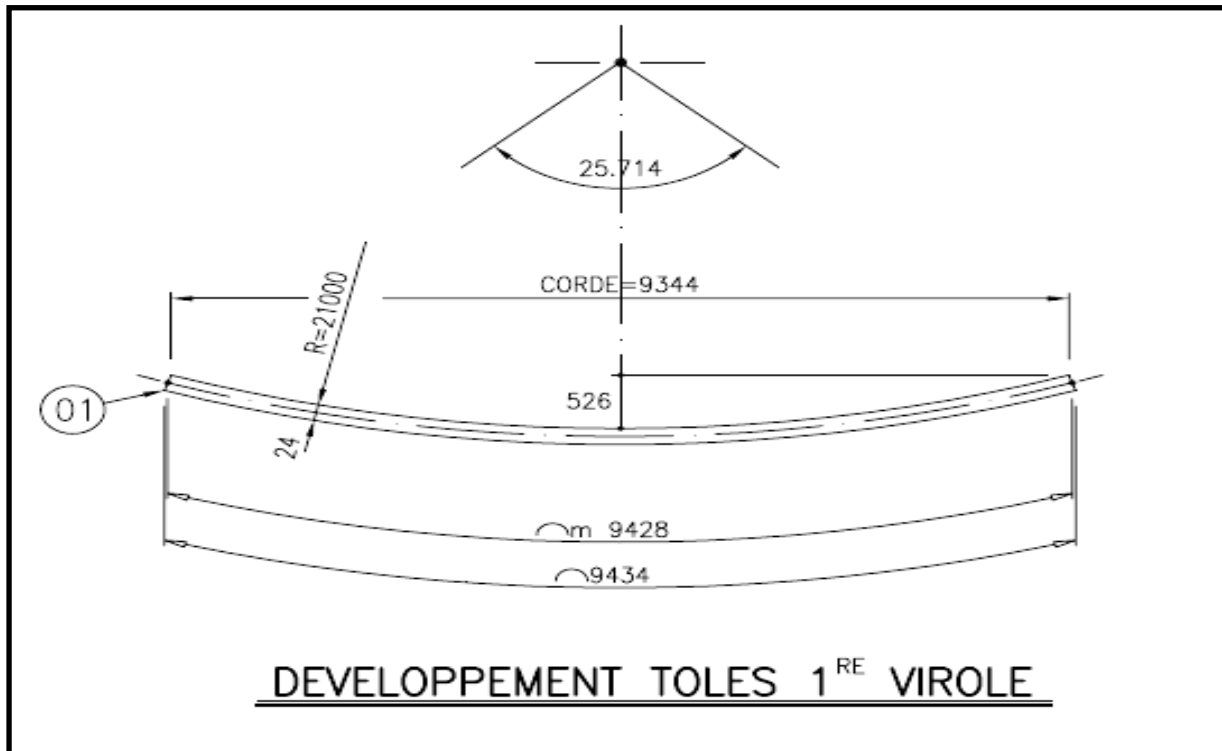


Figure VIII. 2 : Développement des tôles de la première vérole

VIII.6. Gamme de montage :

Le montage des constructions métallique doit être bien étudié en utilisant des techniques et des méthodes afin d'assurer la rapidité d'exécution, et la sécurité des ouvriers.

VIII.6.1. Exécution :

Toutes les opérations concernant la construction et le montage du bac exécutées conformément à la spécification du code APIsta650.

En plus, le réalisateur est tenu de respecter également, les plans d'engineering du bac, les plans d'exécution, plans de fondations et les tolérances dimensionnelles fournis par le bureau d'étude.

VIII.6.2. Explication de méthode de montage "tôle par tôle" :

La méthode traditionnelle effectuée en fonction des moyens humains et matériels utilisée. Elle s'appelle "méthode : tôle par tôle".

La nomenclature de cette méthode peut donner au lecteur une idée approximative, elle s'applique suivant des étapes, l'une après l'autre.

VIII.6.3. Montage du fond :

Avant le début du montage d'un fond il faut repérer les axes principaux des éléments suivants :

- Fondation, soit de la surface bétonnée dans la direction nord sud.
- Fond de bac.
- La paroi avec les tubulures.
- Le toit.

Le montage du fond plat commence après la préparation de sol et de la fondation. Puis, il est nécessaire d'approcher les tôles autour de la fondation pour faciliter le travail (on utilise comme moyen de manutention, une grue).

Le soudage du fond doit être effectué par le procédé de soudage à l'arc manuel

La largeur de la zone doit être nettoyé au minimum de 30 mm de chaque côté de la soudure.

La mise en place des tôles du fond s'effectuera en allant du centre vers le périphérique en respectant le recouvrement demandé

Les tôles seront soudées sur la partie plate seulement et avec recouvrement minimum de cinq fois l'épaisseur de la tôle. Cette opération se fait afin qu'il ne reste aucun espace entre le fond et la robe à poser.

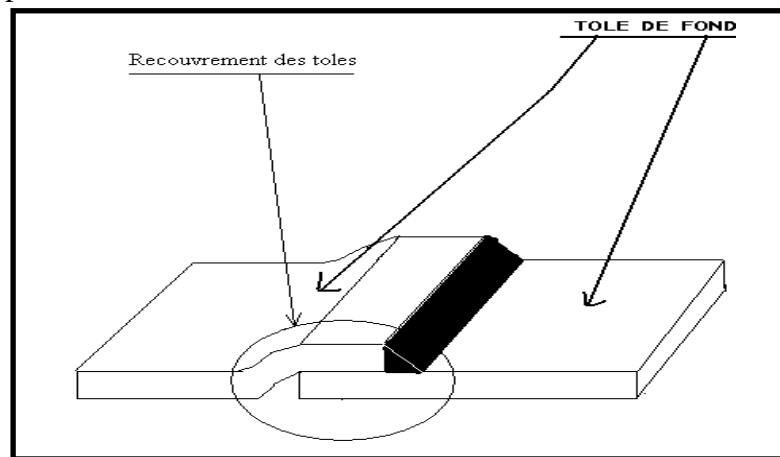


Figure VIII. 3 : Recouvrement des tôles du fond

VIII.6.3.1. Soudage du fond plat :

L'ordre de soudage des tôles du fond doit être bien respecté, cet ordre est le suivant :

Souder les tôles marginales entre elles,

Souder les tôles de bordure entre elle sur une longueur de 10 cm.

Souder les tôles de bordure avec les tôles marginales sur une longueur de 50mm tout les 200mm.

Souder les joints formés par les tôles entre elles.

Souder les tôles longitudinales dès que les joints des tôles placées de chaque côté soient soudés.

Régler les tôles de la première virole sur les tôles de fond, le pointage étant fait du côté extérieur.

Souder le cordon d'angle du côté intérieur, le cordon extérieur pourra être exécuté immédiatement ou ultérieurement selon la possibilité.

Terminer le soudage des tôles marginales au fur et a mesure de l'avancement du soudage du cadre de retrait.

Lorsqu'on termine complètement le soudage du fond et de la première virole sur le fond, on passe à l'essai du fond.

VIII.6.4. Montage de la robe :

VIII.6.4.1. Montage de la première virole :

Avant d'entamer le montage de la première virole, certaines préparations sont nécessaires :
A l'aide d'un ruban métallique gradué, on trace par la craie le cercle par lequel passera la robe, puis, on le pointe par un pointeau.

Exécution d'une soudure de 10cm de longueur sur toute la périphérie ou la virole passe.

On soude les dés d'accostage sur le fond, sur la partie extérieur par rapport à la position de la robe pour faciliter le démontage ultérieurement.

Parallèlement à ces travaux, on procède à la préparation des tôles en soudant les accessoires de levage et de réglage comme indiqué sur la figure suivante.

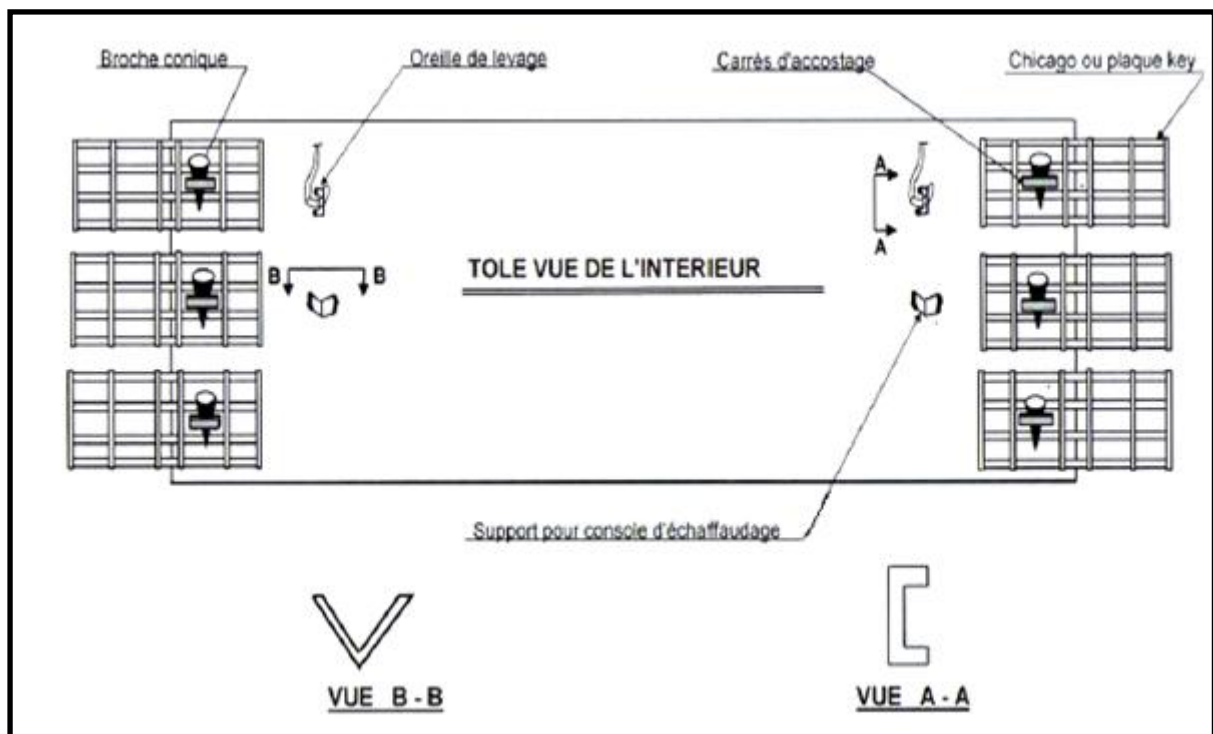


Figure VIII. 4 : Vue intérieure d'une tôle préparée pour montage

Le montage proprement dit comprend les opérations suivantes:

A l'aide d'une grue, la tôle est soulevée en utilisant les élingues qui sont crochées dans les oreilles de levage.

On soude les dés d'accostage intérieur au fur et à mesure du montage des tôles, ces carrés sont soudés tous les 50cm, mais d'un seul côté pour faciliter le démontage ultérieurement.

La tôle sera donc maintenue dans le position vertical par les dés extérieur et intérieur et la grue.

Lorsqu'on termine le soudage des carrés intérieur, on libère la grue et on passe au montage de la deuxième tôle.

Une fois la deuxième tôle posée, on fixe d'abord les deux tôles verticalement par l'intermédiaire du dispositif de réglage (carré et Chicago). Chaque joint vertical doit avoir trois Chicagos (dispositif de réglage).

La pose de dispositif de réglage (Chicago) s'effectue comme suit:

- Un monteur enlève la broche conique libérant ainsi le Chicago.

Puis il pose le Chicago sur les deux tôles à assembler d'une manière que les deux carrés soient disposés entre les barres de Chicago.

Il place les deux broches dans l'orifice de carré ; ainsi les deux tôles sont maintenues verticales.

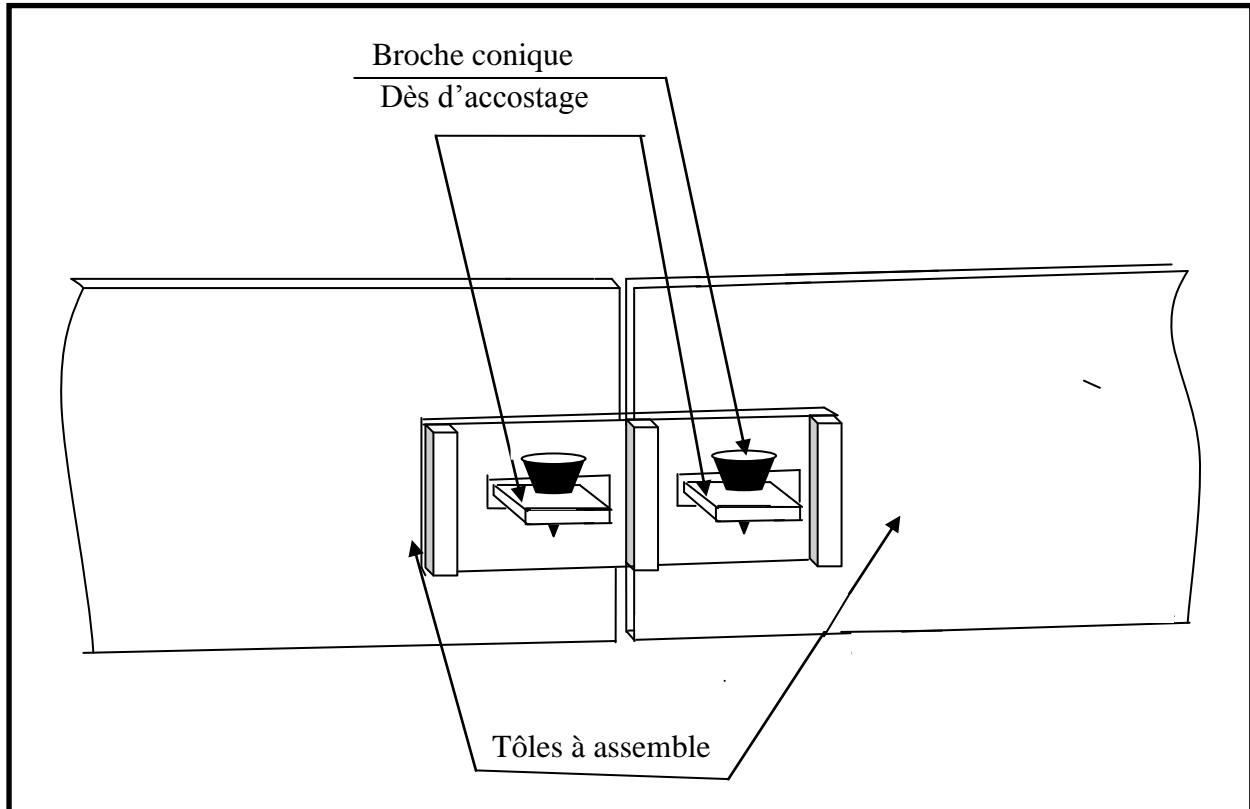


Figure VIII. 5 : Dispositif de réglage des tôles

VIII.6.4.2. Réglage des joints :

Ce n'est qu'en terminant l'assemblage de la première virole qu'on commence le réglage proprement dit.

On commencera par le réglage des joints verticaux:

Si le jeu est très grand et qu'il faut le diminuer, on introduit la broche conique entre le carré (dés d'accostage) et la barre du dispositif de réglage (Chicago) et on lui donne des légers coups de marteau, ainsi la tôle à assembler se déplace vers la tôle assemblée.

Si le jeu n'est pas suffisamment grand et qu'il faudrait l'augmenter, on agit sur la broche placée entre le carré (Dés d'accostage) et la barre de dispositif de réglage, ainsi la tôle à assembler s'écarte de la tôle assemblée.

Une fois le réglage des joints verticaux terminé, on commence le réglage de la première virole sur le fond. Pour effectuer ce réglage, on interpose des broches entre la tôle et les carrés qui sont soudés sur le fond comme indiqué sur la figure suivante :

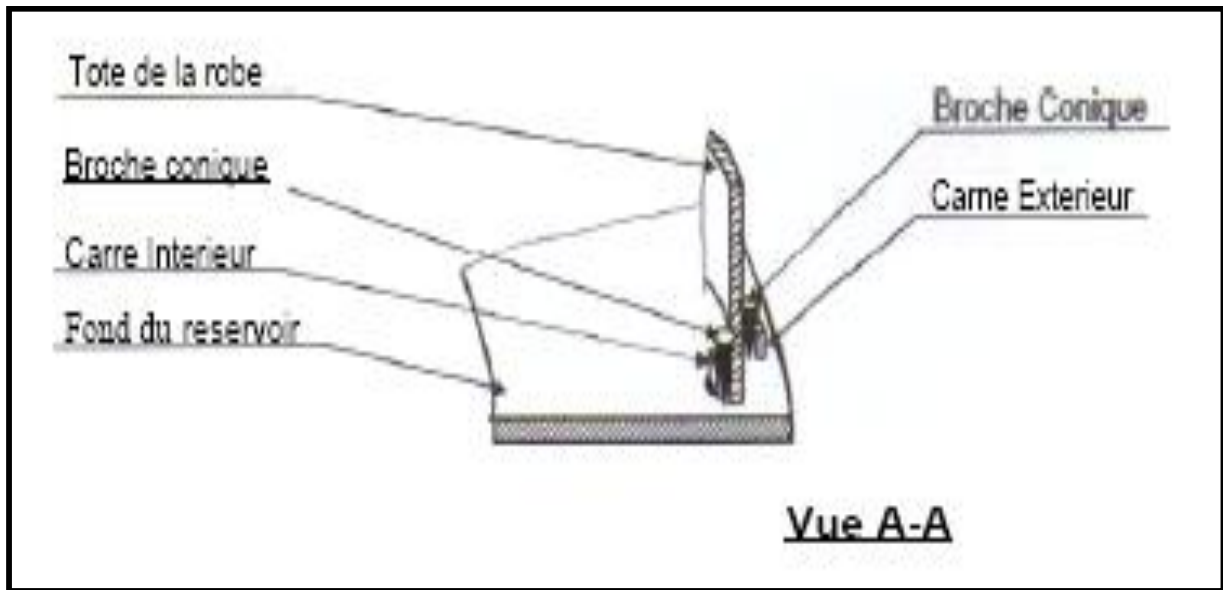


Figure VIII. 6 : Disposition des carrés

Et quand ce réglage est terminé, on procède au soudage par points des joints verticaux (un point de soudure de 50 mm de longueur tous les 200 mm). Puis on effectue le soudage par point pour l'assemblage de la première virole-fond. La figure suivante représente le montage de la première virole :

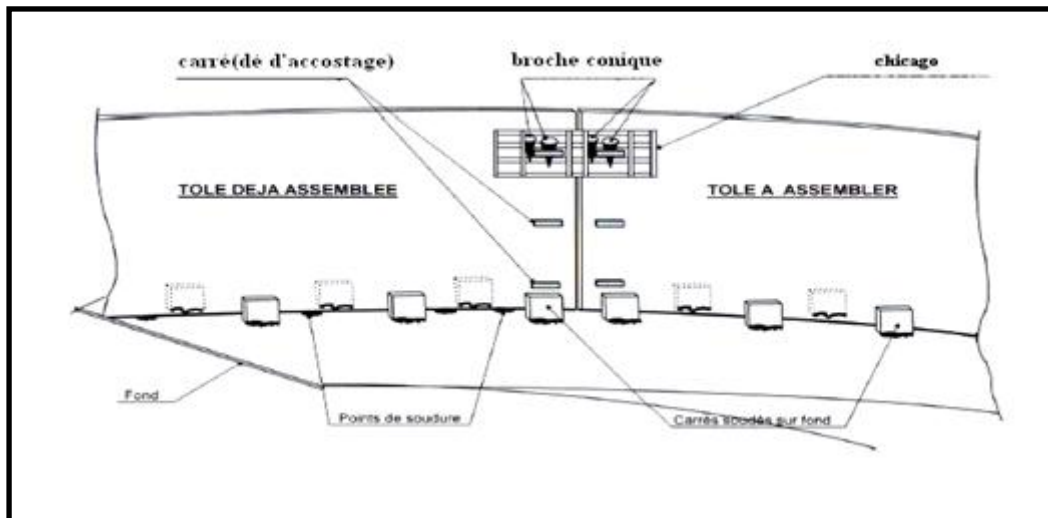


Figure VIII. 7 : montage de la première vérole vue de l'intérieur

Une fois ces opérations terminées, on procède au soudage continu des joints de la première virole et du fond. L'ordre du soudage est le suivant :

- Soudage des joints verticaux.
- Soudage des joints horizontaux.

VIII.6.4.3. Protection de la robe pendant le montage :

Le montage utilisera la méthode adéquate pour la protection de la robe durant le montage. Les facteurs à prendre en considération pour déterminer la fiabilité de la méthode proposée sont :

- dimension du réservoir.
- méthode de montage.
- Site et degré d'exposition aux vents.
- Nombre et type de pièces d'assemblage.

VIII.6.4.4. étapes de montage des viroles :

Pour cela les tôles doivent être préparées à l'avance. La tôle est soulevée par les oreilles de levage à l'aide de deux élingues et un palonnier.

Les pièces de fixation des supports d'échafaudage (consoles) sont soudées sur la robe.

Le support de l'échafaudage est monté à part et ne reste qu'à introduire sa tige dans la pièce soudée.

L'ordre de montage est le suivant :

- Soulèvement de la tôle par la grue.
- Introduction de plaquette de calibrage (clamp) entre les deux tôles.
- Introduction des coins en même temps.

Ces pièces sont disposées tous les 20 cm et constituent une sorte de clamps.

On frappe à l'aide d'un marteau les coins pour obtenir le serrage nécessaire.

La plaquette de calibrage doit avoir la même épaisseur que celle prévue pour le joint de soudage.

La figure suivante représente le montage de deuxième virole :

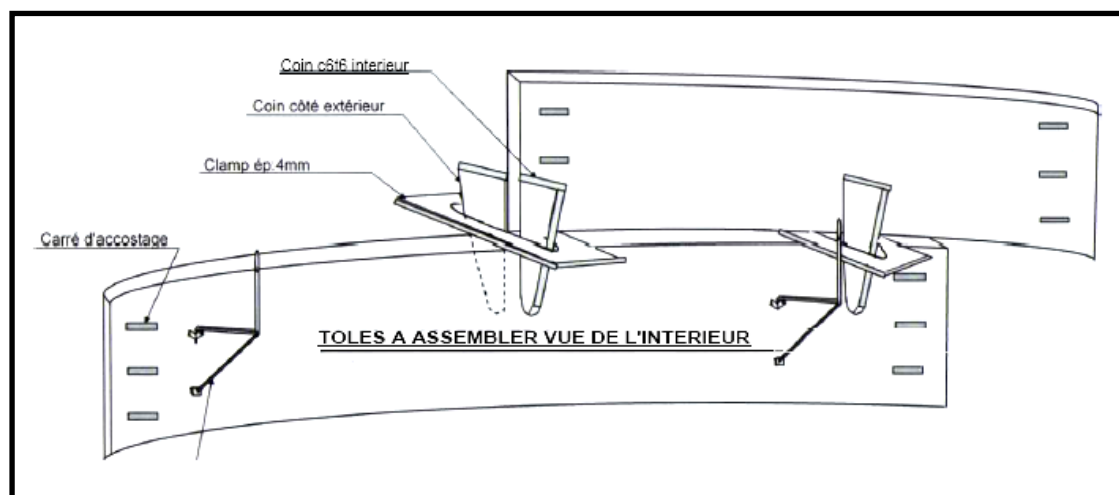


Figure VIII. 8 : Montage de deuxième virole

La méthode d'assemblage des joints verticaux est la même que celle décrite auparavant. Lorsqu'on effectue l'assemblage de toutes les tôles de la virole, on commence le réglage des joints verticaux et le soudage par points.

Après cela on enlève toutes les pièces d'assemblage et on commence le soudage continu pour les joints verticaux d'abord puis les joints horizontaux.

Le montage est le même pour les autres viroles.

VIII.6.5. Montage et soudage de la cornière :

La cornière de rive doit avoir le cintrage correspondant au diamètre de réservoir et un chanfrein correspondant. Le procédé retenu est le soudage manuel avec électrode E7028.

On soude d'abord les éléments du profilé entre eux ensuite avec la dernière virole.

VIII.6.6. Montage du toit :

Le montage du toit se fait après les poteaux et le soudage de la dernière virole et le contrôle complet de la robe.

VIII.6.6.1. Préparations avant le montage :

Préparation des échafaudages à l'intérieur de réservoir.

Le montage se compose des phases suivantes :

- Montage et soudage de la cornière de la rive.
- montage et contrôle de la charpente du toit.
- montage et pointage des tôles du toit.
- soudage des tôles du toit.
- contrôle final du toit.
- Démontage du mat provisoire.

VIII.6.7. Montage des accessoires :

VIII.6.7.1. Tubulure :

- Le découpage des tubes se fera à la scie mécanique, selon les plans.
- La soudure des brides des tubes se fera, selon les plans.

VIII.6.7.2. Trou d'hommes :

Les cols de trous d'homme serrant façonnées par oxycoupage d'une tôle, puis cintrés à froid.

Les brides seront façonnées par oxycoupage.

Le soudage longitudinal se fera sur les cols cintrés et les cols ainsi préparés et les brides seront alors soudées, tout selon les plans.

Pour les trous d'hommes sur la robe, le façonnage mécanique se fera pour la finition des brides selon les plans.

VIII.7. Conclusion :

Le montage est pratique des études à faire, pour cela il faut assurer un bon montage avec des mains d'œuvre qualifiées soit en atelier ou on chantier, et contrôler le travail selon les normes.

Chapitre IX

Soudage et contrôle des soudures

CHAPITRE IX : Soudage et contrôle des soudures

IX.1. Introduction :

Le procédé est l'opération la plus utilisée dans le montage des éléments de réservoir, on se concerne la résistance et la sécurité de la construction.

Les modes de soudage utilisés doivent permettre d'obtenir des assemblages soudés dont les propriétés mécaniques conviennent aux conditions de calcul

Le soudage qui sera réalisé devra satisfaire toutes les conditions et exigences recommandées par la norme ASME

Afin de juger leur qualification, les soudeurs seront soumis des tests d'homologations effectués sur des éprouvettes avant le commencement des travaux de montage sur chantier

On opte pour un procédé de soudage en tenant compte d'un certain nombre de paramètres :

Taille et épaisseur de la tôle

Problèmes de soudabilité métallurgique

Problème de soudabilité opératoire

Problèmes d'oxydation à chaud de la liaison

Problèmes de vitesse d'exécution

Problèmes de contrainte de déformation

IX.2. Choix du procédé de soudage :

Le terme « soudage à l'arc à l'électrode enrobée » est un soudage manuel à la baguette par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil-électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3500 et 5550 °C. Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion, lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode et de métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage

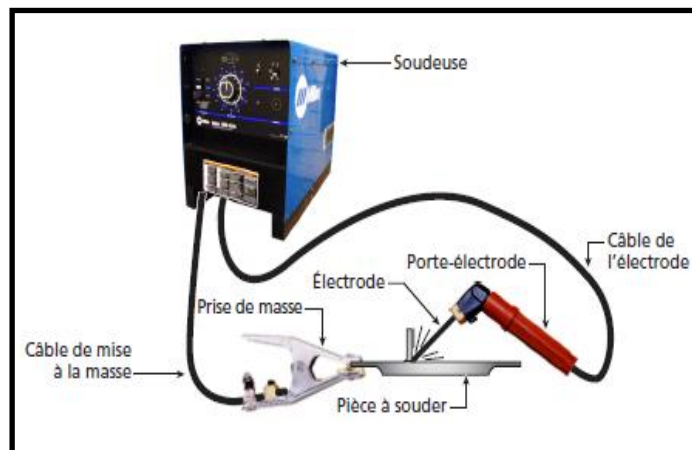


Figure IX. 1 : Circuit de soudage à l'arc

IX.3. Choix d'électrode de soudage :

Les électrodes de soudage à l'arc manuel satisfont à la série de classification (E60) et (E70), convenant aux caractéristiques de courant électrique, à la position de soudage et aux autres conditions d'utilisation prévues dans les règlements de l'AWS, spécification pour électrodes de soudage à l'arc enrobées en acier doux : (Spécification for Mild Steel Covered Arc Welding Electrodes).

Électrodes enrobées AWS E7018 type OK 48.00 (basiques).

Tous les cordons de soudures sont effectués à l'arc électrique manuel pour ces réservoirs on utilise une électrode de $\phi = 3,25\text{mm}$, et $\phi = 4\text{mm}$.

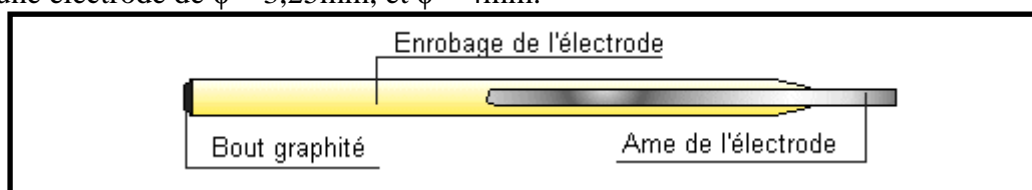


Figure IX. 2 : électrode enrobé

IX.3.1. Caractéristiques de l'électrode :

Tableau IX. 1 : Caractéristique de l'électrode

Désignation	Type D'enrobage	$\phi(\text{mm})$	Nature de Courant	Classification	Composition chimique ou mécanique	
					C : 0,1 Mn : 0,5 Si : 0,9	E: 410-450 Nmm ² R530-90 Nmm ² A : 5d 30%
Ok48-00	Basique	3,25 4	Continu +	AW E7018	C : 0,1 Mn : 0,5 Si : 0,9	E: 410-450 Nmm ² R530-90 Nmm ² A : 5d 30%

IX.3.2. Etuvage des électrodes de soudage :

Les électrodes de soudage subiront un étuvage pendant au moins deux (02) heures à des températures de 250°C à 300°C, avant leur utilisation sur le site et à des températures de 60°C à 80°C pendant le soudage.

À la fin des travaux de soudage, toutes les électrodes restantes seront réarrangées dans l'étuve à des températures de 60°C à 80°C.

IX.4. Soudage SAW: (submerged Arc welding)

IX.4.1. Définition :

Le soudage semi automatique à l'arc sous flux de poudre (SAW ou SAFP), appelée également soudage à l'arc submerge, est une méthode de soudage semi-automatisé à haut rendement, il est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil électrode d'apport de métal (de $D= 1.2$ à $D= 6\text{mm}$) dévidé à une vitesse constante et la pièce souder.

Un dépôt continu de flux en poudre (parfaitement étuvé et de granulométrie homogène) recouvre l'extrémité du fil électrode et la pièce à souder.

L'arc de soudage et le bain de fusion sont non visibles pendant le soudage.

L'énergie calorifique fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode est une partie de flux en poudre pour constituer le bain de fusions et après refroidissement du cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur. Le soudage SAW peut être effectué simultanément par une ou plusieurs têtes de soudage. Chaque tête dispose d'un fil-électrode simple ou double.

On utilise pour soudée les joints horizontaux de la robe la méthode semi automatique à l'arc sous flux en poudre (SAW), ce procédé aujourd'hui a une utilisation plus répandue que celui à l'électrode enrobée (SMAW) , offre une meilleure productivité car il permet un soudage semi-automatique ou robotisé.

IX.4.2. Principe de soudage (SAW) :

- Régler la machine suspendue à la position de soudage dans une face direction, il devait franchir le point de heurter l'arc, puis voyage dans le sens de soudage afin d'éliminer le jeu mécanique et éviter les chevauchements ou lacunes.
- Fixer le soudage par point et adopter contact de court-circuit amorçage de l'arc.
- Régler le courant de soudage, la tension de soudage et la vitesse de soudage.
- Ouvrir la vanne de propagation du flux de soudure sur la bande de façon égal, régler le commutateur de commande de soudage.
- Démarrer le soudage
- Respecter la position et la figuration de la perle et régler la vitesse de soudage et la hauteur du pistolet de soudage pour obtenir le meilleur effet de soudage.
- Faire attention à l'état de perles pendant le soudage et l'obstacle à l'avant, câble de soudage.
- Eviter de souder des armes à feu touchant et dévidoir par des outils à main et en métal pour éviter les accédants de court-circuit.

IX.4.3. Avantage du procédé :

- Grande vitesse de soudage.
- Pas de préparation de chanfrein dans certain cas.
- Très bel aspect du cordon lorsque les paramètres sont correctement réglés.
- Limitation de déformation.
- Arc non visible- confort de l'opérateur (pas d'émission de rayon U.V).
- Bonne qualités de joints et bonnes caractéristiques mécanique.
- Bonne répétitivité des paramètres de soudage.
- Aucune émission de fumées.

Remarque :

Le soudage des joints verticaux et le soudage d'angle sera exécuté manuellement selon la méthode spécifique (SMAW)

Le soudage des joints horizontaux (corniche) sera exécuté par soudage semi-automatique sous flux solide selon la méthode spécifiée (SAW)

IX.5. Procédés et détails de soudage :

- Le soudage sera exécuté manuellement selon les méthodes spécifiées, par des soudeurs et agrémentés.
- Le soudage sera exécuté de manière à assurer une fusion complète avec le métal de base, dans les limites exigées par le Code ASME.
- Le soudage des éléments du réservoir ne sera pas effectué dans les conditions suivantes :
 - lorsque les surfaces des éléments à souder sont humides par suite de pluie, neige ou glace.
 - lorsqu'il pleut ou neige ces surfaces.
 - durant les périodes de grand vent.
(Sauf si le soudeur et son travail soient protégés conformément aux normes de soudage)
- Le soudage des éléments du réservoir ne sera pas effectué lorsque la température du métal de base est inférieur à 0°F (-18°C).
- Lorsque la température du métal de base comprise entre 0°F et 32°F (-18°C et 0°C), il sera chauffé à une température chaude au toucher, sur une distance de 3Pce (76mm) du point où doit commencer le soudage.
- Lorsque la température du métal de base sera supérieure à 32°F (0°C), le soudage se fera normalement.
- Pour le soudage multi couches, chaque couche de métal d'apport sera débarrassée du laitier et autres dépôt avant l'application de la couche suivant.
- Les bords de toutes les soudures rejoindront la surface de la tôle, sans angle aigu.
- Les tôles de tous les joints à recouvrement seront maintenues en contact étroit pendant l'opération de soudage.
- Les soudures de pointage, utilisées dans l'assemblage des joints verticaux de la robe, seront enlevées pendant l'opération de soudage. Elles ne devront pas subsister dans le joint définitif.

- Les soudures de pointage des tôles de fonds, de toit et accessoires, n'ont pas lieu d'être enlevées si elles seront saines et si les cordons de soudure appliqués ultérieurement soient entièrement fondus dans ces soudures.
- Les soudures de pointage seront réalisées avec des électrodes de même type et nature que celles utilisées pour le soudage définitif.
- Les tôles de fond, après avoir été disposées et pointées, seront assemblées par soudage des joints suivant un ordre établi sur place par un spécialiste, afin de réduire au minimum les déformations par retrait et d'assurer ainsi une surface aussi plane que possible.
- Le soudage de la robe au fond (jonction de la robe avec le fond du réservoir) sera pratiquement terminé avant qu'il soit procédé au soudage des joints de fond laissés ouverts pour compenser le retrait de toute soudure antérieure.
- Les tôles de la robe seront alignées à l'aide de pinces métalliques fixées aux tôles de fond.
- Après l'alignement, les tôles de robe seront assemblées avec le fond par une soudure de pointage, avant de procéder au soudage continu.
- Les tôles de la robe, assemblées par soudage bout à bout, seront appariées avec précision et maintenues en place durant l'opération de soudage.
- Le défaut d'alignement des joints verticaux terminés ne dépassera pas les tolérances admises, 10% de l'épaisseur de la tôle ou bien 1/16'' (1,6mm) de la plus grande valeur à considérer des épaisseurs.
- Dans les joints de soudure (bout à bout) horizontaux achevés de la robe, le défaut d'alignement ne dépassera pas les tolérances admises : la virole supérieure ne dépassera pas la surface de la virole inférieure de plus de 20% de l'épaisseur de la virole supérieure, avec un maximum de 1/8'' (3,2mm).
- Les pacifications concernant le toit et les accessoires (tels que escalier, garde-corps, échelle,.....) ne comportent pas de stipulations particuliers pour le montage. Ces éléments seront, tout simplement, à l'alignement et à la cote voulue.

IX.5.1. Les joints de soudure :

Dans l'assemblage des tôles on utilise déferons procédés de soudage pour lié les tôles avec des joints qu'ils sont classé de la manière suivent :

IX.4.2. Joints bout à double soudure

C'est un joint entre deux tôles bout, placées approximativement dans le mêmes plan et soudées des deux cotés

IX.5.3. Joints à recouvrement à double soudure

C'est l'assemblage de deux pièces recouvrant, dans lequel les bords de recouvrement des deux pièces sont soudés avec soudure d'angle.

IX.5.4. Joint à recouvrement à simple soudure

C'est l'assemblage de deux pièces recouvrant dans lequel le bord de recouvrement d'une Pièce est soudée avec une soudure d'angle

IX.5.5. Soudure d'angle

C'est une soudure de section approximativement triangulaire assemblant deux surfaces pratiquement perpendiculaire, come dans un assemblage à recouvrement, assemblage en T.

IX.5.6. Soudure d'angle normale

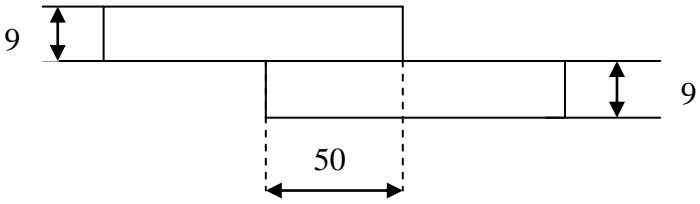
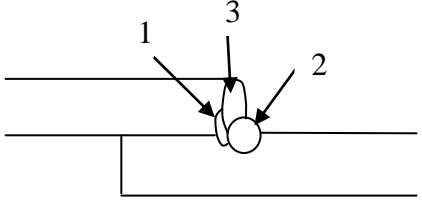
C'est une soudure d'angle dont la taille est égale à l'épaisseur de la pièce assemblée la plus mince.

IX.5.7. Soudure de pointage

C'est une soudure destinée à maintenir un ensemble à souder en alignement convenable jusqu'à ce que les soudures définitives soient effectuées

IX.6. Tableaux récapitulatifs de soudage :**IX.6.1. Joints de soudure de fond :**

Tableau IX. 2 : Joints de soudure des tôles centrales

Type d'assemblage						Par recouvrement			
Mode de chanfreinage						/			
Code utilisé						ASME			
Procédé de soudage						SMAW			
Métal de base	N° De Passe	Intensité (A)	Tension (v)	Vitesse de soudage (cm/min)	Polarité De poste	Métal d'apport			Position de soudage
A283GrC	1	160	32	3	(-)	Electrode	Ø (mm)	Long (mm)	IF IF IF
	2	160	32	4.4	(+)	E7024	3.25	450	
	3	160	32	4.6		E7024	3.25	450	
						E7024	3.25	450	
Schéma de préparation						Schéma de passé			
									

IX.6.2. Tôles marginales :

Tableau IX. 3 : Joints de soudure des tôles marginale

Type d'assemblage						Bout à bout			
Mode de chanfreinage						/			
Code utilisé						ASME			
Procédé de soudage						SMAW			
Métal de base	N° De Passe	Intensité (A)	Tension (v)	Vitesse de soudage (cm/min)	Polarité De poste	Métal d'apport			Position de soudage
A283GrC	1	160	32	3	(-)	Electrode	Ø (mm)	Long (mm)	1 G
	2	160	32	4.4	(-)	E7024	3.25	450	
	3	160	32	4.6	(-)	E7024	3.25	450	
					(+)	E7024	3.25	450	
Schéma de préparation						Schéma de passé			

IX.6.3. Joints de soudure de la robe :

Tableau IX. 4 : Joints de soudure pied de la robe

Type d'assemblage						Angle			
Mode de chanfreinage						/			
Code utilisé						ASME			
Procédé de soudage						SMAW			
Métal de base	N° De Passe	Intensité (A)	Tension (v)	Vitesse de soudage (cm/min)	Polarité De poste	Métal d'apport			Position de Soudage
A283GrC	1	160	32	3	(-)	Electrode	Ø (mm)	Long (mm)	1G
	2	160	32	4.4		E7024	3.25	450	
	3	160	32	4.6	(+)	E7024	3.25	450	
Schéma de préparation						Schéma de passé			

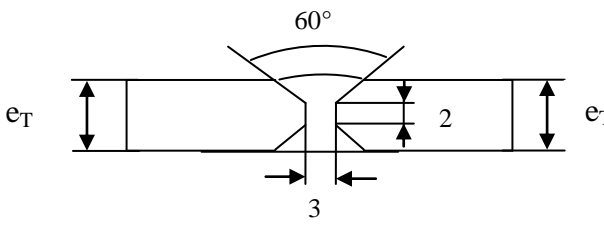
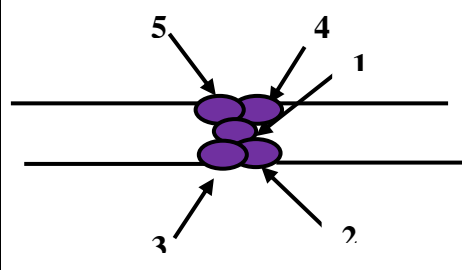
IX.6.4. Joints de soudure verticaux de la robe :

Tableau IX. 5 : Joints de soudure verticaux de 1 ère virole

Type d'assemblage						Bout à bout			
Mode de chanfreinage						/			
Code utilisé						ASME			
Procédé de soudage						SMAW			
Métal de base	N° De Passe	Intensité (A)	Tension (v)	Vitesse de soudage (cm/min)	Polarité De poste	Métal d'apport		Position de Soudage	
A283GrC	1	90	23	3.75	(+)	Electrode	Ø (mm)	Long (mm)	3G
	2	115	26	4.44		E7024	2.5	450	
	3	115	26	4.44		E7024	2.5	450	
	4	120	32	6		E7024	2.5	450	
	5	120	32	6	(-)	E7024	2.5	450	
	6	120	32	6		E7024	2.5	450	
						E7024	2.5	450	
						E7024	2.5	450	
Schéma de préparation						Schéma de passé			

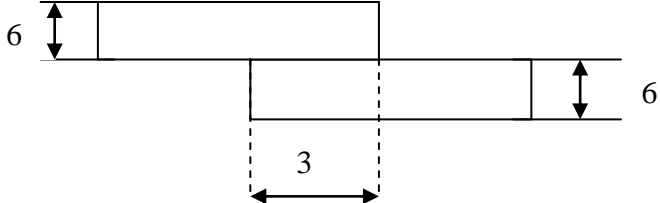
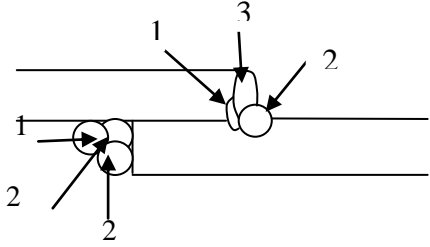
IX.6.5. Du 2éme Virole jusqu'a la 9éme virole

Tableau IX. 6 : Joints de soudure verticaux des viroles 2 à 9

Type d'assemblage						Par recouvrement			
Mode de chanfreinage						/			
Code utilisé						ASME			
Procédé de soudage						SMAW			
Métal de base	N° De Passe	Intensité (A)	Tension (v)	Vitesse de soudage (cm/min)	Polarité De poste	Métal d'apport			Position de Soudage
A283GrC	1	90	23	3.75	(+)	électrode	Ø (mm)	Long (mm)	3G
	2	115	26	4.44		E7024	2.5	450	
	3	115	26	4.44		E7024	2.5	450	
	4	120	32	6	E7024	2.5	450		
	5	120	32	6	(-)	E7024	2.5	450	
						E7024	2.5	450	
Schéma de préparation						Schéma de passé			
									

IX.6.6. Joints de soudure de toit :

Tableau IX. 7 : Joints de soudure de toit

Type d'assemblage						Par recouvrement			
Mode de chanfreinage						/			
Code utilisé						ASME			
Procédé de soudage						SMAW			
Métal de base	N° De Passe	Intensité (A)	Tension (v)	Vitesse de soudage (cm/min)	Polarité De poste	Métal d'apport			Position de Soudage
A283GrC	1	90	23	3.75	(+)	électrode	Ø (mm)	Long (mm)	IF IF IF
	2	115	26	4.44	(-)	E7024	2.5	450	
	3	115	26	4.44		E7024	2.5	450	
						E7024	2.5	450	
Schéma de préparation						Schéma de passé			
									

IX.7. Les déferlants contrôles de soudage :

Il est nécessaire et de plus haut impotence de vérifié la santé des soudures. A cet effet, il existe de nombreuse méthodes d'essais à utilisé pour le contrôle exercer à trois moments biens distincts :

IX.7.1. Contrôle avant le soudage :

- Contrôle d'équipement de soudage.
- Contrôle de conditions de travail.
- La soudabilité métallurgique du métal de base (analyse chimique du matériau, propriété mécanique, etc ...).
- Contrôle de qualité du métal d'apport (compatibilité avec le métal de base, état de surface ...).
- La qualification des modes opératoires de soudage
- Vérification des dimensions des joints.
- Contrôle de nettoyage des surfaces.
- Contrôle de pointage.

IX.7.2. Contrôle en cours de soudage :

Il a pour but de s'assurer que les règles d'une bonne exécution du joints sont respectées il portera sur :

- La qualité de soudage.
- La nature et dimension du métal d'apport.
- Le réglage des appareils de soudage.
- Les déformations (décalage des pièces).
- L'état des joints réalisés.

IX.7.3. Contrôle après le soudage :**IX.7.3.1. Contrôle des cordons de soudures :****IX.7.3.1.1. Contrôle par ressuage :**

Cette méthode est utilisée pour contrôler les joints des viroles inférieurs fond. C'est un procède qui permet de déceler les fissures débouchant en surface qui sont parfois suffisamment fin pour échapper a l'examen visuel.

IX.7.3.1.2. Contrôle radiographique (100 % des joints bout à bout) :

Le contrôle radiographique des soudures horizontales et verticales de la robe se fera conformément au code API650.

L'interprétation et les critères d'acceptabilité des radiographies se feront suivant le code ASME section VIII. Le choix des emplacements de radiographies devra être reparti de façon que tous les soudeurs soient contrôlés.

Les radiographies doivent être numérotées d'une façon appropriée. Cette numérotation est portée sur le plan du développé de la robe.

Sur chaque radiographie, les indications suivantes doivent apparaître à coté du cordon de soudure :

- Numéro du bac (identification).
- Repère du soudeur.
- Numéro du film.
- Numéro de commande du projet.
- La lettre « R » précèdent le numéro du film quand il s'agit d'une réparation.

En plus de ces indications, on placera sur le cordon de soudure un indicateur de qualité d'image (pénétrömètre).

IX.7.3.1.3. Contrôle par ultra son :

Les résultat des contrôles appliqués et des épreuves seront enregistrés sur des formulaires qui seront conjointement définis par l'entreprise et l'inspection de l'acheteur et représentent les seuls documents qui prouvent la qualité des travaux effectués.

IX.7.3.2. Contrôle d'Etanchéité :

IX.7.3.2.1. Contrôle d'Etanchéité des Joints de Fond :

Pour contrôler l'étanchéité de fond, on utilise une ventouse, le principe de cette méthode consiste à créer localement une dépression sur la surface qu'on veut vérifier, on enduit cette surface avec une eau savonneuse, puis on cherche les petites bulles qui indique les fuites.

IX.7.3.2.2. Inspection des Tôles Renforts :

Les tôles de renforts sont contrôles avec l'application d'une pression pneumatique de 15lb /pc² entre la robe et la tôle de renfort a partir de trou témoin.

Pendant la mise en pression de chaque renfort l'eau de savon est appliquée a toutes les soudures de fixation.

IX.7.3.2.3. Essai à l'Eau :

Le réservoir est rempli d'eau jusqu'au niveau maximal et laisse plein pendant 4 jours L'essai portera sur l'étanchéité des soudures et leur résistance.

IX.7.3.3. Contrôle de toit :

Le toit doit être vérifié avec la charpente à l'épreuve sous vide, tous les orifices sont bouchés et à l'aide d'une pompe a vide, le réservoir est vide progressivement de l'air qu'il contenait jusqu'a une pression de 0,2 bars. Au moindre bruit ou affaissement du toit, arrêter la mise sous vide. Nécessite alors de renforcer le toit et la charpente.

IX.8. Conclusion :

La bon réalisation de soudage permet à donné un bon assemblage et une bonne stabilité de réservoir, et le chois de matériaux et le contrôle de travail effectué selon la norme ASME.

Conclusion générale

Dans ce projet, on a effectué toutes les étapes de calcul et de vérification des éléments constructifs d'un bac de stockage de type toit fixe de capacité 35000m³ muni d'un écran flottant, pour cela on a commencé par des calculs préliminaires pour dimensionner les tôles du réservoir à des valeurs très approchés à la réalité et vérifié sa stabilité sous différentes directions et sollicitations, ensuite on a dimensionné la charpente du toit fixe autoportant , sans oublier les accessoires du réservoir soudage, et le montage .

Toutes ces études sont appliquées conformément aux normes et règlements API 650 dernier édition 2013, ASME, ASTM, NV65, RNVA 99, Eurocode 3et RPA99 version 2003 et le règle d'aménagement et de sécurité.

Le travail réalisé, nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises durant le cursus universitaire dans le domaine du génie mécanique et en particulier en ouvrages chaudronnés et piping.

Le stage pratique effectué au sein de société national **Sonatrach** (raffinerie d'Alger) dans le but d'améliorer nos connaissances théoriques et de s'adapter avec le milieu industriel.

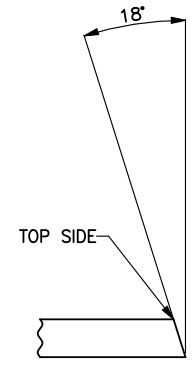
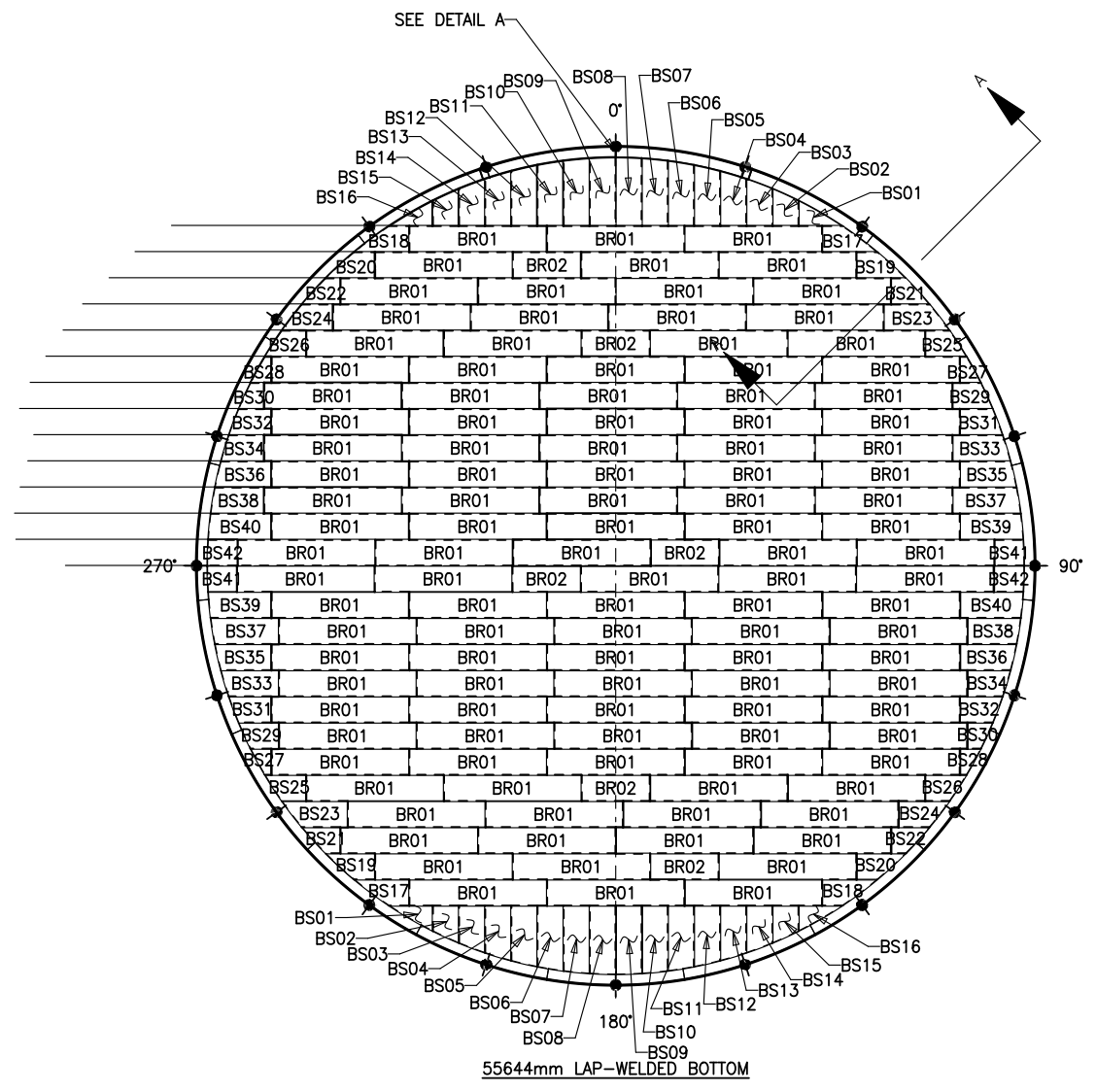
Références bibliographiques :

- **API 650. welded steel tanks for oil storage , American petroleum institute**
- **ASME (American society of mechanical engineers) section X**
- **Eurocode 3**
- **Règles NV65 (règles définissant les effets du vent sur la construction)**
- **Règles NV99**
- **Ametank pour les dessins**
- **ASTM (american society for testing materials)**

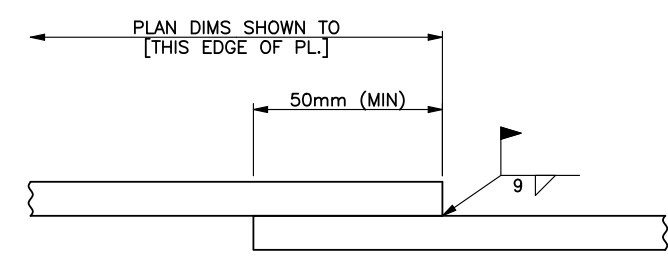


WORK INSTRUCTIONS									
RECV	CUT ROLL	FIT	WELDED	READY TO COAT	SENT TO VENDOR	COATING COMPLETE	READY TO SHIP	SHIPPED	
BILL OF MATERIALS									
QTY	SHPG MARK	ASSY QTY	ASSY MARK	DESCRIPTION	LENGTH	SPEC MATL	REMARKS	KGS WEIGHT	
19	01A			PL. 10mm x 1178mm x	9402mm	A283-C	SEE DETAIL	[11097]	
19	01B			FB 7mm x 51mm x	748mm	A283-C		[40]	

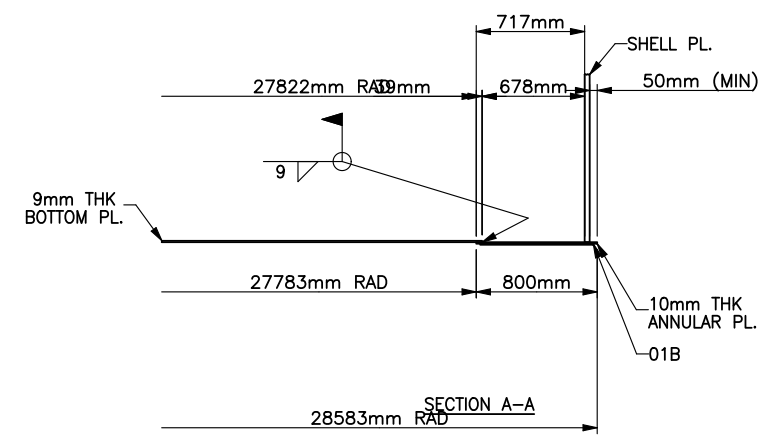
BILL OF MATERIALS LISTED FOR (1) TANK - (1) TANK REQUIRED.
 NOTE 1: LINEAR FEET OF WELD IS 1830139mm
 NOTE 2: FABRICATION TOLERANCE = ± 4mm COMPARED TO DRAWING DIMENSION UNLESS OTHERWISE NOTED.



DETAIL B



TYPICAL LAP
 LAY PLATES STARTING AT OUTER EDGE
 AND WORKING TOWARD THE CENTER



SECTION A-A

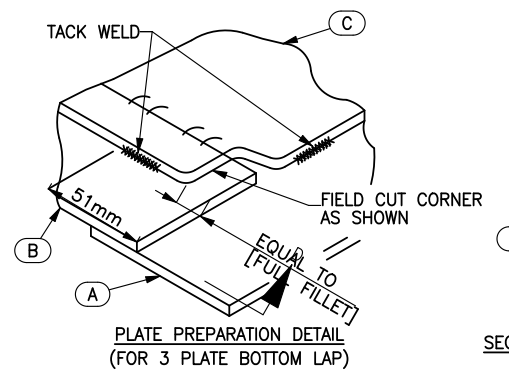
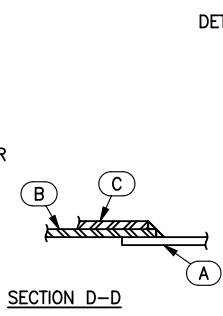
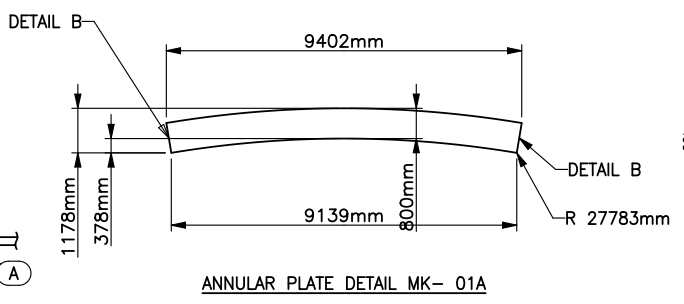


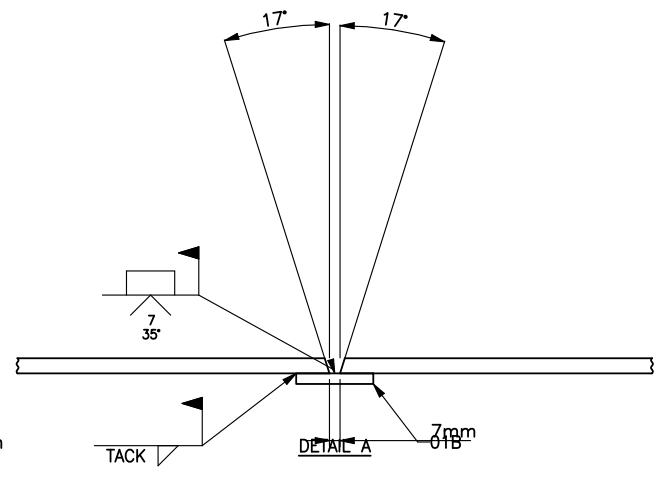
PLATE PREPARATION DETAIL
 (FOR 3 PLATE BOTTOM LAP)



SECTION D-D



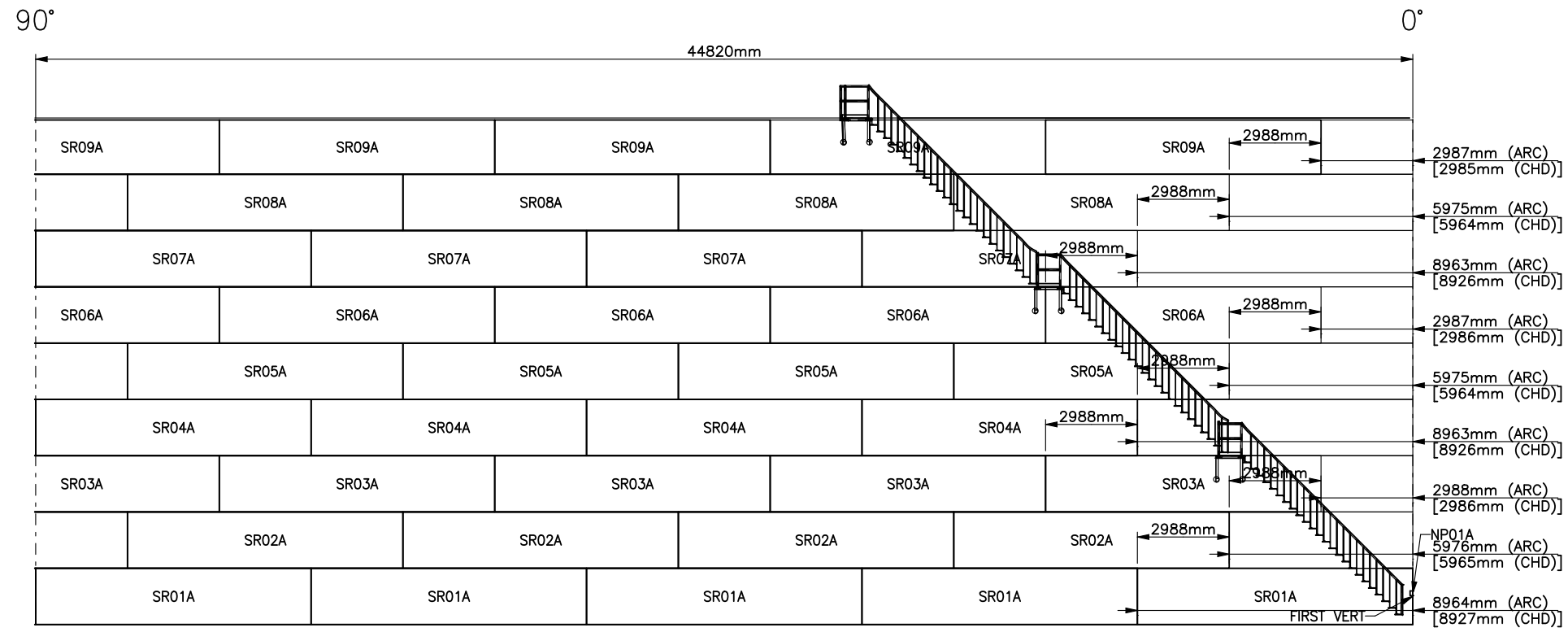
ANNULAR PLATE DETAIL MK-01A



DETAIL A

NO.	REVISIONS	BY	CHKD	DATE
0				

 11180 REED HARTMAN HWY. CINCINNATI, OHIO 45242 TELEPHONE: (513) 985-9877 FAX: (513) 985-0522 http://www.technosoft.com	CUSTOMER	
	PURCHASER DESCRIPTION CITY AND STATE	
DWG BY	DATE	57.00m DIA X 16.47m HEIGHT OTT w/EFR TANK NO.
CHK BY	DATE	
CONT. #		DWG #
2020-9-29-20-38		BL01
REV #		
0		



- NOTE 1: SHELL PLATE IS TO BE STACKED FLUSH INSIDE.
 NOTE 2: ELEVATIONS SHOWN FROM TOP OF TANK BOTTOM AT THE LOCATION OF THE APPURTENANCE.
 NOTE 3: ARC DIMENSIONS CALCULATED ON THE OUTSIDE OF THE FIRST SHELL RING.
 NOTE 4: FABRICATION TOLERANCE = ± 4mm COMPARED TO DRAWING DIMENSION UNLESS OTHERWISE NOTED.

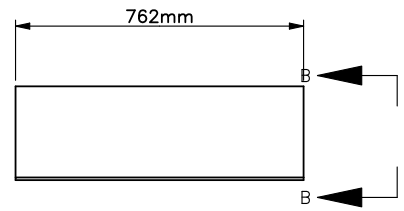
ELEVATION VIEW APPURTENANCE

MARK	CUST. MARK	DESCRIPTION	OUTSIDE PROJ	INSIDE PROJ	ORIENT	ELEVATION	REMARKS	REF DWG
NP01A		STD API	--	--	0°	1016mm		NP01

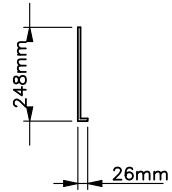
0				
NO.	REVISIONS	BY	CHKD	DATE
		CUSTOMER PURCHASER DESCRIPTION CITY AND STATE SHELL LAYOUT VIEWED FROM OUTSIDE 57.00m DIA X 16.47m HEIGHT OTT w/EFR TANK NO.		
DWG BY	DATE	CONT. #	DWG #	REV #
		2020-9-29-20-38	E03-A	0



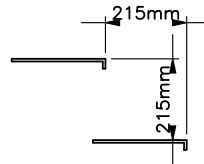
11180 REED HARTMAN HWY.
 CINCINNATI, OHIO 45242
 TELEPHONE: (513) 985-9877
 FAX: (513) 985-0522
<http://www.technosoft.com>



DETAIL AS01C



SECTION B-B



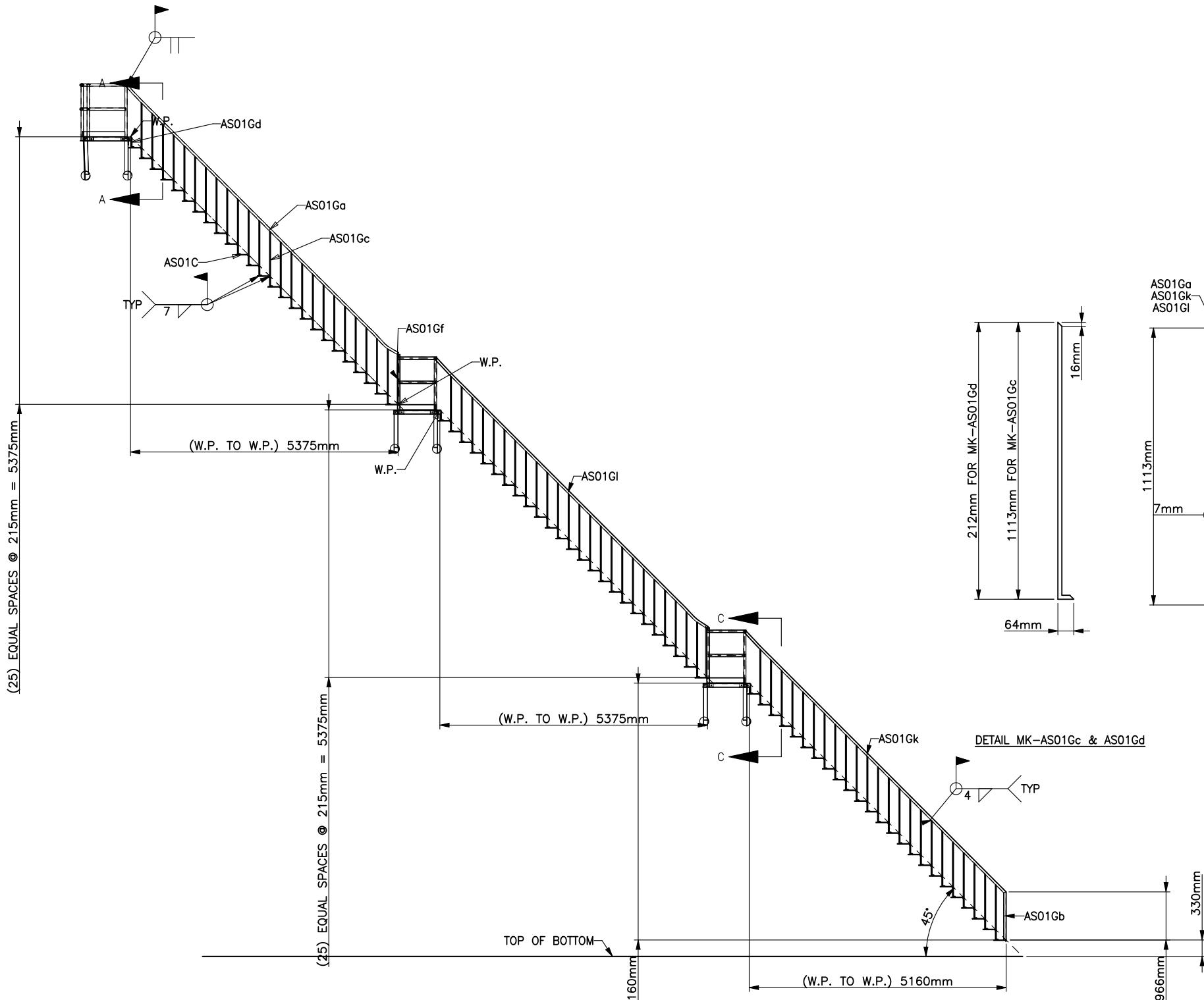
RISE AND RUN DETAIL MK. AS01C

WORK INSTRUCTIONS									
REC'D	CUT ROLL	FIT	WELDED	READY TO COAT	SENT TO VENDOR	COATING COMPLETE	READY TO SHIP	SHIPPED	
BILL OF MATERIALS									
QTY	SHPG MARK	ASSY QTY	ASSY MARK	DESCRIPTION	LENGTH	SPEC MATL	REMARKS	KGS WEIGHT	
74	AS01C			CHK'D PL 7mm x 274mm x	762mm	A36	BEND	[888]	
1	AS01Ga			PIPE 48mm DIA x 4mm WALL THK x	7847mm	A36	MODE FLD TRIM	[35]	
1	AS01Gb			PIPE 48mm DIA x 4mm WALL THK x	966mm	A36	MODE	[4]	
71	AS01Gc			16mm SQ BAR x	1177mm	A36	BEND/MODE	[213]	
3	AS01Gd			16mm SQ BAR x	276mm	A36	BEND/MODE	[3]	
2	AS01Gf			16mm SQ BAR x	1046mm	A36	BEND/MODE	[6]	
1	AS01Gk			PIPE 48mm DIA x 4mm WALL THK x	7516mm	A36	MODE FLD TRIM	[30]	
1	AS01Gi			PIPE 48mm DIA x 4mm WALL THK x	7833mm	A36	MODE FLD TRIM	[32]	

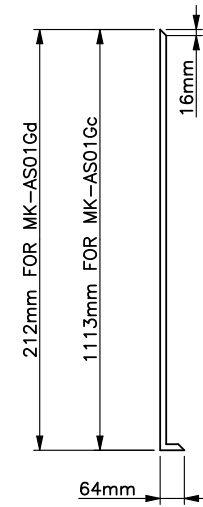
BILL OF MATERIALS LISTED FOR (1) TANK - (1) TANK REQUIRED.

NOTE:

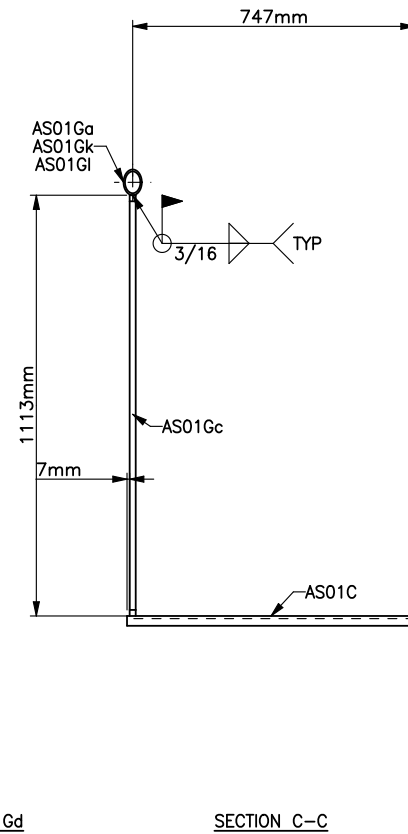
- FABRICATION TOLERANCE = ± 4mm COMPARED TO DRAWING DIMENSION UNLESS OTHERWISE NOTED.
- ROLL RADIUS AT UPRAIL 57084mm



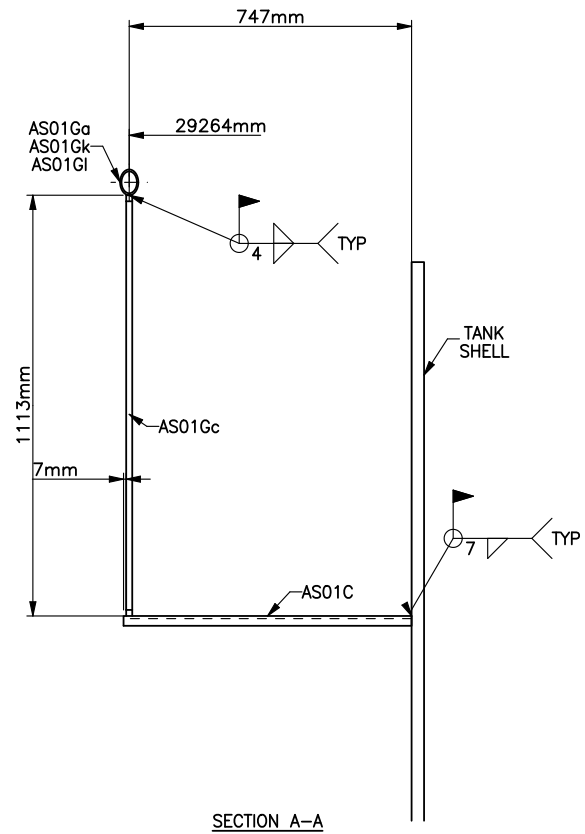
STAIRWAY ELEVATION BASED ON TANK OD



DETAIL MK-AS01Gc & AS01Gd



SECTION C-C



SECTION A-A

NO.	REVISIONS	BY	CHKD	DATE
0				

<p>11180 REED HARTMAN HWY. CINCINNATI, OHIO 45242 TELEPHONE: (513) 985-9877 FAX: (513) 985-0522 http://www.technosoft.com</p>	<p>CUSTOMER</p> <p>PURCHASER DESCRIPTION</p> <p>CITY AND STATE</p>			
	<p>SPIRAL STAIRWAY</p> <p>(CW)</p> <p>57.00m DIA X 16.47m HEIGHT OTT w/EFR</p> <p>TANK NO.</p>			
DWG BY	DATE	CONT. #	DWG #	REV #
CHK BY	DATE	2020-9-29-20-38	AS0101	0

ملخص:

في هذه المذكرة، قمنا بدراسة وتصميم خزان ذو سطح ثابت محمول ذاتيا مع سطح عائم داخلي سعته الحجمية مقدرة ب: 35000 م³ يقع في الجزائر العاصمة.

قمنا بحساب أبعاد المكونات المختلفة للخزان وهي السقف (الثابت والعائم)، الغلاف الخارجي، القاعدة إضافة إلى الملحقات المصاحبة للخزان مثل فتحات الصيانة والسلام، تم الحساب والتحقق من هذه المكونات وفقا للمعايير الدولية المعمول بها وهي : **API 650 , EUROCODE 3 , ASME**، بالإضافة إلى القواعد الخاصة بالظروف المناخية **RNV 99** .

من اجل السطح الثابت فقد استعملنا برنامج **Robot** من اجل الإنشاء مع التقيد بالمعايير المذكورة سابقا .

Résumé:

Dans ce mémoire , nous avons fait une étude sur la conception et le dimensionnement d'un réservoir à toit fixe muni d'un écran flottant pour le stockage d'essence super , d'une capacité volumique de 35000 m³ , sa position géographique est (Alger).

Pour le dimensionnement des différents composants du réservoir à savoir le toit fixe , l'écran flottant , la robe , le fond , et les différents accessoires accompagnant comme le, l'escalier. la porte visite , calcule de dimensionnement et la stabilité de ces composants de réservoir est vérifié selon les normes **API 650 , EUROCODE 3, ASME** ainsi que le règlement des conditions de climat **RNV 99** .

Pour le dimensionnement de toit fixe, nous avons utilisé l'logicielle **Robot** pour le dimensionnement et la vérification de stabilité.

Abstract:

In this Memory, we made a study on design and dimming of a fixed tank includes internal floating roof tank is for super fuel Storage, with a volume capacity of 35000 m³, it position geographic is (Algiers).

For the dimensions of the different components of the storage according to the fixed roof, the internal floating roof, the shell, the bottom and the different accompanying accessories such as the stairs and the inspection door, the dimensioning and the stability of these tank components must be matched to standards **API 650, EUROCODE 3, ASME**, as well as the regulation of climate conditions **RNV 99**.

For the dimensioning of the fixed roof, we used the software **Robot** for the dimensioning and the verification of stability.