

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie civil

Spécialité : Structures

Par :

ABDELLI Zineb

DERARDJA Baya

Sujet

Elaboration des abaques de dimensionnement des réservoirs en béton armé soumis aux actions statiques cas des réservoirs semi-enterrés à cuves circulaires

Soutenu publiquement, le // , devant le jury composé de :

CHALANE Mourad	Grade	Univ-BBA	Président
BENSELAMA Boualam	Grade	Univ-BBA	Examineur
MSSAD Mokhtar	Garde	Univ-BBA	Examineur
ZORAI Ameir	Garde	Univ-BBA	Examineur
ROKBANE Abd El Madjid	Grade	Univ-BBA	Encadrant
LOGZIT Nacer	Grade	Univ-BBA	Co-Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024



Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration et à l'achèvement de ce mémoire.

Tout d'abord, nous remercions chaleureusement nos encadrants, Monsieur **Logzit Naser** et Monsieur **Abd Elmadjid Rokben**. Vos conseils avisés, votre disponibilité et votre soutien inestimable ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Vos compétences, votre patience et votre encouragement constant nous ont guidés tout au long de ce parcours académique.

Par conséquent, nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et de faire les critiques nécessaires sur ce travail.

Nous adressons une pensée spéciale à **nos familles respectives**. À **nos parents**, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible, ainsi qu'à nos amis et proches pour leur compréhension et leurs encouragements tout au long de cette aventure.

Enfin, nous remercions **nos collègues et camarades** de promotion pour les moments de partage et de collaboration qui ont enrichi notre expérience.





Dédicace

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

À mes chers parents,

Je dédie humblement ce travail en témoignage de ma gratitude envers vous. Vous avez toujours été une source de soutien et d'inspiration pour moi, et vos conseils et vos conseils ont été un phare dans ma vie et mes études. J'espère avoir honoré une partie de la fierté et de l'honneur que vous méritez.

À mes chères sœurs, Sara, Manel, et Farah,

Je dédie ce travail en reconnaissance de votre soutien constant et de votre encouragement, qui ont eu un impact significatif sur mon parcours. Votre amour a toujours été un moteur pour moi à chaque étape.

À mes amies, Fatima et Maroua,

Votre amitié, votre soutien et vos conseils ont rendu cette aventure plus agréable.

Je prie Allah de rendre ce travail sincère pour Sa noble face et de le rendre bénéfique à tous.

~ Zineb ~



Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

Figure. 1.1. Formes d'un réservoir.	3
Figure. 1.2. Position du réservoir par rapport au sol.	4
Figure. 1.3. Piscines.	4
Figure. 1.4. Châteaux d'eau.	4
Figure. 1.5. Réservoirs non couverts.	5
Figure. 1.6. Réservoirs superposés.	5
Figure. 1.7. Réservoir simple.	5
Figure. 1.8. Réservoir multiples ou même superposés.	6
Figure. 1.9. Réservoirs multiples.	6
Figure. 1.10. Position des poteaux.	7
Figure. 1.11. Cas d'un réservoir de grand diamètre.	8
Figure. 1.12. Cas d'un réservoir à paroi avec contreforts.	8

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

Figure. 2.1. La pression hydrostatique sur la paroi d'un réservoir d'eau.	16
Figure. 2.2. Abaque de détermination de K	17
Figure. 2.3. Abaque de détermination de K_0	18
Figure. 2.4. Abaque de détermination de K_1	19
Figure. 2.5. Abaque de détermination de K_1	20
Figure. 2.6. Abaque de détermination de K_2	21
Figure. 2.7. Abaque de détermination de K''	21

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

Figure. 3.1. Forme de conception d'un réservoir 500 m ³	25
Figure. 3.2. Angle de coupole.	27
Figure. 3.3. Ferrailage de coupole.	31
Figure. 3.4. Ferrailage de ceinture.	32
Figure. 3.5. Ferrailage de paroi.	35
Figure. 3.5. Ferrailage de radie.	39

Liste des figures

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

Figure. 4.1 : Extrait de la vue 3D.	41
Figure. 4.2. Extrait de la vue en plan radier.....	41
Figure. 4.3. Extrait de la vue en plan.....	42
Figure. 4.4. Répartition de la charge hydrostatique sur la paroi.....	43
Figure. 4.5. Poids de l'eau sur le radier.	43
Figure. 4.6. Charge d'exploitation sur coupole.	44
Figure. 4.7. Maillage de la structure.....	45
Figure. 4.8. Maillage dans le radie.	45
Figure. 4.9. ELU (États Limites Ultimes).	46
Figure. 4.10. ELS.....	47
Figure. 4.11. Moments sur x-x.	48
Figure. 4.12. Moments sur y-y.....	48
Figure. 4.13. Déplacements.	49
Figure. 4.14. Réaction du sol.....	50

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

Figure. 5.1. Abaque de modélisation graphique des résultats de conception de dimensionnement et de quantités des réservoir d'eau circulaires en béton armé en comportement statique	56
--	----

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 2 : Informations générales sur les réservoirs

Tableau. 2.1. Tableau théorique..... 14

Tableau. 2.2. Tableau pratique..... 15

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

Tableau. 4.1. Tableau des charges. 42

Tableau. 4.2. Tableau de Combinaisons de charges. 44

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

Tableau. 5.1. Paramètres de Conception des Réservoirs. 55

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Sommaire

Résumé

Introduction générale : 1

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

1. Définitions : 3

2. Classification des réservoirs : 3

2.1. La position du réservoir par rapport au sol : [3] 3

2.2. La forme de la cuve : 4

2.3. Selon le mode de fermeture : 4

2.4. Selon la complicité de la construction : [3] 5

2.5. Selon l'usage : 6

2.6. Selon la nature du liquide conservé : 6

3. La constitution générale des réservoirs : 7

3.1. Fondation : 7

3.2. Parois : 7

3.3. Couvercle ou toit : 8

4. La place du réservoir dans un réseau : 8

4.1. Proximité des sources d'eau : 9

4.2. Élévation : 9

4.3. Capacité de stockage : 9

4.4. Accessibilité : 9

Sommaire

4.5. Distribution équitable :	9
4.6. Protection environnementale :	9

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

1. Méthode de dimensionnement :	12
1.1. Détermination des dimension initiales :	12
1.2. Réservoir de 50 m ³ :	13
1.3. Réservoir de 100 m ³ :	14
2. Méthode de calcul :	15
2.1. Généralités :	15
2.2. Calcul de la sollicitation (M, N, T) de la paroi :	16
2.2.1. Méthode Hangan-Soares :	16

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

1. Introduction :	25
2. Prédimensionnement :	25
3. Etude et ferrailage de la coupole :	25
3.1. Calcul de la coupole :	25
3.2. Calcul du rayon de la coupole :	26
3.3. Calcul de l'angle φ :	26
4. La surface de la coupole :	27
5. Le Poids propre de la coupole :	27
6. La charge de calcul par mètre linéaire :	28
7. Calcul d'effort normal :	28
7.1. Les donnes :	28
7.2. Les résultants :	28

Sommaire

8. Ferrailage de la coupole :	28
8.1. Vérification des contraintes :	28
9. Etude de la ceinture :	31
9.1. Poussé horizontal H :	31
9.2. L'effort de traction dans la ceinture T :	31
9.3. Ferrailage de la ceinture :	31
10. La paroi :	32
10.2. Moment T_{\max} au pied de la paroi M_0 :	33
10.3. Abscisse x_0 du moment de l'exionne :	33
10.4. Abscisse x_1 du moment de flexion négatif maximal :	33
10.5. Moment fléchissant négatif maximale :	34
10.6. Abscisse x_2 de l'effort maximale suivent les cerces :	34
10.7. Effort N_ϱ maximal suivant les cerces :	34
11. Calcul du radier :	35
11.1. Efforts exercés :	36
11.2. Ferrailage du radier :	37

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

1. Introduction :	41
2. Conception de l'ouvrage :	41
3. Charges appliquées :	42
4. Présentation des diagrammes des charges :	43
5. Poids de l'eau sur le radier :	43
6. Charge d'exploitation sur coupole :	44
7. Combinaisons de charges :	44

Sommaire

8. Maillage :	45
9. Résultats :	45
9.1. Traction dans la paroi :	45
9.1.1. ELU (États Limites Ultimes) :	45
9.1.2. ELS :	47
9.1.3. Moments sur x-x :	47
9.1.4. Moments sur y-y :	48
10. Déplacements :	48
11. Réaction du sol :	49
12. La comparaison entre les méthodes manuelle et automatique :	50

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

1. Introduction :	52
2. Modalisation Graphique et Reformulation des Résultats :	52
2.1. Diagrammes en barres :	52
2.2. Graphiques circulaires (camemberts) :	53
2.3. Graphiques en nuages de points :	53
2.4. Graphiques à bulles :	53
2.5. Graphiques en boîte (boxplots) :	53
2.6. Cartes de chaleur :	53
3. Etape à suivre :	53
4. Interprétation des résultats graphiques :	57
5. Conclusion :	57
Conclusion générale :	59

Sommaire

Références bibliographiques :.....	61
------------------------------------	----

Résumé

Résumé :

Ce travail de mémoire crée l'élaboration d'abaques de conception, de dimensionnement et de quantitatifs pour les réservoirs en béton armé, en se concentrant spécifiquement sur les réservoirs semi-enterrés avec des cuves circulaires soumises à l'action hydrostatique. Il comprend une analyse détaillée des méthodes de calcul manuelles et automatiques, pour déterminer les dimensions appropriées des réservoirs. Afin de fournir des outils pratiques et efficaces pour concevoir ces structures de manière sécurisée et durable, en prenant en compte une gamme de volumes de réservoirs variée de 50 à 5000 m³.

Mots clés

: Réservoir en béton armé, Cuve circulaire, Pression hydrostatique, Abaque.

Summary :

This thesis creates the development of design, sizing, and quantitative charts for reinforced concrete tanks, specifically focusing on semi-buried tanks with circular basins subjected to hydrostatic action. It includes a detailed analysis of both manual and automatic calculation methods to determine the appropriate dimensions for these tanks. The aim is to provide practical and effective tools for designing these structures in a safe and durable manner, considering a range of tank volumes varying from 50 to 5000 m³.

Keywords : Reinforced concrete tank, Circular tank, Hydrostatic pressure, Abacus.

ملخص:

تستكشف هذه المذكرة انشاء التصميم والتحجيم والمخططات الكمية لخزانات الخرسانة المسلحة، مع التركيز بشكل خاص على الخزانات شبه المردومة ذات الخزانات الدائرية الخاضعة للعمل الهيدروستاتيكي. ويتضمن تحليلاً مفصلاً لطرق الحساب اليدوية والآلية لتحديد أبعاد الخزان المناسبة. وذلك من أجل توفير أدوات عملية وفعالة لتصميم هذه الهياكل بطريقة آمنة ومستدامة، مع الأخذ في الاعتبار مجموعة من أحجام الخزانات تتراوح من 50 إلى 5000 م³.

الكلمات المفتاحية: خزان خرسانة مسلحة، حوض دائري، ضغط هيدروستاتيكي، معداد.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

L'élaboration des abaques de dimensionnement des réservoirs en béton armé soumis aux actions statiques représente une problématique essentielle le domaine de l'ingénierie civile et de la construction. Ce travail de mémoire s'intéresse spécifiquement aux réservoirs semi-enterrés à cuves circulaires, couramment utilisés pour le stockage de liquides tels que l'eau potable, les eaux usées et divers produits chimiques. Les réservoirs en béton armé sont des structures indispensables dans les infrastructures urbaines et industrielles. Leur conception doit garantir non seulement la capacité de stockage mais aussi la durabilité et la sécurité face aux diverses sollicitations mécaniques et environnementales. Les actions statiques, notamment la pression hydrostatique exercée par le liquide contenu, représentent une contrainte majeure à considérer lors du dimensionnement de ces réservoirs.

L'objectif principal de ce mémoire est de développer des abaques de dimensionnement pour les réservoirs semi-enterrés à cuves circulaires en béton armé, visant à simplifier et standardiser le processus de conception en fournissant des outils de référence précis et faciles à utiliser pour les ingénieurs. Pour atteindre cet objectif, le travail se divise en deux volets principaux :

Le calcul manuel, qui inclut la détermination des contraintes et des efforts internes dans la structure du réservoir à partir des principes de la mécanique des structures et l'utilisation des formules analytiques pour calculer les dimensions nécessaires des différents éléments du réservoir.

Le calcul automatique par ordinateur, qui implique l'implémentation de méthodes numériques et l'utilisation de logiciels de calcul pour modéliser le comportement des réservoirs sous les charges statiques et valider les résultats obtenus par les méthodes manuelles.

La méthodologie adoptée inclut une revue exhaustive de la littérature, la formulation des hypothèses de calcul basées sur les normes en vigueur, et la réalisation de cas pratiques pour différents volumes de réservoir. Les résultats obtenus seront compilés sous forme d'abaques, permettant une application directe dans les projets de conception. Les abaques développés offriront aux ingénieurs un outil précieux pour le dimensionnement rapide et fiable des réservoirs en béton armé semi-enterrés à cuves circulaires. En outre, cette recherche peut ouvrir la voie à des études plus approfondies sur les comportements dynamiques et les interactions sol-structure, enrichissant ainsi le corpus de connaissances dans ce domaine.

En conclusion, ce mémoire vise à répondre à un besoin pratique immédiat et à contribuer de manière significative à l'amélioration des méthodes de conception des infrastructures hydrauliques en béton armé.

Chapitre 1
Informations générales sur
les réservoirs

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

1. Définitions :

Un réservoir est une enveloppe contenant un liquide. Ce liquide est généralement de l'eau, soit potable (réservoirs d'eau de distribution publique), soit usée (eau d'égout). Parmi les liquides autres que l'eau, les plus courants sont : le vin, la bière, le lait, les hydrocarbures, etc. [3]

Ces réservoirs peuvent être soit posés sur le sol, soit légèrement enterrés, soit sur une superstructure (piscines au-dessus du sol), soit sur des pylônes de grande hauteur (châteaux d'eau) ou sur des bâtiments.

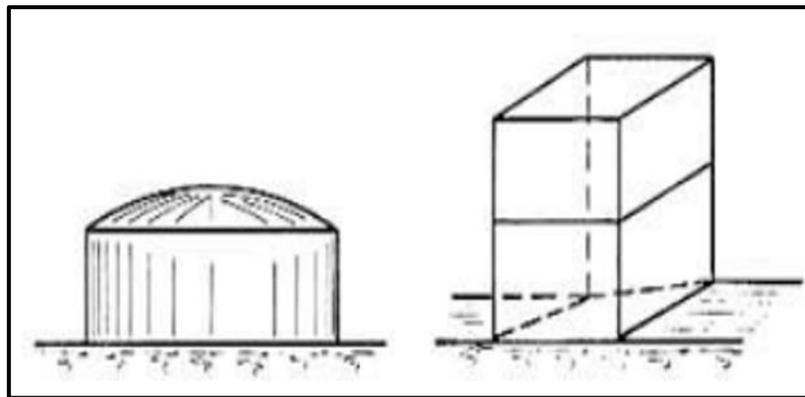


Figure. 1.1. Formes d'un réservoir. [3]

2. Classification des réservoirs : [5]

On peut classer les réservoirs selon :

2.1. La position du réservoir par rapport au sol :

- **Au niveau du sol (on très peu enterrer) :**

Radier du réservoir est toujours placé au contact du sol sur un béton maigre de 5 à 10 cm d'épaisseur.

- **Sur poteaux (légèrement surélever) :**

C'est le cas des piscines.

- **Sur pylônes :**

Châteaux d'eau.

- **Sur bâtiment :**

Ce peut être la façon économique d'utiliser quasi gratuitement un (pylône) existant pour alimenter non seulement le bâtiment porteur lui-même mais ceux voisins d'un niveau inférieur.

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

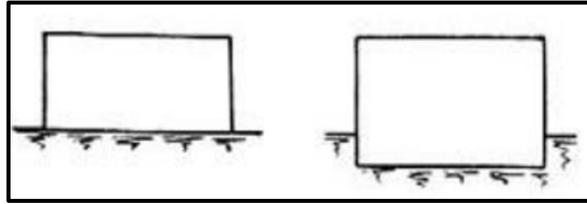


Figure. 1.2. Position du réservoir par rapport au sol. [3]

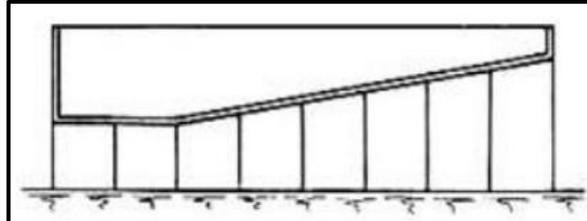


Figure. 1.3. Piscines. [3]

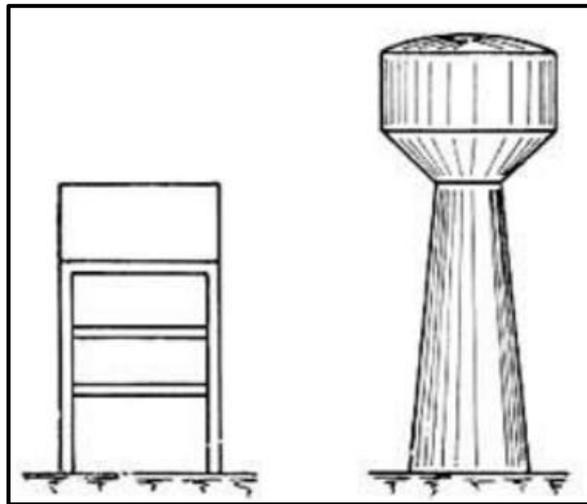


Figure. 1.4. Châteaux d'eau. [3]

2.2. La forme de la cuve :

- Réservoir carre.
- Réservoir rectangulaire.
- Réservoir circulaire.
- Réservoir de forme quelconque.

2.3. Selon le mode de fermeture :

- Réservoirs non couverts.
- Réservoir couvert.

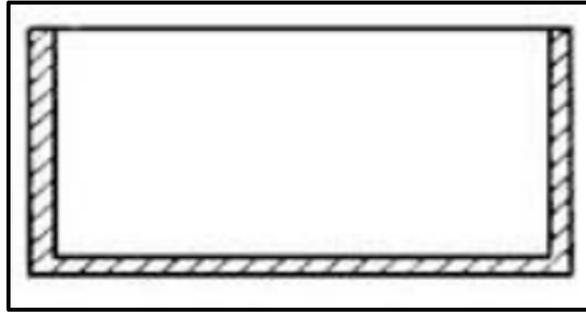


Figure. 1.5. Réservoirs non couverts.

2.4. Selon la complexité de la construction : [3]

- Réservoir simple.
- Réservoirs multiples.
- Réservoirs superposés.
- Réservoir superposé et multiple.

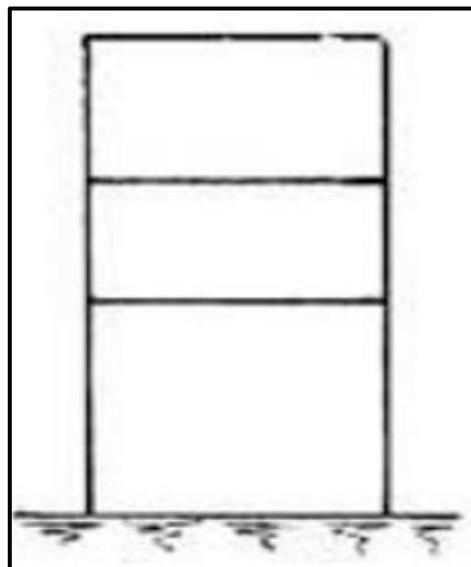


Figure. 1.6. Réservoirs superposés. [3]

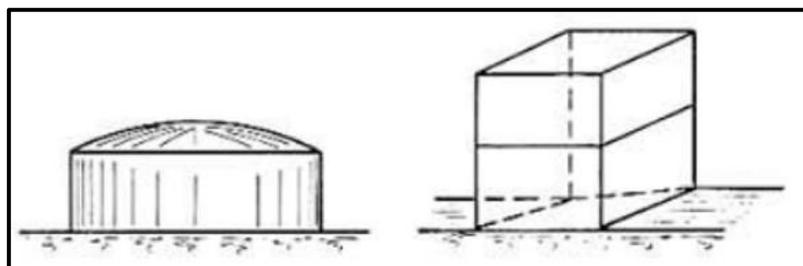


Figure. 1.7. Réservoir simple. [3]

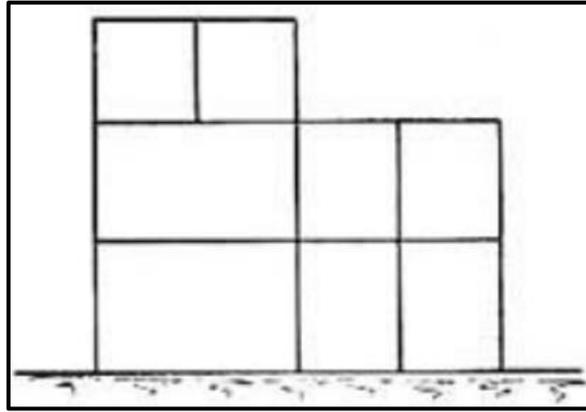


Figure. 1.8. Réservoir multiples ou même superposés. [3]

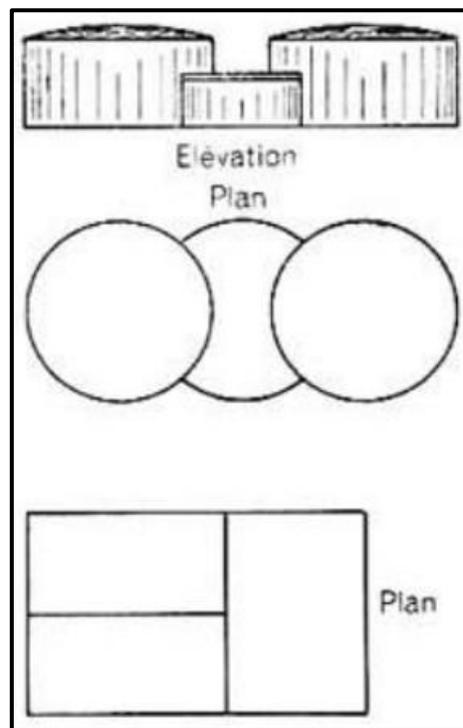


Figure. 1.9. Réservoirs multiples. [3]

2.5. Selon l'usage :

- Réservoir d'emménagement quand il s'agit seulement de liquides divers.
- Bassins de traitement (pour épuration des eaux usées). Le malaxage de produits, ..., etc.
- Bassin sportif (piscines).
- Cuve à gazomètre.

2.6. Selon la nature du liquide conservé :

- Réservoir à eau.
- Cuve à vin. Bière. Cidre, ..., etc.
- Citernes à produits noirs (goudron. Bitume).

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

- Réservoir à hydrocarbures (pétrole, essence). Gas-oil. Huiles. Minérales).

3. La constitution générale des réservoirs :[1]

La constitution générale des réservoirs d'eau peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que leur taille, leur emplacement, leur usage prévu, et les normes de construction locales. Cependant, voici les éléments généraux que l'on retrouve souvent dans la construction des réservoirs d'eau :

3.1. Fondation :

Les réservoirs d'eau reposent sur une fondation solide, généralement en béton, conçue pour supporter le poids de la structure et résister aux charges hydrostatiques.

3.2. Parois :

Les parois du réservoir peuvent être construites en différents matériaux tels que le béton, l'acier ou le plastique, en fonction des exigences de conception et de durabilité. Ces parois doivent être étanches pour empêcher les fuites d'eau.

- En cas d'un réservoir de grande dimension ($D > 30$ m) on ajoute des poteaux pour soutenir la couverture sont nécessaires.

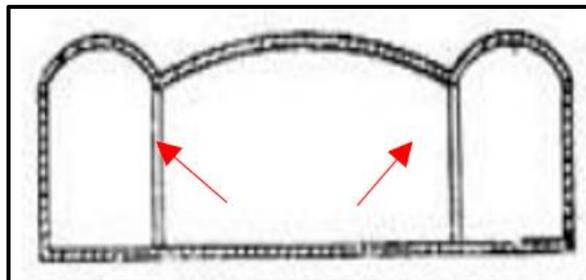


Figure. 1.10. Position des poteaux. [3]

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

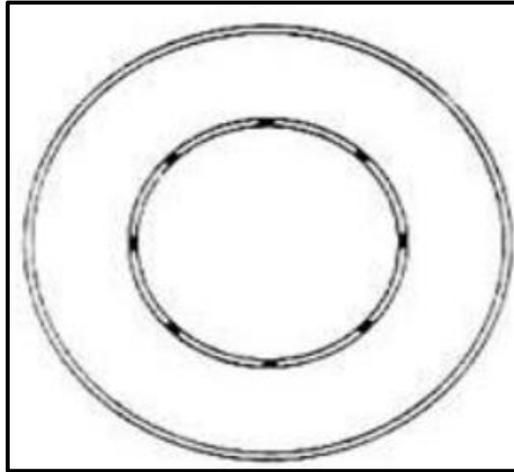


Figure. 1.11. Cas d'un réservoir de grand diamètre. [3]

Pour renforcer les parois (cas de très grand réservoir) on ajoute des confortos.

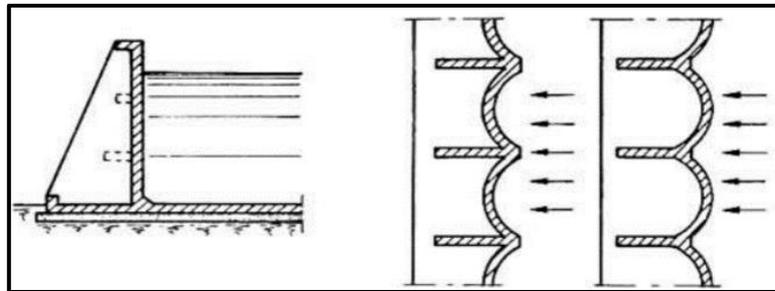


Figure. 1.12. Cas d'un réservoir à paroi avec contreforts. [3]

3.3. Couvercle ou toit :

Les réservoirs d'eau peuvent être équipés d'un couvercle ou d'un toit pour protéger l'eau contre la contamination, l'évaporation et les impuretés extérieures. Ce couvercle peut être fixe ou mobile pour permettre l'accès à l'intérieur du réservoir.

En résumé, la constitution générale des réservoirs d'eau comprend une fondation solide, des parois étanches, un couvercle ou un toit, des entrées et sorties, des systèmes de drainage, des dispositifs de contrôle et de sécurité, ainsi que parfois une isolation thermique. Ces éléments sont essentiels pour assurer le stockage sûr et efficace de l'eau pour divers usages.

4. La place du réservoir dans un réseau :

La place du réservoir d'eau dans un réseau est stratégique pour assurer une distribution efficace et fiable de l'eau potable. Voici quelques considérations importantes concernant son emplacement :

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

4.1. Proximité des sources d'eau :

Le réservoir doit être situé près des sources d'eau, comme les rivières, les lacs ou les puits, pour faciliter le pompage et le stockage de l'eau brute.

4.2. Élévation :

Idéalement, le réservoir est placé à une altitude élevée par rapport aux zones desservies. Cela permet de créer une pression naturelle dans les canalisations, réduisant ainsi le besoin de pompes de surpression et assurant une distribution uniforme de l'eau à tous les niveaux du réseau.

4.3. Capacité de stockage :

La capacité du réservoir doit être dimensionnée en fonction de la demande en eau et des fluctuations saisonnières. Un réservoir de grande capacité peut stocker suffisamment d'eau pour répondre aux besoins pendant les périodes de pointe ou en cas d'urgence.

4.4. Accessibilité :

Le réservoir doit être facilement accessible pour la maintenance, les réparations et les inspections régulières. Un accès pratique permet d'assurer une gestion efficace du réseau et une intervention rapide en cas de problème.

4.5. Distribution équitable :

L'emplacement du réservoir doit permettre une distribution équitable de l'eau à toutes les zones desservies. Il doit être stratégiquement positionné pour minimiser les pertes par friction dans les canalisations et assurer une pression adéquate dans tout le réseau.

4.6. Protection environnementale :

L'emplacement du réservoir doit prendre en compte les considérations environnementales, telles que la préservation des écosystèmes locaux, la minimisation des impacts sur les ressources en eau et la réduction des risques de pollution.

En résumé, la place du réservoir d'eau dans un réseau est déterminée par un équilibre entre la proximité des sources d'eau, l'élévation, la capacité de stockage, l'accessibilité, la distribution équitable et la protection environnementale. Un emplacement stratégique contribue à garantir une distribution efficace et durable de l'eau potable à la population desservie.

Chapitre 1 : Informations générales sur les réservoirs

En conclusion, les réservoirs d'eau jouent un rôle essentiel dans la gestion des ressources hydriques et dans la distribution d'eau potable à la population. Leur importance dans les réseaux de distribution est indéniable, offrant une capacité de stockage vitale pour répondre aux besoins en eau, réguler la pression dans les canalisations et assurer un approvisionnement fiable même pendant les périodes de pointe ou les situations d'urgence.

L'emplacement stratégique des réservoirs, leur capacité de stockage adéquate et leur construction robuste contribuent à garantir un fonctionnement efficace et durable des réseaux de distribution d'eau. De plus, les réservoirs peuvent jouer un rôle crucial dans la protection de l'environnement en préservant les écosystèmes locaux, en réduisant les pertes d'eau par friction et en facilitant la gestion des ressources hydriques.

En fin de compte, les réservoirs d'eau représentent bien plus que de simples structures de stockage. Ils sont le cœur des réseaux de distribution, assurant un accès fiable à l'eau potable pour les communautés et contribuant à la sécurité, à la santé et au bien-être des populations desservies. Il est donc essentiel de concevoir, construire et entretenir ces infrastructures avec soin et responsabilité pour garantir une gestion durable des ressources en eau à long terme.

Chapitre 2

Méthodologie de calcul

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

1. Méthode de dimensionnement :

Le dimensionnement d'un réservoir circulaire en béton armé commence par la détermination des dimensions initiales basées sur la capacité de stockage requise et d'autres critères de conception.

1.1. Détermination des dimension initiales : [3]

- **Diamètre intérieur de la cuve :**

$$d = 1,405\sqrt[3]{v} \quad (2.1)$$

- **Hauteur d'eau utile :**

$$H = 0,460 \times d \quad (2.2)$$

- **Hauteur libre de niveau de l'eau jusqu'à bas de la ceinture de calotte :**

$$H_0 = 0,10 \times d \quad (2.3)$$

- **Flèche de la coupole :**

$$F = 0,104 \times d \quad (2.4)$$

On adopte, en général, pour la flèche des coupoles une valeur. [2]

Supérieure à :

- $D/10$ pour les coupoles de couverture.
- $D/8$ pour les coupoles, fonds de réservoir.

Où D représente l'ouverture de la coupole.

- **Épaisseur de la coupole : [2]**

L'épaisseur des coupoles est au moins de :

- 8 cm pour les coupoles de couverture
- 15 cm pour les coupoles, fonds de réservoir.

Les coupoles d'épaisseur inférieure à 15 cm comprennent des goussets de raccordement avec la ceinture.

- **Épaisseur de paroi :**

$$e = 0,207 \times d^2 \quad (2.5)$$

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

L'épaisseur minimale de la paroi est de 15 cm pour les ouvrages de la classe A Elle est de 12 cm pour les ouvrages des classes B et C.

- Pour apporter une meilleure clarification, nous avons illustré la méthode de dimensionnement en utilisant des exemples de réservoirs avec des capacités de 50m³ et 100m³.

1.2. Réservoir de 50 m³ :

- **Diamètre intérieur de la cuve :**

$$d = 1,405\sqrt[3]{v}$$

$$d = 1,0405\sqrt[3]{50}$$

$$d = 5,176m$$

- **Hauteur d'eau utile :**

$$H = 0,460 \times d$$

$$H = 0,460 \times 5,176$$

$$H = 2,380m$$

- **Hauteur libre de niveau de l'eau jusqu'à bas de la ceinture de calotte :**

$$H_0 = 0,10 \times d$$

$$H_0 = 0,10 \times 5,176$$

$$H_0 = 0,5176m$$

- **Flèche de la coupole :**

$$F = 0,104 \times d$$

$$F = 0,104 \times 5,176$$

$$F = 0,538m$$

- **Épaisseur de paroi :**

$$e = 0,207 \times d^2$$

$$e = 0,207 \times 5,176^2$$

$$e = 5,54cm$$

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

1.3. Réservoir de 100 m³ :

- Diamètre intérieur de la cuve :

$$d = 1,405\sqrt[3]{v}$$

$$d = 1,0405\sqrt[3]{100}$$

$$d = 6,5176m$$

- Hauteur d'eau utile :

$$H = 0,460 \times d$$

$$H = 0,460 \times 6,5176$$

$$H = 2,997m$$

- Hauteur libre de niveau de l'eau jusqu'à bas de la ceinture de calotte :

$$H_0 = 0,10 \times d$$

$$H_0 = 0,10 \times 6,5176$$

$$H_0 = 0,65178m$$

- Flèche de la coupole :

$$F = 0,104 \times d$$

$$F = 0,104 \times 6,5176$$

$$F = 0,677m$$

Nous avons résumé les dimensions des réservoirs standards dans le tableau ci-dessous :

Tableau. 2.1. Tableau théorique.

Capacité standard du réservoir (m ³)	Diamètre intérieure	Hauteur paroi H (m)	Hauteur d'eau H ₀ (m)	Épaisseur de paroi e ₂ (cm)	Épaisseur de radie e ₃ (cm)
50	5,18	2,38	0,52	5,55	5,8
100	6,52	3,00	0,65	8,80	7,3
150	7,47	3,43	0,75	11,54	8,4
200	8,22	3,78	0,82	13,97	9,2
250	8,85	4,07	0,89	16,21	9,9
300	9,41	4,33	0,94	18,31	10,5

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

500	11,15	5,13	1,12	25,74	12,5
750	12,77	5,87	1,28	33,73	14,3
1000	14,05	6,46	1,41	40,86	15,7
2000	17,70	8,14	1,77	64,86	19,8
3000	20,26	9,32	2,03	84,97	22,7
5000	24,03	11,05	2,40	119,48	26,9

Ces dimensions peuvent être ajustées et affinées au besoin en fonction des considérations pratiques et des critères de conception spécifiques.

Tableau. 2.2. Tableau pratique.

Capacité standard du réservoir (m ³)	Diamètre intérieure	Hauteur paroi H (m)	Hauteur d'eau H ₀ (m)	Épaisseur coupole e ₁ (m)	Épaisseur paroi e ₂ (m)	Épaisseur radie e ₃ (m)	Hauteur de la ceinture A (m)	Largeur de la ceinture B (m)
50	5	3,00	2,60	0,08	0,15	0,15	0,30	0,25
100	7	3,00	2,50	0,08	0,20	0,20	0,35	0,30
150	8	3,50	3,00	0,10	0,20	0,20	0,35	0,30
200	9	3,70	3,20	0,12	0,20	0,20	0,40	0,30
250	9	4,50	4,00	0,12	0,20	0,20	0,40	0,30
300	10	4,40	3,80	0,14	0,20	0,20	0,45	0,35
500	12	4,40	3,80	0,14	0,25	0,25	0,45	0,35
1000	16	5,60	5,00	0,14	0,30	0,30	0,50	0,40
2000	22	6,20	5,30	0,16	0,35	0,35	0,60	0,40
5000	32	7,25	6,25	0,20	0,40	0,40	0,80	0,50

2. Méthode de calcul :

2.1. Généralités :

Les réservoirs, destinés à contenir des liquides, doivent être parfaitement étanches. Pour leur construction, on utilise généralement un béton dosé à 350 - 400 kg/m³. Les contraintes admissibles des aciers sont limitées à des valeurs relativement faibles, autour de 1000 kgf/cm². De plus, un enduit est souvent appliqué à l'intérieur du réservoir pour améliorer l'étanchéité.

Les réservoirs peuvent être surélevés, posés sur le sol ou enterrés. Dans le cas des réservoirs enterrés, il est essentiel de tenir compte de la poussée des terres, surtout lorsque le réservoir est

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

vide, afin de vérifier sa résistance. Lorsque le réservoir est plein, on peut, par mesure de sécurité, négliger la poussée des terres, car elle agit en sens inverse de celle de l'eau. Toutefois, si l'on décide de prendre en compte cette poussée, il est crucial d'être très prudent dans son estimation pour ne pas surestimer la force réelle dans les calculs.

La méthode de calcul des sollicitations agissant sur la paroi d'un réservoir circulaire et l'influence de la classe d'étanchéité sur la section unitaire des armatures doivent être soigneusement étudiées.

2.2. Calcul de la sollicitation (M, N, T) de la paroi :

2.2.1. Méthode Hangan-Soares : [3]

Dans ce cas l'encastrement n'étant qu'élastique, c'est le cas auquel se rapporte la résolution qui suit et qui admet le radier est appliqué sur une fondation rigide.

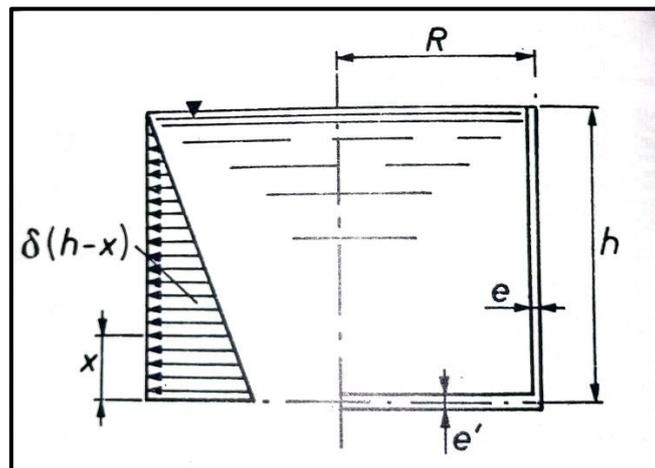


Figure. 2.1. La pression hydrostatique sur la paroi d'un réservoir d'eau.

Les formules de calcul des sollicitations sont données comme suit :

$$N_Q = \delta R(H - X) - \delta R h e - \beta x - 2M_0 R \beta^2 e^{-\beta x} \sin \beta x \quad (2.6)$$

$$M = \frac{\delta h}{2\beta^2} e^{-\beta x} \sin \beta x + M_0 e^{-\beta x} \cos \beta x \quad (2.7)$$

$$T = -\frac{\delta h}{2\beta} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \quad (2.8)$$

D'où :

M_0 : Moment à l'encastrement inférieur.

δ : Poids volumique de l'eau.

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

R : Rayon intérieur du réservoir.

H : Hauteur d'eau.

e : Epaisseur de la paroi.

e' : Epaisseur du radier.

- Pour les valeurs caractéristiques de dimensionnement nous avons :

$$M_0 = K \delta h^3 \quad (2.9)$$

D'où :

K : étant donné par l'équation :

$$\left(\frac{e}{e'}\right)^3 \frac{K^3}{2} + \frac{3}{2\beta h} K - \frac{2}{4(\beta h)^3} \left(1 - \frac{1}{\beta h}\right) = 0$$

Abaques pour le calcul du moment de l'encastrement donne K en fonction de $\left(\frac{e}{e'}\right)$.

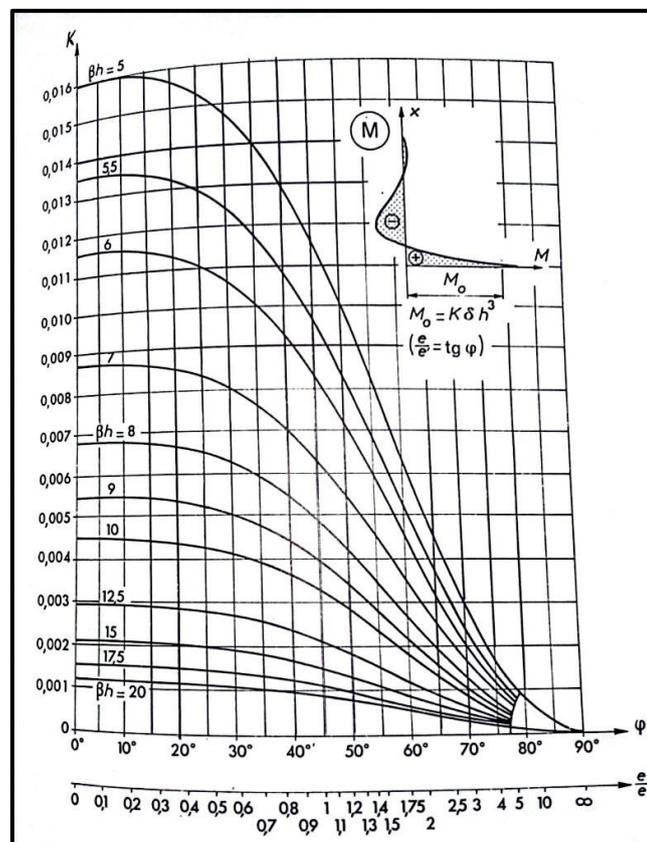


Figure. 2.2. Abaque de détermination de K . [3]

- Pour un encastrement parfait de la paroi sur le radier on a :

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

$$E \rightarrow \infty \text{ et } \frac{e}{e'} = 0$$

$$K = \frac{1}{2(\beta h)^2} \left(1 - \frac{1}{\beta h} \right) \quad (2.10)$$

- L'articulation de la paroi sur le radier donne : $e' \rightarrow \infty$ et $\frac{e}{e'} = 0$.
- L'abscisse x_0 (le point où le moment de flexion nul) : $X_0 = kh$.

Avec $K_0 = \frac{\varphi_0}{\beta h}$.

Abaque (**Figure. 2.3**) donne K_0 en fonction de et $\frac{e}{e'}$.

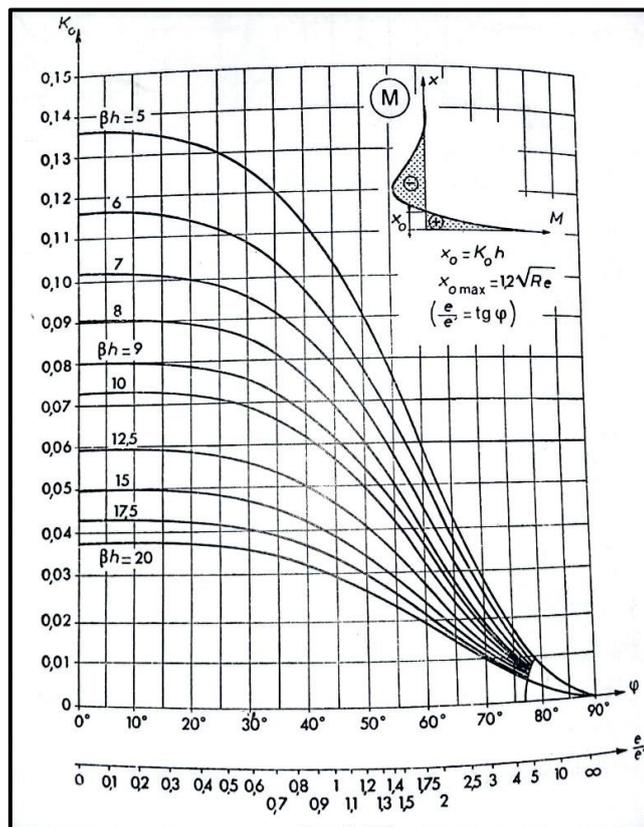


Figure. 2.3. Abaque de détermination de K_0 . [3]

- L'abscisse a une valeur limite indépendante de h .

$$X_0 = \frac{2\pi}{2\beta} = \frac{\pi}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} \sqrt{Re} \quad (2.11)$$

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

Ou pour $\nu = \frac{1}{6}$ (Cas de béton armé).

$$X_{0\max} = 1,2\sqrt{Re}$$

- Le moment de flexion s'annule une seconde fois à la distance du fond de la cuve donné par :

$$X_0 + \frac{\pi}{\beta} = \left(K_0 + \frac{\pi}{\beta} \right) h \quad (2.12)$$

- Abscisse x_1 du moment de flexion négatif maximal :

$$X_1 = K_1 h \quad (2.13)$$

Avec : $K_1 = \frac{\pi}{4\beta h} + K_0$.

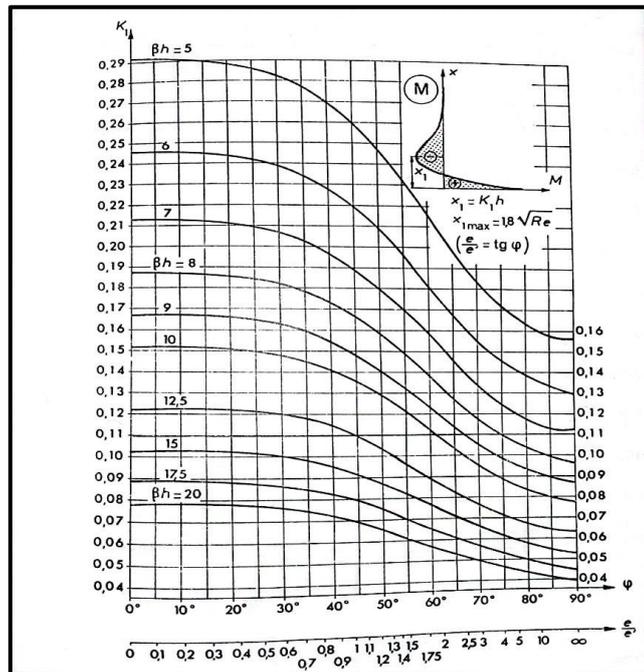


Figure. 2.4. Abaque de détermination de K_1 . [3]

K_1 est donnée par la (Figure. 2.4).

$$M' = -K'h^3 \quad (2.14)$$

M' : moment de flexion négatif maximal.

Avec : $K' = -Ke^{-\beta x_1(\cos \beta x_1)}$.

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

La Figure. 2.5 donne K_1 en fonction de $\frac{e}{e'}$:

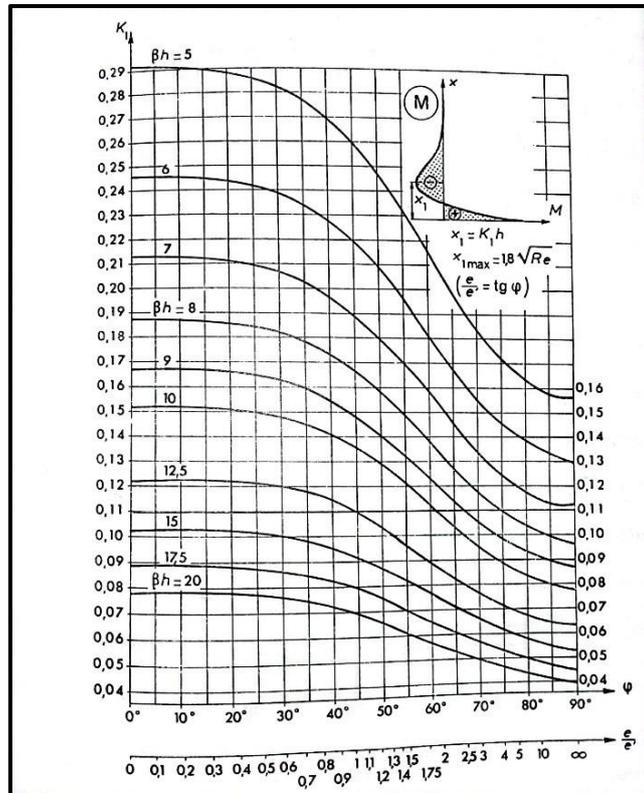


Figure. 2.5. Abaque de détermination de K_1 . [3]

- X_2 de l'effort N_φ maximal suivant les cerces :

$$X_2 = K_2 \quad (2.15)$$

$$X_{2\max} = \frac{\pi}{2\beta} = -\frac{\pi}{\sqrt[3]{3(1-\nu^2)}} \sqrt{Re}$$

$$X_{2\max} = 0,6\sqrt{Re}$$

Avec : $K_2 = \frac{\varphi^2}{\beta h}$.

Pour calculer l'abscisse de l'effort maximale suivant les cerces on détermine le coefficient K_2 en

fonction de $\left(\frac{e}{e'}\right)$.

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

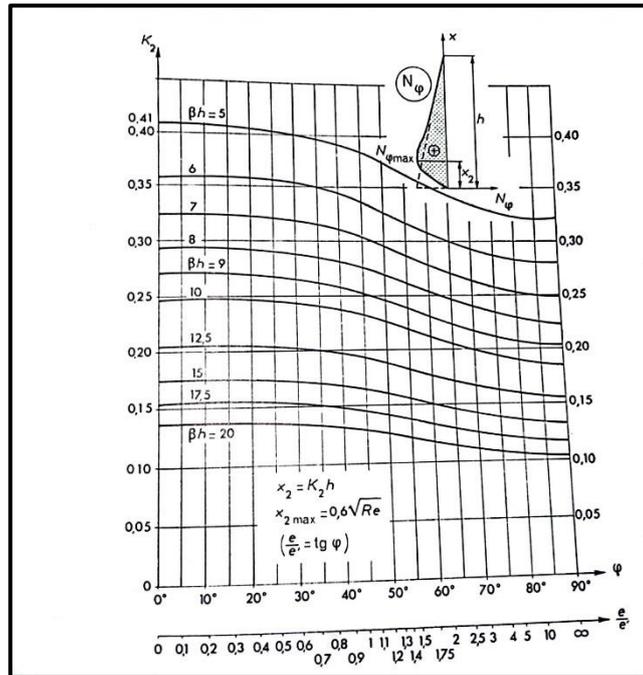


Figure. 2.6. Abaque de détermination de K_2 . [3]

- L'effort N_φ maximal suivant les cerces :

$$N_\varphi = K'' \beta R h \quad (2.16)$$

Avec : $K'' = 1 - K_2 - e^{\varphi_2 \cos \varphi_2} - 2K(\beta h)^2 e^{-\varphi_2 \sin \varphi_2}$ Notion de $\frac{e}{e'}$.

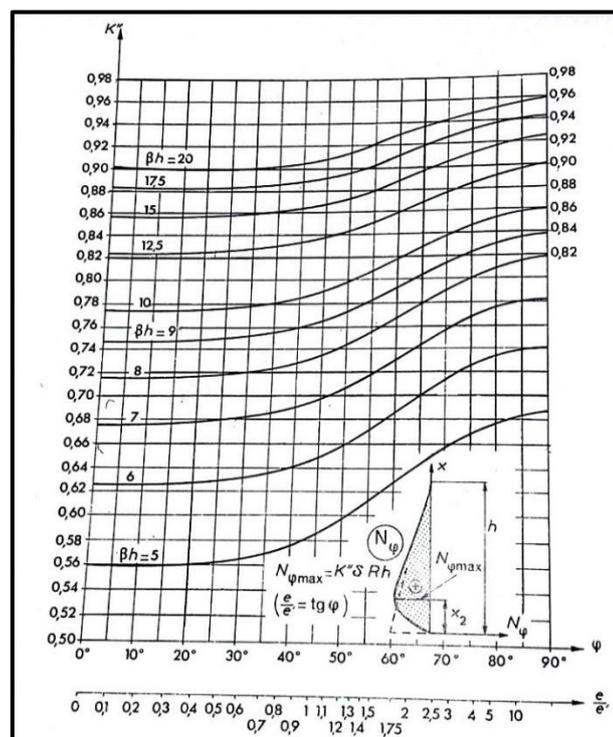


Figure. 2.7. Abaque de détermination de K'' . [3]

Chapitre 2 : Méthodologie de calcul

- Paroi encastrée sur le radier :

$$e' \rightarrow \infty \text{ et } e \rightarrow 0$$

$$M_0 = \delta h^3 \frac{1}{2(\beta h)^2} \left(1 - \frac{1}{\beta h}\right) = \frac{1}{2\sqrt{1-\nu^3}} = h \text{Re} - \frac{(\text{Re})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \quad (2.17)$$

$$\text{Pour : } \delta = 1 \text{KdaN/m}^3 \text{ et } V = \frac{1}{6}$$

$$M_0 = \frac{h \text{Re}}{3,416} - \frac{(\text{Re})^{\frac{3}{2}}}{4,464}$$

(h , R , e en mètre et M_0 en KN.m/ml)

$$X_0 = \frac{\psi_0}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \sqrt{\text{Re}}$$

$$\text{Avec : } \tan \psi_0 = 1 - \frac{\psi_0}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \sqrt{\text{Re}}$$

Chapitre 3

**Dimensionnement des
éléments résistants du
réservoir**

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

1. Introduction :

Dans cette partie, nous allons procéder au calcul manuel des différentes parties composant l'ouvrage. Le réservoir étudié est un réservoir circulaire en béton armé coulé sur place, de type semi-enterré, de capacité 500 m^3 . La conception adoptée pour l'ouvrage est présentée dans la **figure. 3.1**.

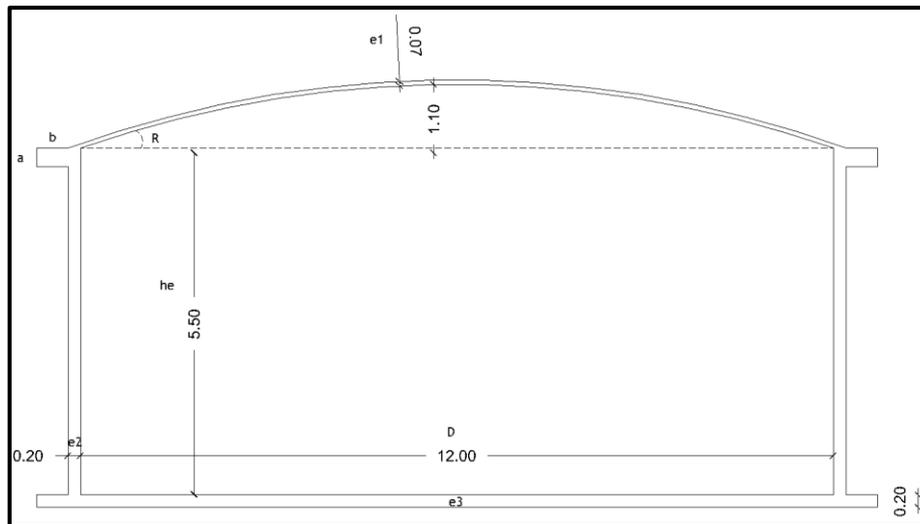


Figure. 3.1. Forme de conception d'un réservoir 500 m^3 .

2. Prédimensionnement :

Les dimensions préalables du réservoir sont les suivantes :

- Avec le volume de réservoir : $V = 500 \text{ m}^3$.
- Diamètre intérieur de la cuve (D) en m = 12 m.
- Hauteur de réservoir (H) en m = 5,5 m.
- Flèche de la coupole (d) en m = 1,10 m.
- Épaisseur de la coupole (e_1) en m = 0,08 m.
- Épaisseur de la paroi (e_2) en m = 0,20 m.
- Épaisseur de la radier (e_3) en m = 0,20 m.

3. Etude et ferrailage de la coupole :

3.1. Calcul de la coupole : [2]

Une coupole de réservoir est une structure en forme de dôme ou de voûte qui couvre le dessus d'un réservoir d'eau pour le protéger contre les intempéries. Elle garantit l'étanchéité et la stabilité tout en facilitant l'accès pour l'entretien.

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

- Effort suivant les méridiens : [4]

$$N_m = \frac{R \times P}{1 + \cos \varphi}$$

- Effort suivant les parallèles (cerces) :

$$N_p = R \times P \left(\frac{1}{1 + \cos \varphi} - \cos \varphi \right)$$

P : Charge uniforme sur la surface de la coupole.

R : Rayon de la courbure de la coupole.

φ : Angle composé de l'axe de révolution jusqu'au bord supérieur de la coupole.

3.2. Calcul du rayon de la coupole :

$$(R - f^2) + r^2 = R^2$$

$$R = \frac{r^2 + f^2}{2 \times f} = \frac{6 + 1,10^2}{2 \times 1,10} = 16,91m$$

3.3. Calcul de l'angle φ :

$$\varphi = \frac{r}{R - f} = \frac{6}{16,19 - 1,10} = 0,32$$

$$\varphi = 17,74 \Rightarrow \begin{cases} \cos \varphi = 0,95 \\ \sin \varphi = 0,30 \end{cases}$$

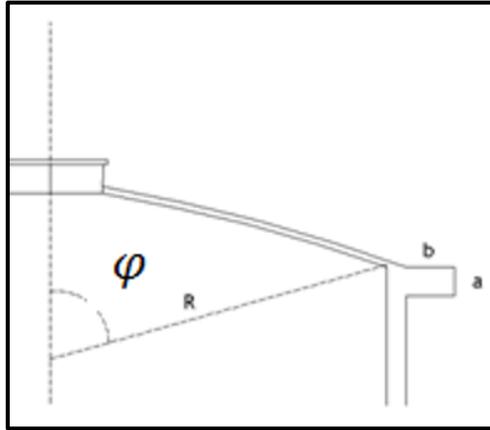


Figure. 3.2. Angle de coupole.

4. La surface de la coupole :

$$S(\text{coupole}) = 2\pi R \times f$$

$$S(\text{coupole}) = 2\pi \times 16,91 \times 1,10$$

$$S(\text{coupole}) = 116,87 \text{ m}^2$$

5. Le Poids propre de la coupole : [6]

$$P_p = e \times \delta \text{ béton}$$

$$e = 0,08 \text{ m}$$

$$P_p = 0,08 \times 2500$$

- Poids propre de la coupole : 200 Kg/m^2 .
- Enduit : $2200 \times 0,02 = 44 \text{ Kg/m}^2$.
- Etanchéité : $7,30 \text{ Kg/m}^2$.
- Charge permanente : $G = 251,3 \text{ Kg/m}^2$.
- Charge d'exploitation : $Q = 100 \text{ Kg/m}^2$.
- La charge de calcul :

$$\text{On a : } G = 251,3 \text{ Kg/m}^2 \text{ et } Q = 100 \text{ Kg/m}^2$$

$$\text{ELU : } q_u = (1,35G + 1,5Q) \times S(\text{coupole})$$

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

$$=(1,35 \times 251,3 + 1,5 \times 100) \times 116,87$$

$$= 57179,23 \text{ Kg}$$

6. La charge de calcul par mètre linéaire :

Avec : $r = 6$

$$\text{ELU} : = P \frac{q_u}{2\pi r} = \frac{57179,23}{2\pi \times 6}$$

$$= 1517,09 \text{ Kg/m}$$

7. Calcul d'effort normal :

7.1. Les données :

Poids de la coupole : $P = 1,35G + 1,5Q$

$$= 1,35 \times 251,3 + 1,5 \times 100$$

$$P = 489,25 \text{ Kg/m}^2$$

7.2. Les résultants :

$$N_m = \frac{-R \times P}{1 + \cos \varphi}$$

$$= \frac{-16,91 \times 489,25}{1 + 0,95}$$

$$N_m = 4242,675 \text{ Kg}$$

$$N_p = R \times P \left(\frac{1}{1 + \cos \varphi} - \cos \varphi \right)$$

$$= 16,91 \times 489,25 \left(\frac{1}{1 + 0,95} - 0,95 \right)$$

$$N_p = 3616,88 \text{ Kg}$$

8. Ferrailage de la coupole :

8.1. Vérification des contraintes :

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

Sous combinaisons ELS, la contrainte de compression du béton est limitée à la plus petite des deux valeurs suivantes :

- **Contrainte de compression ELS : [7]**

$$\sigma_{bc} = \frac{e+0,55}{3} \times f_{c28} \text{ et } \sigma_{bc} = 100 \times \frac{h}{R} \times (f_{c28})^{1/3} \text{ (MPa) (CBA)}$$

h_0 : Épaisseur de la coupole.

R : Rayon de courbure de la coupole.

f_{c28} : Résistance caractéristique à 28 jours du béton à la compression.

$$\sigma_{bc} = \frac{0,08 + 0,55}{3} \times 25 = 5,25 \text{ Mpa} = 5250 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_{bc} \leq 100 \times \frac{0,08}{6} \times 25^{1/3} = 3,89 \text{ Mpa} = 3898,69 \text{ KN/m}^2$$

- **La contrainte sont limitée à la plus petite des deux valeurs :**

$$\sigma_{bc} = 3,89 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_b = \frac{N_{\max}}{b \times e}$$

Avec : $b = 100 \text{ cm}$, $e = 8 \text{ cm}$ et $N_{\max} = 4242,675 \text{ Kg/ml}$

$$\sigma_b = 0,530 \text{ Mpa}$$

$\sigma_b < \sigma_{bc}$ donc La contrainte est vérifiée.

- **ELU :**

$$A_u = \frac{N_u}{\sigma_{st}} = \frac{4104,123 \times 0,08}{348000} = 9,51 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_u = 9,51 \text{ cm}^2$$

- **Condition de non fragilité : [8]**

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

$$A_{\min} = \frac{B \times ft_{28}}{fe} = \frac{0,08 \times 2,1}{400} = 4,2 \times 10^{-4} m^2$$

$$A_{\min} = 4,20 cm^2$$

- La section des Armatures :

$$\frac{As}{b \times d} \geq 0,20\% \Rightarrow As \geq \frac{b \times d \times 0,2}{100}$$

$$As = \frac{8 \times 100 \times 0,2}{100} = 1,6 cm^2$$

- Le diamètre ϕ des aciers :

Le diamètre ϕ des aciers est au plus égale $\frac{h_0}{10}$.

$$\phi = \frac{8}{10} = 0,8 cm$$

- L'espacement des armatures :

L'écrêtement maximal des aciers est de $20 cm$.

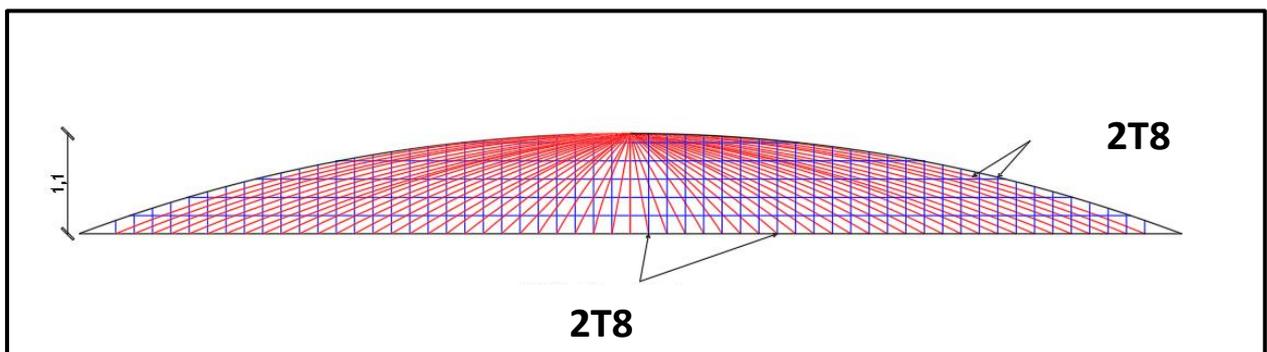
$$H_0 \times 1,5 = 8 \times 1,5 \text{ et } 20 cm.$$

La plus petite $12e = 12$.

Nous allons adopter :

Armature principale = 2T8 espacement $e = 12 cm$ dans la direction horizontale.

Répartition = 2T8 espacement $e = 12 cm$ dans la direction v.



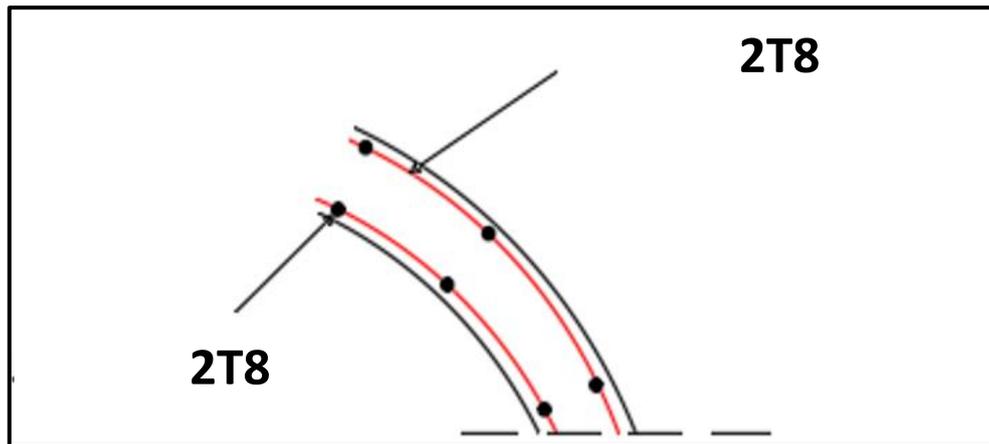


Figure. 3.3. Ferrailage de coupole.

9. Etude de la ceinture : [3]

La ceinture est dimensionnée comme une poutre soumise à une traction due à la composante ramenée par la couverture. Elle doit équilibrer la composante horizontale de la poussée de la coupole.

9.1. Poussé horizontal H :

$$H = \frac{P(r^4 - f^4)}{4f \times r^2}$$

$$H = \frac{489,25(6^4 - 1,10^4)}{4 \times 1,10 \times 6^2}$$

$$H = 3998,432 \text{ Kg/m}$$

9.2. L'effort de traction dans la ceinture T :

L'effort de traction appliqué sur la ceinture.

$$T = H \times \frac{D}{2}$$

$$T = 3998,432 \times 6 = 23990,594 \text{ Kg}$$

9.3. Ferrailage de la ceinture :

$$T = 23990,594 \text{ Kg}$$

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

$$A = \frac{T}{\sigma_{ac}} = \frac{23990,594}{3480} = 6,89$$

On adopte pour $8T12 = 9,05\text{cm}^2$ avec des cadres T8.

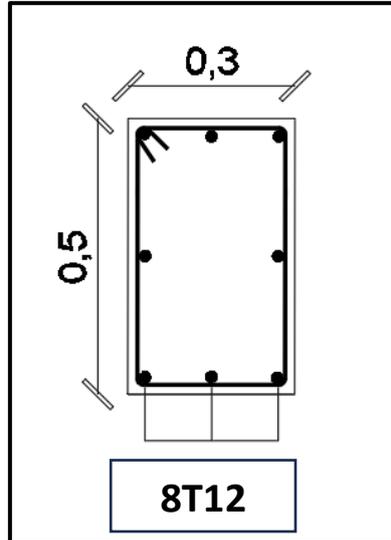


Figure. 3.4. Ferrailage de ceinture.

10. La paroi :

10.1. Calcul des efforts et moments de la paroi :

Ont utilisé la méthode de Hangan-Soares : [3]

Les données :

- La hauteur d'eau utile $h = 5,50$.
- L'épaisseur de la paroi $e = 20\text{cm}$.
- L'épaisseur de radier $e' = 20\text{cm}$.

Les résultats :

$$\frac{e}{e'} = \frac{0,20}{0,20} = 1$$

$$B = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{r \times e}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{6 \times 0,20}} = 1,20$$

$$B \times h = 1,20 \times 5,50 = 6,6$$

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

$$K = \frac{21,30 - 20}{30 - 20} + 0,009 \times \frac{30 - 21,30}{30 - 20}$$

$$K = 0,009$$

10.2. Moment T_{\max} au pied de la paroi M_0 :

$$\begin{aligned} M_0 &= K \times \sigma \times h^3 \\ &= 0,009 \times 1000 \times 5,50^3 \end{aligned}$$

$$M_0 = 1497,37 \text{ Kg/m}$$

$$B \times h = 6,6$$

10.3. Abscisse x_0 du moment de l'exionne :

$$K = 0,11 \times \frac{21,30 - 20}{30 - 20} + 0,10 \times \frac{30 - 21,30}{30 - 20}$$

$$K = 0,10$$

$$x_0 = K_0 \times h = 0,101 \times 5,50 = 0,55m$$

$$x_{0\max} = 1,2\sqrt{R \times e} = 1,2\sqrt{16,91 \times 0,20}$$

$$x_{0\max} = 1,31m$$

10.4. Abscisse x_1 du moment de flexion négatif maximal :

$$K_1 = 0,23 \times \frac{21,30 - 20}{30 - 20} + 0,22 \times \frac{30 - 21,30}{30 - 20}$$

$$K_1 = 0,22$$

$$x_1 = K_1 \times h = 0,22 \times 5,50 = 1,21m$$

$$K' = 0,0026$$

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

10.5. Moment fléchissant négatif maximale :

$$\begin{aligned}M' &= -K' \times \sigma \times h^3 \\ &= 0,0026 \times 1000 \times 5,50\end{aligned}$$

$$M' = -415,93$$

10.6. Abscisse x_2 de l'effort maximale suivent les cerces :

$$K_2 = 0,35 \times \frac{21,30 - 20}{30 - 20} + 0,30 \times \frac{30 - 21,30}{30 - 20}$$

$$K_2 = 0,306$$

$$x_2 = K_2 \times h = 0,306 \times 5,50 = 1,68m$$

$$K'' = 0,642$$

10.7. Effort N_o maximal suivant les cerces :

$$\begin{aligned}N_{\max} &= K'' \times \delta \times h \times R \\ &= 0,642 \times 1000 \times 6 \times 5,50 \\ &= 21186Kg/m^2\end{aligned}$$

Le calcul des armatures verticales se fait à la flexion simple d'une bande de 1 m On a :

Les données :

$$A_{ST} = \frac{Mu}{z\sigma_{st}}, \quad d = 0,20cm, \quad \sigma_{bc} = 14,74Mpa \quad \text{et} \quad \sigma_{st} = 348Mpa.$$

$$M_u = 1497,31Kg/m = 0,0149731MN.m$$

$$U = \frac{Mu}{b \times d^2 \times \sigma_{bc}} = \frac{0,0149731}{1 \times 0,20^2 \times 14,47}$$

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

$$U = 0,0258$$

$$\alpha_u = 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2u} \right)$$

$$= 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,0258} \right) = 0,032$$

$$\alpha_u = d \left(1 - 0,4\alpha_u \right) = 0,14 \left(1 - 0,4 \times 0,032 \right)$$

$$\alpha_u = 0,197$$

$$\text{Donc : } A_{st} = \frac{0,0149731}{0,197 \times 348}$$

$$= 2,18 \times 10^{-3} m^2$$

$$= 2,18 cm^2$$

On opt : $8T8 = 4,02 cm^2$.

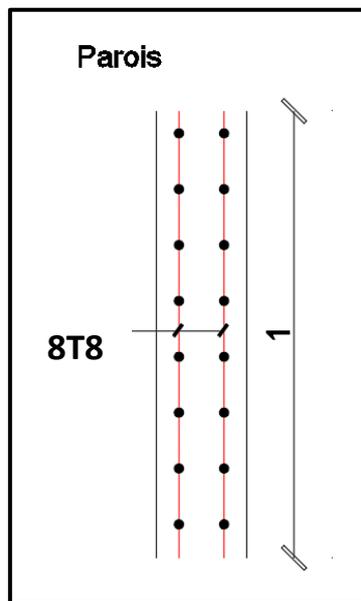


Figure. 3.5. Ferrailage de paroi.

11. Calcul du radier : [9]

Le radier est calculé comme une dalle circulaire en flexion sous l'effet de la charge due au poids du réservoir. Il doit assurer l'étanchéité du réservoir et garantir une bonne répartition des charges sur le sol. Dans ce contexte, le choix d'un radier général s'impose.

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

11.1. Efforts exercés :

- Poids de la coupole :

$$P_1 = 2\pi \times R \times f \times p$$

$$P_1 = 2 \times 3,14 \times 1,10 \times 16,91 \times 489,25$$

$$P_1 = 57151,386Kg$$

- Poids de la ceinture :

$$P_2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \times h \times 2500$$

$$P_2 = \left(\frac{3,14}{4}\right) \times (16,40^2 - 12^2) \times 0,50 \times 2500$$

$$P_2 = 9581,85Kg$$

- Poids de la paroi :

- Poids du Béton :

$$P_3 = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \times h \times 2500$$

$$P_3 = \left(\frac{3,14}{4}\right) \times (12,40^2 - 12^2) \times 0,50 \times 2500$$

$$P_3 = 105400,43Kg$$

- Poids de l'enduit :

$$P_4 = 2\pi \times (r_{ext} \times h + r_{int} \times h) \times 0,02 \times 2300$$

$$P_4 = 2\pi \times (6,60 \times 5,50 + 6 \times 5,50) \times 0,02 \times 2300$$

$$P_4 = 19393,679$$

- Poids de la cuve P₅ :

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

$$P_5 = P_3 + P_4 = 105400,43 + 19933,679 = 124794,109$$

- Poids de l'eau :

$$P_6 = 1000 \times 500 = 500000 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{vide}} &= P_{\text{coupole}} + P_{\text{ceinture}} + P_{\text{cuve}} \\ &= 57151,386 + 9581,85 + 124794,109 \\ &= 191527,345 \text{ Kg} \end{aligned}$$

- Poids total du réservoir plein :

$$\begin{aligned} P_t(\text{Plein}) &= P_t(\text{vide}) + P_{\text{eau}} \\ &= 191527,345 + 500000 = 691527,345 \text{ Kg} \end{aligned}$$

- Surface de radier :

D : Diamètre de radier 12,40.

$$S = \pi \times \frac{D^2}{4} = 120,76$$

- Sons pression :

$$P_s = \frac{P}{S} = \frac{691527,345}{120,76} = 5726,460$$

$$M_{\text{max}} = \frac{P \times D^2}{24}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{5730 \times 12^2}{24} = 34380 \text{ Kg.m}$$

$$M_{\text{max}} = 34380 \text{ N} = 0,34 \text{ MN.m}$$

$$M_{\text{max}} = 343 \text{ KN.M}$$

11.2. Ferrailage du radier :

Chapitre 3 : Dimensionnement des éléments résistants du réservoir

On va calculer le ferrailage pour un radier posé sur sole soumis à la flexion simple, sachant que :

Les données :

$b = 1m$, $d = 0,16m$, enrobage $c = 4cm$, $f_{c28} = 25Mpa$ et $f_{bu} = 14,2Mpa$.

Les résultats :

$$U = \frac{Mu}{b \times d^2 \times \sigma_{bc}} = \frac{0,3480}{1 \times 0,16^2 \times 14,47}$$

$$U = 0,093$$

$$\alpha_u = 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2u} \right)$$

$$= 1,25 \left(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,093} \right) = 0,122$$

$$\alpha = d \left(1 - 0,4 \times 0,022 \right) = 0,16 \left(1 - 0,4 \times 0,022 \right)$$

$$\alpha = 0,158$$

$$\text{Donc : } A_{st} = \frac{0,0348}{0,158 \times 348}$$

$$= 6,32 \times 10^{-3} m^2$$

$$= 6,32 cm^2$$

On opte : $8T12 = 9,05 cm^2$.

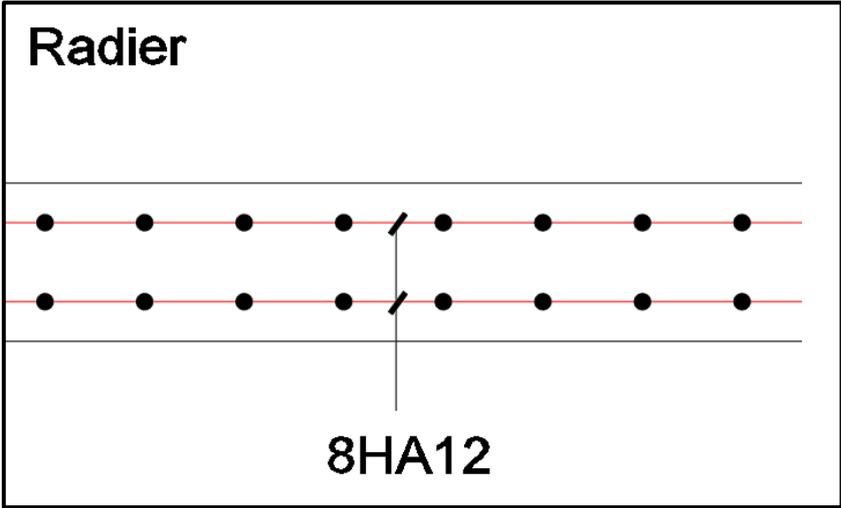


Figure. 3.6. Ferrailage de radie.

Chapitre 4

Calcul automatique d'un réservoir

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

1. Introduction :

Ce chapitre est réservé au calcul automatique en utilisant le logiciel Robot Version 2023. Le calcul sera effectué sur la base d'un réservoir circulaire semi-enterré en mode statique. Le cas le plus défavorable est celui d'une cuve pleine sans poussée des terres, c'est le cas d'essai d'étanchéité du réservoir avant réception de l'ouvrage.

2. Conception de l'ouvrage : [10]

La conception de l'ouvrage étudié est présentée dans la **figure. 4.1** et **figure. 4.2**.

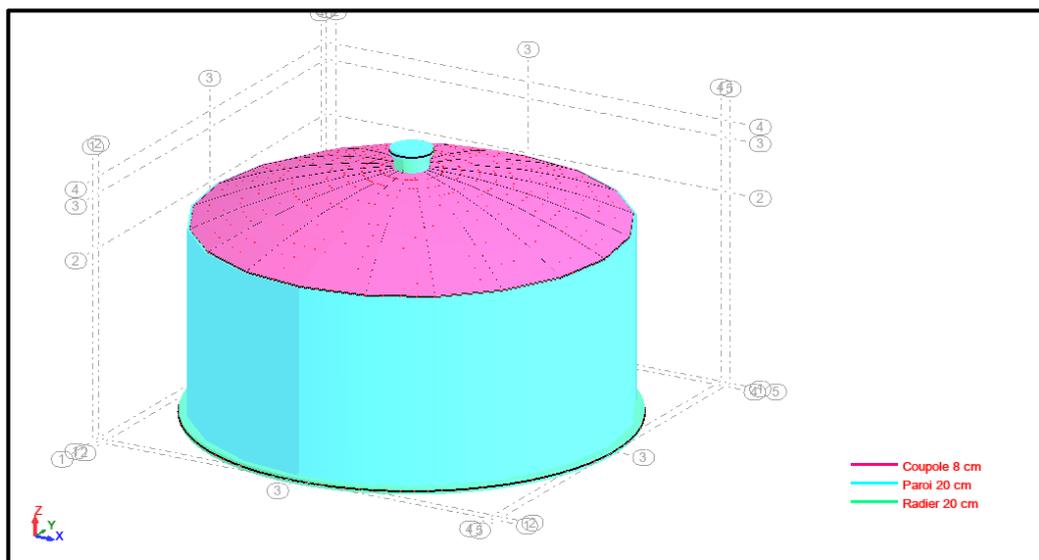


Figure. 4.1 : Extrait de la vue 3D.

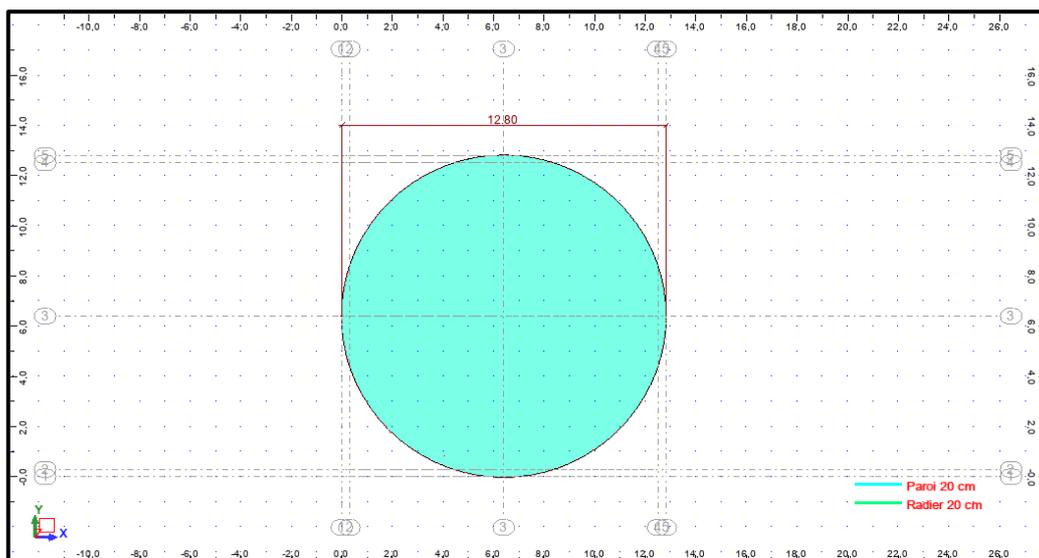


Figure. 4.2. Extrait de la vue en plan radier.

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

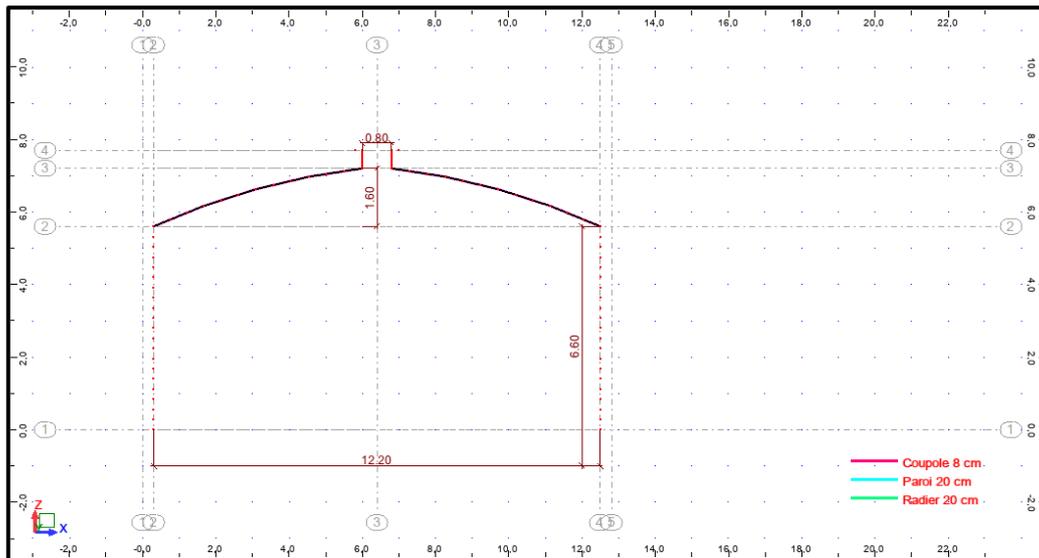


Figure. 4.3. Extrait de la vue en plan.

3. Charges appliquées :

Le cas étudié est soumis principalement à l'action de la pression hydrostatique exercée à l'intérieur de la cuve à une hauteur d'eau de 5.50 m.

Tableau. 4.1. Tableau des charges.

Cas	Type de charge	Liste
9	PH1	(EF) pression hydrostatique 2 P=0,0 GA=1000,00 h=5,50 -Z MEMO.
10	PR1	(EF) surfacique uniforme 3 PX=0,0 PY=0,0 PZ=-55,00 global non projetés absolues MEMO.
11	Q coupole	(EF) surfacique uniforme 31 32 36A87P3 PX=0,0 PY=0,0 PZ=-1,00 global non projetés absolues MEMO.

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

4. Présentation des diagrammes des charges :

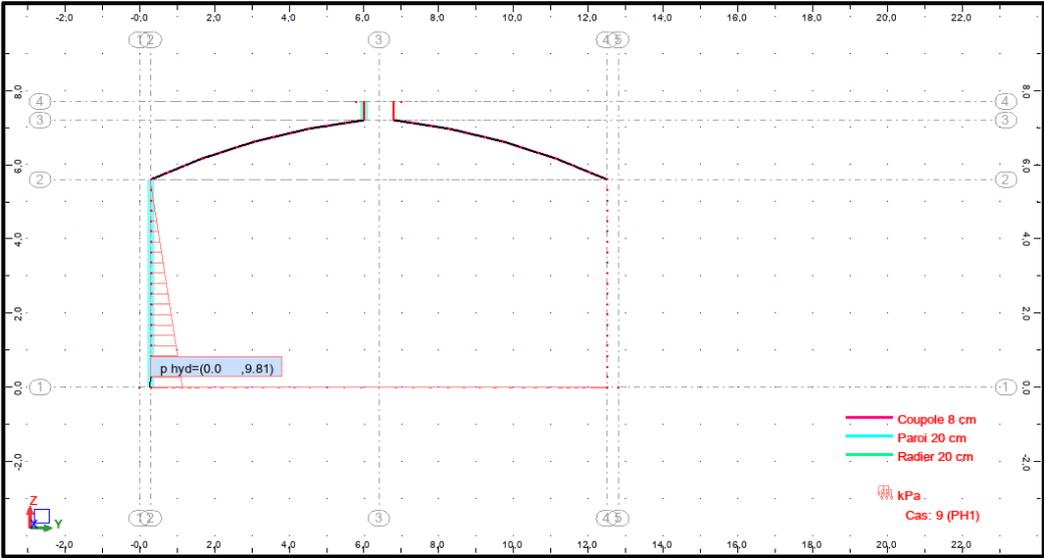


Figure. 4.4. Répartition de la charge hydrostatique sur la paroi.

5. Poids de l'eau sur le radier :

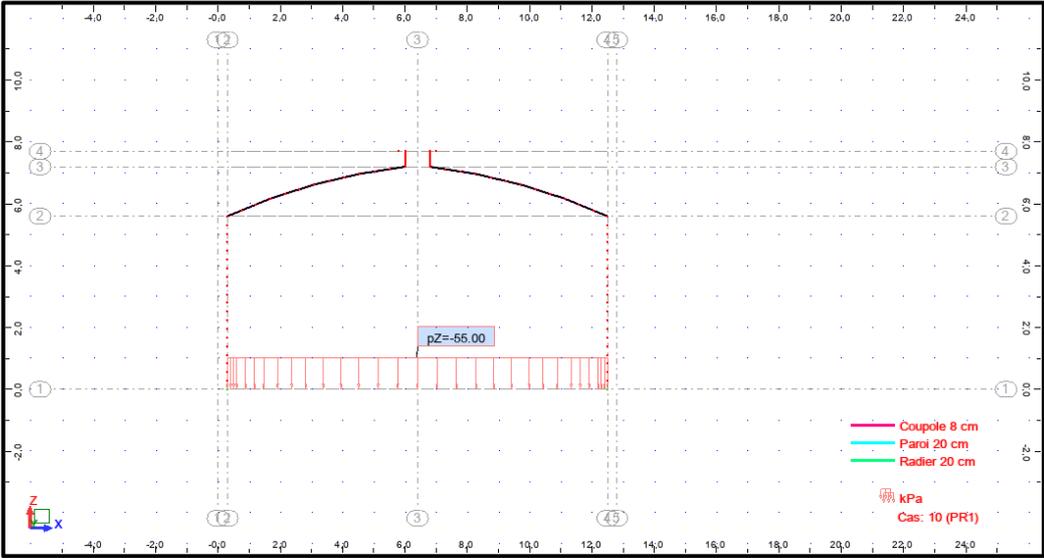


Figure. 4.5. Poids de l'eau sur le radier.

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

6. Charge d'exploitation sur coupole :

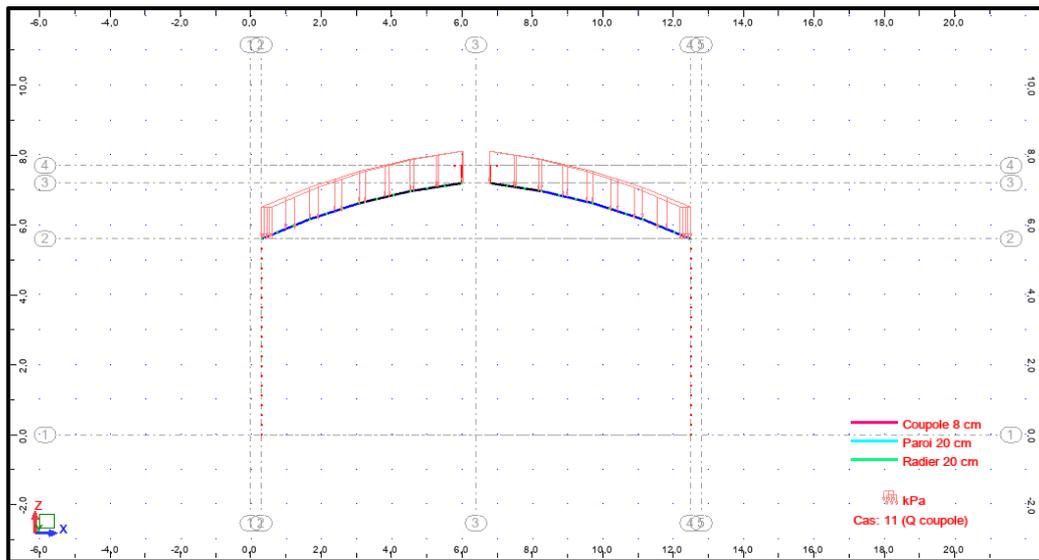


Figure. 4.6. Charge d'exploitation sur coupole.

7. Combinaisons de charges :

Tableau. 4.2. Tableau de Combinaisons de charges.

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Type de la combinaison	Nature du cas	Définition
5 (C)	ELS	Combinaison linéaire	EFF	Permanente	$(1+2+3+4) \times 1,00$
6 (C)	ELU	Combinaison linéaire	EFF	Permanente	$1 \times 1,35 + (2+3+4) \times 1,50$

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

8. Maillage :

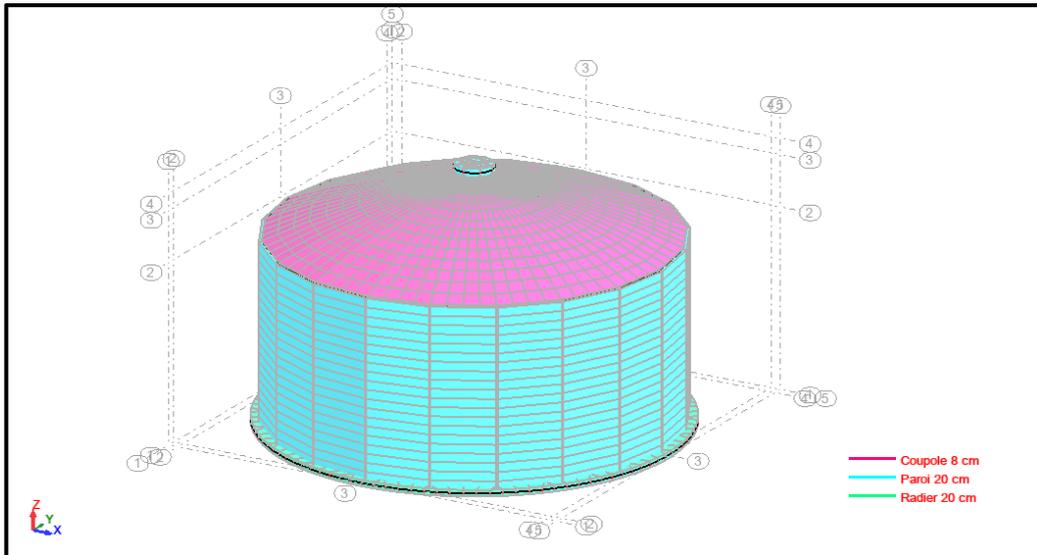


Figure. 4.7. Maillage de la structure.

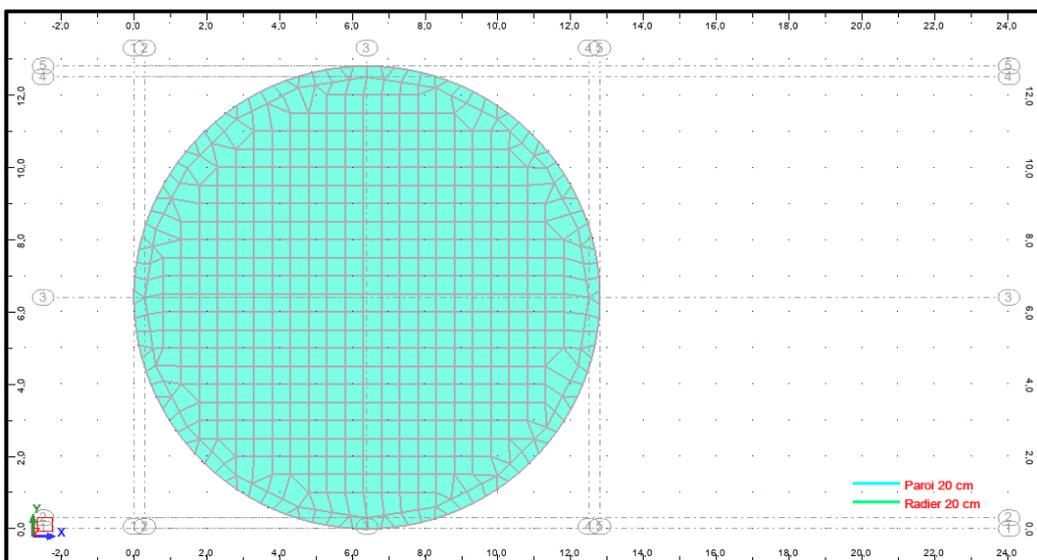


Figure. 4.8. Maillage dans le radier.

9. Résultats :

9.1. Traction dans la paroi :

9.1.1. ELU (États Limites Ultimes) :

Cette valeur représente la traction maximale que la paroi du réservoir peut supporter sans rupture.

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

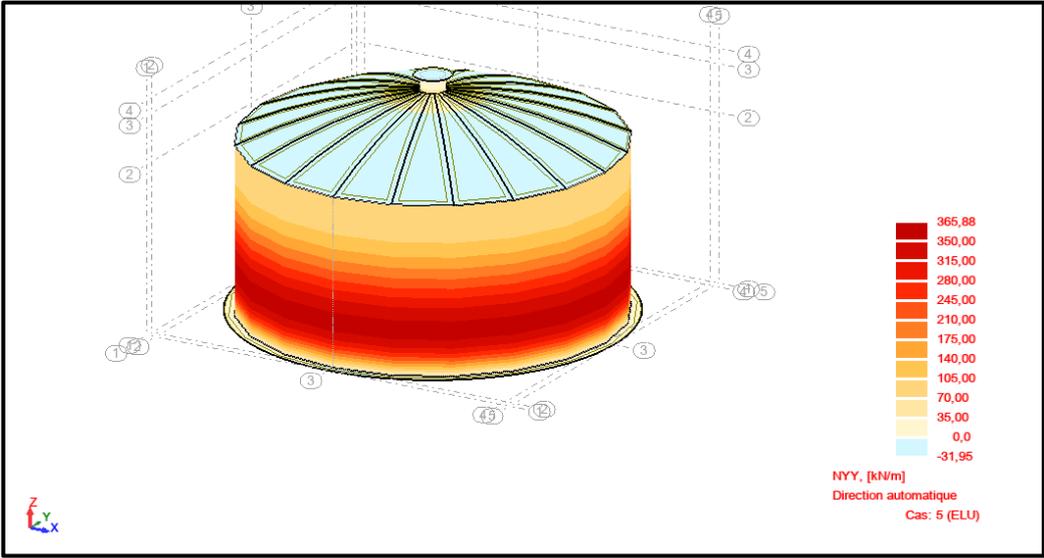
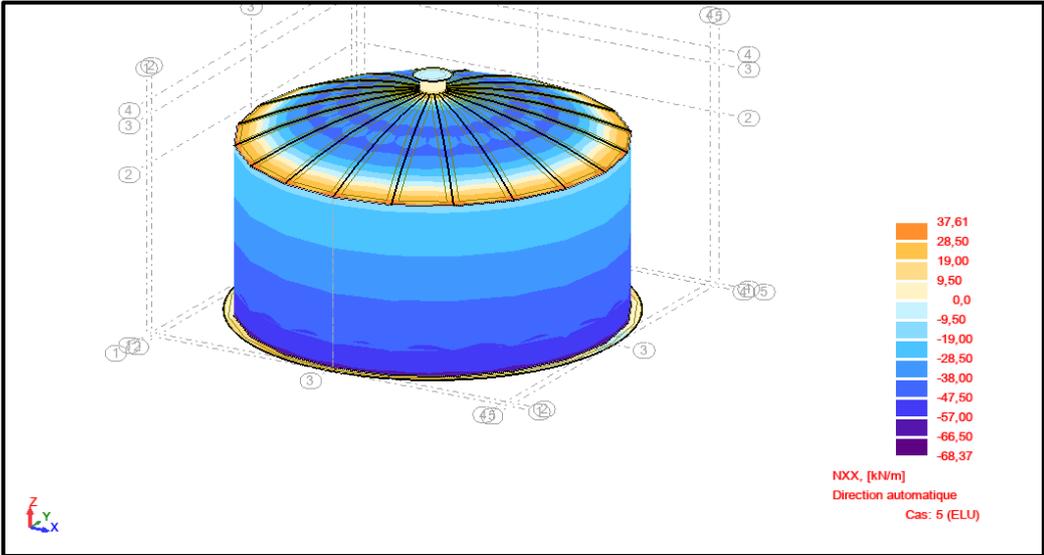


Figure. 4.9. ELU (États Limites Ultimes).

Chapitre 4 : Calcul automatique d'un réservoir

9.1.2. ELS :

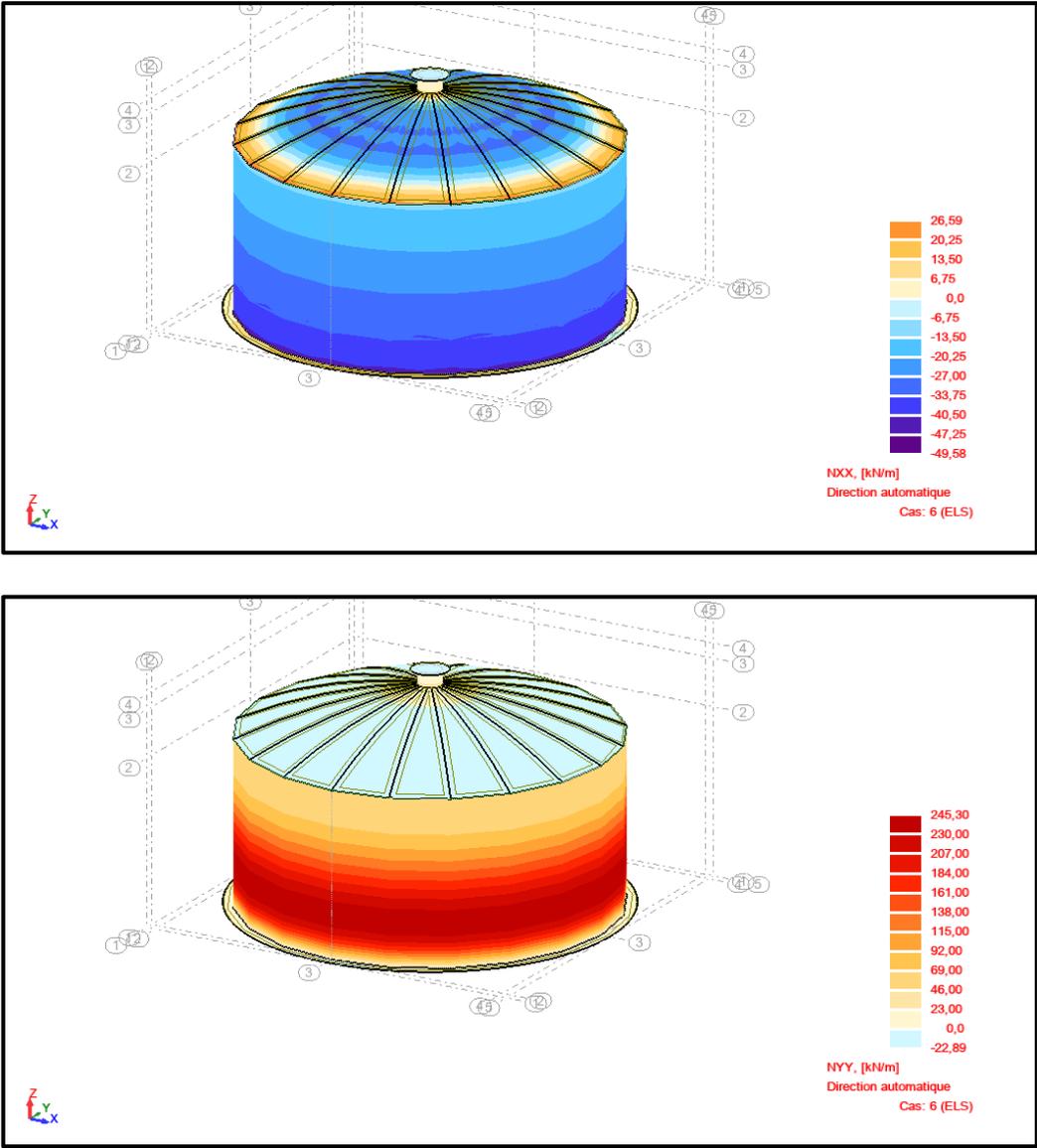


Figure. 4.10. ELS.

9.1.3. Moments sur x-x :

Cette donnée indique le moment de flexion maximal agissant sur la paroi du réservoir dans la direction Xx. Ce moment est crucial pour évaluer les contraintes de flexion et les besoins en armature dans cette direction.

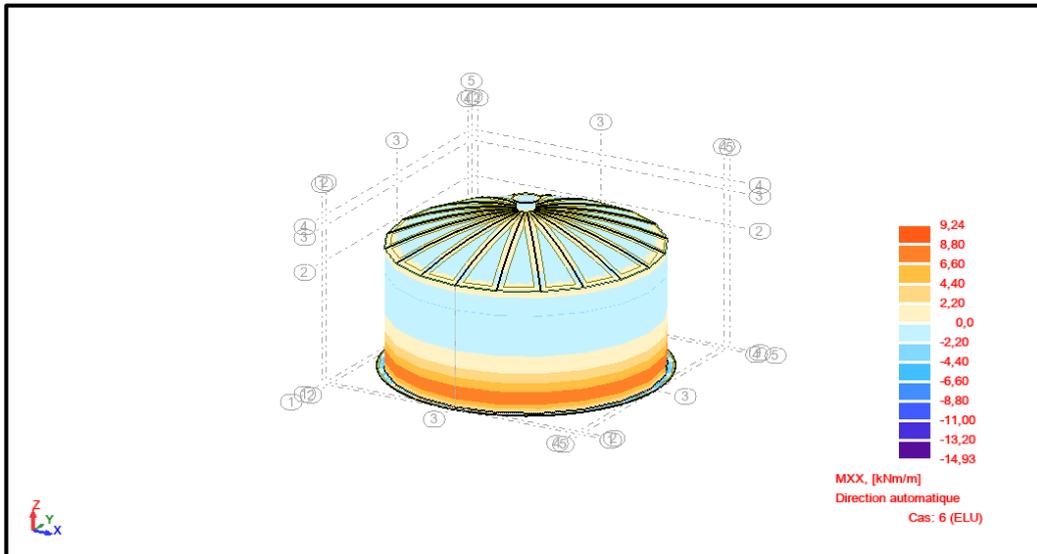


Figure. 4.11. Moments sur x-x.

9.1.4. Moments sur y-y :

Similaire au précédent, cette valeur représente le moment de flexion maximal dans la direction yy. Elle est également essentielle pour le dimensionnement de l'armature et pour s'assurer que la paroi peut résister aux forces de flexion dans cette direction.

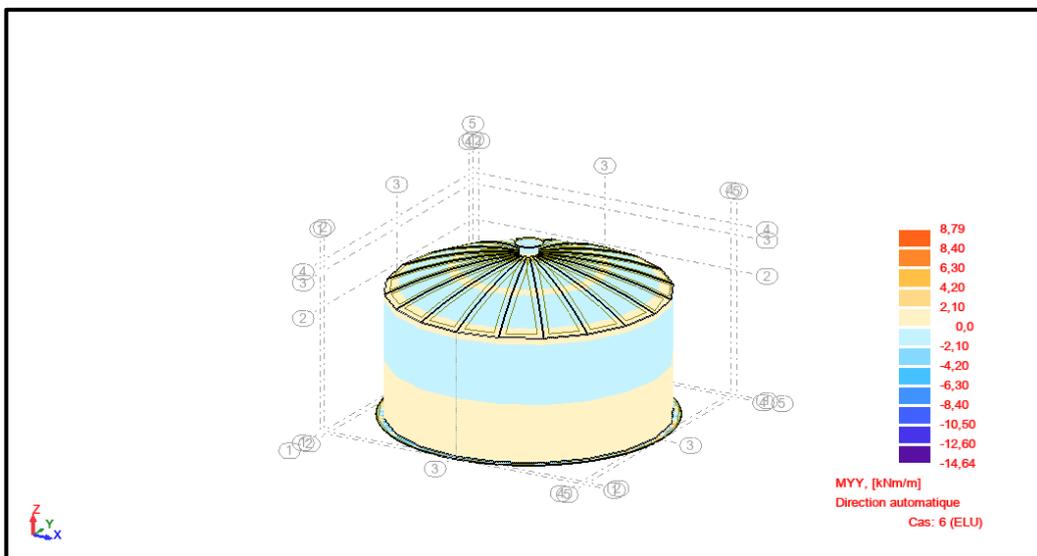


Figure. 4.12. Moments sur y-y.

10. Déplacements :

Le déplacement fait référence aux mouvements de la paroi du réservoir sous les charges appliquées. Il peut inclure des déplacements horizontaux et verticaux. Les déplacements doivent être contrôlés pour éviter des déformations excessives qui pourraient compromettre l'intégrité structurelle et fonctionnelle du réservoir.

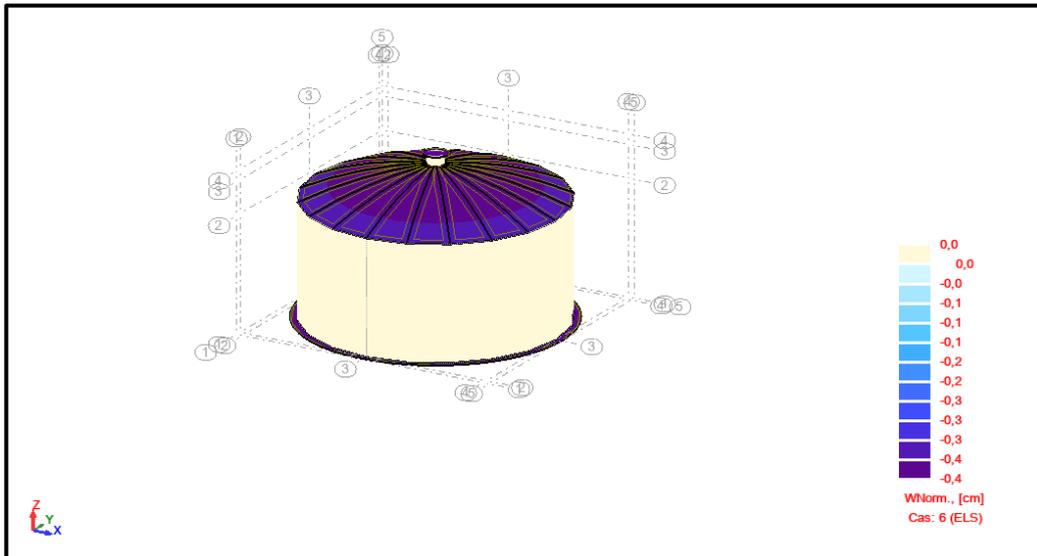
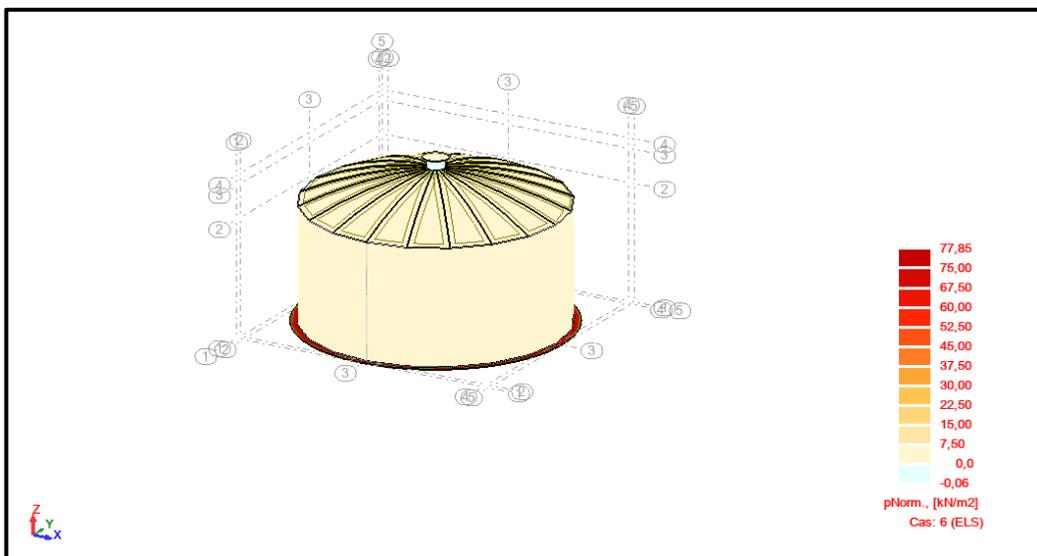


Figure. 4.13. Déplacements.

11. Réaction du sol :

La réaction du sol correspond aux forces que le sol exerce sur la base du réservoir. Cela inclut les pressions de contact sous la fondation, qui doivent être dans des limites acceptables pour éviter le tassement différentiel ou la rupture du sol de fondation.



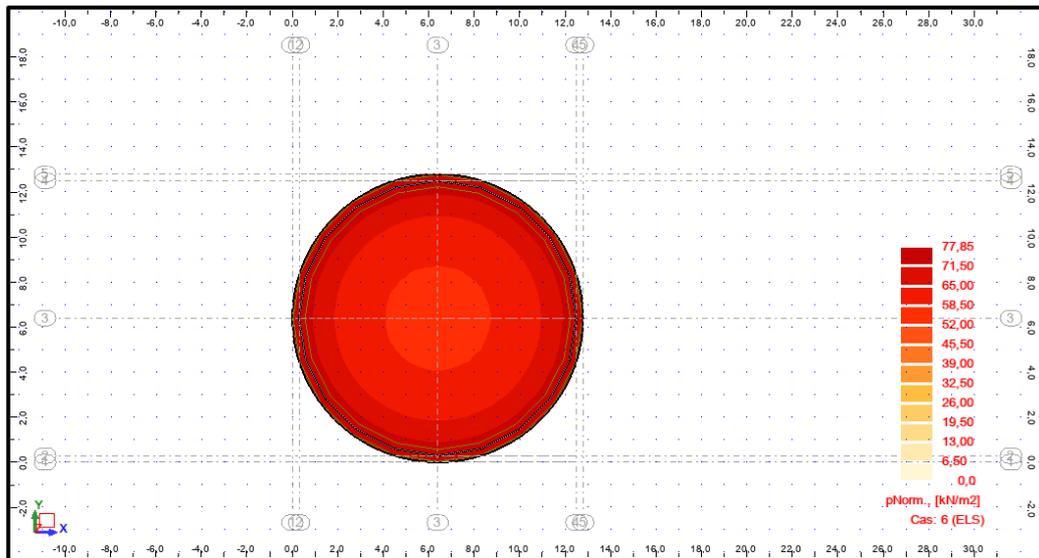


Figure. 4.14. Réaction du sol.

12. La comparaison entre les méthodes manuelle et automatique :

La comparaison entre les méthodes manuelles et automatiques pour calculer le moment maximum dans un réservoir circulaire montre une grande différence :

- Moment max automatique (logiciel Robot 2023) : 14.78 kn.m.
- Moment max manuel : 329 kn.m.

Cette différence importante s'explique par la manière dont les calculs sont effectués :

- **Méthode manuelle** : Utilise des simplifications et des hypothèses qui ne prennent pas en compte toutes les interactions complexes dans la structure et avec le sol.
- **Logiciel Robot 2023** : Modélise toute la structure en même temps, incluant l'interaction avec le sol, ce qui donne un résultat plus proche de la réalité.

En résumé, le logiciel prend en compte des facteurs plus complexes et réalistes, ce qui explique pourquoi la valeur obtenue est beaucoup plus faible que celle calculée manuellement.

Chapitre 5

**Modélisation Graphique des
Résultats de Conception et
Dimensionnement
Quantitatif**

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

1. Introduction :

Ce chapitre se consacre à la présentation et à l'analyse des résultats de conception des réservoirs semi-enterrés à cuves circulaires en béton armé. L'objectif est de traduire les données quantitatives obtenues lors des calculs manuels et automatiques en représentations graphiques claires et compréhensibles. Cette approche permet non seulement de visualiser les tendances et les relations entre les différents paramètres de dimensionnement, mais aussi de faciliter l'interprétation et l'utilisation pratique des résultats pour les ingénieurs et les concepteurs

Le dimensionnement quantitatif est une étape cruciale dans le processus de conception qui permet de déterminer les spécifications et les dimensions exactes des composants d'un projet. Cette étape utilise des calculs et des analyses pour définir les mesures précises. La modélisation graphique de ces résultats à l'aide d'Excel est une méthode efficace pour visualiser les données obtenues. En représentant graphiquement les résultats de la conception, on peut mieux comprendre les relations entre les différentes variables et optimiser le design final.

2. Modalisation Graphique et Reformulation des Résultats :

La modalisation graphique consiste à représenter les résultats de conception et de dimensionnement du réservoir circulaire sous forme de graphiques.

Reformuler les résultats en forme graphique permet de rendre les données plus accessibles et compréhensibles, ce qui peut faciliter la communication avec d'autres parties prenantes et aider à prendre des décisions éclairées. Pour représenter graphiquement les résultats de la modélisation, vous pourriez utiliser diverses formes graphiques selon les données et les paramètres que vous

Souhaitez visualiser. Voici quelques exemples de formes graphiques adaptées à différents types de données :

2.1. Diagrammes en barres : [11]

Utiles pour comparer des valeurs numériques entre différentes catégories. Par exemple, vous pourriez utiliser des diagrammes en barres pour comparer l'épaisseur des parois des réservoirs pour différentes profondeurs ou charges hydrostatiques. Graphiques linéaires : Idéaux pour représenter des tendances et des relations entre deux variables continues. Vous pourriez utiliser des graphiques linéaires pour montrer comment l'épaisseur des parois varie en fonction du diamètre de la cuve, par exemple.

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

2.2. Graphiques circulaires (camemberts) :

Utiles pour représenter la répartition des différentes composantes d'une variable par rapport au tout. Par exemple, vous pourriez utiliser des graphiques circulaires pour montrer la répartition des contraintes à travers la circonférence d'un réservoir.

2.3. Graphiques en nuages de points :

Utiles pour visualiser la relation entre deux variables continues. Vous pourriez utiliser des graphiques en nuages de points pour montrer la relation entre la charge hydrostatique et l'épaisseur des parois, par exemple.

2.4. Graphiques à bulles :

Similaires aux graphiques en nuages de points, mais avec des bulles de différentes tailles pour représenter une troisième variable. Par exemple, vous pourriez utiliser des graphiques à bulles pour représenter la relation entre la profondeur du réservoir, la charge hydrostatique et l'épaisseur des parois.

2.5. Graphiques en boîte (boxplots) :

Utiles pour représenter la distribution des valeurs d'une variable numérique. Vous pourriez utiliser des graphiques en boîte pour montrer la distribution des contraintes à travers différentes sections de la structure du réservoir.

2.6. Cartes de chaleur :

Idéales pour visualiser la distribution spatiale des valeurs d'une variable. Vous pourriez utiliser des cartes de chaleur pour représenter la répartition des contraintes à travers la surface du réservoir.

Ces formes graphiques peuvent être utilisées individuellement ou combinées pour créer des visualisations plus complexes et informatives des résultats de la modélisation de vos réservoirs en béton armé.

3. Etape à suivre :

L'objectif de ce chapitre est de modéliser graphiquement les résultats obtenus à partir des calculs automatisés réalisés sur Excel. Nous voulons obtenir des résultats concernant les calculs et

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

la détermination des paramètres de conception, de dimensionnement et de quantitatif pour différentes formes de réservoirs allant de 50 à 500 m Pour modéliser graphiquement les résultats de conception, de dimensionnement et de quantitatif des réservoirs, nous devons suivre plusieurs étapes. D'abord, il est nécessaire de définir les paramètres clés des réservoirs, puis de structurer les résultats obtenus à partir des calculs automatisés dans Excel. Ensuite, nous pouvons créer des graphiques pour visualiser ces résultats. Les résultats fournis par le programme de calcul développé sur Excel sont les suivants :

Ce tableau (**tableau. 5.1**) présente les paramètres clés de conception des réservoirs, notamment le volume, la hauteur, le diamètre, l'épaisseur de la paroi, ... etc. Pour différentes capacités allant de 50 à 500 m³ :

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

Tableau. 5.1. Paramètres de Conception des Réservoirs.

Capacité standard du réservoir (m ³)	Rayon de la coupole Rc (m)	Surface de la coupole (m ²)	Section de ferrailage ceinture (cm ²)	Traction max dans la paroi (KN)	Moment max paroi (KN.m)	Moment max radier (KN.m)	Quantité de béton de la coupole (m ³)	Quantité de béton de la ceinture (m ³)	Quantité de béton de la cuve (m ³)	Quantité totale béton (m ³)
50	4,81	21,16	0,78	2713,44	281,79	3864,61	1,69	2,83	16,96	21,48
100	8,06	40,47	1,88	6537,36	505,78	7467,17	3,24	4,62	30,77	38,63
150	8,50	53,38	2,55	8873,28	693,64	11070,86	5,34	5,28	40,19	50,81
200	9,75	67,38	3,70	12882,30	832,37	14722,16	8,09	6,78	47,48	62,35
250	9,04	68,11	3,39	11791,16	1040,46	17842,66	8,17	6,78	56,52	71,48
300	10,27	83,81	4,76	16552,74	1098,27	21456,68	11,73	9,89	60,29	81,91
500	14,83	139,73	9,07	31572,41	1784,68	35522,65	19,56	12,86	97,97	130,39
1000	19,67	210,03	14,94	51978,88	3468,21	68047,16	29,40	20,07	180,86	230,36
2000	31,25	392,50	36,26	126183,00	5897,40	134336,84	62,80	33,52	304,64	400,60
5000	52,45	823,47	105,19	366068,52	11560,69	328998,62	164,69	80,38	582,78	827,82

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

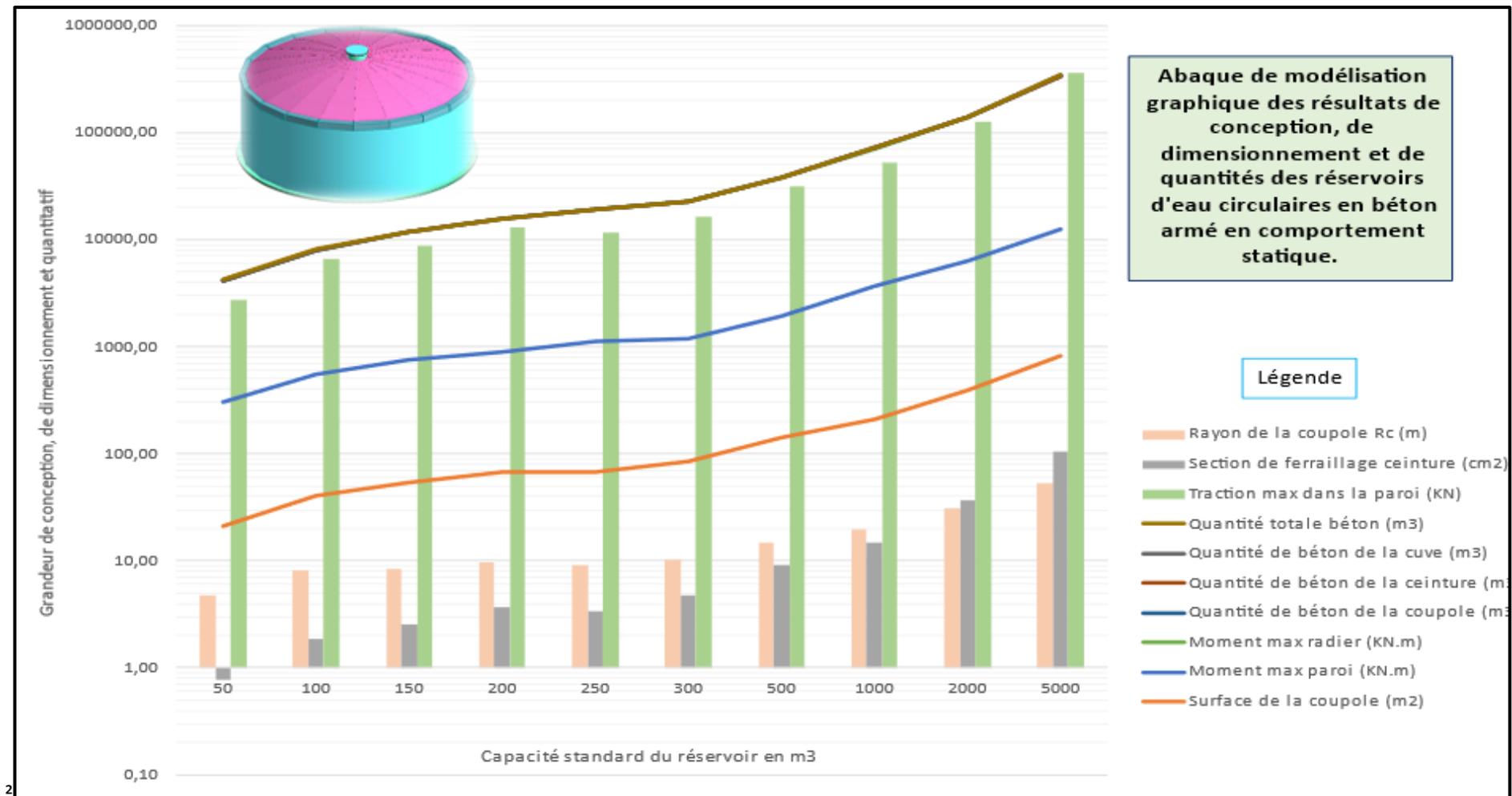


Figure. 5.1. Abaque de modélisation graphique des résultats de conception de dimensionnement et de quantités des réservoir d'eau circulaires en béton armé en comportement statique .

Chapitre 5 : Modélisation Graphique des Résultats de Conception et Dimensionnement Quantitatif

4. Interprétation des résultats graphiques :

Grâce à cette représentation graphique (**figure. 5.1**) des résultats, nous avons obtenu cet abaque. Cet abaque permet de concevoir des paramètres de dimensionnement tels que l'épaisseur, le moment et le ferrailage de ceinture les rayons de courbure des coupes pour différentes formes de volume, il fournit les paramètres quantitatifs nécessaires, pour chaque paramètre de conception, facilitant ainsi le processus de dimensionnement.

En d'autres termes, l'abaque sert de guide pour déterminer les dimensions et les caractéristiques de divers éléments structuraux, en se basant sur les volumes concernés

5. Conclusion :

L'abaque est un outil de référence indispensable qui aide les ingénieurs et les concepteurs à déterminer avec précision les dimensions et les caractéristiques des éléments structuraux en fonction du volume spécifique de chaque élément. Cela permet une conception efficace et précise des structures.

En clair, l'abaque est essentiel dans le processus de conception structurelle, car il permet de traduire les résultats graphiques en paramètres concrets et utilisables pour dimensionner et renforcer différentes parties d'une structure.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce mémoire souligne l'importance cruciale de développer des abaques de dimensionnement pour les réservoirs en béton armé, en particulier ceux semi-enterrés avec des cuves circulaires, en tenant compte des actions statiques. L'utilisation combinée de calculs manuels et automatiques, avec l'intégration de robots, constitue une approche complète pour déterminer les dimensions adéquates de ces réservoirs, couvrant une variété de volumes.

Cette étude démontre que l'automatisation des calculs peut accélérer le processus de conception tout en améliorant sa précision, tandis que les calculs manuels permettent une compréhension approfondie des principes de conception. L'intégration de ces deux approches offre une flexibilité et une fiabilité accrues dans le dimensionnement des réservoirs en béton armé.

De plus, ce travail met en évidence l'importance de prendre en considération les actions statiques pour garantir la sécurité et la durabilité des réservoirs, en tenant compte des différentes charges auxquelles ils peuvent être soumis.

L'élaboration d'abaques de dimensionnement pour les réservoirs semi-enterrés à cuves circulaires représente une avancée significative dans le domaine de l'ingénierie des structures en béton armé, offrant des solutions robustes et efficaces pour répondre aux exigences de conception dans divers contextes et garantir la fiabilité des réservoirs face aux actions statiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

Références bibliographiques :

- [1] <http://elearning.centre-univ-mila.dz/>. [en ligne], consulté en juin 2022.
- [2] Ouvrages spéciaux", coupole en béton armé , Mémoire master en structure, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi , 2017/2018.
- [3] Lveur, A. Guerrin et R.C, "Traité de béton armé (Tome 06) ; Réservoirs, châteaux d'eau, piscines", Paris, Dunod, 1968.
- [4] Halima, Benloumafek. "Projet de fin d'études : Château d'eau V = 400 m³ surélève de 20 m".
- [5] Cours de l'université de mila . [En ligne], consultés en juin 2022
- [6] André Guerrin, Traité de béton armé. Tome VIII, Ouvrages enterrés", Paris, Dunod, 1970.
- [7] Stockage de l'eau ; ouvrages en béton, Bruno Ducrot, Bernard Fargeot, et Gérard Mathieu, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C 3 671 – 1, © Techniques de l'Ingénieur, toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
- [8] Règles BAEL 91 modifiées 99, "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites", Eyrolles - Collection Blanche BTP , 2000 (3eme édition).
- [9] M. Belazougui. "Calcul des ouvrages en béton armé" OPU, 1991.
- [10] "Documentation d'Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2023", 23 juin 2024.
- [11] " Portail des connaissances statistiques ", https://www.jmp.com/fr_fr/statistics-knowledge-portal.html , 2024 JMP Statistical Discovery LLC. Tous droits réservés.