

Chapitre 4. Les Réservoirs et Château d'eau

- 4.1. Définition
- 4.2. Différences entre réservoir et château d'eau
- 4.3. Différents types de réservoirs
- 4.4. Classification de l'étanchéité
- 4.5. Étapes de calcul d'un réservoir
- 4.6. Méthodes de calcul structurel
- 4.7. Détermination de la capacité d'un réservoir
- 4.8. Méthode analytique de calcul des réservoirs

Chapitre 4

Réservoirs et Château d'eau

4.1. Définition

Un réservoir est une enveloppe contenant un liquide ; ce liquide est généralement de l'eau, soit potable (réservoir d'eau des distributions publiques), soit usée (eau d'égouts).

Ces réservoirs peuvent être soit posés sur le sol, soit légèrement enterrés, soit sur des pylônes de grandes hauteurs (châteaux d'eau)

Le réservoir est un ouvrage hydraulique de stockage d'eau, soit à la consommation publique ou à usage industriel (Cousin, 2016).

4.2. Différences entre réservoir et château d'eau

La différence principale est la topographie du terrain : on construit un château d'eau (réservoir surélevé) si le terrain n'est pas suffisamment en hauteur, tandis qu'on préfère un réservoir au sol si un point haut est disponible.

Le tableau suivant (Tab.4.1) donne les différences entre un réservoir et un château d'eau.

Tableau.4.1: les différences entre un réservoir et un château d'eau.

Caractéristique	Château d'eau	Réservoir
Position	Surélevé, sur un point haut du territoire ou construit sur une structure.	Peut-être semi-enterré ou au sol, en fonction de la topographie.
Principe de fonctionnement	Utilise la gravité pour distribuer l'eau. Les pompes servent uniquement à remplir le réservoir.	S'il est surélevé, il fonctionne comme un château d'eau. S'il est au sol, il nécessite des pompes pour la distribution.

4.3. Différents types de réservoirs

Les réservoirs, peuvent être de différents types.

4.3.1. Selon la forme de la cuve

On peut les classifier tout d'abord selon **la forme de la cuve**. On distingue :

- Les réservoirs circulaires
- Les réservoirs rectangulaires
- Les réservoirs de forme quelconque

D'une façon générale, la forme circulaire conduit à des dimensionnement plus économiques. Mais la forme rectangulaire est généralement plus facile à réaliser du fait qu'il n'est pas nécessaire de disposer de coffrages courbes. Les réservoirs rectangulaires de petite capacité, jusqu'à une centaine de m³ peuvent être réalisés en maçonnerie armée (blocs béton à bancher).

4.3.2. Selon leur disposition par rapport au sol

On peut aussi les classifier selon leur **disposition par rapport au sol**. On distingue:

- Les réservoirs enterrés
- Les réservoirs semi-enterrés
- Les réservoirs posés au sol
- Les réservoirs surélevés : les châteaux d'eau

4.3.3. Selon la couverture

Enfin on distingue :

- Les ouvrages couverts : les réservoirs
- Les ouvrages qui ne comportent pas de couverture : les bassins (figure 1.2).



Figure 4.1 : Un bassin de stockage d'eau d'irrigation au Niger (Cousin, 2016).

4.4. Classification de l'étanchéité

4.4.1 Classification selon le fascicule 74

Pour le fascicule 74 du Cahier de Clauses Techniques Générales français (CCTG) les réservoirs sont classés en quatre catégories selon le principe de réalisation de leur étanchéité :

- Classe A : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule
- Classe B : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure complétée par un revêtement d'imperméabilisation.
- Classe C : Ouvrages dont l'étanchéité est assurée par un revêtement d'étanchéité, adhérent ou indépendant du support, la structure assurant uniquement une fonction mécanique.
- Classe D : Ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués.

4.4.2 Classification selon l'Eurocode 2

L'Eurocode 2 (NF EN 1992-3), définit quatre classes d'étanchéité :

- Classe 0 : Un certain débit de fuite admissible, ou fuite de liquide sans conséquence
- Classe 1 : Fuites limitées à une faible quantité, quelques taches ou plaques d'humidité en surface admises
- Classe 2 : Fuites minimales. Aspect non altéré par des taches
- Classe 3 : Aucune fuite admise

A ces catégories correspondent des exigences en terme de fissuration.

4.5. Étapes de calcul d'un réservoir

Le calcul d'un réservoir ou d'un château d'eau implique deux étapes principales : la détermination du **volume de stockage nécessaire (dimensionnement fonctionnel)**, puis le **calcul structurel** pour assurer sa stabilité et sa résistance.

4.5.1. Calcul du volume de stockage nécessaire

Le volume (capacité) d'un réservoir doit être suffisant pour répondre à la demande en eau, en tenant compte des variations journalières, des interruptions de service et des besoins d'urgence (comme la lutte contre les incendies).

La formule générale de dimensionnement se base sur la consommation et le temps de stockage requis :

Volume nécessaire = Consommation journalière totale × Nombre de jours de réserve

Pour un système d'approvisionnement en eau potable, les étapes sont les suivantes :

- a) **Estimer la population desservie** : Déterminer le nombre d'habitants ou d'utilisateurs.
- b) **Estimer la consommation moyenne par habitant** : La consommation varie selon les régions (une moyenne de 120 à 135 litres par personne et par jour est souvent utilisée, mais ce chiffre doit être adapté localement).
- c) **Calculer la consommation journalière totale** :
Consommation totale (L/jour) = Population × Consommation par habitant (L/jour)
- d) **Définir le temps de réserve** : Généralement, les réservoirs sont conçus pour stocker l'équivalent de 1 à 3 jours de consommation pour assurer la sécurité de l'approvisionnement.
- e) **Calculer le volume final** : Multiplier la consommation journalière totale par le nombre de jours de réserve. Convertir le résultat en mètres cubes (1 m³ = 1000 litres).

4.5.2. Calcul des dimensions physiques (Volume géométrique)

Une fois le volume nécessaire déterminé, on calcule les dimensions physiques (hauteur, longueur, largeur ou rayon) en fonction de la forme choisie (cylindrique ou rectangulaire).

- **Pour un réservoir rectangulaire (ou prismatique) :**
Volume (m³) = Longueur (m) × Largeur (m) × Hauteur (m)
- **Pour un réservoir cylindrique :**
Volume (m) = $\pi \times \text{Rayon (m)}^2 \times \text{Hauteur (m)}$

4.5.3. Calcul structurel (Dimensionnement technique)

Le calcul structurel est une étape d'ingénierie complexe qui garantit que le réservoir (et la structure porteuse pour un château d'eau) résistera aux différentes contraintes :

- **Poids de l'eau :** La charge principale exercée sur les parois et le fond.
- **Pression hydrostatique :** La pression de l'eau augmente avec la profondeur, ce qui génère des efforts considérables sur les parois latérales.
- **Contraintes du matériau :** Résistance du béton armé, de l'acier ou autre matériau utilisé.
- **Charges externes :**
 - **Vent :** Crucial pour les châteaux d'eau élevés.
 - **Séismes :** Essentiel dans les zones à risque sismique (analyse hydrodynamique de l'eau pendant un séisme).
 - **Température :** Dilatation et contraction des matériaux.

Cette partie du calcul nécessite l'intervention de bureaux d'études spécialisés et l'utilisation de logiciels de modélisation structurelle pour concevoir les plans de ferrailage (béton armé) ou d'assemblage (acier) appropriés, en respectant les normes de construction en vigueur.

4.6. Méthodes de calcul structurel

Le calcul structurel d'un réservoir s'appuie principalement sur deux grandes méthodes d'analyse, souvent combinées, pour assurer sa résistance et son étanchéité conformément aux normes en vigueur comme l'**Eurocode 2 Partie 3** (pour les silos et réservoirs en béton) et la **Partie 4** (pour les fixations dans le béton), ou l'**Eurocode 3** pour l'acier.

4.6.1. Méthodes analytiques (ou manuelles)

Ces méthodes sont basées sur des formules mathématiques dérivées de la théorie de l'élasticité et de la mécanique des structures. Elles sont principalement utilisées pour des géométries simples et des conditions de chargement standards.

a) Pour les réservoirs circulaires (cylindriques) :

- Le calcul se concentre sur les efforts de **traction circumférentielle** (effort d'anneau) dans les parois, dus à la pression hydrostatique du liquide.
- La pression à une profondeur z est $P(z) = \gamma \times z$, où γ est le poids volumique du liquide.

- L'effort de traction T dans l'anneau est donné par $T = P \times R$ (pression x rayon).
- Le dimensionnement se fait ensuite pour résister à cet effort en traction, en contrôlant la fissuration pour garantir l'étanchéité.

b) Pour les réservoirs rectangulaires :

- Les parois sont traitées comme des **plaques ou des voiles fléchis** encastrés (ou articulés) aux angles et au radier (fondation).
- Le calcul implique des méthodes de plaques (par exemple, la théorie de la plaque mince) ou l'utilisation d'abaques pour déterminer les moments de flexion et les efforts tranchants dans les parois.

4.6.2. Méthode des éléments finis (MEF ou FEM)

C'est la méthode la plus courante et la plus précise pour les projets d'ingénierie modernes, en particulier pour les structures complexes, les réservoirs de grande taille, ou ceux situés en zones sismiques.

- **Principe :** La structure est décomposée en un grand nombre de petits éléments (le "maillage") connectés par des nœuds. Des logiciels spécialisés (comme Robot Structural Analysis ou ANSYS) appliquent les charges sur ces éléments et résolvent numériquement les équations complexes pour déterminer les contraintes, les déformations et les efforts internes dans chaque partie de la structure.
- **Avantages :**
 - Permet de modéliser avec précision des géométries complexes, des ouvertures, des changements d'épaisseur, etc.
 - Prend en compte le **couplage fluide-structure**, essentiel pour l'analyse dynamique (actions sismiques).
 - Fournit une distribution détaillée et réaliste des contraintes, permettant un dimensionnement optimal et sûr.

4.6.3. Synthèse

Le choix de la méthode dépend de la complexité du projet et des exigences de précision.

Le tableau suivant (Tab.4.2) définit l'utilité des méthodes pour chaque type de réservoirs.

Tableau.4.2 : l'utilité des méthodes pour chaque type de réservoirs.

Méthode	Réservoirs circulaires	Réservoirs rectangulaires	Réservoirs complexes/sismiques
Analytique	Simple et efficace	Simple à modérée (abaques)	Inadaptée
Éléments Finis	Très précise, plus longue	Très précise, standard	Indispensable

Dans la pratique, les ingénieurs utilisent souvent une approche analytique préliminaire pour le prédimensionnement, puis affinent le calcul final avec un logiciel d'éléments finis pour garantir la conformité aux normes (Eurocodes) et optimiser le ferrailage ou l'épaisseur de l'acier.

4.7. Détermination de la capacité d'un réservoir

4.7.1. Formule de calcul de volume de stockage d'un réservoir

Le volume de stockage d'un réservoir peut être calculé par la formule suivante :

$$V_{max} = P_{amx}(\%). \frac{Q_{maxj}}{100}$$

P_{max} : Contenu de l'eau restant dans le réservoir calculé pour chaque heure (%)

Q_{maxj} : Consommation maximale journalière (m³/j)

V_{max} : Volume max de stockage

Avec:

$$Q_{maxj} = K_{maxj} \cdot Q_{moyj}$$

K_{maxj} : Coefficient d'irrégularité journalière max (dépend de la variation de la consommation dans le temps, les fuites, le gaspillage...).

$$1,1 < K_{maxj} < 1,3$$

Q_{moyj} : Consommation moyenne journalière (m³/j)

$$Q_{moyj} = \frac{\sum q \cdot N_i}{1000}$$

q : la quantité d'eau journalière pour les différents besoins (domestique, écoles, sanitaire, administration, socio-culturelle...)

N_i : Nombre d'habitation à l'horizon donné.

Le tableau suivant (Tab.4.3) donne les Besoins et les Dotations (l/jour/habitant).

Tableau.4.3: les Besoins et les Dotations (l/jour/habitant).

Besoins	Dotation (l/jour/habitant)
Domestique	150 à 200
Ecoles	10 à 20
Sanitaires	5 à 10
Administration	10

Pour calculer P_{max} , il faut calculer le volume cumulé d'alimentation (d'entrée) et le volume de consommation pour chaque heure.

$$P_{amx} = \max(|\Delta V^+| - |\Delta V^-|)$$

heure	Volume d'alimentation	Volume consommé	ΔV
1			
2			
3			
.			

4.7.2. Exemple de calcul

On suppose que :

Besoins	Dotation (l/jour/habitant)	Nombre de consommateur
Domestique	150	2000
Ecoles	20	300
Sanitaires	10	50

$$Q_{moyj} = \frac{(2000 \times 150) + (300 \times 20) + (50 \times 10)}{1000} = 306,5 \text{ m}^3/j$$

Si $K_{maxj} = 1,3$; Donc :

$$Q_{maxj} = K_{maxj} \cdot Q_{moyj} = 1,3 \times 306,5 = 398,45 \text{ m}^3/j$$

Si on prend par exemple $P_{max} = 20\%$

$$V_{max} = 20 \cdot \frac{398,45}{100} = 80 \text{ m}^3$$

4.8. Méthode analytique de calcul des réservoirs

4.8.1. Réservoir circulaire posé sur le sol

La pression due à l'eau à la base de réservoir peut être calculée par :

$$P = \gamma_w \cdot h$$

On a le calcul classique qui consiste à diviser la paroi en tranches de 1 m de hauteur à partir de bas. Chaque tranche est soumise à une charge trapézoïdale calculée par :

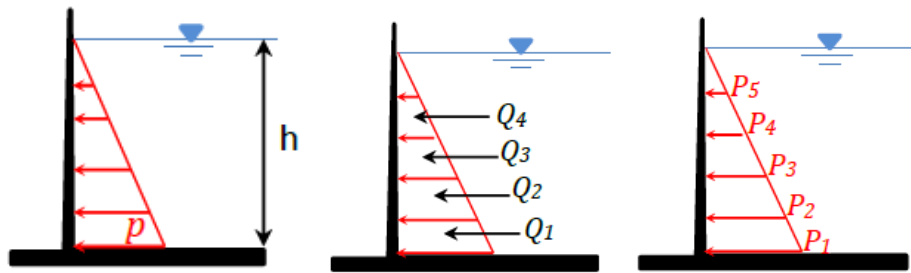


Figure 4.2 : calcul classique par tranches

$$Q_1 = \frac{P_1 + P_2}{2} ; Q_2 = \frac{P_2 + P_3}{2} ; Q_3 = \frac{P_3 + P_4}{2}$$

Donc chaque bande sera tendue avec un effort tangentiel de :

$$T = Q \cdot \frac{D}{2}$$

D : diamètre de réservoir

La section d'acier est :

$$A = \frac{T}{\sigma_{st}}$$

σ_{st} : Contrainte de traction de l'acier.

Pour calculer l'épaisseur de la paroi e, il faut que :

$$\sigma_{st} \geq \frac{T}{100e + nA} ; \text{avec } n = 15$$

Cette méthode néglige l'influence du radier et de la couverture qui empêchent la déformation des parois sous l'influence des efforts tangents.

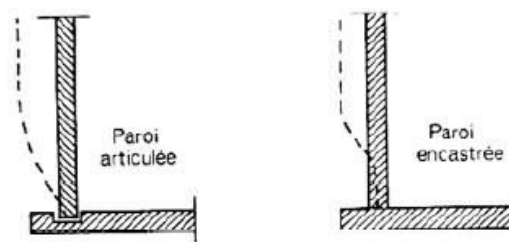


Figure 4.3 : l'influence du radier

4.8.2. L'influence du Radier et de la Couverture

Le cœur du problème de calcul d'un réservoir circulaire est l'interaction complexe entre deux comportements structurels :

1. **Le comportement "type anneau" :** Si la paroi était infiniment haute et libre de toute contrainte aux extrémités, chaque mètre de hauteur se dilaterait indépendamment sous l'effet de la pression hydrostatique (efforts tangents ou circonférentiels). C'est l'état de "membrane".
2. **L'influence de la "rigidité d'appui" :**
 - a. Le radier (fond) est rigide et empêche la base de la paroi de se dilater librement (déformation nulle à la base).
 - b. De même, si le réservoir a une couverture rigide (dôme ou toit plat en béton armé), le haut de la paroi est également contraint.

4.8.3. Le rôle des méthodes Lossier et Lebelle

Les méthodes Lossier et Lebelle utilisent la théorie de la flexion des coques cylindriques pour modéliser cette interaction. Elles introduisent des moments de flexion et des efforts tranchants à proximité des zones d'appui (radier et couverture).

Ces efforts de flexion ont pour conséquence de :

- **Réduire les efforts tangents (circonférentiels) :** Dans la zone proche du radier, la traction "type anneau" est considérablement réduite, car l'encastrement reprend une partie de la charge via la flexion verticale.
- **Introduire des contraintes verticales :** La paroi est désormais soumise à de la flexion (verticale et horizontale) en plus de la traction.

4.8.4. Méthode de Lossier

a) Principe :

La méthode de **Lossier** est une méthode repose sur les principes fondamentaux de la mécanique des structures appliqués aux coques cylindriques, en les simplifiant grâce à l'utilisation d'abaques (courbes graphiques) et de coefficients forfaitaires.

Lossier a développé des abaques qui fournissent des coefficients multiplicateurs en fonction d'un paramètre adimensionnel " $Z = \beta \cdot H$ ", qui caractérise la rigidité

relative du réservoir (H = hauteur, β = paramètre de rigidité dépendant du rayon R et de l'épaisseur e).

b) Objectifs

Les objectifs principaux de cette méthode sont :

- **Détermination des Sollicitations Internes** : Calculer avec précision l'effort de traction horizontale (T) et les moments fléchissants (verticaux et horizontaux, M_v , M_h) en tout point de la hauteur du réservoir.
- **Garantir l'Étanchéité (ELS)** : La méthode permet de dimensionner le ferrailage de manière à limiter la contrainte dans l'acier (σ_s) à des valeurs faibles (typiquement 120-140 MPa) pour contrôler l'ouverture des fissures et assurer l'imperméabilité de l'ouvrage.
- **Optimisation du Ferrailage** : Elle permet une détermination plus fine des sollicitations, menant souvent à un dimensionnement plus optimisé (moins conservatif) des armatures, en particulier dans la zone de transition paroi/radier.

c) Étapes de Calcul

Étape 1 : Définition des Données du Projet

Recueillez toutes les informations nécessaires :

- **Rayon intérieur du réservoir (R)** (en mètres).
- **Hauteur du liquide (H)** (en mètres).
- **Épaisseur de la paroi (e)** (en mètres, à prédimensionner, souvent $e \approx H/20$ minimum 15 cm).
- **Masse volumique du liquide (ρ)** (1 t/m³ pour l'eau).
- **Résistances des matériaux** : f_{c28} (béton) et f_e (acier).
- **Coefficient d'élasticité relatif** : $n = E_a/E_b$, où E_a et E_b sont les modules d'élasticité de l'acier et du béton (souvent $n \approx 15$).

Étape 2 : Calcul des Paramètres Adimensionnels

- Calculer le paramètre de rigidité λ :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{R^2 \cdot e^2}}$$

Où ν est le coefficient de Poisson du béton ($\nu \approx 0,2$).

- Calculer le paramètre de hauteur relatif Z : $Z = \beta \cdot H$

Étape 3 : Détermination des Sollicitations via les Abaques de Lossier

C'est l'étape clé de la méthode. Pour un Z donné, vous devez utiliser les abaques (courbes) spécifiques à Lossier pour trouver les coefficients qui modifient les efforts théoriques.

Les abaques fournissent généralement des coefficients pour :

- **Effort normal de traction circonférentielle T** (horizontal).
- **Moment fléchissant horizontal M_{horiz} .**
- **Moment fléchissant vertical M_{vert} .**

Ces coefficients sont souvent fonction d'une hauteur relative z/H (0 pour le bas, 1 pour le haut).

Étape 4 : Calcul des Efforts Réels aux Points Critiques

En utilisant les coefficients tirés des abaques, vous calculez les efforts réels. La pression de référence à la base est $P_{base} = \rho \cdot g \cdot H$.

1. Traction Circonférentielle (T) :

- Théorique (type anneau) : $T_{th} = P(z) \cdot R$
- Réelle : $T = \text{Coefficient}_T(z) \cdot T_{th}$. (Cet effort est maximal vers le milieu de la hauteur et s'annule presque à la base à cause de l'effet d'encastrement).

2. Moment Vertical (M_{vert}) :

- Maximal à la base (encastrement):
 $M_{vert_base} = \text{Coefficient}_M(Z) \cdot P_{base} \cdot R \cdot e$.

3. Moment Horizontal (M_{horiz}) :

- Souvent maximal un peu au-dessus de la base.

Étape 5 : Dimensionnement du Ferrailage (ELS et ELU)

Les efforts obtenus sont utilisés pour dimensionner les armatures en acier selon les règles du béton armé (par exemple BAEL 91 ou Eurocode 2).

- Ferrailage Horizontal** : Calculé pour reprendre l'effort de traction T . C'est l'armature principale qui fait le "cerceau".
- Ferrailage Vertical** : Calculé pour reprendre les moments de flexion M_{vert} , agissant principalement à la base du réservoir.
- Vérification de l'ELS (État Limite de Service)** : C'est crucial pour les réservoirs. La méthode de Lossier s'inscrit dans un cadre normatif où il

faut limiter la **contrainte dans l'acier (σ_s)** pour garantir une fissuration minimale et l'**étanchéité**. On impose souvent $\sigma_s \leq 120\text{MPa}$ ou 140MPa .

4.8.5. Méthode de Lebel (Méthode par Abaques)

Dans cette méthode, on ne considère pas la paroi comme une simple membrane (qui se dilate uniformément sous pression), mais comme une structure qui subit à la fois une traction circonférentielle (effort tangentiel) et de la flexion (moments fléchissants) près de sa base encastrée dans le radier (le fond du réservoir).

Les formules pour le calcul de la traction circonférentielle) et de moment de flexion sont :

$$T = \gamma \times \gamma_w \times h \times r \text{ et, } M = \gamma' \times \gamma_w \times h^3$$

Sachant que : $T_{réel} = \gamma \times T_{théorique_membrane}$ et, $M_{réel} = \gamma' \times M_{théorique_membrane}$

Où :

- $T_{théorique_membrane} = \gamma_w \cdot h \cdot r$ (l'effort de traction simple si la paroi était très fine et non encastrée).
- γ et γ' : Coefficients sans dimension lu sur l'abaque.

Le rôle de l'abaque

L'abaque vous permet d'ajuster l'effort de traction théorique en fonction de la rigidité réelle de la structure (voir Annexes).

Les paramètres d'entrée de l'abaque sont des termes sans dimension qui caractérisent la géométrie et les matériaux du réservoir :

a) Z/h :

- Z : La cote verticale du point étudié (distance depuis le fond ou le haut du réservoir, selon l'abaque spécifique).
- h : La hauteur totale du liquide (hauteur d'eau).
- Ce rapport vous positionne verticalement dans le réservoir.

b) $h^2/(eD)$

- h : Hauteur du liquide.
- e : Épaisseur de la paroi du réservoir.
- D : Diamètre du réservoir ($D = 2r$).
- Ce paramètre global est lié à la rigidité relative de la paroi (hauteur élevée par rapport à l'épaisseur et au diamètre). Un réservoir haut et mince ne se comporte pas comme un réservoir large et épais.

Le tableau suivant résume l'utilité de calcul de T et M pour la méthode de Lebel.

Tableau.4.3 : l'utilité de calcul de T et M pour la méthode de Lebel.

Caractéristique	Tension T	Moment M
Formule	$T = \gamma \cdot \gamma_w \cdot h \cdot r$	$M = \gamma' \cdot \gamma_w \cdot h^3$
Unité	Force par mètre (ex: kN/m)	Moment par mètre (ex: kN · m/m)
Coefficient	γ (de l'abaque de T)	γ' (de l'abaque de M)
Sert à calculer	Ferraillage horizontal	Ferraillage vertical
Dépend de	h et r	h^3

4.8.6. Section Minimale Générale (Pourcentage d'Acier)

La section d'acier minimale $A_{s,min}$ est généralement exprimée en pourcentage de la section de béton Ac (largeur b multipliée par épaisseur e).

Selon l'**Eurocode 2**, pour les éléments fléchis ou tendus (ce qui est le cas des parois de réservoirs), la section minimale doit respecter la formule suivante, sans être inférieure à une valeur absolue simplifiée :

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot f_{ctm} / f_{yk} \cdot b \cdot d \text{ mais pas moins de } 0,0013 \cdot b \cdot d$$

- f_{ctm} : Résistance moyenne à la traction du béton (dépend de la classe du béton, ex: pour C25/30, $f_{ctm} \approx 2,5\text{MPa}$).
- f_{yk} : Limite élastique de l'acier (ex: 500MPa pour l'acier B500).
- b : Largeur moyenne de la zone tendue (ici, l'épaisseur e du voile).
- d : Hauteur utile de la section (épaisseur e moins l'enrobage et la moitié du diamètre des armatures).

En pratique (simplification courante) :

Pour le béton armé courant utilisant de l'acier haute adhérence (HA) de classe B500, le pourcentage minimal d'armature dans chaque direction (horizontale et verticale) est souvent fixé forfaitairement à environ **0,13% à 0,15% de la section de béton brute ($b \times e$)**.

a) Dispositions Constructives

Les normes prévoient également des règles de disposition :

- Les armatures minimales doivent être réparties sur toute la section du béton.
- L'espacement maximal entre les barres est limité (souvent $3e$ ou 400mm maximum pour les armatures principales).
- Dans les réservoirs, un soin particulier est apporté à l'**enrobage** (distance entre l'armature et la surface du béton) pour garantir la durabilité et l'étanchéité, souvent 30 mm ou 40 mm minimum pour les bétons en contact avec l'eau ou l'extérieur

Références bibliographiques

Bruno COUSIN. Ouvrages spéciaux en béton. Réservoirs. Ecole supérieure polytechnique de la jeunesse. Janvier 2016. Pp. 4-50.

Annexes

Annexe 01 : abaque de coefficient (γ) pour calculer (T), en fonction du rapport $H^2/(R \times e)$ et Z/h (Méthode de Lebel).

h^2/ed \ z/h	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,4	+ 0,474	+ 0,440	+ 0,395	+ 0,352	+ 0,308	+ 0,264	+ 0,215	+ 0,165	+ 0,111	+ 0,057
0,8	+ 0,423	+ 0,402	+ 0,381	+ 0,358	+ 0,330	+ 0,297	+ 0,249	+ 0,202	+ 0,145	+ 0,076
1,2	+ 0,350	+ 0,355	+ 0,361	+ 0,362	+ 0,358	+ 0,343	+ 0,309	+ 0,256	+ 0,186	+ 0,098
1,6	+ 0,271	+ 0,303	+ 0,341	+ 0,369	+ 0,385	+ 0,385	+ 0,362	+ 0,314	+ 0,233	+ 0,124
2,0	+ 0,205	+ 0,260	+ 0,321	+ 0,373	+ 0,411	+ 0,434	+ 0,419	+ 0,369	+ 0,280	+ 0,151
3,0	+ 0,074	+ 0,179	+ 0,281	+ 0,375	+ 0,449	+ 0,506	+ 0,519	+ 0,479	+ 0,375	+ 0,210
4,0	- 0,017	+ 0,137	+ 0,253	+ 0,367	+ 0,469	+ 0,545	+ 0,579	+ 0,553	+ 0,447	+ 0,256
5,0	- 0,008	+ 0,114	+ 0,235	+ 0,356	+ 0,469	+ 0,562	+ 0,617	+ 0,606	+ 0,503	+ 0,294
6,0	- 0,011	+ 0,103	+ 0,223	+ 0,343	+ 0,463	+ 0,566	+ 0,639	+ 0,643	+ 0,547	+ 0,327
8,0	- 0,015	+ 0,096	+ 0,208	+ 0,324	+ 0,443	+ 0,564	+ 0,661	+ 0,697	+ 0,621	+ 0,386
10,0	- 0,008	+ 0,095	+ 0,200	+ 0,311	+ 0,428	+ 0,552	+ 0,666	+ 0,730	+ 0,678	+ 0,433
12,0	- 0,002	+ 0,097	+ 0,197	+ 0,302	+ 0,417	+ 0,541	+ 0,664	+ 0,750	+ 0,720	+ 0,477
14,0	0,000	+ 0,098	+ 0,197	+ 0,299	+ 0,408	+ 0,531	+ 0,659	+ 0,761	+ 0,752	+ 0,513
16,0	+ 0,002	+ 0,100	+ 0,198	+ 0,299	+ 0,403	+ 0,521	+ 0,650	+ 0,764	+ 0,776	+ 0,543

Annexe 02 : abaque de coefficient (γ') pour calculer (Mv) en fonction du rapport $H^2/(R \times e)$ et Z/h (Méthode de Lebel).

h^2/ed \ z/h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,4	+ 0,0005	+ 0,0014	+ 0,0021	+ 0,0007	- 0,0042	- 0,0150	- 0,0302	- 0,0529	- 0,0816	- 0,1205
0,8	+ 0,0011	+ 0,0037	+ 0,0063	+ 0,0080	+ 0,0070	+ 0,0023	- 0,0068	- 0,0224	- 0,0465	- 0,0795
1,2	+ 0,0012	+ 0,0042	+ 0,0077	+ 0,0103	+ 0,0112	+ 0,0090	+ 0,0022	- 0,0108	- 0,0311	- 0,0602
1,6	+ 0,0011	+ 0,0041	+ 0,0075	+ 0,0107	+ 0,0121	+ 0,0111	+ 0,0058	- 0,0051	- 0,0232	- 0,0505
2,0	+ 0,0010	+ 0,0035	+ 0,0068	+ 0,0099	+ 0,0120	+ 0,0115	+ 0,0075	- 0,0021	- 0,0185	- 0,0436
3,0	+ 0,0006	+ 0,0024	+ 0,0047	+ 0,0071	+ 0,0090	+ 0,0097	+ 0,0077	+ 0,0012	- 0,0119	- 0,0333
4,0	+ 0,0003	+ 0,0015	+ 0,0028	+ 0,0047	+ 0,0066	+ 0,0077	+ 0,0069	+ 0,0023	- 0,0080	- 0,0268
5,0	+ 0,0002	+ 0,0008	+ 0,0016	+ 0,0029	+ 0,0046	+ 0,0059	+ 0,0059	+ 0,0028	- 0,0058	- 0,0222
6,0	+ 0,0001	+ 0,0003	+ 0,0008	+ 0,0019	+ 0,0032	+ 0,0046	+ 0,0051	+ 0,0029	- 0,0041	- 0,0187
8,0	0,0000	+ 0,0001	+ 0,0002	+ 0,0008	+ 0,0016	+ 0,0028	+ 0,0038	+ 0,0029	- 0,0022	- 0,0146
10,0	0,0000	0,0000	+ 0,0001	+ 0,0004	+ 0,0007	+ 0,0019	+ 0,0029	+ 0,0028	- 0,0012	- 0,0122
12,0	0,0000	- 0,0001	+ 0,0001	+ 0,0002	+ 0,0003	+ 0,0013	+ 0,0023	+ 0,0026	0,0005	- 0,0104
14,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	+ 0,0001	+ 0,0008	+ 0,0019	+ 0,0023	0,0001	0,0090
16,0	0,0000	0,0000	0,0001	- 0,0002	0,0001	+ 0,0004	+ 0,0013	+ 0,0019	+ 0,0001	0,0079