

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Spécialité : Génie Civil

Option : Construction Hydraulique et Aménagement (CHA)

Thème

**Analyse mécano-fiabiliste des contraintes dans la paroi d'un
réservoir posé au sol compte tenu du gradient thermique**

Présenté par :

M^{lle} ZAMOUM Nesma

Devant le jury composé de :

| | | |
|----------------------|---------------------------------|-------------|
| Mr. HAMMOUM Hocine | Professeur à l'UMMTO | Président. |
| Mme. BOUZELHA Karima | Professeure à l'UMMTO | Encadrante. |
| Mr. ALICHE Amar | Maitre de conférences à l'UMMTO | Encadrant. |
| Mr. DEHMOUS Hocine | Maitre de conférences à l'UMMTO | Examineur. |

Promotion : 2024/2025

Remerciements

*En premier lieu, merci **Dieu** le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce projet de fin d'études.*

*Tout d'abord, mes remerciements à Madame **BOUZELHA Karima**, Professeur au département de génie civil pour m'avoir encadré et suivi tout au long de la réalisation de ce mémoire et Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **ALICHE Amar**, Chef de département de génie civil qui m'a beaucoup aidé et qui a toujours répondu présent.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'apport de Monsieur **HAMMOUM Hocine**, Professeur au département de Génie Civil. Je le remercie pour son assistance et ces orientations qui ont grandement contribué à l'élaboration de ce travail.*

*J'exprime mes remerciements à Monsieur **DEHMOUS Hocine**, Maître de Conférences au Département de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour ses conseils et ses encouragements.*

Je remercie les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

*À mes **parents**, les piliers de ma vie, mon ancrage.*

Maman, toi la guerrière, tu as toujours été mon modèle, ma source de courage et d'amour inébranlable. Tu es celle qui, par ta force et ton dévouement, m'a appris à ne jamais abandonner, peu importe les épreuves. Papa, même dans tes silences, tu m'as montré ce que signifient vraiment l'amour et le sacrifice paix a ton âme. Vous êtes mes étoiles, celles qui éclairent mon chemin.

À mes sœurs adorées, mes complices de toujours.

Vous avez été là dans les moments de doute, présentes à chaque étape de mon parcours. Je ne pourrai jamais vous remercier assez pour votre présence constante, votre soutien inconditionnel et tout l'amour que vous me portez.

A ma famille, merci d'avoir toujours été ce lien solide, ce refuge sincère dans les hauts comme dans les bas. Votre présence, vos paroles, vos gestes simples mais remplis d'amour ont fait toute la différence. Vous êtes le socle de ma force et de ma sérénité. Je vous porte dans mon cœur, aujourd'hui et pour toujours.

À mes amies, mes sœurs de cœur, mes confidents. Vous êtes plus qu'une simple amitié, vous êtes une véritable famille pour moi. À chaque sourire, chaque éclat de rire, vous avez illuminé ma vie et allégé mes moments de doute. Je vous aime plus que tout.

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre 1

Calcul déterministe des contraintes de traction dans la paroi du réservoir

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 5 |
| 1.1. Calcul des pressions hydrostatiques | 5 |
| 1.2. Calcul des pressions hydrodynamiques | 6 |
| 1.2.1 Exposé de la méthode de Westergaard | 6 |
| 1.2.2. Calcul de l'accélération a_m [m/s^2] | 7 |
| 1.3 Combinaisons d'actions | 10 |
| 1.4. Calcul des efforts de traction dans la bande (i) | 10 |
| 1.5. Calcul de ferrailage | 11 |
| 1.6. Etude de Cas | 12 |
| 1.6.1. Présentation de l'ouvrage | 12 |
| 1.6.2. Calcul des pressions hydrostatiques | 12 |
| 1.6.3. Calcul des pressions hydrodynamiques | 13 |
| 1.6.4. Combinaisons de charge | 14 |
| 1.6.5. Calcul des Effort de traction | 15 |
| 1.6.6. Calcul des sections d'armatures | 15 |
| 1.7. Calcul des contraintes de traction dans la paroi du réservoir | 16 |
| 1.7.1 Béton | 16 |
| 1.7.2. Aciers | 16 |
| 1.8. Résultats et interprétations | 17 |
| 1.9. Influence de la charge hydraulique sur les contraintes de traction..... | 18 |
| 1.10. Influence de l'action thermique sur les contraintes de traction | 23 |
| 1.11. Analyse de l'effet saisonnier de la température sur les contraintes de traction..... | 25 |
| Conclusion..... | 33 |
| Conclusion générale | 35 |

Références bibliographiques

Chapitre 01 : Calcul déterministe des contraintes de traction dans la paroi du réservoir

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Pressions hydrostatiques agissant sur la paroi du réservoir | 6 |
| Figure 1.2 : Pressions hydrodynamiques agissant sur la paroi du réservoir | 7 |
| Figure 1.3 : Spectre de réponse de RPA2003 (am/g) | 13 |
| Figure 1.4 : Variation des contraintes dans le béton en fonction de la charge hydraulique H_e | 17 |
| Figure 1.5 : La variation des contraintes de traction dans l'acier en fonction de la charge hydraulique H_e | 18 |
| Figure 1.6 : Diagramme de la capacité du réservoir sur 24heures en adduction continue.. | 20 |
| Figure 1.7 : Variation des contraintes de traction dans le béton sur 24 heures | 22 |
| Figure 1.8 : Variation des contraintes de traction dans l'acier sur 24 heures | 22 |
| Figure 1.9 : Variation des contraintes de traction dans l'acier sur 24 heures | 25 |
| Figure 1.10 : Trajectoire de la température par heure deux journées successives d'une saison froide, à Tizi Ouzou (Miloudi.2024) | 25 |
| Figure 1.11 : Trajectoire de la température par heure deux journées successives d'une saison chaude a Tizi Ouzou (Miloudi.2024) | 26 |
| Figure 1.12 : Répartition des températures extérieure (T_e) et intérieure (T_i) le long de la paroi (h_0) (Fascicule 74) | 27 |
| Figure 1.13 : courbe sinusoïdale de la variation de la température sur 24h pour les deux saisons | 28 |
| Figure 1.14 : Variation de la température selon 24h pour les 4 bandes à la saison froide.. | 32 |
| Figure 1.15 : Variation de la température selon 24h pour les 4 bandes à la saison chaude | 32 |

Chapitre 01 : Calcul déterministe des contraintes de traction dans la paroi du réservoir

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1 : Coefficient d'accélération de zone A (RPA, 2023)..... | 8 |
| Tableau 1.2 : Pourcentage d'amortissement critique ξ | 9 |
| Tableau 1.3 : Pénalités observées P_q | 9 |
| Tableau 1.4 : Périodes caractéristiques T_1, T_2 | 9 |
| Tableau 1.5 : Caractéristiques du réservoir d'étude | 12 |
| Tableau 1.6 : Valeur de la pression Q_i hydrostatique sur chaque bande | 12 |
| Tableau 1.7 : Période fondamentale (T)..... | 13 |
| Tableau 1.8 : Résultat de calcul l'accélération..... | 13 |
| Tableau 1.9 : Valeur de la pression P_i hydrodynamique sur chaque bande..... | 14 |
| Tableau 1.10 : Valeurs des combinaisons de charges pour chaque bande (i) | 14 |
| Tableau 1.11 : Valeurs des efforts de traction T_i dans chaque bande (i) | 15 |
| Tableau 1.12 : Sections d'armatures A_i sous les combinaisons d'actions, dans chaque bande (i)..... | 15 |
| Tableau 1.13 : La section d'armatures choisit sous les combinaisons d'actions dans chaque bande | 15 |
| Tableau 1.14 : Contrainte de traction dans le béton | 17 |
| Tableau 1.15 : Contrainte de traction dans les aciers | 18 |
| Tableau 1.16 : Capacité de réservoir à chaque heure en adduction continue pour une petite ville..... | 19 |
| Tableau 1.17 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoir (aciers -béton) pour la bande du fon..... | 21 |
| Tableau 1.18 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoir (aciers -béton) pour la bande du fond..... | 24 |
| Tableau 1.19 : paramètre de calcul de $T(\text{ext})$ | 27 |
| Tableau 1.20 : paramètre de calcul de $T_{\text{paroi,int}}(t), T_e(t)$ | 27 |
| Tableau 1.21 : Variation de la température extérieure, intérieure, et température de l'eau sur 24h..... | 28 |
| Tableau 1.22 : variation de gradient thermique sur 24h pour les deux saisons | 29 |
| Tableau 1.23 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoir (aciers -béton) pour la bande I sous l'effet thermique en saison froide | 30 |
| Tableau 1.24 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoir (aciers -béton) pour la bande I sous l'effet thermique en saison chaude..... | 31 |

Ce travail de recherche nous a permis d'analyser les contraintes de traction dans la paroi du réservoir de stockage posé au sol, dans le béton les aciers. Différentes charges sont considérées ; à savoir les charges hydrostatiques, les charges hydrodynamiques et l'effet thermique. Deux approches complémentaires, déterministe et fiabiliste ont été développées, afin de mieux appréhender la problématique et ses conséquences sur l'état du réservoir.

L'analyse déterministe menée sur la paroi du réservoir a permis d'identifier les contraintes de traction ainsi que leur impact sur le comportement mécanique du béton et de l'acier. Les résultats ont montré que, sous l'effet de la seule charge hydrostatique, les contraintes restent dans les limites admissibles, aussi bien pour le béton que pour l'acier. Toutefois, l'ajout de la charge hydrodynamique augmente sensiblement les sollicitations, bien que les contraintes restent maîtrisées. L'introduction d'une variation journalière de la charge d'eau dans le réservoir, permettant de reproduire des conditions d'exploitation plus réalistes, induit une variation sensible des contraintes en fonction de la hauteur d'eau. Ces contraintes atteignent des valeurs maximales entre 5 et 7 heures, correspondant à la charge maximale dans le réservoir et à la période creuse d'exploitation, ces contraintes restent tout de même inférieures aux contraintes admissibles. Par ailleurs, l'intégration de l'effet thermique s'est révélée particulièrement critique. L'application d'un gradient de température $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, tel que dicté par le Fascicule 74 a mis en évidence des dépassements de la contrainte de traction admissible dans les aciers ; pour la bande du fond. L'étude de l'effet saisonnier de la température sur 24 heures a donné une répartition plus réaliste des contraintes et a illustré la sensibilité thermique de la structure, notamment en période estivale où les gradients de température sont plus marqués. Ces résultats soulignent la nécessité de prendre en compte l'effet de la température combiné à la variation de la charge dans le réservoir dans la conception et le dimensionnement des réservoirs en béton armé, afin de garantir leur sécurité et leur durabilité à long terme.

En perspective, il serait intéressant d'introduire l'effet stochastique de la température sur le calcul des contraintes.

Introduction

Ce chapitre est consacré au calcul déterministe de la paroi d'un réservoir circulaire en béton armé, soumis à diverses actions ; à savoir l'effet hydrostatique, l'effet hydrodynamique, la variation de la charge hydraulique et l'effet thermique (variation saisonnières de température). L'objectif principal est d'évaluer les contraintes générées dans le béton et l'acier afin de vérifier leur conformité aux exigences des règlements (Fascicules 74 et le BAEL91) vis-à-vis de l'état Limite de Service (ELS).

1.1. Calcul des pressions hydrostatiques

Il s'agit des pressions exercées par l'eau au repos, contenu dans le réservoir. Ces pressions agissent horizontalement sur la paroi de l'ouvrage et suivent une répartition linéaire (Figure 1.1). Pour calculer ces actions hydrostatiques, nous divisons la paroi du réservoir en bandes de 1 m. Ainsi, chaque bande est soumise à une charge trapézoïdale. La pression hydrostatique Q_i [Kg/m^3] agissant à la base d'une bande d'ordre i [kg/m^2], est donnée par l'équation suivante (Ben Abderrahmane, 2012) :

$$P_i = h_i \cdot Z_i \quad (1.1)$$

Avec :

ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3),

Z_i : profondeur du trop-plein jusqu'à la base de la bande i considérée (m)

La charge linéaire q_i (Kg/ml) agissant sur chaque bande i est donnée par la relation suivante (Hammoum, 2012) :

$$Q_i = P_i \cdot h_i \quad (1.2)$$

h_i : la hauteur de la bande i (m) ;

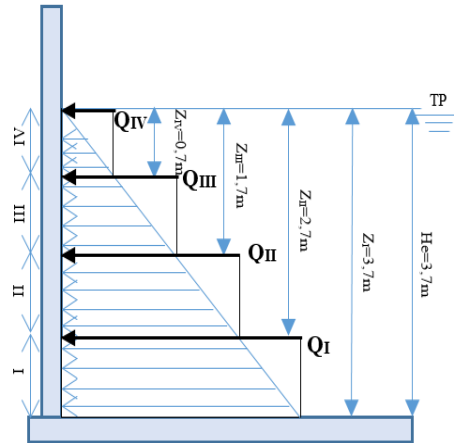


Figure 1.1 : Pressions hydrostatiques agissant sur la paroi du réservoir.

1.2. Calcul des pressions hydrodynamiques

La pression hydrodynamique qui simule l'interaction fluide-structure lors d'un séisme reçoit une attention considérable afin d'assurer la sécurité des ouvrages hydrauliques, notamment les réservoirs de stockage d'eau potable en béton armé. Différentes méthodes ont été proposées pour rendre compte de ces pressions hydrodynamiques, nous citons la méthode développée par Westergaard (1933).

1.2.1 Exposé de la méthode de Westergaard

C'est une méthode analytique utilisée pour évaluer les effets hydrodynamiques exercée par le liquide sur les parois, dans des structures contenant des liquides, comme les réservoirs au sol, lors de sollicitations dynamiques telles que les séismes. La méthode repose sur les hypothèses suivantes :

- Fluide incompressible (une compressibilité de l'eau négligée) ;
- Parement vertical (fruit est nul) ;
- Structure rigide.

Cette méthode considère une forme parabolique pour la charge hydrodynamique agissant sur la paroi (figure 1.2).

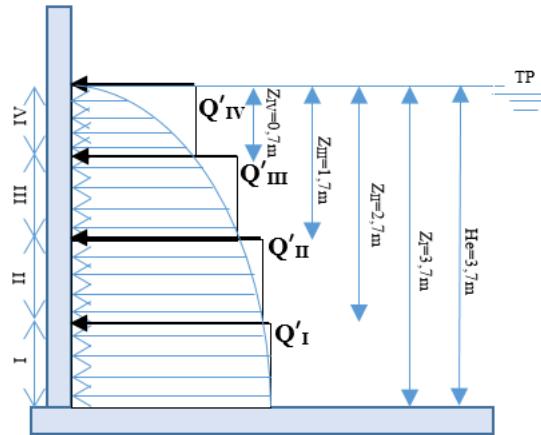


Figure 1.2 : Pressions hydrodynamiques agissant sur la paroi du réservoir.

Par procédé analogue, au calcul hydrostatique, nous subdivisons la paroi en bandes de 1 m de hauteur. Chaque bande (i) est en réalité soumise à une charge horizontale parabolique. La pression hydrodynamique à la base de chaque bande est donnée par :

$$P'_i = C_e \cdot \alpha \cdot \rho \cdot \sqrt{H_e \cdot Z_i} \quad (1.3)$$

Avec :

- C_e : coefficient de Westergaard égal à 7/8,
- α : rapport de l'accélération à la force de pesanteur (a_m/g),
- ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3),
- H_e : hauteur d'eau (m),
- Z_i : profondeur du trop-plein jusqu'à la base de la bande i considérée (m).

La charge linéaire est donnée par la relation (1.4) :

$$Q'_i = P'_i \cdot h_i \quad (1.4)$$

- P'_i : la pression hydrodynamique (kg/m^2).
- h_i : la hauteur de la bande i (m) ;

1.2.2. Calcul de l'accélération a_m [m/s^2]

L'accélération a_m appliquée au réservoir, prenant en compte l'interaction sol-structure, est définie par les règlements en fonction de la zone sismique et de plusieurs paramètres caractéristiques du site. Elle est exprimée comme une fraction de l'accélération gravitationnelle. En Algérie, les Règles Parasismiques Algériennes (RPA, 2003) préconisent l'utilisation d'un spectre de réponse unique pour le calcul de l'action sismique. Ce spectre permet d'estimer les effets dynamiques d'un séisme sur une structure en fonction de sa période propre et des conditions sismiques locales, telle que :

$$\alpha = \frac{a_m}{g} \begin{cases} 1.25A(1 + \frac{T}{T_2}(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1)) & \text{pour } 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A)(\frac{Q}{R}) & \text{pour } T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A)(\frac{Q}{R})(\frac{T}{T_2})^{2/3} & \text{pour } T_2 \leq T \leq 3 \text{ s} \\ 2.5\eta(1.25A)(\frac{T_2}{3})^{2/3}(\frac{3}{T})^{5/3}(\frac{Q}{R}) & \text{pour } T > 3 \text{ s} \end{cases} \quad (1.5)$$

T [s] : Période fondamentale du réservoir, donnée par la relation de Rayleigh, pour les réservoirs posés au sol, pouvant être assimilés de façon réaliste à un prisme de section transversale constante (Hammoum, 2010). Soit :

$$T = 1.79 \cdot Ht^2 \cdot \sqrt{\frac{P}{g \cdot E \cdot I_x}} \quad (1.6)$$

Ht : la hauteur totale de l'ouvrage [m] ;

P : le poids de l'ouvrage [KN/ml] ;

E : module d'élasticité du béton [KN/m²], donné par :

$$E = 11000 \cdot \sqrt[3]{f_{c28}} \quad (1.7)$$

I_x : moment d'inertie de la section transversale du réservoir [m⁴], donnée par :

$$I_x = \frac{\pi}{4} \cdot (Re^4 - Ri^4) \quad (1.8)$$

g : l'accélération de la pesanteur [m/s²].

A : Coefficient d'accélération de la zone sismique A qui est en fonction de la zone sismique et du groupe d'usage (tableau 1.1). Les réservoirs de stockage sont classés comme ouvrage de classe 1B (ouvrage important)

Tableau 1.1 : Coefficient d'accélération de zone A (RPA, 2023).

| Groupe D'usage | Zone sismique | | | |
|----------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | I Sismicité faible | IIa Sismicité moyenne | IIb Sismicité moyenne | III Sismicité élevée |
| 1A | 0.15 | 0.25 | 0.3 | 0.4 |
| 1B | 0.12 | 0.2 | 0.25 | 0.3 |
| 2 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
| 3 | 0.07 | 0.1 | 0.14 | 0.18 |

η: un facteur de correction d'amortissement, donné par la formule suivante :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2 + \xi)}} \quad (1.9)$$

Où ξ désigne le pourcentage d'amortissement critique. Sa valeur est en fonction du matériau constitutif, du type de la structure et de l'importance des remplissages. Le réservoir peut être à défaut assimilé à une structure en voile en béton armé. Aussi, nous considérons comme pourcentage d'amortissement critique $\xi = 10\%$ (tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Pourcentage d'amortissement critique ξ

| | Portiques | | Voile ou mur |
|--------------------|-------------------|--------------|------------------------|
| Remplissage | Béton armé | Acier | B.a/ maçonnerie |
| Leger | 6 | 4 | 10 |

R : représente le niveau de ductilité et de dissipation d'énergie d'une structure soumise à une action sismique. Sa valeur dépend du type de système de contreventement utilisé et est définie par le RPA (2003). Dans le cas de notre ouvrage, assimilé à une structure en voiles porteurs, il est classé dans la catégorie 3 selon le RPA (2003). Ainsi, la valeur retenue pour le coefficient de comportement est : $R=3,50$.

Q : est le facteur de qualité de la structure, donné par la formule suivante :

$$Q = 1 + \sum P_q \tag{1.10}$$

P_q : désigne les pénalités à retenir selon le critère de qualité est satisfait ou non, conformément au tableau 1.3:

Le facteur de qualité Q est pris égal à 1 pour un réservoir posé au sol les six pénalités sont observées.

Tableau 1.3 : Pénalités observées P_q

| | | P_q | |
|-----------|--|----------------------|--------------------|
| N° | Critère q | Observé | Non observé |
| 1 | Conditions minimales sur les files de contreventement | 0 | 0.05 |
| 2 | Redondance en plan | 0 | 0.05 |
| 3 | Régularité en plan | 0 | 0.05 |
| 4 | Régularité en élévation | 0 | 0.05 |
| 5 | Contrôle de qualité des matériaux | 0 | 0.05 |
| 6 | Contrôle de qualité de l'exécution | 0 | 0.05 |

T₁, T₂ : sont des périodes caractéristiques associées à la catégorie du site S_i (s) (tableau (1.4).

Tableau 1.4 : Périodes caractéristiques T₁, T₂.

| Site | S₁ | S₂ | S₃ | S₄ |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| | Site rocheux | Site ferme | Site meuble | Site très meuble |
| T₁ (s) | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| T₂ (s) | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 |

1.3 Combinaisons d'actions

Les combinaisons d'actions définissent l'ensemble des sollicitations à considérer pour la vérification de la stabilité et de la résistance des ouvrages en béton armé. Elles permettent de prendre en compte les effets simultanés des différentes charges (permanentes, variables, accidentelles) conformément aux exigences réglementaires. Dans le cadre de cette étude, les combinaisons adoptées en [kg] sont celles proposées par le Fascicule 74, et sont détaillées comme suit:

a) Vis-à-vis des états limites ultimes (ELU) sous combinaisons fondamentales

$$C_1 = 1,35 G + 1,5 (Q + \psi_0 T) + W' \text{ (et/ou Sn)} \quad (1.11)$$

$$C_2 = 1,35 G + 1,5 W' + 1,3 (Q + \psi_0 T) \quad (1.12)$$

$$C_3 = G + 1,5 W' + 1,3 \psi_0 T \quad (1.13)$$

G : ensemble des actions permanentes,

Q : ensemble des actions variables qui représentent dans le cas du réservoir posé au sol les charges hydrostatiques,

W : action du vent à l'ELS,

W' : action du vent en ELU (1.2 fois W),

Sn : action de la neige,

T : action de la température.

b) Vis-à-vis des états limites ultimes (ELU) sous combinaisons accidentelles

$$C_4 = G + Q + F_a + 0.6. T \quad (1.14)$$

Fa : action accidentelle.

c) Vis-à-vis des états limites de service (ELS)

$$C_5 = G + Q + T \quad (1.15)$$

$$C_6 = G + W \text{ (et/ou Sn)} + Q + 0.6. T \quad (1.16)$$

1.4. Calcul des efforts de traction dans la bande (i)

L'effort de traction T_i est calculé pour chaque bande et chaque combinaison d'action à l'ELU et l'ELS en (kg) par la relation suivante :

$$T_i = \frac{(q_i \cdot D)}{2} \quad (1.17)$$

D : Diamètre intérieur du réservoir (m),

q_i : Charges répartis sous les différentes combinaisons d'action

1.5. Calcul de ferrailage

Les efforts de traction dans chaque bande seront absorbés par les armatures circulaires disposées sous formes de cercles.

a. Etat limite ultime

Les sections d'armatures à l'ELU sont données en [cm²] par la relation du BAEL (91) suivante :

$$A_{iu} \geq \frac{T_{iu}}{f_e/\gamma_s} \quad (1.18)$$

T_{iu} : L'effort de traction a L'ELU

f_e : Limite élastique des aciers de béton armé, égale 400 Mpa.

Le coefficient γ_s vaut 1.15 en situation durable ou transitoire et 1 en situation accidentelle.

b. Etat limite de service

La section d'armatures à l'ELS est donnée en [cm²] par la relation suivante (BAEL, 91) :

$$A_{is} \geq \frac{T_{is}}{\sigma_{st}} \quad (1.19)$$

T_{is} : L'effort de traction a L'ELS

σ_{st} : Contrainte admissible des armatures a L'ELS (fissuration très préjudiciables), donnée par le BAEL (91), telle que :

$$\sigma_{st1} = 0.8 \cdot \min \left(\frac{2}{3} f_e; \max \left(\frac{1}{2} f_e; 90 \sqrt{\eta \cdot f_{tj}} \right) \right) \quad (1.20)$$

c. Condition de non fragilité

Par ailleurs, la section minimale d'armature est définie par la condition de non fragilité (BAEL 91), telle que

$$A_{min} \geq B \cdot \frac{f_{t28}}{f_e} \quad (1.21)$$

Où :

A_{min} : aire totale de la section des armatures longitudinales tendues [cm²]

B : aire de la section droite de béton [cm²];

f_e : limite d'élasticité de l'acier [400Mpa];

f_{t28} : résistance caractéristique à la traction du béton [Mpa]; donné par (BAEL 91) :

$$f_{t28} = 0.6 + 0.06 \cdot f_{c28} \quad (1.22)$$

d. Section minimale d'acier RPA

D'après le RPA 99, le pourcentage total minimum d'armatures longitudinales, sur toute la section d'une bande de la paroi est de 0.5% de la section d'une bande de 1 m (Hammoum.2024)

$$A_{rpa} = \left(\frac{0,5}{100} \cdot e_p \cdot H_e \right) \tag{1.23}$$

1.6. Etude de Cas

1.6.1. Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage faisant l'objet d'étude est un réservoir circulaire de stockage d'eau, en béton armée posé au sol, implanté à Boumerdes, zone de forte sismicité (zone III). Le site d'implantation est de catégorie S3 "site meuble". Le réservoir est classé dans le groupe d'usage 1B. Ces caractéristiques sont données dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Caractéristiques du réservoir d'étude.

| Paramètres | Symbole | valeur | unité |
|---|------------------|----------|-------------------|
| Capacité de réservoir | V | 200.00 | m ³ |
| Diamètre du réservoir | D | 8.30 | m |
| Hauteur totale du réservoir | H _t | 6.15 | m |
| Hauteur de la paroi | H _p | 4.00 | m |
| Epaisseur de la paroi | e _p | 0.13 | m |
| Section rectangulaire de la paroi | B _p | 0.13 | m ² |
| Poids du réservoir | P | 190.88 | KN/ml |
| Rayon intérieur | R _i | 4.15 | m |
| Rayon extérieur | R _{ex} | 4.28 | m |
| Résistance caractéristique du béton à 28 jours | f _{c28} | 25.00 | Mpa |
| Résistance caractéristique de traction du béton | f _{t28} | 2.1 | Mpa |
| Situation durable | γ _s | 1.15 | |
| Situation accidentelle | γ _s | 1.00 | |
| Module d'élasticité du béton | E _j | 32164.20 | MN/m ² |
| La pesanteur d'accélération | g | 10.00 | m/s ² |

1.6.2. Calcul des pressions hydrostatiques

Les pressions hydrostatiques sont calculées conformément aux relations (1.1) et (1.2). Les résultats sont présentés dans le tableau (1.6).

Tableau 1.6 : Valeur de la pression Qi hydrostatique sur chaque bande.

| N° de bande | Z _i (m) | P _i (kg/m ²) | Q _i (Kg/ml) |
|-------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------|
| I | 3.7 | 3 700.00 | 3 700.00 |
| II | 2.7 | 2 700.00 | 2 700.00 |
| III | 1.7 | 1 700.00 | 1 700.00 |
| IV | 0.7 | 700.00 | 490.00 |

1.6.3. Calcul des pressions hydrodynamiques

Les pressions hydrodynamiques sont calculées conformément aux relations (1.3) et (1.4). La période fondamentale du réservoir est obtenue par l'équation (1.6). Les paramètres de calcul de la période ainsi que les résultats sont illustrés dans le tableau (1.7) :

Tableau 1.7 : Période fondamentale (T)

| Paramètres | Symbole | valeur | unité |
|--|---------|-----------|-------------------|
| Hauteur totale du réservoir | H_t | 6.15 | m |
| Poids du réservoir | P | 190.88 | KN/ml |
| Module d'élasticité du béton | E_j | 32 164.20 | MN/m ² |
| Moment d'inertie | I_x | 30.59 | m ⁴ |
| Période fondamentale du réservoir | T | 0.0094 | s |

Nous constatons que la période T est comprise entre 0 et 1 donc le spectre est défini par la relation (1.24):

$$1.25A(1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta \frac{Q}{R} - 1)) = 0.364 \quad (1.24)$$

Le spectre est illustré par la figure 1.3 :

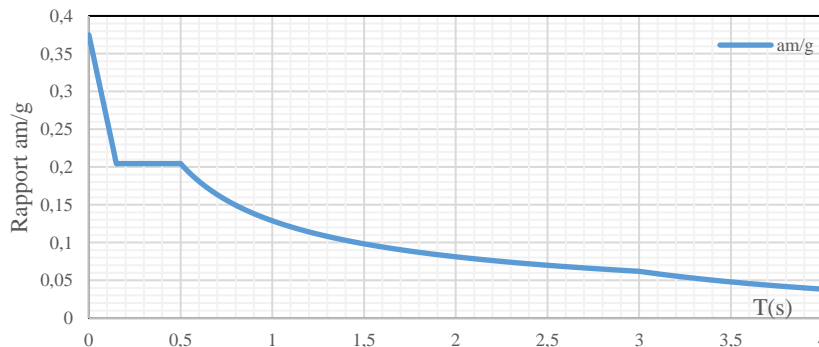


Figure 1.3 : Spectre de réponse de RPA2003 (a_m/g)

Les paramètres de calcul de l'accélération ainsi que les résultats sont donnés dans le tableau (1.8) :

Tableau 1.8 : Résultat de calcul l'accélération

| paramètre | Symbole | Valeurs | unité |
|--|---------|---------|-------|
| Périodes caractéristiques | T_1 | 0.15 | s |
| associées à la catégorie du site (s) | T_2 | 0.50 | s |
| Coefficient d'accélération de zone sismique | A | 0.30 | - |
| Facteur de qualité de la structure | Q | 1.00 | - |
| Pourcentage d'amortissement critique | ξ | 10.00 | % |
| Facteur de correction d'amortissement | η | 0.76 | - |
| Coefficient de comportement globale de la structure | R | 3.50 | - |
| Période fondamentale du réservoir | T | 0.01 | s |
| Rapport d'accélération | a_m/g | 0.364 | - |

Les résultats de calcul des pressions hydrodynamiques à la base de chaque bande sont donnés dans le tableau (1.9)

Tableau 1.9 : Valeur de la pression P_i hydrodynamique sur chaque bande.

| N° de bande | Z_i (m) | P_i' (kg/m ²) | Q_i' (Kg/ml) |
|-------------|-----------|-----------------------------|----------------|
| I | 3.7 | 1 179,38 | 1179,38 |
| II | 2.7 | 860,63 | 860,63 |
| III | 1.7 | 541,88 | 541,88 |
| IV | 0.7 | 223,13 | 156,19 |

1.6.4. Combinaisons de charge

Les actions à considérer pour l'analyse de la paroi du réservoir sont les charges hydrostatiques et les charges hydrodynamiques. Les combinaisons à retenir ; conformément aux relations (1.11 à 1.16), tirées du Fascicule 74 sont les suivantes :

a. Vis-à-vis des états limites ultimes (ELU) sous combinaisons fondamentales

Les relations (1.11), (1.12) et (1.13) deviennent :

$$C_1 = 1,5 (Q_i + Q_i') \quad (1.25)$$

$$C_2 = 1,3 (Q_i + Q_i') \quad (1.26)$$

$$C_3 = 0 \quad (1.27)$$

b. Vis-à-vis des états limites ultimes (ELU) sous combinaisons accidentelles

La formule (1.14) devient :

$$C_4 = (Q_i + Q_i') \quad (1.28)$$

c. Vis-à-vis des états limites de service (ELS)

Les formules (1.15) et (1.16) deviennent :

$$C_5 = (Q_i + Q_i') \quad (1.29)$$

$$C_6 = (Q_i + Q_i') \quad (1.30)$$

Les résultats des combinaisons de charges sont donnés dans le tableau (2.10) pour chaque bande (i).

Tableau 1.10 : Valeurs des combinaisons de charges pour chaque bande (i).

| N° de bande | ELU fondamental | | | ELU accidentel | ELS | |
|-------------|-----------------|----------|---------|----------------|----------|----------|
| | C1 (kg) | C2 (kg) | C3 (kg) | C4 (kg) | C5 (kg) | C6 (kg) |
| I | 7 319,07 | 6 343,19 | 0 | 4 879,38 | 4 879,38 | 4 879,38 |
| II | 5 340,94 | 4 628,81 | 0 | 3 560,63 | 3 560,63 | 3 560,63 |
| III | 3 362,81 | 2 914,44 | 0 | 2 241,88 | 2 241,88 | 2 241,88 |
| IV | 969,28 | 840,04 | 0 | 646,19 | 646,19 | 646,19 |

1.6.5. Calcul des Effort de traction

Les efforts de traction sont calculés conformément à la relation (1.17), pour chaque bande (i) de la paroi du réservoir. Ces efforts ont été évalués en tenant compte des différentes 2combinaisons d’actions (C1 à C6). Les résultats sont donnés dans le tableau (1.11):

Tableau 1.11: Valeurs des efforts de traction T_i dans chaque bande (i).

| N° de bande | T1 (kg) | T2 (kg) | T3 (kg) | T4 (kg) | T5(kg) | T6 (kg) |
|-------------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| I | 30374,12 | 26324,24 | 0 | 20249,42 | 20249,42 | 20249,42 |
| II | 22164,90 | 19209,58 | 0 | 14776,60 | 14776,60 | 14776,60 |
| III | 13955,68 | 12094,92 | 0 | 9303,79 | 9303,79 | 9303,79 |
| IV | 4022,52 | 3486,18 | 0 | 2681,68 | 2681,68 | 2681,68 |

1.6.6. Calcul des sections d’armatures

Les sections d’armatures sont calculées conformément aux relations (1.18), (1.19 et (1.21). Les résultats, sous différentes combinaisons, sont présentées dans le tableau (1.12) :

Tableau 1.12 : Sections d’armatures A_i sous les combinaisons d’actions, dans chaque bande (i).

| N° de bande | A1 (cm ²) | A2 (cm ²) | A3(cm ²) | A4 (cm ²) | A5 (cm ²) | A6 (cm ²) | Amin (cm ²) | A _{RPA} (cm ²) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| I | 8,73 | 7,57 | 0 | 5,06 | 12,66 | 12,66 | 6,825 | 9 |
| II | 6,37 | 5,52 | 0 | 3,69 | 9,24 | 9,24 | 6,825 | 9 |
| III | 4,01 | 3,48 | 0 | 2,33 | 5,81 | 5,81 | 6,825 | 9 |
| IV | 1,16 | 1,00 | 0 | 0,67 | 1,68 | 1,68 | 6,825 | 9 |

Les sections maximales sont données par la relation (1.31):

$$A_{\max} = \max (A1, A2, A4, A5, A6, A_{\min}, A_{RPA}) \quad (1.31)$$

Les résultats sont présentés dans le tableau (1.13), ainsi que la section adoptée pour chaque bande :

Tableau 1.13 : La section d’armatures choisit sous les combinaisons d’actions dans chaque bande.

| N° de bande | A _{max} | A _{adpt} | Ferraillage |
|-------------|------------------|-------------------|---------------|
| I | 12,66 | 15,83 | 7T12, e=13 cm |
| II | 9,24 | 11,00 | 7T10, e=13 cm |
| III | 9,00 | 11,00 | 7T10, e=13 cm |
| IV | 9,00 | 11,00 | 7T10, e=13 cm |

1.7. Calcul des contraintes de traction dans la paroi du réservoir

Nous nous intéressons, dans cette section, au calcul des contraintes de traction dans la paroi du réservoir, à savoir dans le béton et les aciers. Ces contraintes seront calculées à l'état limite de service.

1.7.1 Béton

La contrainte dans le béton σ_{bt} [Mpa] est obtenue par la relation (1.32) :

$$\sigma_{bti} = \frac{T_i}{1.e_p} \quad (1.32)$$

Avec :

T_i : l'effort de traction [kg] ; sous les combinaisons de charge, à l'ELS

e_p : épaisseur de la paroi [m]

- **Contrainte admissible**

La contrainte de traction admissible dans le béton est la contrainte qu'il ne faut pas dépasser en tous point de l'ouvrage. A l'état limite de service, la contrainte admissible de traction est donnée par le Fascicule 74 par la formule (1.33) :

$$\overline{\sigma}_{bc} = 1.1. \theta. f_{tj} \quad (1.33)$$

θ : cas de traction simple égal à 1.

1.7.2. Aciers

Les armatures utilisées sont des armatures courantes à haute adhérence de classe FeE400 type (HA), avec une limite d'élasticité $f_e = 400$ MPa.

Les contraintes de traction dans les armatures à l'état limite de services en [Mpa] sont calculées par la relation (1.34) :

$$\sigma_{sti} = \frac{T_i}{A_s} \quad (1.34)$$

T_i : Effort de traction sous les combinaisons de charge [kg], à l'ELS,

A_s : section d'armatures [cm²]

- **Contrainte admissible**

La contrainte admissible selon le fascicule 74 est donnée par la relation (1.35) ; en considérant une fissuration très préjudiciable, nous avons :

$$\sigma_{st1} = 0.8 \min \left(\frac{2}{3} f_e; \max \left(\frac{1}{2} f_e; 90 \sqrt{\eta \cdot f_{tj}} \right) \right) \quad (1.35)$$

Avec :

η : aciers à haute adhérence égal à 1.6,

1.8. Résultats et interprétations

Les contraintes de traction dans le béton et dans les aciers ont été déterminées en tenant compte des efforts de traction calculés à l'état limite de service (ELS), sous les combinaisons d'actions C₅ et C₆. Les résultats correspondants sont présentés dans les tableaux 1.14 et 1.15, et illustrés respectivement par les figures 1.4 et 1.5, pour l'ensemble des bandes. L'analyse montre que les contraintes de traction restent inférieures aux contraintes admissibles, aussi bien pour le béton que pour l'acier, soit en considérant uniquement la charge hydrostatique ou bien à la fois la charge hydrostatique et la charge hydrodynamique. Toutefois l'ajout de l'effet hydrodynamique entraîne une augmentation des contraintes réduisant la marge sécurité mais sans provoquer des dépassements sur la contrainte admissible ; ce qui mis en évidence l'importance de la prise en compte de l'effet hydrodynamique, souvent négligé par les ingénieurs. Il est à noter que la contrainte maximale dans l'acier n'est pas nécessairement atteinte au niveau de la bande du fond comme l'illustre le tableau 1.15 et la figure 1.5 autrement dit la bande du fond n'est pas la bande la plus préjudiciable comme on pourrait penser.

Tableau 1.14 : Contrainte de traction dans le béton

| N° de bande | Z _i (m) | Sous hydrostatique + hydrodynamique | | |
|-------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Sous hydrostatique | $\sigma_{bt5} + \sigma_{bt6}$ (Mpa) | $\sigma_{bt5} + \sigma_{bt6}$ (Mpa) |
| I | 3,7 | 1,18 | 1,56 | 2,31 |
| II | 2,7 | 0,86 | 1,14 | 2,31 |
| III | 1,7 | 0,54 | 0,72 | 2,31 |
| IV | 0,7 | 0,16 | 0,21 | 2,31 |

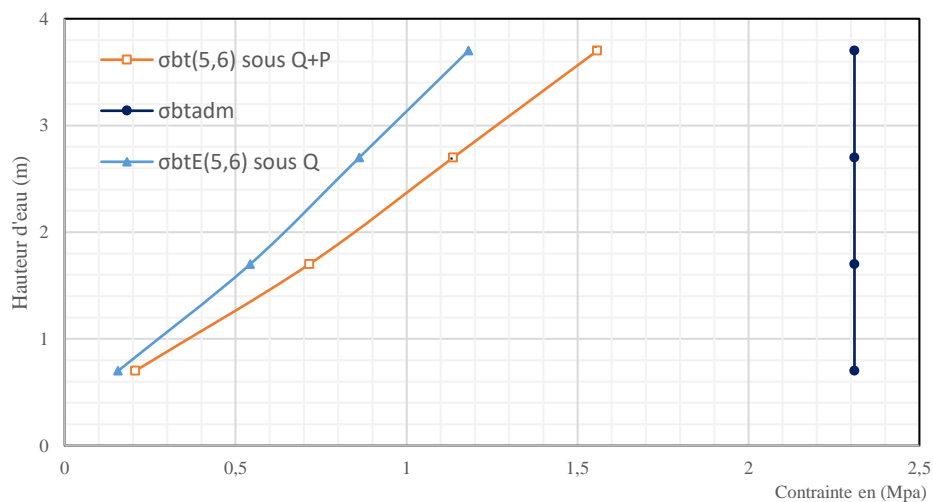


Figure 1.4 : Variation des contraintes dans le béton en fonction de la charge hydraulique He.

Tableau 1.15 : Contrainte de traction dans les aciers

| N° de bande | Z _i (m) | Sous hydrostatique | | Sous hydrostatique + hydrodynamique | |
|-------------|--------------------|--|--|--|--------------------------|
| | | σ _{bt5} +σ _{bt6} (Mpa) | σ _{bt5} +σ _{bt6} (Mpa) | σ _{bt5} +σ _{bt6} (Mpa) | σ _{stadm} (Mpa) |
| I | 3,7 | 96,98 | 127,89 | 160,00 | 160,00 |
| II | 2,7 | 101,90 | 134,33 | 160,00 | 160,00 |
| III | 1,7 | 64,16 | 84,58 | 160,00 | 160,00 |
| IV | 0,7 | 18,49 | 24,38 | 160,00 | 160,00 |

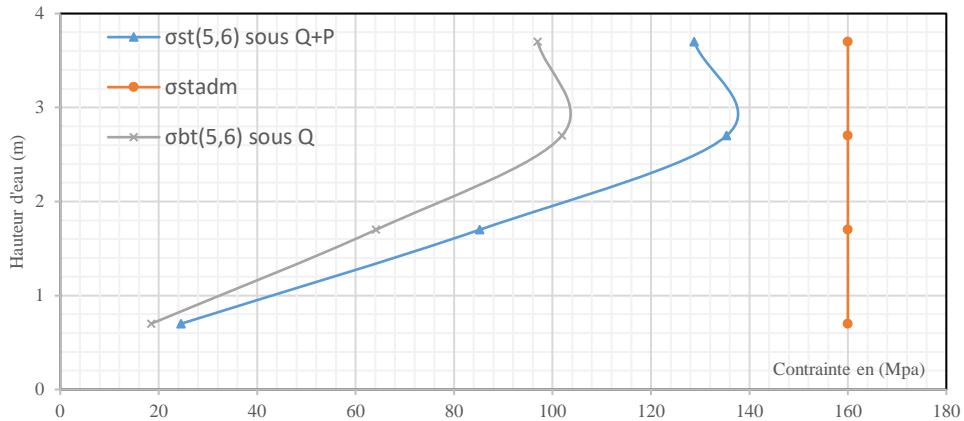


Figure 1.5 : La variation des contraintes de traction dans l'acier en fonction de la charge hydraulique H_e

1.9. Influence de la charge hydraulique sur les contraintes de traction

Le volume d'eau stocké dans le réservoir ainsi que la charge hydraulique (H_e) varient au cours de la journée, en fonction du débit d'entrée, qui dépend du type d'adduction et du débit de consommation horaire, lié à l'importance de l'agglomération desservie.

En adduction continue, le réservoir est alimenté avec un débit moyen horaire uniforme égale $a = C/24$, C étant de débit maximale journalier, calculée en fonction des besoins (Ben Abderrahmane, 2015). Quant au débit de distribution, celui-ci varie selon l'heure de la journée et du type de l'agglomération. Pour la ville de Boumerdès ; considérée comme une ville moyenne, les débits de consommation sont définis en fonction du débit horaire a comme suit (Dupond, 1979) :

- De 6 heures à 7 heures..... a
- De 7 heures à 11 heures..... $3.5a$
- De 11 heures à 16 heures..... $0.4 a$
- De 16 heures à 18 heures..... $2a$
- De 18 heures à 22 heures..... $0.5 a$
- De 22 heures à 6 heures..... $0.5a$

Ainsi, la capacité maximale du réservoir est obtenue par la somme, en valeur absolue, du plus grand excès (DV+) de la journée avec le plus grand déficit (DV-) d'un autre moment de la journée; telle qu'illustrés dans le tableau 2.16 et figure 2.6, soit

$$V_r = |(DV+) |+| (DV-)| = |5,25a| + |-4,75a| \quad (1. 36)$$

Le volume maximal théorique est donc égal à 10a.

Par ailleurs, si nous considérons que Ω est la section transversale interne de la cuve du réservoir, la variation journalière de la charge d'eau $H_e(t)$ dans le réservoir est donnée par la relation (1.37) en fonction de la capacité $V(t)$ du réservoir à différents instants de la journée (Aliche, 2016). Les résultats ont illustré dans le tableau 1.16 :

$$H_e(t) = \frac{V(t)}{\Omega} \quad (1.37)$$

Tableau 1.16 : Capacité de réservoir à chaque heure en adduction continue pour une petite ville

| Temps(h) | Arrivée (qa) | Arrivée cummulé | Consommation (qc) | Cons cummulé | (qa_qc)cummulé | Capacite(m³) | He(m) | | | | | |
|----------|--------------|-----------------|-------------------|--------------|----------------|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|------|
| 0 | a | 20,00 | a | 20,00 | 0,125a | 2,50 | 0,125a | 2,50 | 0,875a | 17,50 | 112,50 | 2,08 |
| 1 | a | 20,00 | 2a | 40,00 | 0,125a | 2,50 | 0,250a | 5,00 | 1,750a | 35,00 | 130,00 | 2,40 |
| 2 | a | 20,00 | 3a | 60,00 | 0,125a | 2,50 | 0,375a | 7,50 | 2,625a | 52,50 | 147,50 | 2,73 |
| 3 | a | 20,00 | 4a | 80,00 | 0,125a | 2,50 | 0,500a | 10,00 | 3,50a | 70,00 | 165,00 | 3,05 |
| 4 | a | 20,00 | 5a | 100,00 | 0,125a | 2,50 | 0,625a | 12,50 | 4,375a | 87,50 | 182,50 | 3,37 |
| 5 | a | 20,00 | 6a | 120,00 | 0,125a | 2,50 | 0,750a | 15,00 | 5,250a | 105,00 | 200,00 | 3,70 |
| 6 | a | 20,00 | 7a | 140,00 | a | 20,00 | 1,750a | 35,00 | 5,250a | 105,00 | 200,00 | 3,70 |
| 7 | a | 20,00 | 8a | 160,00 | 3,5a | 70,00 | 5,250a | 105,00 | 2,750a | 55,00 | 150,00 | 2,77 |
| 8 | a | 20,00 | 9a | 180,00 | 3,5a | 70,00 | 8,750a | 175,00 | 0,250a | 5,00 | 100,00 | 1,85 |
| 9 | a | 20,00 | 10a | 200,00 | 3,5a | 70,00 | 12,25a | 245,00 | 2,25a | -45,00 | 50,00 | 0,92 |
| 10 | a | 20,00 | 11a | 220,00 | 3,5a | 70,00 | 15,75a | 315,00 | 4,75a | -95,00 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | a | 20,00 | 12a | 240,00 | 0,4a | 8,00 | 16,15a | 323,00 | 4,15a | -83,00 | 12,00 | 0,22 |
| 12 | a | 20,00 | 13a | 260,00 | 0,4a | 8,00 | 16,55a | 331,00 | 3,55a | -71,00 | 24,00 | 0,44 |
| 13 | a | 20,00 | 14a | 280,00 | 0,4a | 8,00 | 16,95a | 339,00 | 2,95a | -59,00 | 36,00 | 0,67 |
| 14 | a | 20,00 | 15a | 300,00 | 0,4a | 8,00 | 17,35a | 347,00 | 2,35a | -47,00 | 48,00 | 0,89 |
| 15 | a | 20,00 | 16a | 320,00 | 0,4a | 8,00 | 17,75a | 355,00 | 1,75a | -35,00 | 60,00 | 1,11 |
| 16 | a | 20,00 | 17a | 340,00 | 2a | 40,00 | 19,75a | 395,00 | 2,75a | -55,00 | 40,00 | 0,74 |
| 17 | a | 20,00 | 18a | 360,00 | 2a | 40,00 | 21,75a | 435,00 | 3,75a | -75,00 | 20,00 | 0,37 |
| 18 | a | 20,00 | 18a | 380,00 | 0,5a | 10,00 | 22,25a | 445,00 | 3,25a | -65,00 | 30,00 | 0,55 |
| 19 | a | 20,00 | 20a | 400,00 | 0,5a | 10,00 | 22,75a | 455,00 | 2,75a | -55,00 | 40,00 | 0,74 |
| 20 | a | 20,00 | 21a | 420,00 | 0,5a | 10,00 | 22,25a | 465,00 | 2,25a | -45,00 | 50,00 | 0,92 |
| 21 | a | 20,00 | 22a | 440,00 | 0,5a | 10,00 | 23,75a | 475,00 | 1,75a | -35,00 | 60,00 | 1,11 |
| 22 | a | 20,00 | 23a | 460,00 | 0,125a | 2,50 | 23,875a | 477,50 | 0,875a | -17,50 | 77,50 | 1,43 |
| 23 | a | 20,00 | 24a | 480,00 | 0,125a | 2,50 | 24a | 480,00 | 0,00 | 0,00 | 95,00 | 1,76 |

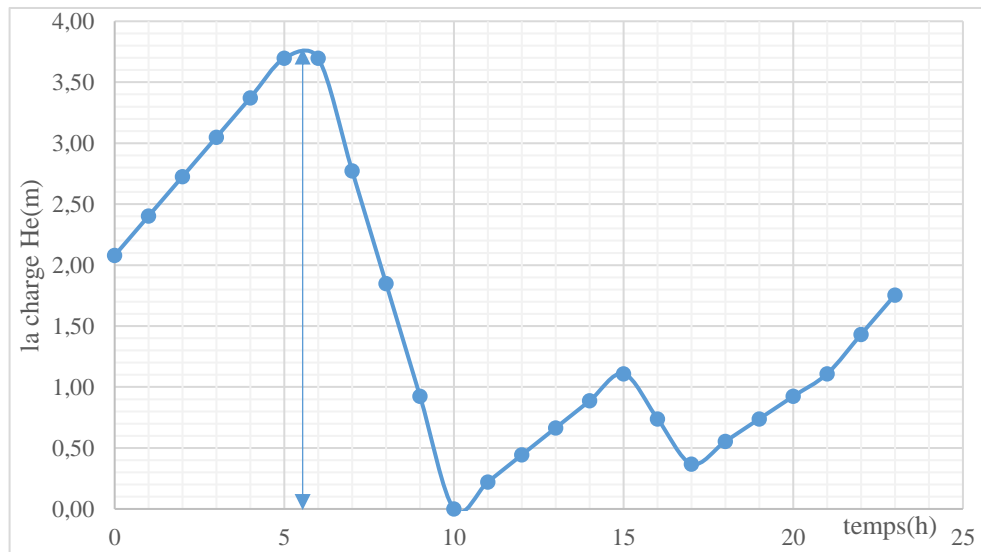


Figure 1.6 : Diagramme de la capacité du réservoir sur 24heures en adduction continue

Pour illustrer l'effet de la variation de la charge hydraulique (He) sur le calcul des contraintes de traction dans le béton et les aciers, nous les avons calculés pour la bande (I) du fond, sur 24h. Les résultats sont illustrés dans le tableau 1.17. Par procède analogue, nous avons calculé les contraintes de traction pour toutes les bandes. Les résultats sont illustrés par les figures 1.7 et 1.8, pour le béton et les aciers respectivement.

Nous constatons que les contraintes de traction varient en fonction de la variation de la charge hydraulique. Les contraintes de traction maximales sont enregistrées de 5h à 7h, correspondant à la charge maximale pour toutes les bandes. Par ailleurs, il y a lieu de souligner l'importance de la prise en compte de l'effet hydrodynamique qui est significatif à cette tranche horaire pour toutes les bandes (béton et acier) et qui diminue pour le reste de la journée.

Notons toutefois, que les contraintes sont toutes vérifiées, elles sont toutes inférieures aux contraintes admissibles.

Chapitre 1 : Calcul déterministe des contraintes de traction dans la paroi du réservoir

Tableau1.17 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoirs (aciers -béton) pour la bande du fond

| Temps(h) | He | Hydrostatique | Hydrodynamique | Efforts de traction ELS | | | | Vérification des contraintes dans le béton | | Vérification des contraintes dans l'acier | | |
|------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|------------------|------------------|--|---------------|---|----------------|---------------|
| | | Qi (kg/m²) | Qi'(kg/m²) | Tstat(kg) | Tdyn(kg) | T5(kg) | T6(kg) | σbt5(Mpa) | σadmb(Mpa) | σst5(Mpa) | σst6(Mpa) | σstadm(Mpa) |
| 0-1 | 2,079 | 2 079,482 | 662,84 | 8 629,852 | 2 750,77 | 11 380,62 | 11 380,62 | 0,8754 | 2,3100 | 71,876 | 71,876 | 160,00 |
| 1-2 | 2,403 | 2 402,957 | 765,94 | 9 972,274 | 3 178,67 | 13 150,94 | 13 150,94 | 1,0116 | 2,3100 | 83,057 | 83,057 | 160,00 |
| 2-3 | 2,726 | 2 726,433 | 869,05 | 11 314,695 | 3 606,57 | 14 921,26 | 14 921,26 | 1,1478 | 2,3100 | 94,238 | 94,238 | 160,00 |
| 3-4 | 3,050 | 3 049,908 | 972,16 | 12 657,116 | 4 034,46 | 16 691,58 | 16 691,58 | 1,2840 | 2,3100 | 105,419 | 105,419 | 160,00 |
| 4-5 | 3,373 | 3 373,383 | 1 075,27 | 13 999,538 | 4 462,36 | 18 461,90 | 18 461,90 | 1,4201 | 2,3100 | 116,599 | 116,599 | 160,00 |
| 5-6 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 20 232,22 | 20 232,22 | 1,5563 | 2,3100 | 127,780 | 127,780 | 160,00 |
| 6-7 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 20 232,22 | 20 232,22 | 1,5563 | 2,3100 | 127,780 | 127,780 | 160,00 |
| 7-8 | 2,773 | 2 772,643 | 883,78 | 11 506,470 | 3 667,69 | 15 174,16 | 15 174,16 | 1,1672 | 2,3100 | 95,835 | 95,835 | 160,00 |
| 8-9 | 1,848 | 1 848,429 | 589,19 | 7 670,980 | 2 445,13 | 10 116,11 | 10 116,11 | 0,7782 | 2,3100 | 63,890 | 63,890 | 160,00 |
| 9-10 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 5 058,05 | 5 058,05 | 0,3891 | 2,3100 | 31,945 | 31,945 | 160,00 |
| 10-11 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2,3100 | - | - | 160,00 |
| 11-12 | 0,222 | 221,811 | 70,70 | 920,518 | 293,42 | 1 213,93 | 1 213,93 | 0,0934 | 2,3100 | 7,667 | 7,667 | 160,00 |
| 12-13 | 0,444 | 443,623 | 141,41 | 1 841,035 | 586,83 | 2 427,87 | 2 427,87 | 0,1868 | 2,3100 | 15,334 | 15,334 | 160,00 |
| 13-14 | 0,665 | 665,434 | 212,11 | 2 761,553 | 880,25 | 3 641,80 | 3 641,80 | 0,2801 | 2,3100 | 23,000 | 23,000 | 160,00 |
| 14-15 | 0,887 | 887,246 | 282,81 | 3 682,070 | 1 173,66 | 4 855,73 | 4 855,73 | 0,3735 | 2,3100 | 30,667 | 30,667 | 160,00 |
| 15-16 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | 4 602,588 | 1 467,08 | 6 069,67 | 6 069,67 | 0,4669 | 2,3100 | 38,334 | 38,334 | 160,00 |
| 16-17 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 4 046,44 | 4 046,44 | 0,3113 | 2,3100 | 25,556 | 25,556 | 160,00 |
| 17-18 | 0,370 | 369,686 | 117,84 | 1 534,196 | 489,03 | 2 023,22 | 2 023,22 | 0,1556 | 2,3100 | 12,778 | 12,778 | 160,00 |
| 18-19 | 0,555 | 554,529 | 176,76 | 2 301,294 | 733,54 | 3 034,83 | 3 034,83 | 0,2334 | 2,3100 | 19,167 | 19,167 | 160,00 |
| 19-20 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 4 046,44 | 4 046,44 | 0,3113 | 2,3100 | 25,556 | 25,556 | 160,00 |
| 20-21 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 5 058,05 | 5 058,05 | 0,3891 | 2,3100 | 31,945 | 31,945 | 160,00 |
| 21-22 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | 4 602,588 | 1 467,08 | 6 069,67 | 6 069,67 | 0,4669 | 2,3100 | 38,334 | 38,334 | 160,00 |
| 22-23 | 1,433 | 1 432,532 | 456,62 | 5 945,009 | 1 894,98 | 7 839,98 | 7 839,98 | 0,6031 | 2,3100 | 49,515 | 49,515 | 160,00 |
| 23-24 | 1,756 | 1 756,007 | 559,73 | 7 287,431 | 2 322,87 | 9 610,30 | 9 610,30 | 0,7393 | 2,3100 | 60,696 | 60,696 | 160,00 |

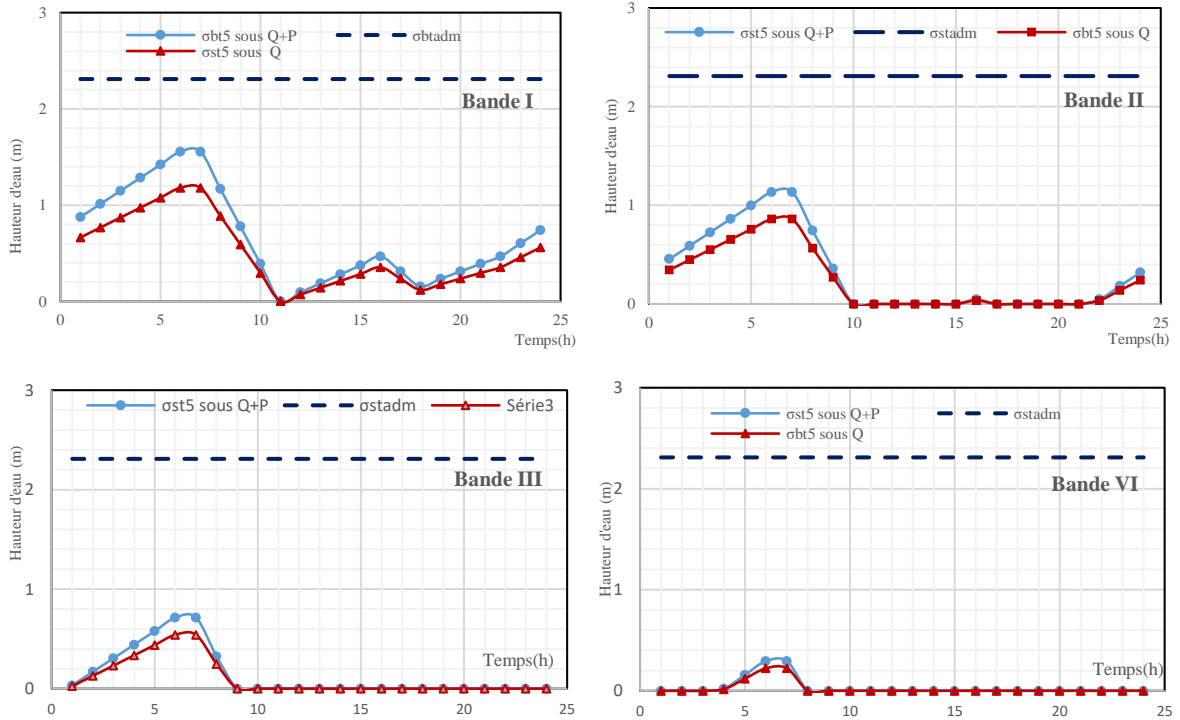


Figure 1.7 : Variation des contraintes de traction dans le béton sur 24 heure

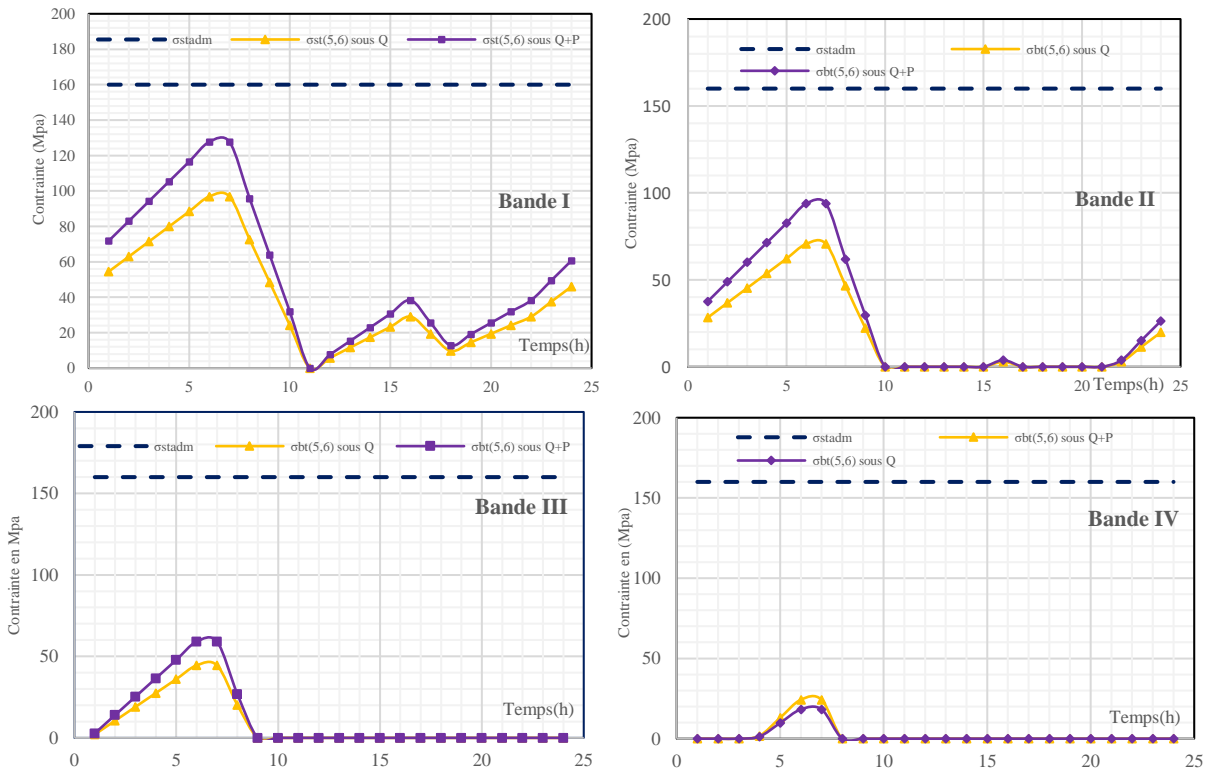


Figure 1.8 : Variation des contraintes de traction dans l'acier sur 24 heure

1.10. Influence de l'action thermique sur les contraintes de traction

Conformément au fascicule 74, le changement de température extérieure (jour/nuit, saisons) provoquent la dilatation ou le retrait des aciers. Lorsque ces déformations sont empêchées, cela engendre des contraintes de traction thermiques dans ces armatures, susceptibles d'affecter la durabilité et le comportement global de la structure, notamment à l'état limite de service (ELS). L'action thermique induite est définie par le Fascicule 74 par la relation suivante :

$$T_{\text{temp}} = \sigma \times A_s \quad (1.38)$$

A_s : section d'acier [cm^2] ;

σ : contrainte thermique [KN/m^2], donné par :

$$\sigma = E_s \times \varepsilon \quad (1.39)$$

E_s : module d'élasticité d'acier donné par

$$E_s = 200000 \text{ Mpa} \quad (1.40)$$

ε : la déformation thermique donnée par :

$$\varepsilon = \Delta_t \times \alpha_2 \quad (1.41)$$

α_2 : coefficient de dilatation selon le Fascicule 74 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] donné par

$$\alpha_2 = 10^{-5} \quad (1.42)$$

Δ_t : variation de la température entre la paroi intérieure et extérieure [$^{\circ}\text{C}$], égale à 30° .

Le calcul des contraintes de traction dans les aciers ; tenant compte de l'effet de la température est effectué sous les combinaisons (1.15) et (1.16) qui s'écrivent :

$$C_5 = Q + T \quad (1.43)$$

$$C_6 = Q + 0,6 \times T \quad (1.44)$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 2.18 pour la bande I du fond, tenant compte de la variation de la charge hydraulique. Par un procédé analogue, le calcul est effectué pour toutes les bandes. Les résultats sont illustrés par les figures 1.9.

Nous remarquons que pour bande du fond, les contraintes de traction dépassent la contrainte admissible entre 5h et 7h, correspondant là la charge maximale dans le réservoir, et à une période creuse d'exploitation. Cela signifie que les armatures sont soumises à des efforts supérieurs à ceux qu'elles peuvent supporter en conditions normales de service ; ce qui peut compromettre la sécurité et la durabilité du réservoir. Toutefois, pour une approche plus réaliste de l'effet thermique sur l'évolution des contraintes, nous proposons une analyse journalière et saisonnière de la température.

Tableau1.18 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoirs (aciers -béton) pour la bande du fond

| | | Effort de traction a l'ELS | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|----------------------------|------------|----------------|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|---|-----------|--|--|
| | | Hydrostatique | | Hydrodynamique | | Effet thermique | | Béton | | Acier | | Vérification des contrainte dans le béton | | Vérification des contraintes dans les aciers | |
| Temps (h) | He | Qi (kg/m²) | Qi'(kg/m²) | Tstat(kg) | Tdyn(kg) | Ttemp(kg) | T5(kg) | T5(kg) | T6(kg) | ost5(Mpa) | oadmb(Mpa) | ost5(Mpa) | ost6(Mpa) | ostadm(Mpa) | |
| 0-1 | 2,079 | 2 079,482 | 662,84 | 8 629,852 | 2 750,77 | 9 500,18 | 11 380,62 | 20 880,80 | 17 080,73 | 0,8754 | 2,3100 | 131,876 | 107,876 | 160,00 | |
| 1-2 | 2,403 | 2 402,957 | 765,94 | 9 972,274 | 3 178,67 | 9 500,18 | 13 150,94 | 22 651,12 | 18 851,05 | 1,0116 | 2,3100 | 143,057 | 119,057 | 160,00 | |
| 2-3 | 2,726 | 2 726,433 | 869,05 | 11 314,695 | 3 606,57 | 9 500,18 | 14 921,26 | 24 421,44 | 20 621,37 | 1,1478 | 2,3100 | 154,238 | 130,238 | 160,00 | |
| 3-4 | 3,050 | 3 049,908 | 972,16 | 12 657,116 | 4 034,46 | 9 500,18 | 16 691,58 | 26 191,76 | 22 391,69 | 1,2840 | 2,3100 | 165,419 | 141,419 | 160,00 | |
| 4-5 | 3,373 | 3 373,383 | 1 075,27 | 13 999,538 | 4 462,36 | 9 500,18 | 18 461,90 | 27 962,08 | 24 162,01 | 1,4201 | 2,3100 | 176,599 | 152,599 | 160,00 | |
| 5-6 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 9 500,18 | 20 232,22 | 29 732,39 | 25 932,32 | 1,5563 | 2,3100 | 187,780 | 163,780 | 160,00 | |
| 6-7 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 9 500,18 | 20 232,22 | 29 732,39 | 25 932,32 | 1,5563 | 2,3100 | 187,780 | 163,780 | 160,00 | |
| 7-8 | 2,773 | 2 772,643 | 883,78 | 11 506,470 | 3 667,69 | 9 500,18 | 15 174,16 | 24 674,34 | 20 874,27 | 1,1672 | 2,3100 | 155,835 | 131,835 | 160,00 | |
| 8-9 | 1,848 | 1 848,429 | 589,19 | 7 670,980 | 2 445,13 | 9 500,18 | 10 116,11 | 19 616,29 | 15 816,22 | 0,7782 | 2,3100 | 123,890 | 99,890 | 160,00 | |
| 9-10 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 9 500,18 | 5 058,05 | 14 558,23 | 10 758,16 | 0,3891 | 2,3100 | 91,945 | 67,945 | 160,00 | |
| 10-11 | - | - | - | - | - | 9 500,18 | - | 9 500,18 | 5 700,11 | - | 2,3100 | 60,000 | 36,000 | 160,00 | |
| 11-12 | 0,222 | 221,811 | 70,70 | 920,518 | 293,42 | 9 500,18 | 1 213,93 | 10 714,11 | 6 914,04 | 0,0934 | 2,3100 | 67,667 | 43,667 | 160,00 | |
| 12-13 | 0,444 | 443,623 | 141,41 | 1 841,035 | 586,83 | 9 500,18 | 2 427,87 | 11 928,04 | 8 127,97 | 0,1868 | 2,3100 | 75,334 | 51,334 | 160,00 | |
| 13-14 | 0,665 | 665,434 | 212,11 | 2 761,553 | 880,25 | 9 500,18 | 3 641,80 | 13 141,98 | 9 341,91 | 0,2801 | 2,3100 | 83,000 | 59,000 | 160,00 | |
| 14-15 | 0,887 | 887,246 | 282,81 | 3 682,070 | 1 173,66 | 9 500,18 | 4 855,73 | 14 355,91 | 10 555,84 | 0,3735 | 2,3100 | 90,667 | 66,667 | 160,00 | |
| 15-16 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | 4 602,588 | 1 467,08 | 9 500,18 | 6 069,67 | 15 569,84 | 11 769,77 | 0,4669 | 2,3100 | 98,334 | 74,334 | 160,00 | |
| 16-17 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 9 500,18 | 4 046,44 | 13 546,62 | 9 746,55 | 0,3113 | 2,3100 | 85,556 | 61,556 | 160,00 | |
| 17-18 | 0,370 | 369,686 | 117,84 | 1 534,196 | 489,03 | 9 500,18 | 2 023,22 | 11 523,40 | 7 723,33 | 0,1556 | 2,3100 | 72,778 | 48,778 | 160,00 | |
| 18-19 | 0,555 | 554,529 | 176,76 | 2 301,294 | 733,54 | 9 500,18 | 3 034,83 | 12 535,01 | 8 734,94 | 0,2334 | 2,3100 | 79,167 | 55,167 | 160,00 | |
| 19-20 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 9 500,18 | 4 046,44 | 13 546,62 | 9 746,55 | 0,3113 | 2,3100 | 85,556 | 61,556 | 160,00 | |
| 20-21 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 9 500,18 | 5 058,05 | 14 558,23 | 10 758,16 | 0,3891 | 2,3100 | 91,945 | 67,945 | 160,00 | |
| 21-22 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | 4 602,588 | 1 467,08 | 9 500,18 | 6 069,67 | 15 569,84 | 11 769,77 | 0,4669 | 2,3100 | 98,334 | 74,334 | 160,00 | |
| 22-23 | 1,433 | 1 432,532 | 456,62 | 5 945,009 | 1 894,98 | 9 500,18 | 7 839,98 | 17 340,16 | 13 540,09 | 0,6031 | 2,3100 | 109,515 | 85,515 | 160,00 | |
| 23-24 | 1,756 | 1 756,007 | 559,73 | 7 287,431 | 2 322,87 | 9 500,18 | 9 610,30 | 19 110,48 | 15 310,41 | 0,7393 | 2,3100 | 120,696 | 96,696 | 160,00 | |

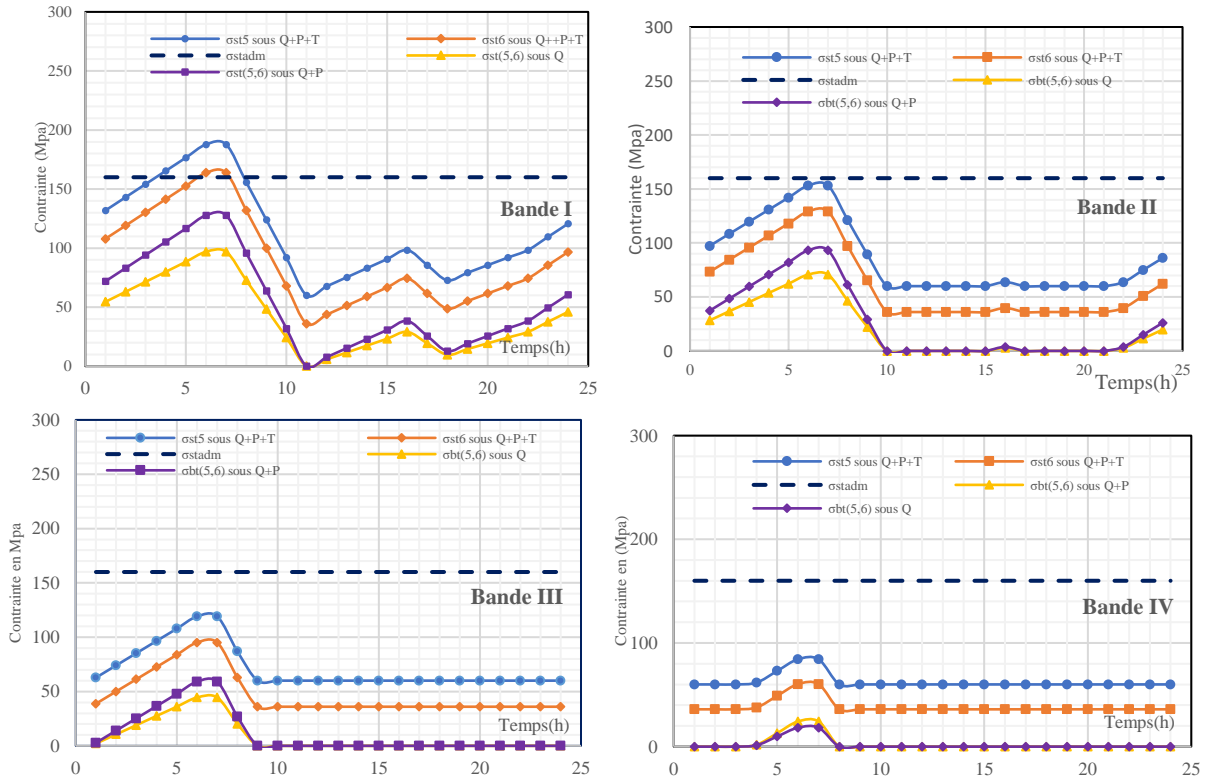


Figure 1.9 : Variation des contraintes de traction dans l'acier sur 24 heure

1.11. Analyse de l'effet saisonnier de la température sur les contraintes de traction

L'analyse saisonnière consiste à évaluer les variations de température sur une période de 24 heures pour deux saisons distinctes : une saison froide et une saison chaude. Les deux figures 1.10 et 1.11 illustrent ces variations typiques au cours d'une journée pour chaque saison, à Tizi Ouzou (Miloudi, 2024). Cette évaluation journalière des températures est essentielle pour adapter les calculs thermiques aux contraintes de traction associées. Nous constatons que la température extérieure suit une variation sinusoïdale sur 24h, selon les conditions climatiques journalières

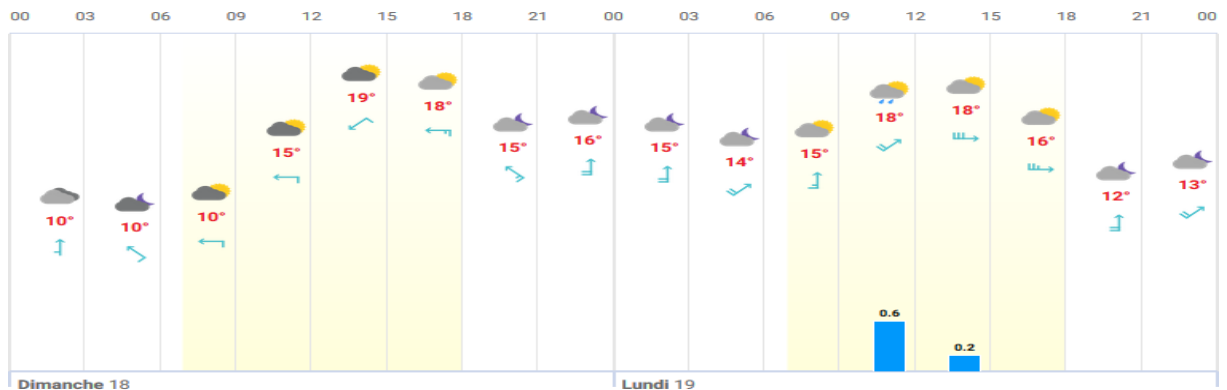


Figure 1.10 : Trajectoire de la température par heure deux journées successives d'une saison froide, à Tizi Ouzou (Miloudi.2024).

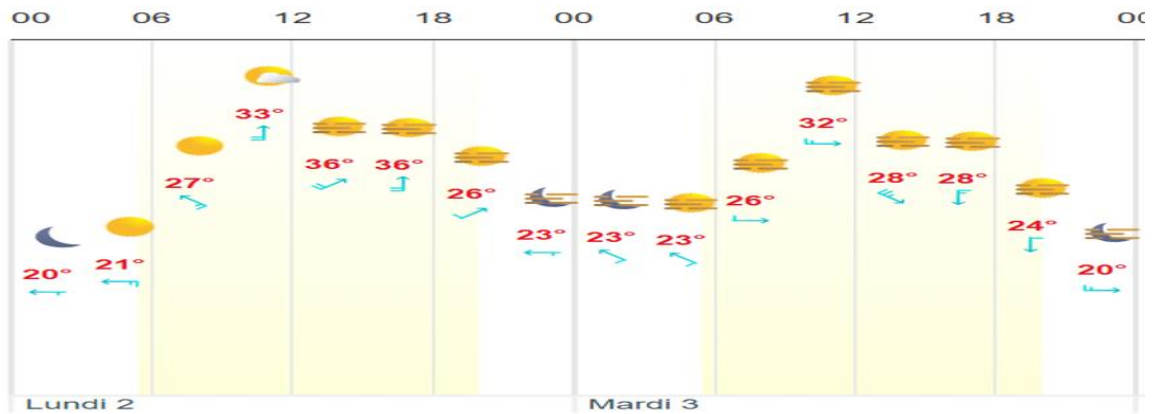


Figure 1.11 : Trajectoire de la température par heure deux journées successives d'une saison chaude, à Tizi Ouzou (Miloudi.2024).

Dans le cadre de cette étude, on cherche à calculer la température extérieure et intérieure d'un réservoir sur une période de 24 heures. La température extérieure peut être modélisée à l'aide de la fonction suivante (ASHRAE,2004) :

$$T_{\text{ext}}(t) = T_{\text{moy}} + A \times \sin \times \left(\frac{2\pi}{24} \times (t - t_{\text{max}}) \right) \quad (1.45)$$

Avec :

T_{moy} : Température moyenne journalière [°C]

A : Amplitude (variation maximale autour de T_{moy})

t : Heure de la journée (de 0 à 24 h)

t_{max} : Heure maximale de la journée (ex:13h)

Par ailleurs, la température de la paroi intérieure d'un réservoir dépend principalement des échanges thermiques entre le liquide contenu (l'eau) et la paroi elle-même. Le calcul de cette température est donné par la relation suivante (ASHRAE,2004) :

$$\begin{aligned} \text{si } t_s \leq t \leq t_c \quad T_{\text{paroi,int}}(t) &= T_e(t) + a \times \sin \times \left(\frac{\pi(t-t_s)}{(t_c-t_s)} \right) \\ \text{si non ,} \quad T_{\text{paroi,int}}(t) &= T_e(t) \end{aligned} \quad (1.46)$$

Avec :

t : heure (entre 0h et 24h)

a : amplitude thermique due à l'ensoleillement (entre 0,5 °C et 3 °C selon le climat et la paroi)

t_s : heure de lever du soleil (ex. 6 h)

t_c : heure de coucher du soleil (ex. 18 h)

$T_e(t)$: température de l'eau (ou de l'air ambiant si l'eau est stagnante) donnée par :

$$\begin{aligned} \text{si } t_s \leq t \leq t_c \quad T_e(t) &= T_{\text{moy}} + A \times \sin \times \left(\frac{\pi(t - t_{\text{déc}})}{(t_c - t_s)} \right) \\ \text{si non :} \quad T_e(t) &= T_{\text{moy}} \end{aligned} \quad (1.47)$$

$t_{\text{déc}}$: Heure de décalage du pic (souvent ≈ 14 h, car l'eau chauffe lentement)

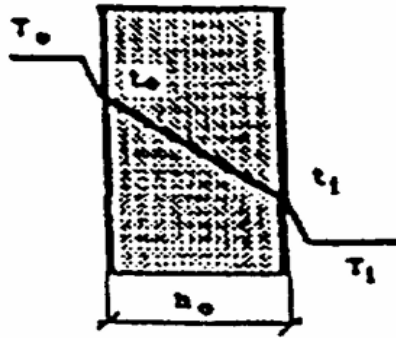


Figure 1.12 : Répartition des températures extérieure (T_e) et intérieure (T_i) le long de la paroi (h_o) (Fascicule 74).

En se référant aux données des températures (Seltzer (1913-1938)) nous avons extrait, pour les besoins de calcul les températures maximales, minimales et moyennes pour les deux saisons chaudes et froide comme illustrer sur les tableaux (1.19 et 1.20),

Tableau 1.19 : paramètre de calcul de $T(\text{ext})$

| Paramètre | Hiver | Été |
|-------------|---------|---------|
| | Valeurs | Valeurs |
| Tmin | -5 | 13 |
| Tmax | 24 | 46,3 |
| Tmoy | 9,5 | 29,65 |
| A | 14,5 | 16,65 |
| tmax | 13 | 13 |

Tableau 1.20 : paramètre de calcul de $T_{\text{paroi,int}}(t)$, $T_e(t)$

| Paramètre | Hiver | Été |
|-------------|---------|---------|
| | Valeurs | Valeurs |
| Tmoy | 9,5 | 29,65 |
| a | 0,5 | 0,5 |
| ts | 6 | 6 |
| tc | 18 | 18 |
| tdec | 14 | 14 |
| A | 5 | 3 |

Ainsi, les résultats des températures extérieures illustrés par la figure (1.12), des températures de l'eau et des températures la paroi intérieure, sur 24 sont donnés dans le tableau (1.22).

Tableau 1.21 : Variation de la température extérieure, intérieure, et température de l'eau sur 24h

| heure | Saison chaude(°C) | | | Saison froide(°C) | | |
|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
| | Température(ext) | Te | Tint | Température(ext) | Te | Tint |
| 0 | 33,96 | 29,65 | 29,65 | 13,25 | 9,5 | 9,50 |
| 1 | 29,65 | 29,65 | 29,65 | 9,50 | 9,5 | 9,50 |
| 2 | 25,34 | 29,65 | 29,65 | 5,75 | 9,5 | 9,50 |
| 3 | 21,33 | 29,65 | 29,65 | 2,25 | 9,5 | 9,50 |
| 4 | 17,88 | 29,65 | 29,65 | -0,75 | 9,5 | 9,50 |
| 5 | 15,23 | 29,65 | 29,65 | -3,06 | 9,5 | 9,50 |
| 6 | 13,57 | 27,05 | 27,05 | -4,51 | 5,17 | 5,17 |
| 7 | 13,00 | 26,75 | 26,88 | -5,00 | 4,67 | 4,80 |
| 8 | 13,57 | 26,65 | 26,90 | -4,51 | 4,50 | 4,75 |
| 9 | 15,23 | 26,75 | 27,11 | -3,06 | 4,67 | 5,02 |
| 10 | 17,88 | 27,05 | 27,48 | -0,75 | 5,17 | 5,60 |
| 11 | 21,33 | 27,53 | 28,01 | 2,25 | 5,96 | 6,45 |
| 12 | 25,34 | 28,15 | 28,65 | 5,75 | 7,00 | 7,50 |
| 13 | 29,65 | 28,87 | 29,36 | 9,50 | 8,21 | 8,69 |
| 14 | 33,96 | 29,65 | 30,08 | 13,25 | 9,50 | 9,93 |
| 15 | 37,98 | 30,43 | 30,78 | 16,75 | 10,79 | 11,15 |
| 16 | 41,42 | 31,15 | 31,40 | 19,75 | 12,00 | 12,25 |
| 17 | 44,07 | 31,77 | 31,90 | 22,06 | 13,04 | 13,16 |
| 18 | 45,73 | 32,25 | 32,25 | 23,51 | 13,83 | 13,83 |
| 19 | 46,30 | 29,65 | 29,52 | 24,00 | 9,5 | 9,50 |
| 20 | 45,73 | 29,65 | 29,65 | 23,51 | 9,5 | 9,50 |
| 21 | 44,07 | 29,65 | 29,65 | 22,06 | 9,5 | 9,50 |
| 22 | 41,42 | 29,65 | 29,65 | 19,75 | 9,5 | 9,50 |
| 23 | 37,98 | 29,65 | 29,65 | 16,75 | 9,5 | 9,50 |

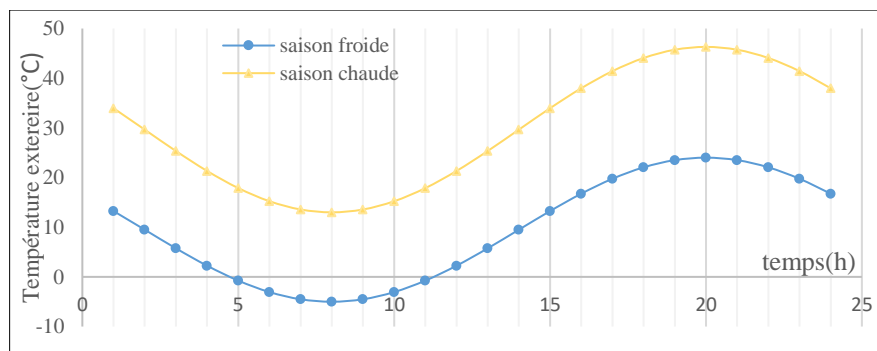


Figure 1.13 : courbe sinusoïdale de la variation de la température sur 24h pour les deux saisons.

Compte tenu des résultats, nous déduisons le gradient de température Δt ; tel que

$$\Delta t = T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} \quad (1.48)$$

Les résultats illustrés dans le tableau 1.23 montrent que, pour la saison froide, les valeurs de Δ_t varient entre 0 °C et 14,5 °C, tandis que pour la saison chaude, elles sont comprises entre 0 °C et 16,78 °C. Ces écarts traduisent des variations thermiques plus importantes en été, en raison d'un ensoleillement plus intense et d'un réchauffement irrégulier de la paroi exposée.

Tableau 1.22 : variation de gradient thermique sur 24h pour les deux saisons

| Δt (saison froide) | Δt (saison chaude) |
|----------------------------|----------------------------|
| 3,753 | 4,31 |
| 0,000 | 0,00 |
| 3,753 | 4,31 |
| 7,250 | 8,33 |
| 10,253 | 11,77 |
| 12,557 | 14,42 |
| 9,676 | 13,48 |
| 9,800 | 13,88 |
| 9,256 | 13,33 |
| 8,081 | 11,88 |
| 6,356 | 9,61 |
| 4,197 | 6,69 |
| 1,753 | 3,31 |
| 0,811 | 0,29 |
| 3,320 | 3,88 |
| 5,602 | 7,19 |
| 7,503 | 10,02 |
| 8,892 | 12,17 |
| 9,676 | 13,48 |
| 14,500 | 16,78 |
| 14,006 | 16,08 |
| 12,557 | 14,42 |
| 10,253 | 11,77 |
| 7,250 | 8,33 |

La variation de gradient thermique Δt , sera utilisée pour évaluer les effets thermiques sur le calcul des contraintes dans les aciers de la paroi du réservoir. Cette valeur sera remplacée dans les formules de calcul pour chacune des quatre bandes (de la bande I au fond jusqu'à la bande IV en haut). L'objectif est de déterminer les contraintes thermiques, en tenant compte de la section d'acier propre à chaque bande. Le calcul est présenté pour la bande I du fond dans le tableau 1.24 (saison froide) et le tableau 1.25 (saison chaude) et illustré pour toutes les bandes par les figures 1.14 et 1.15. Les résultats montrent la sensibilité des aciers à l'effet saisonnier et journalier température. Les contraintes de traction augmentent en fonction du gradient de température enregistré sur 24h d'une manière plus réaliste et atteint des valeurs plus importantes en période estivale où les gradients de température sont plus marqués. Pour la bande du fond les contraintes de traction dans aciers avoisinent la contrainte admissible pendant la tranche horaire 5h à 7h. Ces résultats montrent que le fascicule74 surestime le gradient de température; ce qui induit, par conséquent une surestimation des contraintes de traction dans les aciers.

Tableau 1.23 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoir (aciers -béton) pour la bande I sous l'effet thermique en saison froide

| Temps (h) | Hydrostatique | | Hydrodynamique | | Effet thermique | | | | Effort de traction a l'ELS | | | Vérification des contrainte dans le béton | | Vérification des contraintes dans les aciers | | | |
|-----------|---------------|-------------------------|-------------------------|------------|-----------------|-------|---------|--------------|----------------------------|-----------|-----------|---|-----------|--|-----------|-----------|--------------|
| | He | Qi (kg/m ²) | Qi'(kg/m ²) | Tstat(kg) | Tdyn(kg) | ΔT | ε | σ | Ttemp(kg) | T5(kg) | T5(kg) | T6(kg) | σbt5(Mpa) | σadmb(Mpa) | σst5(Mpa) | σst6(Mpa) | σstadm1(Mpa) |
| 0-1 | 2,079 | 2 079,482 | 662,84 | 8 629,852 | 2 750,77 | 3,75 | 0,00004 | 750 575,23 | 1 188,43 | 11 380,62 | 12 569,06 | 12 093,68 | 0,8754 | 2,3100 | 79,382 | 76,380 | 160,00 |
| 1-2 | 2,403 | 2 402,957 | 765,94 | 9 972,274 | 3 178,67 | 0,00 | 0,00000 | 0,00 | 0,00 | 13 150,94 | 13 150,94 | 13 150,94 | 1,0116 | 2,3100 | 83,057 | 83,057 | 160,00 |
| 2-3 | 2,726 | 2 726,433 | 869,05 | 11 314,695 | 3 606,57 | 3,75 | 0,00004 | 750 575,23 | 1 188,43 | 14 921,26 | 16 109,69 | 15 634,32 | 1,1478 | 2,3100 | 101,744 | 98,741 | 160,00 |
| 3-4 | 3,050 | 3 049,908 | 972,16 | 12 657,116 | 4 034,46 | 7,25 | 0,00007 | 1 450 000,00 | 2 295,88 | 16 691,58 | 18 987,46 | 18 069,11 | 1,2840 | 2,3100 | 119,919 | 114,119 | 160,00 |
| 4-5 | 3,373 | 3 373,383 | 1 075,27 | 13 999,538 | 4 462,36 | 10,25 | 0,00010 | 2 050 609,67 | 3 246,86 | 18 461,90 | 21 708,76 | 20 410,01 | 1,4201 | 2,3100 | 137,105 | 128,903 | 160,00 |
| 5-6 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 12,56 | 0,00013 | 2 511 473,67 | 3 976,57 | 20 232,22 | 24 208,79 | 22 618,16 | 1,5563 | 2,3100 | 152,895 | 142,849 | 160,00 |
| 6-7 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 9,68 | 0,00010 | 1 935 159,49 | 3 064,06 | 20 232,22 | 23 296,28 | 22 070,65 | 1,5563 | 2,3100 | 147,132 | 139,391 | 160,00 |
| 7-8 | 2,773 | 2 772,643 | 883,78 | 11 506,470 | 3 667,69 | 9,80 | 0,00010 | 1 959 956,08 | 3 103,32 | 15 174,16 | 18 277,49 | 17 036,16 | 1,1672 | 2,3100 | 115,435 | 107,595 | 160,00 |
| 8-9 | 1,848 | 1 848,429 | 589,19 | 7 670,980 | 2 445,13 | 9,26 | 0,00009 | 1 851 184,90 | 2 931,10 | 10 116,11 | 13 047,21 | 11 874,77 | 0,7782 | 2,3100 | 82,402 | 74,997 | 160,00 |
| 9-10 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 8,08 | 0,00008 | 1 616 258,52 | 2 559,12 | 5 058,05 | 7 617,18 | 6 593,53 | 0,3891 | 2,3100 | 48,108 | 41,643 | 160,00 |
| 10-11 | - | - | - | - | - | 6,36 | 0,00006 | 1 271 186,80 | 2 012,75 | - | 2 012,75 | 1 207,65 | - | 2,3100 | 12,712 | 7,627 | 160,00 |
| 11-12 | 0,222 | 221,811 | 70,70 | 920,518 | 293,42 | 4,20 | 0,00004 | 839 485,80 | 1 329,21 | 1 213,93 | 2 543,14 | 2 011,46 | 0,0934 | 2,3100 | 16,062 | 12,704 | 160,00 |
| 12-13 | 0,444 | 443,623 | 141,41 | 1 841,035 | 586,83 | 1,75 | 0,00002 | 350 575,23 | 555,09 | 2 427,87 | 2 982,95 | 2 760,92 | 0,1868 | 2,3100 | 18,839 | 17,437 | 160,00 |
| 13-14 | 0,665 | 665,434 | 212,11 | 2 761,553 | 880,25 | 0,81 | 0,00001 | 162 226,46 | 256,86 | 3 641,80 | 3 898,66 | 3 795,92 | 0,2801 | 2,3100 | 24,623 | 23,974 | 160,00 |
| 14-15 | 0,887 | 887,246 | 282,81 | 3 682,070 | 1 173,66 | 3,32 | 0,00003 | 663 972,69 | 1 051,31 | 4 855,73 | 5 907,04 | 5 486,52 | 0,3735 | 2,3100 | 37,307 | 34,651 | 160,00 |
| 15-16 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | 4 602,588 | 1 467,08 | 5,60 | 0,00006 | 1 120 470,28 | 1 774,11 | 6 069,67 | 7 843,78 | 7 134,13 | 0,4669 | 2,3100 | 49,539 | 45,057 | 160,00 |
| 16-17 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 7,50 | 0,00008 | 1 500 609,67 | 2 376,01 | 4 046,44 | 6 422,45 | 5 472,05 | 0,3113 | 2,3100 | 40,562 | 34,560 | 160,00 |
| 17-18 | 0,370 | 369,686 | 117,84 | 1 534,196 | 489,03 | 8,89 | 0,00009 | 1 778 484,99 | 2 815,99 | 2 023,22 | 4 839,21 | 3 712,81 | 0,1556 | 2,3100 | 30,563 | 23,449 | 160,00 |
| 18-19 | 0,555 | 554,529 | 176,76 | 2 301,294 | 733,54 | 9,68 | 0,00010 | 1 935 159,49 | 3 064,06 | 3 034,83 | 6 098,89 | 4 873,27 | 0,2334 | 2,3100 | 38,519 | 30,778 | 160,00 |
| 19-20 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 14,50 | 0,00015 | 2 900 000,00 | 4 591,75 | 4 046,44 | 8 638,20 | 6 801,49 | 0,3113 | 2,3100 | 54,556 | 42,956 | 160,00 |
| 20-21 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 14,01 | 0,00014 | 2 801 184,90 | 4 435,29 | 5 058,05 | 9 493,35 | 7 719,23 | 0,3891 | 2,3100 | 59,957 | 48,752 | 160,00 |
| 21-22 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | 4 602,588 | 1 467,08 | 12,56 | 0,00013 | 2 511 473,67 | 3 976,57 | 6 069,67 | 10 046,24 | 8 455,61 | 0,4669 | 2,3100 | 63,449 | 53,403 | 160,00 |
| 22-23 | 1,433 | 1 432,532 | 456,62 | 5 945,009 | 1 894,98 | 10,25 | 0,00010 | 2 050 609,67 | 3 246,86 | 7 839,98 | 11 086,84 | 9 788,10 | 0,6031 | 2,3100 | 70,021 | 61,818 | 160,00 |
| 23-24 | 1,756 | 1 756,007 | 559,73 | 7 287,431 | 2 322,87 | 7,25 | 0,00007 | 1 450 000,00 | 2 295,88 | 9 610,30 | 11 906,18 | 10 987,83 | 0,7393 | 2,3100 | 75,196 | 69,396 | 160,00 |

Tableau 1.24 : Résultats de calcul des contraintes dans la paroi du réservoir (aciers -béton) pour la bande I sous l'effet thermique en saison chaude

| Temps(h) | Hydrostatique | | Hydrodynamique | | Effet thermique | | | | | Effort de traction a l'ELS | | | Vérification des contrainte dans le béton | | Vérification des contraintes dans les aciers | | |
|----------|---------------|------------|----------------|------------|-----------------|-------|---------|--------------|----------|----------------------------|-----------|-----------|---|------------|--|-----------|--------------|
| | He | Qi (kg/m²) | Qi'(kg/m²) | Tstat(kg) | Tdyn(kg) | ΔT | ε | σ | Temp(kg) | T5(kg) | T5(kg) | T6(kg) | σbt5(Mpa) | σadmb(Mpa) | σst5(Mpa) | σst6(Mpa) | σstadm1(Mpa) |
| 0-1 | 2,079 | 2 079,482 | 662,84 | 8 629,852 | 2 750,77 | 4,31 | 0,00004 | 861 867,42 | 1 364,65 | 11 380,62 | 12 745,27 | 12 199,41 | 0,8754 | 2,3100 | 80,495 | 77,047 | 160,00 |
| 1-2 | 2,403 | 2 402,957 | 765,94 | 9 972,274 | 3 178,67 | 0,00 | 0,00000 | 0,00 | 0,00 | 13 150,94 | 13 150,94 | 13 150,94 | 1,0116 | 2,3100 | 83,057 | 83,057 | 160,00 |
| 2-3 | 2,726 | 2 726,433 | 869,05 | 11 314,695 | 3 606,57 | 4,31 | 0,00004 | 861 867,42 | 1 364,65 | 14 921,26 | 16 285,91 | 15 740,05 | 1,1478 | 2,3100 | 102,856 | 99,409 | 160,00 |
| 3-4 | 3,050 | 3 049,908 | 972,16 | 12 657,116 | 4 034,46 | 8,33 | 0,00008 | 1 665 000,00 | 2 636,30 | 16 691,58 | 19 327,88 | 18 273,36 | 1,2840 | 2,3100 | 122,069 | 115,409 | 160,00 |
| 4-5 | 3,373 | 3 373,383 | 1 075,27 | 13 999,538 | 4 462,36 | 11,77 | 0,00012 | 2 354 665,58 | 3 728,29 | 18 461,90 | 22 190,19 | 20 698,87 | 1,4201 | 2,3100 | 140,146 | 130,727 | 160,00 |
| 5-6 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 14,42 | 0,00014 | 2 883 864,59 | 4 566,20 | 20 232,22 | 24 798,42 | 22 971,94 | 1,5563 | 2,3100 | 156,619 | 145,083 | 160,00 |
| 6-7 | 3,697 | 3 696,858 | 1 178,38 | 15 341,959 | 4 890,26 | 13,48 | 0,00013 | 2 696 917,76 | 4 270,20 | 20 232,22 | 24 502,42 | 22 794,34 | 1,5563 | 2,3100 | 154,749 | 143,962 | 160,00 |
| 7-8 | 2,773 | 2 772,643 | 883,78 | 11 506,470 | 3 667,69 | 13,88 | 0,00014 | 2 776 326,41 | 4 395,93 | 15 174,16 | 19 570,10 | 17 811,72 | 1,1672 | 2,3100 | 123,598 | 112,493 | 160,00 |
| 8-9 | 1,848 | 1 848,429 | 589,19 | 7 670,980 | 2 445,13 | 13,33 | 0,00013 | 2 666 533,00 | 4 222,09 | 10 116,11 | 14 338,20 | 12 649,36 | 0,7782 | 2,3100 | 90,555 | 79,889 | 160,00 |
| 9-10 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 11,88 | 0,00012 | 2 375 019,78 | 3 760,52 | 5 058,05 | 8 818,57 | 7 314,37 | 0,3891 | 2,3100 | 55,695 | 46,195 | 160,00 |
| 10-11 | - | - | - | - | - | 9,61 | 0,00010 | 1 921 652,88 | 3 042,67 | - | 3 042,67 | 1 825,60 | - | 2,3100 | 19,217 | 11,530 | 160,00 |
| 11-12 | 0,222 | 221,811 | 70,70 | 920,518 | 293,42 | 6,69 | 0,00007 | 1 337 328,51 | 2 117,48 | 1 213,93 | 3 331,41 | 2 484,42 | 0,0934 | 2,3100 | 21,040 | 15,691 | 160,00 |
| 12-13 | 0,444 | 443,623 | 141,41 | 1 841,035 | 586,83 | 3,31 | 0,00003 | 661 867,42 | 1 047,98 | 2 427,87 | 3 475,84 | 3 056,65 | 0,1868 | 2,3100 | 21,952 | 19,305 | 160,00 |
| 13-14 | 0,665 | 665,434 | 212,11 | 2 761,553 | 880,25 | 0,29 | 0,00000 | 58 698,84 | 92,94 | 3 641,80 | 3 734,74 | 3 697,56 | 0,2801 | 2,3100 | 23,587 | 23,353 | 160,00 |
| 14-15 | 0,887 | 887,246 | 282,81 | 3 682,070 | 1 173,66 | 3,88 | 0,00004 | 775 264,88 | 1 227,53 | 4 855,73 | 6 083,26 | 5 592,25 | 0,3735 | 2,3100 | 38,420 | 35,319 | 160,00 |
| 15-16 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | . | 1 467,08 | 7,19 | 0,00007 | 1 438 997,89 | 2 278,46 | 6 069,67 | 8 348,12 | 7 436,74 | 0,4669 | 2,3100 | 52,724 | 46,968 | 160,00 |
| 16-17 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 10,02 | 0,00010 | 2 004 665,58 | 3 174,11 | 4 046,44 | 7 220,56 | 5 950,91 | 0,3113 | 2,3100 | 45,603 | 37,584 | 160,00 |
| 17-18 | 0,370 | 369,686 | 117,84 | 1 534,196 | 489,03 | 12,17 | 0,00012 | 2 433 718,62 | 3 853,46 | 2 023,22 | 5 876,68 | 4 335,30 | 0,1556 | 2,3100 | 37,115 | 27,380 | 160,00 |
| 18-19 | 0,555 | 554,529 | 176,76 | 2 301,294 | 733,54 | 13,48 | 0,00013 | 2 696 917,76 | 4 270,20 | 3 034,83 | 7 305,03 | 5 596,95 | 0,2334 | 2,3100 | 46,136 | 35,349 | 160,00 |
| 19-20 | 0,739 | 739,372 | 235,68 | 3 068,392 | 978,05 | 16,78 | 0,00017 | 3 355 881,90 | 5 313,58 | 4 046,44 | 9 360,02 | 7 234,59 | 0,3113 | 2,3100 | 59,115 | 45,691 | 160,00 |
| 20-21 | 0,924 | 924,214 | 294,59 | 3 835,490 | 1 222,56 | 16,08 | 0,00016 | 3 216 533,00 | 5 092,94 | 5 058,05 | 10 150,99 | 8 113,82 | 0,3891 | 2,3100 | 64,110 | 51,244 | 160,00 |
| 21-22 | 1,109 | 1 109,057 | 353,51 | 4 602,588 | 1 467,08 | 14,42 | 0,00014 | 2 883 864,59 | 4 566,20 | 6 069,67 | 10 635,87 | 8 809,39 | 0,4669 | 2,3100 | 67,173 | 55,637 | 160,00 |
| 22-23 | 1,433 | 1 432,532 | 456,62 | 5 945,009 | 1 894,98 | 11,77 | 0,00012 | 2 354 665,58 | 3 728,29 | 7 839,98 | 11 568,27 | 10 076,96 | 0,6031 | 2,3100 | 73,061 | 63,643 | 160,00 |
| 23-24 | 1,756 | 1 756,007 | 559,73 | 7 287,431 | 2 322,87 | 8,33 | 0,00008 | 1 665 000,00 | 2 636,30 | 9 610,30 | 12 246,60 | 11 192,08 | 0,7393 | 2,3100 | 77,346 | 70,686 | 160,00 |

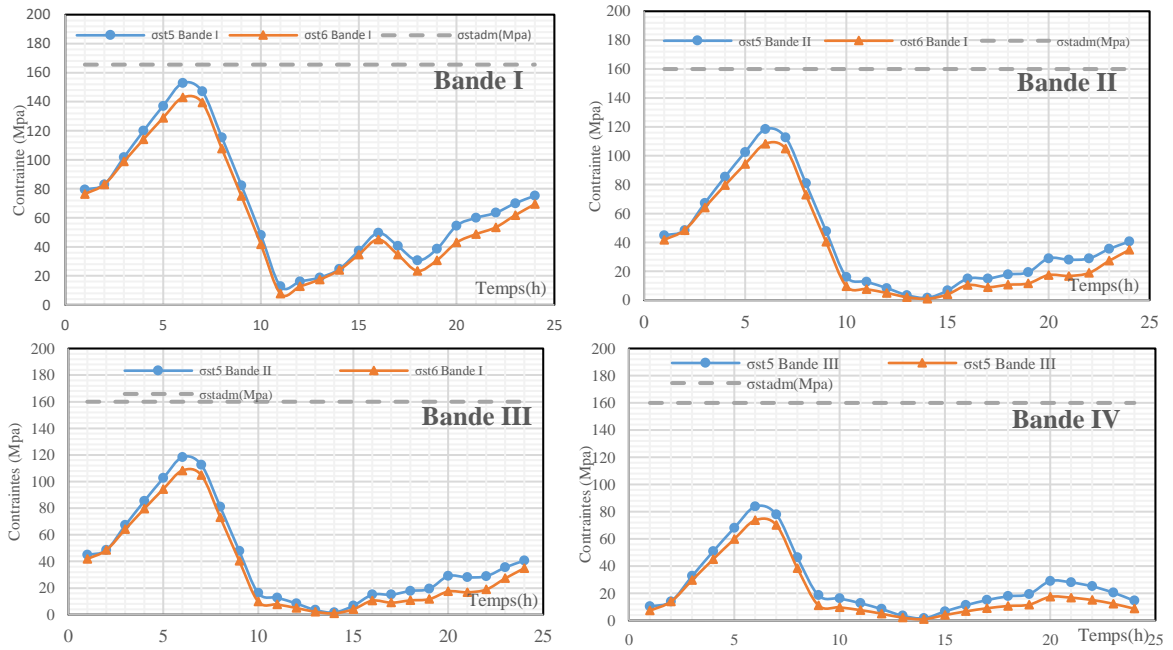


Figure 1.14 : Variation de la température selon 24h pour les 4 bande a la saison froide

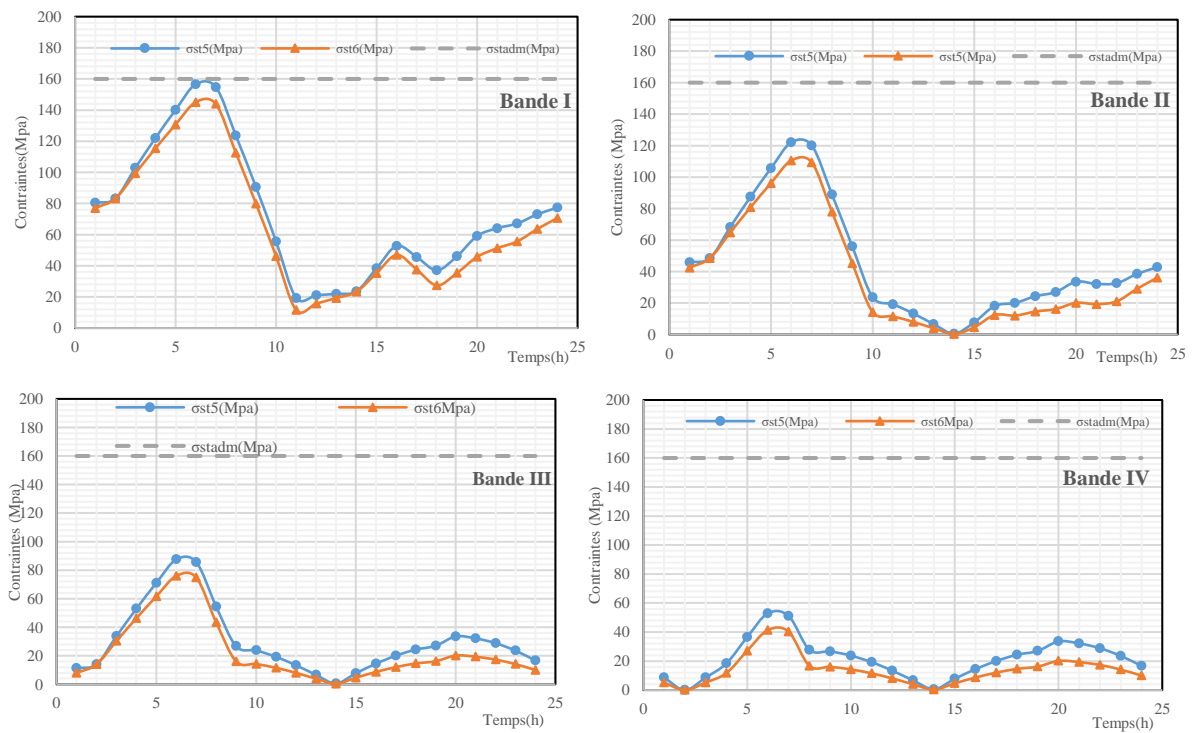


Figure 1.15 : Variation de la température selon 24h pour les 4 bande a la saison chaude

Conclusion

L'étude déterministe menée sur la paroi du réservoir a mis en évidence le comportement mécanique du béton et de l'acier. Les résultats de l'analyse ont montré que :

- Sous l'effet de la seule pression hydrostatique, les contraintes restent dans les limites admissibles, aussi bien pour le béton que pour l'acier.
- L'ajout de l'action hydrodynamique augmente sensiblement les contraintes bien que celles-ci restent maîtrisées.
- L'introduction d'une variation journalière de la charge d'eau illustre que les contraintes varient sensiblement en fonction de la hauteur d'eau et atteignent des contraintes maximales entre 5 et 7 heures, correspondant à la charge maximale dans le réservoir et à la période creuse d'exploitation.
- L'intégration de l'effet thermique, conformément au fascicule 74, s'est révélée particulièrement critique. L'application d'un gradient de température $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$ a mis en évidence des dépassements de la contrainte admissible de l'acier dans la bande inférieure.
- L'étude saisonnière de la température sur 24 heures a révélé la sensibilité thermique de la structure, notamment en période estivale où les gradients de température sont plus marqués. Les résultats des contraintes s'avèrent plus réalistes.

Ce travail de recherche nous a permis d'analyser les contraintes de traction dans la paroi du réservoir de stockage posé au sol, dans le béton les aciers. Différentes charges sont considérées ; à savoir les charges hydrostatiques, les charges hydrodynamiques et l'effet thermique. Deux approches complémentaires, déterministe et fiabiliste ont été développées, afin de mieux appréhender la problématique et ses conséquences sur l'état du réservoir.

L'analyse déterministe menée sur la paroi du réservoir a permis d'identifier les contraintes de traction ainsi que leur impact sur le comportement mécanique du béton et de l'acier. Les résultats ont montré que, sous l'effet de la seule charge hydrostatique, les contraintes restent dans les limites admissibles, aussi bien pour le béton que pour l'acier. Toutefois, l'ajout de la charge hydrodynamique augmente sensiblement les sollicitations, bien que les contraintes restent maîtrisées. L'introduction d'une variation journalière de la charge d'eau dans le réservoir, permettant de reproduire des conditions d'exploitation plus réalistes, induit une variation sensible des contraintes en fonction de la hauteur d'eau. Ces contraintes atteignent des valeurs maximales entre 5 et 7 heures, correspondant à la charge maximale dans le réservoir et à la période creuse d'exploitation, ces contraintes restent tout de même inférieures aux contraintes admissibles. Par ailleurs, l'intégration de l'effet thermique s'est révélée particulièrement critique. L'application d'un gradient de température $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, tel que dicté par le Fascicule 74 a mis en évidence des dépassements de la contrainte de traction admissible dans les aciers ; pour la bande du fond. L'étude de l'effet saisonnier de la température sur 24 heures a donné une répartition plus réaliste des contraintes et a illustré la sensibilité thermique de la structure, notamment en période estivale où les gradients de température sont plus marqués. Ces résultats soulignent la nécessité de prendre en compte l'effet de la température combiné à la variation de la charge dans le réservoir dans la conception et le dimensionnement des réservoirs en béton armé, afin de garantir leur sécurité et leur durabilité à long terme.

En perspective, il serait intéressant d'introduire l'effet stochastique de la température sur le calcul des contraintes.

1. Aliche, A. (2016). *Contribution à l'analyse de la vulnérabilité des réservoirs en béton dans leur cycle de vie* [Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
2. Aliche, A., Hammoum, H., & Bouzelha, K. (2019). Mecano-reliability analysis applied to RC tank under seismic loads according to the Algerian seismic standard. *Asian Journal of Civil Engineering*.
3. Amazouz, L. (2018). *Analyse mécano-fiabiliste d'un réservoir posé au sol en béton armé vis-à-vis de l'aléa corrosion* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
4. ASHRAE. (2004). *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
5. Augusti, G., & Ciampoli, M. (2000). Heritage buildings and seismic reliability. *Progress in Structural Engineering and Materials*.
6. Aoues, Y. (2008). *Optimisation fiabiliste de la conception et de la maintenance des structures* [Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal – Clermont II, France].
7. Azzam, M., & Awad, A. (1996). Entropy measures and some distribution approximations. *Microelectronics Reliability*.
8. BAEL. (1999). *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites*.
9. Bastidas-Arteaga, E., Chateauneuf, A., Sánchez-Silva, M., Bressolette, P., & Schoefs, F. (2010). Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: A stochastic approach. *Structural Safety*.
10. Ben Abderrahmane, A. (2015). *Analyse fiabiliste d'un réservoir circulaire posé au sol, en béton armé* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
11. Boéro, J., Capra, B., Schoefs, F., Bernard, O., & Lasne, M. (2006). Analyse de risques pour la maintenance des structures portuaires : exemple de quais gabions soumis à la corrosion. *IXe Journées Génie Civil - Génie Côtier*.
12. Dehmous, H. (2007). *Fiabilité et micromécanique des matériaux composites – Application à la passerelle de Laroin* [Thèse de doctorat, INP Toulouse].
13. Douglas, J. A. (2001). *Imperial College of Science, Technology and Medicine, Civil Engineering*.
14. Dupont, A. (1979). *Hydraulique urbaine*. Éditions Eyrolles, Paris.
15. Eurocode 8. (2004). *Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*. European Committee for Standardization, Brussels.

16. Fascicule 74. (1998). *Construction des réservoirs en béton – Cahier des clauses techniques générales*. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Paris.
17. Hammoum, H. (2012). *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des réservoirs en béton armé – Développement de méthodes d'aide à l'expertise* [Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
18. Hammoum, H. (Cours). *Parois des réservoirs* [Support de cours Master 1 CHA, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Département de Génie Civil].
19. Hammoum, H., Aliche, A., Bouzelha, K., Aoues, Y., Amiri, O., & Mehani, Y. (2021). Fragility analysis of concrete elevated water tanks under seismic loads. *Frattura ed Integrità Strutturale*.
20. Hammoum, H., Bouzelha, K., & Hannachi, N. E. (2010). Analyse hydrodynamique d'un réservoir circulaire en béton armé posé au sol. *Annales du BTP*, Édition Eska, n° 2–3, Paris, 13–22.
21. Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 381–387.
22. Lemaire, M., Châteauneuf, A., & Mitteau, J. C. (2005). *Fiabilité des structures – Couplage mécano-fiabiliste*. Éditions Lavoisier.
23. Mathieu, G. (2003). Méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques en béton appliquée à un patrimoine. *Annales du BTP*.
24. Matlab. (2010). *MATLAB – The Language of Technical Computing*. The MathWorks Inc.
25. Microsoft Excel. (2016).
26. Miloudi, M. (2018). *Contribution à l'analyse de la fiabilité des réservoirs en béton armé soumis aux sollicitations hydrauliques et environnementales* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
27. Miloudi, N. (2014). *Contribution à l'étude de la vulnérabilité des réservoirs en béton par analyse en composantes principales* [Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
28. Miloudi, N. (2024). *Analyse de la durée de vie d'un réservoir surélevé à l'aide des approches paramétrique et fiabiliste* [Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou].
29. Miloudi, N., Hammoum, H., Bouzelha, K., Metna, B., & Pantet, A. (2015). Principal Component Analysis of the Vulnerability Index for the Natural Hazards of Water Storage Tanks. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*.

30. Nguyen, X. S. (2007). *Algorithmes probabilistes pour la durabilité et la mécanique des ouvrages de Génie Civil* [Thèse, INSA Toulouse].
31. Peyras, L. (2003). *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages – Développement de méthodes d'aide à l'expertise* [Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal – Clermont II].
32. Prez-Gómez, R. (2011). *Thermal analysis of concrete structures under climatic effects* [Thèse de doctorat, Universidad Politécnica de Madrid].
33. Règlement Parasismique Algérien (RPA 99, version 2003). *Document Technique Réglementaire DTR-BC 2.48*, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Ministère de l'Habitat, Alger.
34. Seltzer, P. (1913–1938). *Le climat de l'Algérie*.
35. Serre, D. (2005). *Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations – Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique* [Thèse, Université de Marne-la-Vallée].
36. Westergaard, H. M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. *Transactions of the ASCE*, 98, 418–472.
37. Wu, X. (2003). Calculation of maximum entropy densities with application to income distribution. *Journal of Econometrics*.