

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOHAMED EL-BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU  
ARRERIDJ  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LATECHNOLOGIE

Département de GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master Filière

: Génie Civil– Spécialité : Structures.

**Développement des abaques de dimensionnement  
des réservoirs en béton armé sous chargement  
hydrodynamique.**

Présenté par :

**BOUDJEMLINE Mokhtar Khalil**

Devant le jury composé de:

M. ROKBANE. A. El Madjid      MCA      Encadreur      Université de BBA

M.LOGZIT Nacer      MCA      Co-encadreur      Université de BBA

---

M.      Examineur      Université de BBA

---

M.      Président      Université de BBA

2024/2025.

## *Remerciements*

Tout d'abord nous rendons grâce à Dieu, lui qui nous a permis d'être bien portant afin d'effectuer ce travail du début jusqu'à la fin.

Je tiens à remercier mes parents respectifs pour leurs soutiens durant mon parcours de formation.

Mes remerciements vont, à mes directeurs de mémoire, Mr ROKBANE A EL Madjid et Mr Logzit Nacer, qui m'ont guidé avec ses orientations, ses conseils et ses critiques tout au long de ce travail de recherche en me laissant la liberté dont on avait besoins. On ne peut que lui être reconnaissant surtout pour leur qualités intellectuelles et humaines.

Et enfin, je suis reconnaissant envers tous les enseignants de l'Université MOUHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI à BBA pour leur contribution à notre formation, et également à mes camarades, amis, pour leurs aides précieuses.

# *Dédicace*

*A ma très chère mère*

*Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait  
exprimer la profondeur des sentiments que  
j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables  
et votre dévouement firent pour moi un  
encouragement.*

*Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de  
tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été  
d'un grands cours pour mener à bien mes études.*

*Vous m'avez aidé et soutenu pendant de  
nombreuses années avec à chaque fois une  
attention renouvelée.*

*Puisse Dieu, tout puissant vous combler des santé,  
de bonheur et vous procurer une longue vie.*

## Résumé

Ce mémoire étudie l'élaboration d'abaques de dimensionnement pour les réservoirs circulaires en béton armé soumis aux effets hydrodynamiques et sismiques. Les paramètres clés analysés sont le diamètre du réservoir, la hauteur d'eau, la zone sismique (RPA 2003/2024), avec le type de sol (S1 à S4). Les résultats principaux portent sur la Modélisation graphique des moments de flexion et efforts tranchants à la base, avec la hauteur des vagues générées sous charges sismiques. Les abaques prédictifs retenues pour le dimensionnement rapide, intégrant les exigences du RPA. L'étude révèle des écarts significatifs entre le RPA 2003 et 2024, notamment une augmentation de 30 à 60% des efforts et de la hauteur des vagues dans la version 2024 pour les cas critiques, nécessitant un renforcement des ancrages et du ferrailage. Les abaques proposés offrent un outil pratique pour les ingénieurs, combinant rigueur normative et efficacité opérationnelle.

## المخلص

يتناول هذا البحث تطوير جداول تصميم الخزانات الدائرية المصنوعة من الخرسانة المسلحة . و التي تتأثر بالتفاعلات الهيدروديناميكية و القوى الزلزالية. تشمل دراسة العوامل الرئيسية مثل قطر الخزان , ارتفاع المياه, المنطقة الزلزالية وفقا لكود قواعد الزلزالية الجزائرية 2003.2024 بالإضافة الى طبيعة التربة , تركيز نتائج على تحليل بياني لعزوم الانحناء و قوي القص عند القاعدة , الى جانب ارتفاع الامواج الناتجة عن الاحمال الزلزالية. تم تطوير جداول توقيعية تسهل عملية التصميم الهندسي مع ضمان الالتزام بالمتطلبات التنظيمية لكود قواعد الزلزالية الجزائرية . يبرز البحث تفاوتات ملحوظا بين اصدار 2003 و اصدار 2024 , حيث اظهرت التحديثات الجديدة زيادة تتراوح بين 30 بالمئة و 60 بالمئة في القوى المؤثرة و ارتفاع الامواج في الحالات الحرجة , مما يستدعي تعزيز انظمة التثبيت والتسليح لضمان سلامة المنشآت , توفر الجداول المقترحة اداة عملية تجمع بين الدقة الهندسية و الفاعلية التشغيلية , مما يساهم في تحسين تصاميم الخزانات و تعزيز مقاومتها للاحمال الزلزالية.

## Abstract

This thesis addresses the development of design charts (abacuses) for circular reinforced concrete tanks subjected to hydrodynamic and seismic effects. The key parameters analyzed include the tank diameter, water height, seismic zone according to RPA 2003 and RPA 2024 standards, and soil type (S1 to S4). The study primarily focuses on the graphical modeling of base bending moments and shear forces, as well as the height of waves generated under seismic loads. The predictive charts developed enable rapid design in accordance with RPA requirements. The study reveals significant differences between the RPA 2003 and RPA 2024 editions, with a 30% to 60% increase in forces and wave heights observed in the 2024 version for critical cases, necessitating the strengthening of anchors and reinforcement in the design. The proposed charts serve as a practical tool for engineers, combining normative rigor and operational efficiency.

# SOMMAIRE

<b>I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES RESERVOIRS .....</b>	<b>3</b>
I. Recherche bibliographique sur les réservoirs. ....	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Généralités sur les réservoirs .....	5
I.3 Les types des réservoirs .....	5
I.4 Équipements d'un réservoir.....	7
I.5 Les effets à prendre en compte .....	9
I.6 l'étude d'un réservoir.....	10
I.7 Les risques dans un réservoir .....	10
I.8 Conclusion .....	11
<b>II. Les méthodes de calcul hydrodynamique .....</b>	<b>12</b>
II.1 Introduction.....	13
II.2 Définition de l'hydrodynamique .....	13
II.3 Les lois principales de l'hydrodynamique.....	13
II.4 L'utilité de calcul hydrodynamique .....	14
II.5 Modèles physiques de l'hydrodynamique .....	14
II.6 Méthode de Jacobsen et Ayre .....	14
II.7 Méthode Hunt & Priestley .....	15
II.8 Méthodes aux états-limite (Housner).....	16
II.10 Modèles d'analyse du comportement.....	20
II.11 Conclusion .....	21
<b>III. LES PARAMETRES DE CALCUL HYDRODYNAMIQUE .....</b>	<b>22</b>
III.1 Introduction .....	23
III.2 Paramètre spatial:.....	23
III.3 La méthode de calcul de l'accélération $A_m$ : .....	23
III.4 Paramètre géométrique.....	26
III.5 Calcul des actions d'impulsion. ....	26
III.6 Calcul des actions d'oscillation. ....	27
III.7 Conclusion:.....	27
<b>IV. Analyse hydrodynamique d'un réservoir .....</b>	<b>28</b>
.....	.....
IV.1. Introduction .....	29
IV.2. Données de Base.....	29
IV.3. Calcul de la masse d'eau .....	29
IV.4. Décomposition de la masse .....	29
IV.5. Spectre de réponse et accélérations .....	30
IV.6. Calcul des forces hydrodynamiques .....	30
IV.7. Calcul des efforts .....	30
IV.8. Schéma Explicatif.....	30
IV.9 Organigramme de calcul .....	31
IV.10 Conclusion:.....	33
<b>V. Simulations numériques des effets Hydrodynamiques.....</b>	<b>34</b>
V.1 Introduction .....	35
V.2 Résultats des Calculs Hydrodynamiques RPA 2003 .....	35
V.3. Tableau des Résultats RPA 2003.....	36
V.5. Recommandations.....	37

V.6 Calcul Hydrodynamique des Réservoirs selon la Méthode de Housner (RPA 2024) .....	37
V.7 Tableau des Résultats (RPA 2024) .....	38
V.8. Comparaison RPA 2003 et RPA 2024 .....	39
V.9 Formules Adaptées (RPA 2024) .....	39
V10 .Recommandations Spécifiques RPA 2024 .....	40
V.11 Conclusion .....	40
<b>VI.Comparaison entre le RPA 2003 et le RPA 2024 .....</b>	<b>41</b>
VI.1 Introduction: .....	42
VI.2 Modélisation de l'Action Sismique:.....	42
VI 3. Méthodes d'Analyse Hydrodynamique .....	42
VI 4. Paramètres de Conception.....	43
VI.5 Exigences de Ductilité et Déroulement .....	43
VI.6 Autres Considération .....	43
VI.7 Comportement hydrodynamique .....	43
VI.8 Interprétation des trois figures.....	46
VI.9 Exemple Numérique .....	48
VI.10 Hauteur de vagues.....	48
VI.11 Observations : .....	49
VI.12 Abaque de calcul des effets hydrodynamiques .....	49
VI.13 Exemple d'abaque de simulation de la hauteur de vague dans diverses situations .....	51
VI.12 Conclusion.....	54
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>55</b>
Conclusion générale .....	56
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>58</b>

## Liste des figures

Figure. I.1. Réservoir circulaire posé au sol en béton armé .....	7
Figure. I.2.. Équipement d'un réservoir d'eau potable. ....	8

Figure II-1 Système mécanique et physique équivalent des pressions d'impulsion. ....	18
Figure II-2 Système mécanique et physique équivalent des pressions d'oscillation. ....	18
FigureII-3 Modèle à une masse passive $M_i$ (impulsion) et une masse active $M_0$ (oscillation). ....	19
FigureII-Modèle de Westergaard .....	19
Figure V.1 Organigramme de calcul Selon la méthode de Housner .....	32
Figure VI.1:Force impulsive $F_i$ vs diamètre $D$ pour plusieurs hauteurs.....	44
Figure VI.2.:Force convective $F_c$ vs hauteur $H$ pour plusieurs diamètres.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 5
Figure VI .3.:Moment en base $M$ vs diamètre $D$ pour une hauteur fixée .....	46
Figure VI .4 Comparaison de $D_{max}$ Selon la zone sismique .....	49
Figure VI.5. Abaque de dimensionnement des réservoirs circulaires soumis aux effets hydrodynamiques. Hauteur max des vagues $d_{max}$ en fonction de $D$ , $H$ , zone sismique et type de sol suivant RPA 2024.....	52

## Liste des tableaux

Tableau III. 1 Coefficient d'accélération de sol $A$ .....	24
Tableau III.2 Pourcentage d'amortissement $\zeta$ critique.....	24
Tableau III 3 Les périodes caractéristique $sT_1, T_2$ .....	25
Tableau V.1 Résultats des Calculs Hydrodynamiques RPA 2003.....	36
Tableau V.2 Résultats des Calculs Hydrodynamiques RPA 2024.....	38
Tableau V.3 Comparaison RPA 2003 vs RPA 2024.....	38

## La listes des symboles

$v$  : la vitesse de l'écoulement

$Z$  : la hauteur géométrique de fluide

$P$  : la pression appliquée sur le fluide  $\Omega$

$\rho$  : le poids volumique de fluide

$\Delta h$  : la perte de charge.  $R$

$r$  : rayon de la cuve.

$h$  : hauteur de liquide.

$A_m$  : Accélération maximale du sol.

$\sigma_i$  et  $\sigma_0$  : des coefficients des pressions d'impulsion et de d'oscillation respectivement.

$D_{max}$  : la hauteur max de vague.

$G$  : l'accélération de pesanteur

$R_i$  : le rayon intérieur de réservoir

$g$  : l'accélération de pesanteur

$R$  : coefficient de comportement globale de la structure

$Q$  : facteur de qualité de la structure pour un réservoir circulaire

A : le coefficient d'accélération de zone

$\mu$  : le facteur de correction d'amortissement

$\zeta$  désigne le pourcentage d'amortissement critique

T1, T2 des périodes caractéristiques en fonction de catégorie du site T

T : la période fondamentale

HT : représente la hauteur de la structure

P : la répartition uniforme de poids de l'ouvrage

E : le module d'élasticité de béton.

$I_x$  : le moment d'inertie de l'ouvrage sur l'axe horizontale

$M_e$  : la masse de l'eau dans le réservoir

$H_e$  : la hauteur de l'eau dans le réservoir

$M_o$  : la fraction de l'eau dans le réservoir qui est en vibration  $\Phi_o$

$\Phi_o$  : l'angle maximal d'oscillation de la surface libre

# INTRODUCTION

## GENERALE

# Introduction générale

Depuis l'aube de l'histoire, les ressources en eau potable ont constitué un élément fondamental pour le développement et la pérennité des civilisations. L'accès à une eau de qualité en quantité suffisante a nécessité la mise en place de systèmes hydrauliques performants, tels que les réseaux de distribution et les réservoirs de stockage. Face à l'explosion démographique, il est devenu indispensable de moderniser ces infrastructures afin de répondre à la demande croissante en eau.

Les réservoirs représentent des ouvrages hydrauliques majeurs, ayant connu un développement considérable dans leur conception et leur réalisation. En génie civil, les réservoirs en béton armé occupent une place particulière parmi les constructions hydrauliques, en raison de leur capacité à assurer un approvisionnement régulier et durable en eau. Cependant, ces ouvrages sont exposés à des conditions environnementales sévères, notamment les variations climatiques et les sollicitations hydrodynamiques, ce qui entraîne leur vieillissement et leur dégradation au fil du temps.

Pour évaluer le niveau de dégradation et de vieillissement potentiel de ces structures, des méthodes de diagnostic déterministes sont utilisées, principalement basées sur l'évaluation de l'indice de vulnérabilité (Iv) aux aléas naturels. Par ailleurs, la conception traditionnelle s'appuie sur les coefficients partiels de sécurité recommandés par les codes de calcul, tels que le RPA.

Malgré ces avancées, de nombreux ingénieurs de bureaux d'études négligent l'importance du calcul hydrodynamique des réservoirs, ce qui peut engendrer des risques importants pour la sécurité de l'ouvrage. C'est pourquoi cette étude vise à sensibiliser les ingénieurs à la nécessité de prendre en compte cette étape essentielle, et à faciliter le calcul hydrodynamique grâce à la méthode analytique de Housner.

CHAPITRE I  
RECHERCHE  
BIBLIOGRAPHIQUE  
SUR LES RESERVOIRS

# **I. Recherche bibliographique sur les réservoirs.**

## **I.1 Introduction**

Les réservoirs sont des structures destinées à stocker des fluides (eau potable, pétrole...etc.)ils sont considérés comme des ouvrages d'art hydrauliques qui occupent une place très particulière parmi les constructions, ces ouvrages doivent être étanche et sont généralement béton armé ou en béton précontraint.

Le comportement mécanique hyperstatique de ces ouvrages et le comportement particulier à l'effet hydrodynamique font d'eux des structures complexes. Où l'implantation des réservoirs qui respectent les considérations hydrauliques liées à la pression de service souhaitée dont la solution est obtenue par un compromis avec les contraintes topographiques. Il vient alors que les sites privilégiés pour cette implantation sont à un niveau suffisant pour qui sont généralement des sommets des collines ou des monticules pour le but d'assurer la charge hydraulique nécessaire aux abonnés. C'est pour cette raison, que les réservoirs sont soumis à des conditions naturelles très rudes. Parmi ces conditions, on peut citer les catastrophes naturelles telles que la neige, le vent et aussi les séismes. Ces ouvrages subissent aussi de fortes variations de surcharge d'exploitation (eau contenue dans la cuve), de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur longue période de vie, ainsi que l'effet hydrodynamique suite à une excitation sismique. De ce fait, on constate que les réservoirs sont soumis à un régime qui demande un soin particulier apporté à leur conception, lors de la phase étude.

Pour cela nous consacrons ce premier chapitre à la définition des réservoirs vis à vis de certains aléas.

## I.2 Généralités sur les réservoirs

Que ça soit rectangulaire ou circulaire, on peut classer les réservoirs selon leur position par rapport au sol en trois types ; à savoir le réservoir surélevé, le réservoir au sol ou le réservoir semi-enterré. Lorsque la topographie permet de disposer d'un point haut, on construit un réservoir au sol. En revanche, lorsque le terrain ne présente pas de point suffisamment élevé, on opte pour un réservoir surélevé.

Les réservoirs avoir une couverture en coupole ou en dalle plate. La forme en plan peut être quelconque. Cependant la plupart du temps, les petits réservoirs se font carrés ou rectangulaires, mais la forme circulaire est économiquement meilleure.

Lorsque les moyens d'exécution le permettent, on réalise des réservoirs de forme tronconique et cylindre-tronconique à la place de réservoirs cylindriques de grand volume.

## I.3 Les types des réservoirs

1. Un réservoir cylindrique est un type de réservoir utilisé pour le stockage de liquides ou de gaz. Sa forme cylindrique présente plusieurs avantages, notamment une répartition uniforme des forces de pression interne sur les parois, ce qui contribue à sa stabilité structurelle. Voici quelques caractéristiques et avantages des réservoirs cylindriques

- **Forme et conception :**

- ✓ La forme cylindrique permet une construction plus facile et plus économique par rapport à d'autres formes complexes.
- ✓ Les réservoirs peuvent être construits en position verticale ou horizontale en fonction de l'espace disponible et des besoins spécifiques.

## ● **Matériaux de construction :**

- ✓ Les réservoirs cylindriques peuvent être construits en différents matériaux tels que le béton armé, l'acier, la fibre de verre, et le plastique, selon les exigences du fluide stocké et les conditions environnementales.

## ● **Applications courantes :**

1. Stockage d'eau potable, d'eaux usées, de produits chimiques, de carburants, et de gaz.
2. Utilisés dans les stations de traitement des eaux, les installations industrielles, les raffineries de pétrole, et les stations-service.

## ● **Avantages :**

- Répartition uniforme de la pression interne, réduisant les risques de déformation et de rupture.
- Facilité de maintenance et d'inspection grâce à une conception simple.
- Possibilité de personnalisation en termes de taille et de capacité pour répondre aux besoins spécifiques.



Figure. I.1. Réservoir circulaire posé au sol en béton armé [9]

## I.4 Équipements d'un réservoir

Un réservoir unique ou compartimenté doit être équipé de plusieurs composants essentiels :

✓ Conduite d'arrivée (alimentation) : Qu'elle soit de type refoulement ou gravitaire, elle doit de préférence arriver dans la cuve en siphon noyé ou par le bas, toujours à l'opposé de la conduite de départ pour provoquer le brassage. Cette arrivée permet le renouvellement de l'eau par mélange, en créant des perturbations et un écoulement par rouleaux.

✓ Conduite de départ ou conduite de distribution : Cette conduite est placée à l'opposé de la conduite d'arrivée, à quelques centimètres au-dessus du radier (entre 15 et 20 cm) pour éviter l'entrée des matières en suspension. Son extrémité est munie d'une crépine courbée pour prévenir le phénomène de vortex (pénétration de l'air

dans la conduite). Elle doit également être équipée d'une vanne à survites se permettant une fermeture rapide en cas de rupture de la conduite.

✓ Conduite de trop-plein : Cette conduite permet d'évacuer l'excès d'eau arrivant au réservoir, par exemple lorsque la pompe ne s'arrête pas. Si le réservoir est compartimenté, chaque cuve doit avoir sa propre conduite de trop-plein. Ces conduites se réunissent dans une chambre de manœuvre pour former un joint hydraulique, empêchant ainsi la pénétration de corps étrangers.

✓ Conduite de vidange : Cette conduite permet de vider le réservoir en cas de nettoyage ou de réparation. Elle est munie d'un robinet-vanne et se raccorde généralement à la conduite de trop-plein. Le robinet-vanne doit être nettoyé après chaque vidange pour éviter le dépôt de sable qui pourrait compliquer la manœuvre.

✓ Système de matérialisation de la réserve d'incendie : C'est une disposition spéciale de la tuyauterie qui permet d'interrompre l'écoulement une fois que le niveau de la réserve d'incendie est atteint. On distingue le système à deux prises (rarement utilisé car la réserve de sécurité n'est pas convenablement renouvelée) et le système à siphon (renouvellement constant lorsque le niveau d'eau atteint son minimum).

✓ Conduite de by-pass : C'est un tronçon de conduite qui relie la conduite d'arrivée et la conduite de départ dans le cas d'un réservoir unique non compartimenté. Cette conduite fonctionne lorsque le réservoir est isolé pour son entretien.

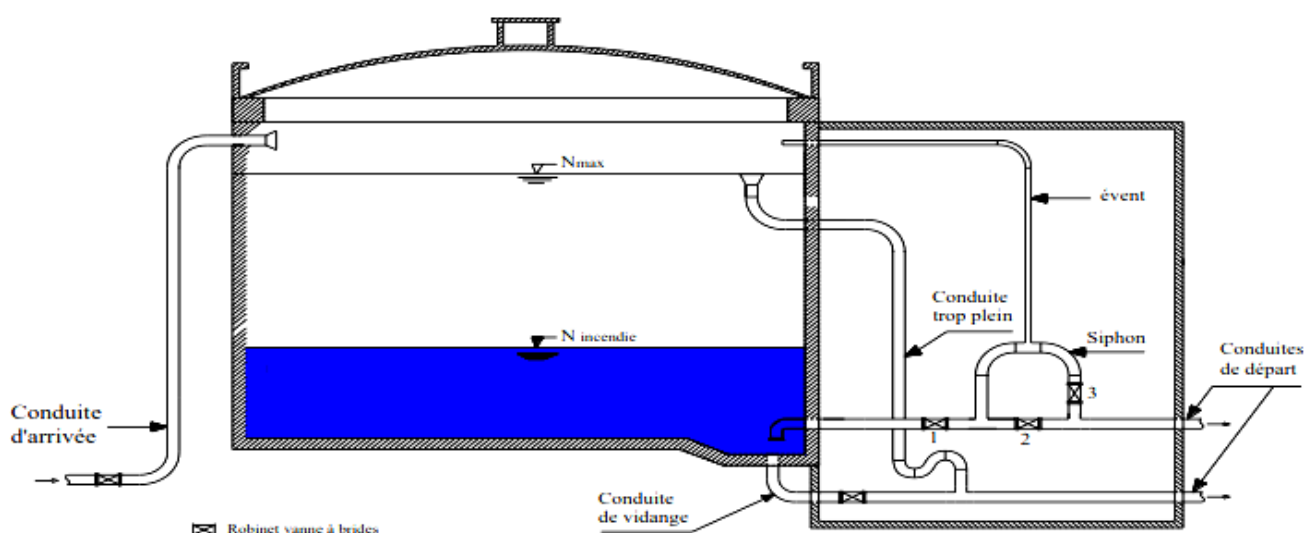


Figure. I.2.. Équipement d'un réservoir d'eau potable. [16]

- **Risque** : Le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences.

Le risque attaché à un danger est donc évalué par une fonction à deux variables. Pour l'obtenir, on recherche :

une mesure de l'occurrence d'un danger (une défaillance dans l'industrie, un état- limite en génie civil).

une estimation des effets ou conséquences du danger s'il se produisait. Cette estimation correspond généralement à un coût humain, économique ou environnemental (nombre de morts, coût économique...)

Le risque est souvent exprimé par la multiplication de ces deux quantités.

Prévention : La seule façon efficace de se protéger contre les catastrophes naturelles reste la prévention. Elle concerne les actions à mener, de manière à diminuer l'impact de ces derniers sur les pertes humaines et aussi sur le plan économique. Diminuer le risque ne peut se faire qu'en diminuant la vulnérabilité, parce que l'aléa découle des contraintes de notre environnement naturel et ne peut être modifié. Le rôle de l'ingénieur est de fournir des procédés de construction ou de réhabilitation qui permettent de réduire la vulnérabilité des nouvelles constructions..ainsi..que..du..bâti..existant.[2]

## **I.5 Les effets à prendre en compte**

L'implantation des réservoirs obéit à des considérations hydrauliques liées à la pression de service souhaitée dont la solution est obtenue par un compromis avec les contraintes topographiques. Il vient alors que les sites privilégiés pour cette implantation sont des sommets de collines et de monticules ; afin d'assurer la charge nécessaire aux abonnés. C'est pour cette raison, que les réservoirs sont soumis à des conditions très rudes. Parmi ces conditions, nous avons les catastrophes naturelles telles que la neige, le vent et aussi les tremblements de terre qui sont les plus terrifiants et les plus destructifs. Ces ouvrages subissent aussi de fortes variations de surcharge d'exploitation (eau contenue dans la

cuve), de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur longue période de vie, ainsi que l'effet hydrodynamique suite à une excitation sismique. De ce fait, on constate que les réservoirs sont soumis à un régime sévère qui demande un soin particulier apporté à leur conception, lors de la phase étude. L'évaluation de la vulnérabilité est une approche intéressante pour la lutte contre le vieillissement et la dégradation des réservoirs. Elle représente un élément clé dans les stratégies de prévention, voire de réduction du risque. Elle permet de disposer d'un outil d'aide à la décision dans le cadre de calcul et de leur réalisation. [2]

## **I.6 l'étude d'un réservoir**

- \_ Charge du eau li qui de contenu
- \_ Poids propre de réservoir et de se ouvrages annexes.
- \_ Sur charges diverses d'exploitation
- \_ Influence du retrait
- \_ Variations de température
- \_ Intervention du fluage
- \_ Effets climatiques:neige et vent
- \_ Influence des séismes.

## **I.7 Les risques dans un réservoir**

Pas mal de facteurs peuvent diminuer les performances de stockage d'un réservoir, influencer la qualité des eaux, et peuvent aller jusqu'au risque d'une rupture totale de réservoir, et pour cela on doit prévisionner ces risques dans le but d'anticiper et réagir contre ces risques, la connaissance de ces facteurs est indispensable.

### **La corrosion des armatures et les défauts d'enrobage**

Les enrobages ponctuels aux limites sont vulnérables et peuvent mettre le risque d'un contact direct

des armatures avec de l'eau dans un réservoir. Si les défauts d'enrobage sont plus généralisés et/ou si la carbonatation de la pâte de ciment est plus importante, les travaux de ragréage devront être complétés par la mise en œuvre d'un inhibiteur de corrosion. [1]

### **La corrosion des équipements métallique**

La sollicitation hydrostatique et le contact direct avec l'eau cause une désintégration par électrolyse ou une attaque chimique aux pièces métallique dans le réservoir ce qui engendre des maladies de transmission hydrique et des pertes d'eau au niveau de la robinetterie et l'accumulation de l'eau dans la chambre des vannes ce qui fait une difficulté de l'entretien et une augmentation de taux de l'humidité qui peut pénétre aussi dans la masse de béton de radier. [1]

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre on a introduit des généralités sur les réservoirs selon leurs différentes positions et géométries, ainsi leurs composants comme la tuyauterie et les vannes les plus utilisées, avec une présentation des risques plus communs dans les réservoirs en béton armé.

# CHAPITRE II

## Les méthodes de calcul hydrodynamique

## II.1 Introduction

Les fluides dans un réservoir en bétons appliquent deux forces dont la force principale et tel de la pression hydrostatique due à la pesanteur de fluide, la deuxième force particulière et telle de l'effet hydrodynamique due au mouvement de fluide.

Pour l'étude de l'effet hydrodynamique il y a plusieurs méthodes et modèles physique et mathématique qui décrit la circulation de l'eau dont on va introduire ces méthodes dans ce chapitre.

## II.2 Définition de l'hydrodynamique

Par définition l'hydrodynamique explique les mouvements des fluides sous l'influence des forces internes et externes qui s'exercent sur le fluide comme la pression ou la gravité et pour l'étude des écoulements de fluide en base sur deux principes fondamentaux

- ◆ Le principe de la conservation de la masse, à partir duquel on établit l'équation de la continuité.
- ◆ Le principe de la conservation de l'énergie qui permet d'obtenir l'équation fondamentale de l'écoulement des fluides

## II.3 Les lois principales de l'hydrodynamique.

-L'équation de Bernoulli : fameuse équation de l'hydrodynamique qui décrit les écoulements des fluides non compressibles en prenant compte de leurs hauteurs géométrique, les pressions appliqués et leurs vitesses par la relation.

$$v^2_1/2g + Z_1 + P_1/\Omega = v^2_2/2g + Z_2 + P_2/\Omega + \Delta h_{1-2}$$

(II.1)

Où :

v : la vitesse de l'écoulement

Z : la hauteur géométrique de fluide

P:la pression appliquée sur le fluide

$\Omega$  : le poids volumique de fluide

$\Delta h$ :la perte de charge.

## II.4 L'utilité de calcul hydrodynamique

- ◆ Les ouvrages hydrauliques en général et les réservoirs de stockage en particulier ne sont pas abordés dans le Règlement Parasismique Algérien, si bien que pour leur conception et calcul.
  - Le RPA 81 fixe à 1000 m<sup>3</sup> la capacité à partir de laquelle il faut tenir compte de l'effet hydrodynamique, en zone II (moyenne sismicité) et zone III (forte sismicité).
  - Le RPA 2003 classe les châteaux d'eau et réservoirs de grande et moyenne importance comme étant des ouvrages de groupe 1B, c'est-à-dire des ouvrages publics d'intérêt national, ayant une importance socioculturelle et économique certaine.

## II.5 Modèles physiques de l'hydrodynamique

Les modèles physiques sont basés sur la modélisation mécanique des processus continus ou discontinus de dégradation du système, à partir des équations mathématiques d'états limites régissant les phénomènes et des modèles mécaniques de comportement de rupture.

## II.6 Méthode de Jacobsen et Ayre

C'est une méthode qui néglige l'effet de temps sur la pression exercée dont elle ne compte que les forces passives de l'impulsion d'où le réservoir a un champ de vitesse proportionnelle à la vitesse relative de sol avant que les oscillations commencent.

Donc cette méthode ne considère que les sollicitations produites par l'impulsion on ne considère qu'une accélération horizontale (pas d'accélération verticale) et suppose que les déplacements sont petits et néglige telles des vagues qui résultent par les oscillations.

La résolution des équations de cette méthode conduit à une résultante des pressions qui est appliquée sur la paroi du réservoir à une hauteur de  $h_i$  de la cuve et qui engendre un moment de

flexion de forme

$$M = \sum F_i \cdot h_i \quad (\text{II.2})$$

De ce fait le modèle mathématique équivalent à la masse totale du fluide M est donné par un système à un seul degré de liberté qui est la masse  $M_i$  à une hauteur  $h_i$ , elle représente la masse impulsive seule. [3]

## II.7 Méthode Hunt & Priestley

Cette méthode prend une relation directe le champ des vitesses en fonction de temps et l'accélération de sol dont elle prit les sollicitations des oscillations et les forces d'impulsion en considération.

résultantes, l'une est celle des pressions d'impulsion de la forme:

$$P_i = -m \cdot a_m \cdot h \cdot R^2 \cdot \sigma_i \quad (\text{II.3})$$

Et l'autre celle des pressions d'oscillation de la forme:

$$P_o = -m \cdot a_m \cdot h \cdot R^2 \cdot \sigma_o$$

D'où :

- ✓ R : rayon de la cuve.
- ✓ h : hauteur de liquide.
- ✓  $a_m$  : accélération maximale du sol.
- ✓  $\sigma_i$  et  $\sigma_o$  sont coefficients des pressions d'impulsion et d'oscillation respectivement,
- ✓ ils sont en fonction de R, H qui est la hauteur de la cuve et la fréquence déterminée à partir de l'accéléromètre. [6]

## II.8 Méthodes aux états-limite (Housner).

L'analyse hydrodynamique des réservoirs circulaires en béton armé sous sollicitations sismiques est essentielle pour garantir la stabilité et la sécurité des infrastructures hydrauliques. La méthode proposée par Housner (1963) reste une référence pour modéliser les effets du fluide sous séisme en séparant les contributions impulsive et convective.

### ✓ Définition des données de base

- Rayon intérieur (R)
- Hauteur d'eau (H)
- Épaisseur de paroi (t)
- Densité du liquide ( $\rho$ )
- Gravité ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

### ✓ Calcul de la masse totale du liquide

Formule :

$$m = \rho \times \pi \times R^2 \times H \quad (\text{II.5})$$

### ✓ Décomposition de la masse liquide

$$\text{Masse impulsive : } m_i = \alpha \times m \quad (\alpha \approx 0,6-0,8) \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Masse convective : } m_c = m - m_i \quad (\text{II.7})$$

### ✓ Calcul de la période propre du sloshing

$$T_c = 2\pi \times \sqrt{(R/g \times \tanh(\pi H/2R))} \quad (\text{II.8})$$

✓ Détermination des accélérations sismiques

Obtenir  $a_i$  pour l'impulsion ( $T \approx 0$ ) et  $a_c$  pour le sloshing ( $T = T_c$ ) à partir du spectre de réponse.

✓ Calcul des forces hydrodynamiques

-  $F_i = m_i \times a_i$  (force impulsive appliquée à  $0,5H$ )

-  $F_c = m_c \times a_c$  (force convective appliquée à  $H$ )

✓ Calcul du moment en base

$$M_{\text{base}} = F_i \times 0,5H + F_c \times H \quad (\text{II.9})$$

✓ Vérifications structurelles

Dimensionnement des parois en béton armé en fonction du moment fléchissant et de l'effort tranchant résultant.[10]

## II.9 Les deux phénomènes pression d'impulsion et pression d'oscillation :

Ces deux phénomènes agissant simultanément, provoquent des fissures inclinées, laissant paraître des suintements qui se manifestent par la présence d'humidité parfois chargée en sels après percolation à travers le béton. [2]

✧ Son système mécanique équivalent est obtenu en considérant une masse  $M_i$  liée rigidement au réservoir à une hauteur  $h_i$ , dont cette masse exerce sur les parois les mêmes efforts horizontaux que la masse d'eau équivalente.

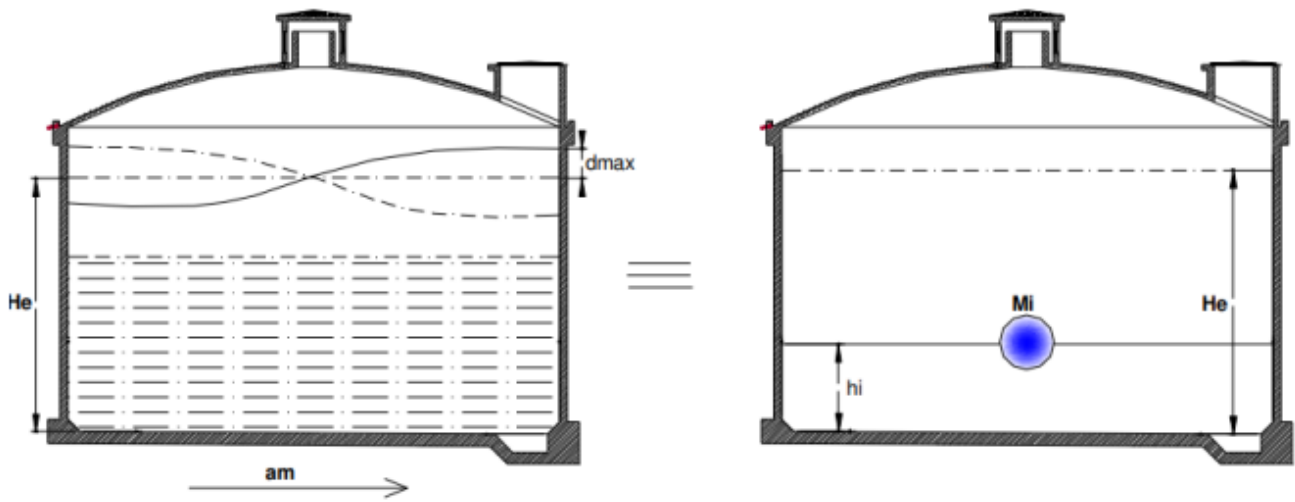


Figure II-1 Système mécanique et physique équivalent des pressions d'impulsion. [1]

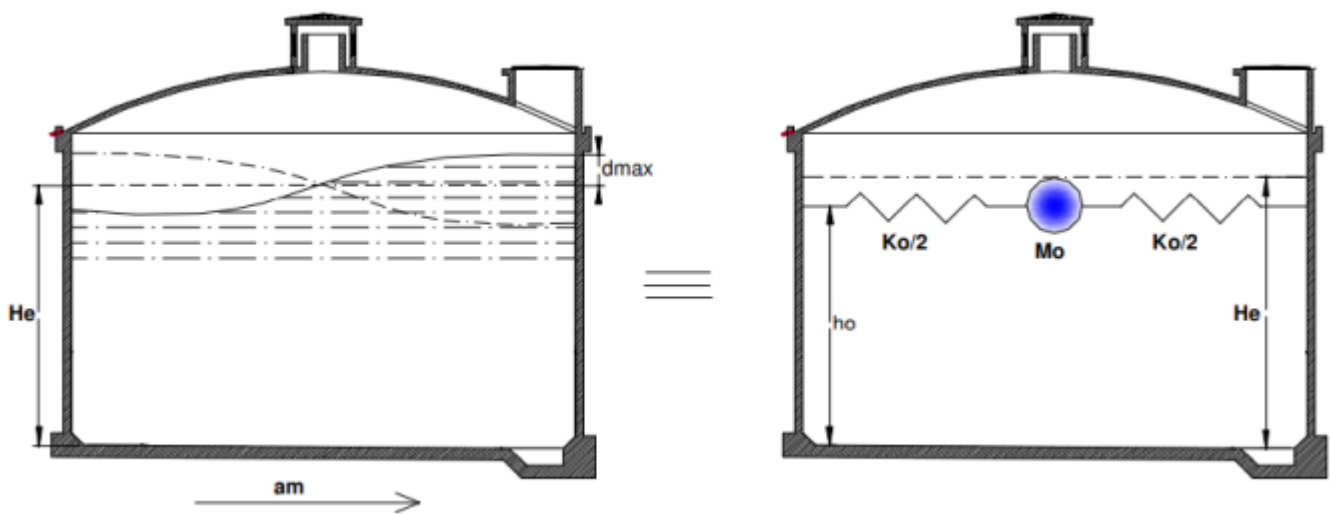
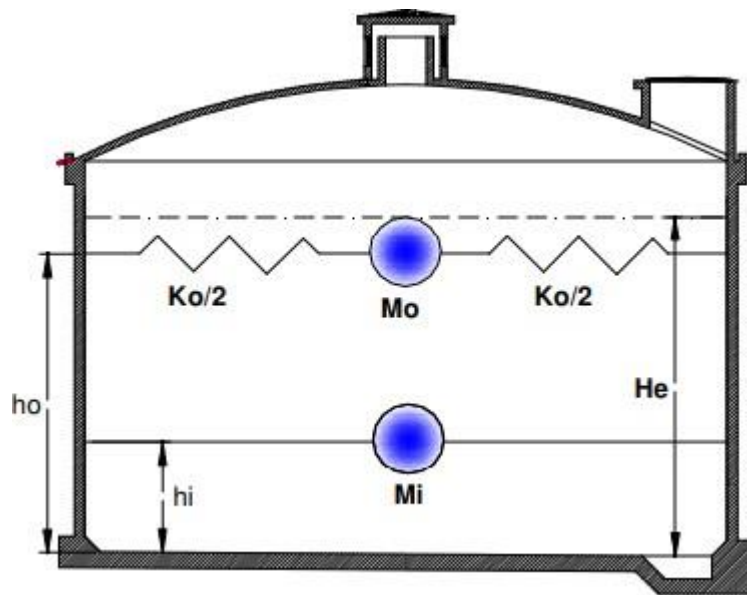
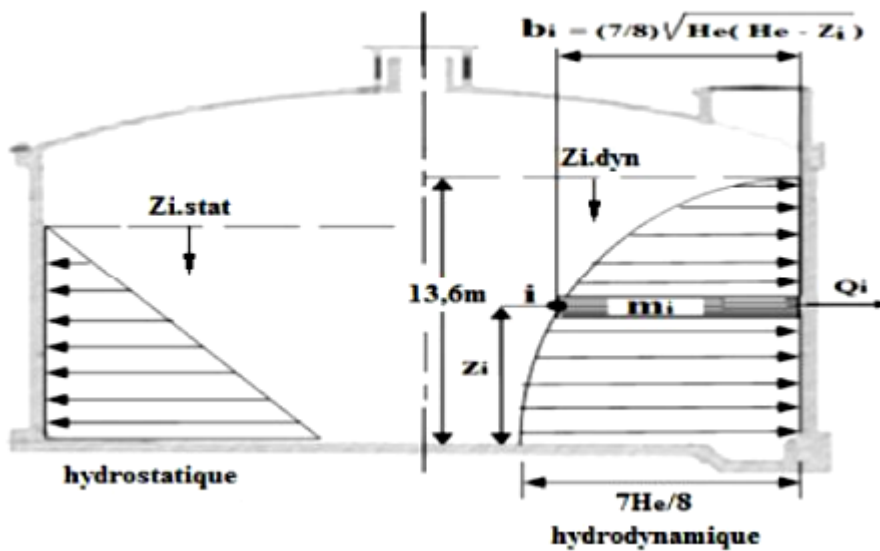


Figure II-2 Système mécanique et physique équivalent des pressions d'oscillation. [1]



FigureII-3 Modèle à une masse passive  $M_i$  (impulsion) et une masse active  $M_0$  (oscillation).  
[1]



FigureII-Modèle de Westergaard [3]

## II.10 Modèles d'analyse du comportement

Ces modèles sont consacrés à la vérification de l'états limite de service de fonctionnement minimal des réservoirs d'après le [7] dans le cadre de dimensionnement des réservoirs sous l'effet sismique d'où l'ouvrage peut être endommager de certains de ses composants dont la capacité de l'ouvrage peut être restaurée.

La hauteur maximale de vague sous un effet sismique peut être prévu pour la précaution de débordement de fluide ou pour l'utiliser dans le dimensionnement de l'ouvrage dont elle est donnée par la relation :

$$D_{\max} = 0.84 \frac{A_m}{g} R_i \quad (\text{II.10})$$

Où:

$D_{\max}$ : la hauteur max de vague  $A_m$

: l'accélération de sol

$g$ : l'accélération de pesanteur

$R_i$ : le rayon intérieur de réservoir

## II.11 Conclusion

Dans ce chapitre on a introduit des méthodes d'analyse hydrodynamique dans la littérature qui sont utilisés pour le calcul des forces d'impulsions et d'oscillation où il existe plusieurs méthodes comme la Méthode Hunt & Priestley, la Méthode de Jacobsen et Ayre , le modèle de l'état limite de Housner et autres, pour la suite de l'étude on a choisi de travailler avec le modèle de Housner qui est parmi les plus méthodes récentes et utilisées dans le calcul hydrodynamique des réservoirs.

Ce modèle offre une approche pratique et efficace pour l'analyse sismique des réservoirs contenant des liquides. Elle facilite la prise en compte des effets hydrodynamiques complexes en scindant l'effet du fluide en deux composantes distinctes : l'effet impulsif lié aux accélérations instantanées, et l'effet convectif lié au mouvement de sloshing. Cette simplification est précieuse pour le dimensionnement parasismique dans le respect des normes de sécurité.

# CHAPITRE III

## LES PARAMETRES DE CALCUL

### HYDRODYNAMIQ

### **III.1 Introduction**

Le modèle de Housner choisi pour la suite de l'étude contient plusieurs paramètres affectant l'effet hydrodynamique dans les réservoirs, dans ce chapitre on va introduire les paramètres principaux affectant cet effet et étudier leur variation par rapport à d'autres paramètres prédéfinis.

### **III.2 Paramètre spatial:**

La localisation de site par rapport à la zone sismique et la nature de site jouent un rôle très important dans la variation de l'effet hydrodynamique, dans l'étude de ces paramètres on utilise le [8] et [7] pour définir les relations entre le site et les pressions d'impulsion et d'oscillation exercées sur un réservoir circulaire de même dimension dans des différentes zones sismiques, cette relation se représente dans un paramètre qui est l'accélération maximale de sol ( $A_m$ ).

### **III.3 La méthode de calcul de l'accélération $A_m$ :**

L'accélération  $A_m$  est l'interaction avec le sol, donnée par le code de calcul de [8] en fonction de la zone sismique dont elle représente une fraction de l'accélération de pesanteur, calculée par la relation suivante :

$$\frac{Am}{g} = 1.25A \left( 1 + \frac{T}{T1} \left( 2.5\mu \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) \quad \text{si : } 0 \leq T \leq T1$$

$$\frac{Am}{g} = 2.5\mu(1.25A) \frac{Q}{R} \quad \text{si : } T1 \leq T \leq T2$$

$$\frac{Am}{g} = 2.5\mu(1.25A) \left( \frac{Q}{R} \right) \left( \frac{T2}{T} \right)^{2/3} \quad \text{si : } T2 \leq T \leq 3s$$

$$\frac{Am}{g} = 2.5\mu(1.25A) \left( \frac{T2}{3} \right)^{2/3} \left( \frac{Q}{R} \right) \left( \frac{3}{T} \right)^{5/3} \quad \text{si : } T \geq 3s$$

(III.1)

**g** : l'accélération de pesanteur

**R** : coefficient de comportement globale de la structure dans notre cas selon le [8]

**Q** : facteur de qualité de la structure ,pour un réservoir circulaire

**A** : le coefficient d'accélération de zone donné par le [8] en fonction de la zone et le groupe sismique donné dans (tableau 1)

**Tableau III.1 Coefficient d'accélération de sol A**

Groupe	Zone sismique			
	Isismicité faible	IIa sismicité moyenne	IIa sismicité moyenne	III sismicité forte
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

**μ** :le facteur de correction d'amortissement donné parla relation:

$$\mu = \sqrt{7 / (2 + \iota)} \geq 0.70 \quad \text{(III.2)}$$

Donc  $\mu = 0.76$

où  $\iota$  désigne le pourcentage d'amortissement critique. Déterminé parle (tableau 2):

**Tableau III.2 Pourcentage d'amortissement critique  $\zeta$**

Remplissage	Portique		Voile ourmur
	Bétonarmé	Acier	B.A./maçonnerie
Léger	6	4	10

Le réservoir peut être assimilé à une structure en voile en béton armé donc  $\rho = 10\%$

$T_1, T_2$  des périodes caractéristiques en fonction de catégorie du site, ils sont déterminés par le (tableau III.3 )

**Tableau III. 3 Les périodes caractéristiques  $T_1, T_2$**

Site	S1	S2	S3	S4
	Siterocheux	Siteferme	Sitemeuble	Site très meuble
$T_1(s)$	0.15	0.15	0.15	0.15
$T_2(s)$	0.3	0.4	0.5	0.7

**T** : la période fondamentale, peut être estimée par des formule empiriques ou calculée par des méthode analytique ou numérique, dans notre cas elle sera déterminée par la formule suggéré par [4]

Où:

$$T = 1.79 H_t^2 \sqrt{\frac{P}{g \cdot EI}} \quad (\text{III.3})$$

Tel que:

$H_t$ :représente la hauteur de la structure dans notre cas  $H_t=6m$

$P$ :la répartition uniforme de poids de l'ouvrage dans notre cas  $P=2025.3kN/m$

$E$  : le module d'élasticité de béton, on prend  $E = 32000 \text{ Mpa}$

$I$ :le moment d'inertie de l'ouvrage sur l'axe horizontale dont:

$$I = \frac{\pi}{2} (Re^4 - Ri^4) \quad (\text{III.4})$$

Où on pose un rayon extérieur  $Re=12.5m$  et un rayon intérieur  $Ri= 12m$  Par

application numérique on a :  $I = 57.74558 \text{ m}^4$

Donc la période fondamentale  $T \approx 0.473s$

### III.4 Paramètre géométrique

La géométrie d'un réservoir à la base circulaire et les parois verticales affecte directement les actions d'impulsion et les actions d'oscillation, pour étudier ces paramètres on doit fixer une zone et un groupe sismique et varier ensuite les paramètres géométriques de réservoir comme le rayon de la base de réservoir, la hauteur de l'eau dans le réservoir, le rapport  $He/Ri$ , et voir l'effet de ces changements sur les actions d'impulsion et d'oscillation, et leur effet sur la stabilité de l'ouvrage.

### III.5 Calcul des actions d'impulsion.

Dans un réservoir cylindrique soumis à une accélération maximale  $A_m$  et en considérant un liquide incompressible, l'expression de la résultante des pressions horizontales d'impulsion ( $P_i$ ) est donnée par la relation :

Avec:

$$P_i = M_i \times A_m \quad (III.5)$$

$$M_i = M_e \times \frac{th\left(\sqrt{3} \frac{R_i}{H_e}\right)}{\sqrt{3} \frac{R_i}{H_e}} \quad (III.6)$$

**$M_e$** : la masse de l'eau dans le réservoir

**$H_e$**  : la hauteur de l'eau dans le réservoir, on prend  $H_e = 4.60\text{m}$

### III.6 Calcul des actions d'oscillation.

En prenant la même hypothèse que dans le calcul des actions d'oscillation, l'expression de la distribution des surpressions hydrodynamique est donné par la formule suivante :

Avec:

$$P_o = 1.2M_o * g * \phi_o \quad (\text{III.7})$$

$M_o$ :la fraction de l'eau dans le réservoir qui semet en vibration,donnée par la relation:

$$M_o = M_e * 0.318 * \frac{Ri}{He} * th(1.84 \frac{He}{Ri}) \quad (\text{III.8})$$

$\phi_o$ :l'angle maximal d'oscillation de la surface libre,donné par la relation: \*

$$\phi_o = 0.83 * \frac{Am}{g} \quad (\text{III.9})$$

### III.7 Conclusion:

Dans ce chapitre les paramètres de calcul hydrodynamique sont la clé d'une conception parasismique efficace, permettant d'anticiper les effets complexes de la dynamique fluide-structure et de prévenir les risques de défaillance.

# CHAPITRE IV

Analyse hydrodynamique

d'un réservoir

## IV.1. Introduction

Cet exemple présente l'analyse hydrodynamique d'un réservoir circulaire en béton armé soumis à une sollicitation sismique en utilisant le Règlement Parasismique Algérien (RPA 2003). Le calcul suit la méthode de Housner adaptée aux conditions algériennes.

## IV.2. Données de Base

- Diamètre intérieur : 10 m
- Rayon intérieur : 5 m
- Hauteur d'eau : 5 m
- Hauteur totale du réservoir : 6 m
- Épaisseur des parois et du radier : 0,25 m
- Masse volumique de l'eau : 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Zone sismique : III
- Type de sol : S2
- Gravité : 9,81 m/s<sup>2</sup>

## IV.3. Calcul de la masse d'eau

$$m = \rho \times \pi \times R^2 \times H \quad 19$$

$$m = 392\,700 \text{ kg}$$

## IV.4. Décomposition de la masse

$$\text{Masse impulsive } m_i = 0,7 \times m = 274\,890 \text{ kg}$$

$$\text{Masse convective } m_c = 0,3 \times m = 117\,810 \text{ kg}$$

## IV.5. Spectre de réponse et accélérations

$S_d(0) = 4,94 \text{ m/s}^2$  (impulsif)

$T_c \approx 4,29 \text{ s}$

$S_d(T_c) \approx 2,3 \text{ m/s}^2$  (convectif)

## IV.6. Calcul des forces hydrodynamiques

Force impulsive  $F_i = 1,36 \text{ MN}$

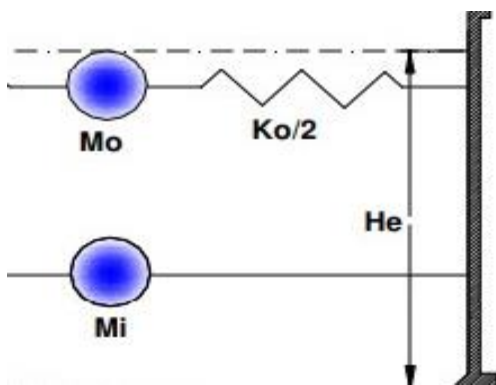
Force convective  $F_c = 0,271 \text{ MN}$

## IV.7. Calcul des efforts

Effort tranchant total  $V = 1,631 \text{ MN}$

Moment de base  $M = 4,755 \text{ MN}\cdot\text{m}$

## IV.8. Schéma Explicatif



Le réservoir est représenté par un cylindre vertical.

Deux forces principales agissent :

- $F_i$  (Force impulsive) appliquée à mi-hauteur ( $0,5H$ ).
- $F_c$  (Force convective) appliquée à la hauteur totale ( $H$ ).

Ces forces génèrent un effort tranchant à la base et un moment fléchissant.[10]

## **IV.9 Organigramme de calcul**

Selon la méthode de calcul Housner, on peut réaliser le calcul hydrodynamique des réservoirs circulaires posés sur sol, qui se base sur l'organigramme suivant :

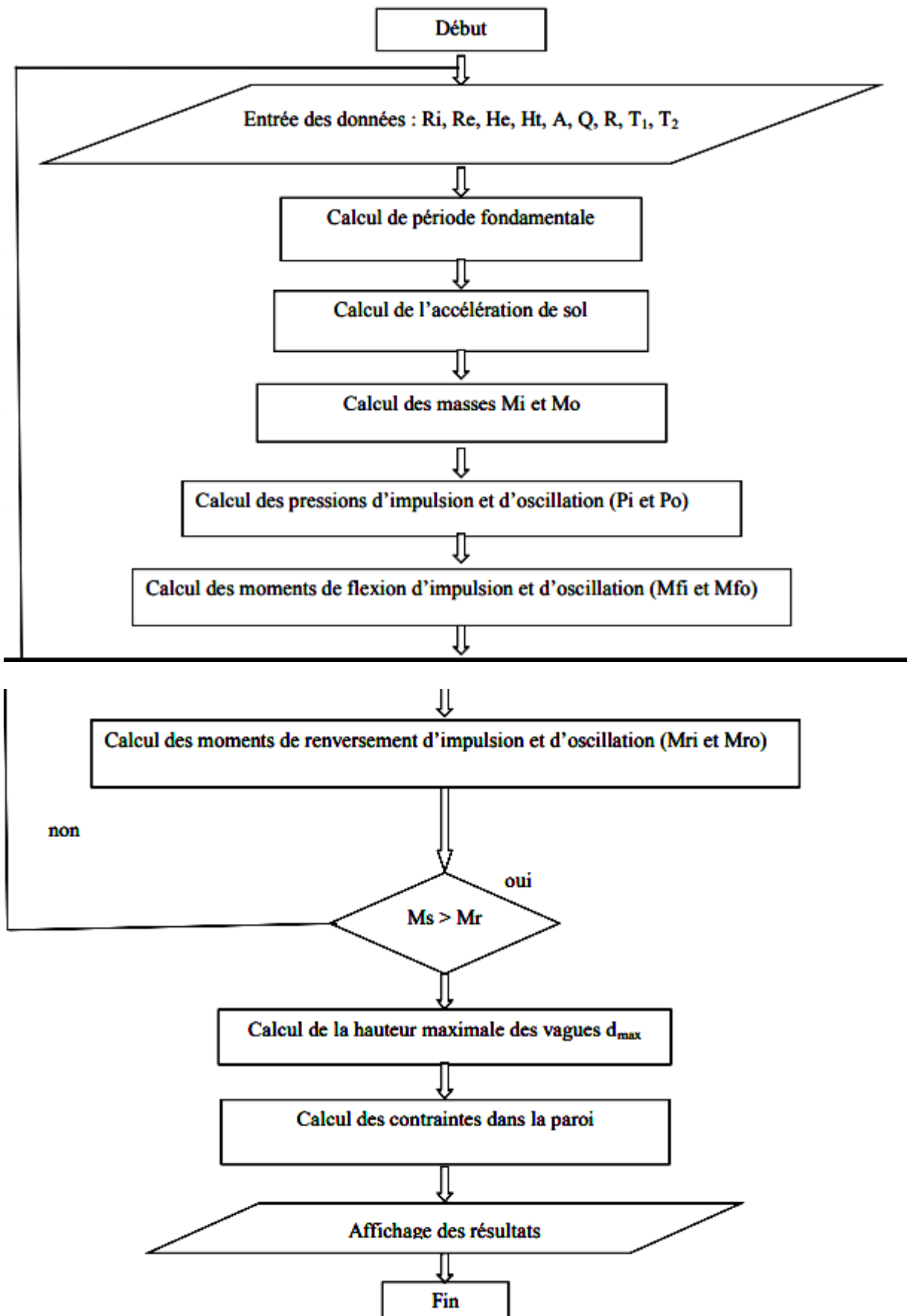


Figure V.1 Organigramme de calcul Selon la méthode de Housner[1]

## IV.10 Conclusion:

L'analyse hydrodynamique du réservoir circulaire en béton armé soumis à une sollicitation sismique, réalisée selon la méthode de Housner et conforme au Règlement Parasismique Algérien (RPA 2003), met en lumière plusieurs points clés :

- La masse d'eau est décomposée en deux composantes distinctes, impulsive et convective, qui génèrent respectivement des forces hydrodynamiques appliquées à des hauteurs différentes, influençant directement les efforts transmis à la structure
- La force impulsive, plus importante, agit à mi-hauteur du réservoir, tandis que la force convective, liée au mouvement oscillatoire de l'eau, s'applique à la hauteur totale.
- Ces forces produisent un effort tranchant total significatif à la base du réservoir ainsi qu'un moment fléchissant important, qui doivent être pris en compte dans la conception pour garantir la stabilité et la sécurité de l'ouvrage.
- Le respect des paramètres sismiques locaux (zone III, type de sol S2) et des propriétés géométriques du réservoir (diamètre, hauteur, épaisseur des parois) est essentiel pour une modélisation réaliste et fiable des sollicitations.
- En somme, cette étude souligne l'importance d'une approche rigoureuse et adaptée aux conditions locales pour le dimensionnement parasismique des réservoirs hydrauliques, afin de prévenir tout risque de défaillance lors d'un séisme.

# CHAPITRE V

Simulations numériques des effets

Hydrodynamiques

## V.1 Introduction

Le calcul hydrodynamique des réservoirs en béton armé soumis aux sollicitations sismiques est une étape cruciale de leur dimensionnement, notamment dans les zones sismiques définies par la norme RPA 2003 et 2024. Cette norme impose la prise en compte des effets dynamiques entre le fluide et la structure, modélisés par la méthode analytique de Housner via deux masses équivalentes : masse d'impulsion et masse d'oscillation. Ces effets génèrent des pressions supplémentaires sur les parois, induisant des efforts importants à considérer pour garantir la stabilité et la sécurité du réservoir. L'approche réglementaire du RPA fournit les coefficients et formules nécessaires pour intégrer ces sollicitations hydrodynamiques dans la conception, assurant ainsi la pérennité des ouvrages hydrauliques en zones sismiques.

## V.2 Résultats des Calculs Hydrodynamiques RPA 2003

### 1. Paramètres Variables :

- Diamètre (D) : 5, 10, 15, 20, 25 m
- Hauteur d'eau (H) : 3, 4, 5, 6, 7 m
- Zone sismique (RPA 2003) :
- Zone I (Faible) :  $S_e=0.10$  g
- Zone II (Moyenne) :  $S_e=0.25$  g
- Zone III (Forte) :  $S_e=0.40$  g

### 2. Type de sol :

- S1 (Rocheux) :  $T_c$  réduit de 10%
- S2 (Ferme) : Pas de modification
- S3 (Moyen) :  $T_c$  augmenté de 15%
- S4 (Mou) :  $T_c$  augmenté de 30%

### V.3. Tableau des Résultats RPA 2003

Dans le tableau (Tableau V.1.), on présente les résultats de simulations en utilisant le code RPA 2003.

*Tableau V. 1 Résultats des Calculs Hydrodynamiques RPA 2003*

D (m)	H (m)	Zone	Sol	Masse Impulsive $m_i$ (tonnes)	Masse Convective $M_c$ (tonnes)	Effort Tranchant V (kN)	Moment M (kN·m)	Hauteur des Vagues $\delta$ (m)
5	3	I	S1	35.3	12.6	35	42	0.18
5	3	III	S4	35.3	12.6	123	148	0.63
10	5	IIb	S2	196.4	68.6	386	824	0.75
10	7	III	S3	274.9	96.0	1,205	2,823	1.45
15	4	I	S1	353.4	125.9	139	278	0.42
15	6	III	S4	530.1	188.8	1,867	5,076	2.00
20	5	IIb	S2	785.4	274.9	1,543	3,858	1.15
20	7	III	S3	1,099.6	384.8	3,872	11,615	2.70
25	6	IIb	S4	1,413.7	503.5	2,765	8,295	1.68
25	7	III	S4	1,649.3	587.7	5,314	18,599	3.15

### V.4. Observations Clés

1. **1. Effet du diamètre :**
  - ✓ Les masses ( $M_i$ ,  $M_c$ ) augmentent avec D .
  - ✓  $T_c$  et  $\delta$  croissent avec D.
1. **2. Effet de la hauteur d'eau :**
  - ✓ Pour  $H/D > 0.4$   $\delta$  augmente significativement.
1. **3. Impact sismique :**

- ✓ II. Zone III : Multiplie  $\delta$  par 4 comparé à la Zone I.

#### 1. 4. Type de sol :

- ✓ . Sol S4 : Allonge  $T_c$  de 30%, augmentant  $\delta$ .

## V.5. Recommandations

### 1. Franc-bord minimal :

- ✓ Pour  $D \geq 15$  m en Zone III :  $F_b \geq 1.5$  m .

### 2. Vérifications :

- Si  $\delta/H > 0.3$  (ex :  $D=25$  m ,  $H=7$  m), une analyse spécifique est requise.

## V.6 Calcul Hydrodynamique des Réservoirs selon la Méthode de Housner (RPA 2024)

*(Mise à jour normative avec le RPA 2024 et analyse paramétrique)*

### 1. Modifications Clés du RPA 2024

- **Nouvelles zones sismiques :**

- **Zone 0** (Très faible) :  $S_e=0.05g$

- **Zone I** (Faible) :  $S_e=0.15g$

- **Zone II** (Moyenne) :  $S_e=0.30g$

- **Zone III** (Forte) :  $S_e=0.45g$

- **Types de sol :**

- **S1** (Rocheux) :  $T_c$  réduit de **5%**

- **S2 (Ferme)** : Pas de modification
- **S3 (Moyen)** : Tc augmenté de **20%**
- **S4 (Mou)** : Tc augmenté de **35%**
- **Coefficient d'importance ( $\gamma$ )** :
- **1.2** pour les réservoirs stratégiques (eau potable).

## V.7 Tableau des Résultats (RPA 2024)

(Valeurs calculées pour  $\gamma=1.0$  ,  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ )

*Tableau V.2 Résultats des Calculs Hydrodynamiques RPA 2024*

D (m)	H (m)	Zone	Sol	Masse Impulsive mi (tonnes)	Masse Convective mc (tonnes)	Effort Tranchant V (kN)	Moment M (kN·m)	Hauteur des Vagues $\delta$ (m)
5	3	I	S1	35.3	12.6	71	85	<b>0.31</b>
5	3	III	S4	35.3	12.6	214	257	<b>0.92</b>
10	5	II	S2	196.4	68.6	612	1,305	<b>1.20</b>
10	7	III	S3	274.9	96.0	1,842	4,315	<b>1.87</b>
15	4	I	S1	353.4	125.9	221	442	<b>0.71</b>
15	6	III	S4	530.1	188.8	2,873	7,812	<b>2.55</b>
20	5	II	S2	785.4	274.9	2,450	6,125	<b>1.84</b>
20	7	III	S3	1,099.6	384.8	5,923	17,769	<b>3.25</b>

25	6	II	S4	1,413.7	503.5	4,241	12,723	<b>2.23</b>
25	7	III	S4	1,649.3	587.7	8,153	28,536	<b>3.66</b>

## V.8. Comparaison RPA 2003 et RPA 2024

*Tableau V.3 Comparaison RPA 2003 et RPA 2024*

Paramètre	RPA 2003	RPA 2024	Impact
Accélération Zone III	0.40 g	0.45 g	+12.5% sur $\delta$
Corrections Sol S4	+30% sur $T_c$	+35% sur $T_c$	+5% supplémentaire sur $\delta$
Coefficient $\gamma$	1.0 (par défaut)	1.2 (stratégique)	+20% sur $Se$ effectif

## V.9 Formules Adaptées (RPA 2024)

### 1. Période convective:

$$T_C^{RPA2024} = T_C * \left(1 + 0.20 \times 1_{S3} + 0.35 \times 1_{S4}\right) \sqrt{\gamma} \quad (V.1)$$

### 2. Hauteur de vagues:

$$\delta = 0,84 . R . \tanh \left( \frac{2\pi H}{L} \right) . Se . \gamma \quad (V.2)$$

### 3. Franc-bord minimal :

$$F_b = \delta + 0.5$$

(V.3)

## V10 .Recommandations Spécifiques RPA 2024

- Pour Les Réservoirs stratégique ( $\gamma = 1.2$ )

Majorer systématiquement  $F_b$  de 20%

- Vérification obligatoire :

Si  $\frac{\delta}{H} \geq 0.25$  \_\_\_ Analyse spécifique est requise.

- Ancrage

Renforcer les ancrages pour  $D \geq 15\text{m}$  en Zone II Et III

## V.11 Conclusion

Le calcul hydrodynamique des réservoirs en béton armé, conformément aux prescriptions du RPA 2003 et 2024, constitue un élément fondamental pour assurer la sécurité et la durabilité des ouvrages hydrauliques en zones sismiques. La prise en compte des interactions fluide-structure, modélisées par la méthode de Housner, permet d'évaluer précisément les efforts supplémentaires induits par les mouvements du liquide lors d'un séisme. Cette approche rigoureuse garantit un dimensionnement adapté des parois et des ancrages, limitant ainsi les risques de défaillance structurelle. En intégrant ces calculs dans la conception, les ingénieurs peuvent répondre efficacement aux exigences normatives tout en assurant la pérennité des infrastructures essentielles à l'approvisionnement en eau potable.

# CHAPTER VI

Comparaison entre le RPA 2003 et  
le RPA 2024

## **VI.1 Introduction:**

La protection des réservoirs circulaires en béton armé contre les effets sismiques constitue un enjeu majeur dans les régions à forte sismicité, comme en Algérie.

Le Règlement Parasismique Algérien (RPA) a connu des évolutions importantes entre l'édition de 2003 et celle de 2024.

Cette comparaison vise à mettre en lumière les principales différences entre le RPA 2003 et le RPA 2024, notamment dans l'analyse hydrodynamique des réservoirs circulaires, en s'appuyant sur les standards internationaux récents, tels que l'Eurocode 8 - Partie 4.

## **VI.2 Modélisation de l'Action Sismique:**

- RPA 2003 : Utilisation d'une approche simplifiée basée sur la méthode de Housner (1957) avec une distinction entre masse impulsive et convective ([Housner, 1963]). Spectre de réponse basé sur des coefficients fixes (AA, SS) et prise en compte limitée de l'interaction sol-structure.
- RPA 2024 : Introduction de méthodes avancées incluant l'analyse dynamique non linéaire et la modélisation des effets de sloshing par éléments finis (FEM). Spectre de réponse actualisé intégrant une zonation sismique plus fine ([Eurocode 8, 2004]).

## **VI 3. Méthodes d'Analyse Hydrodynamique**

- RPA 2003 : Approche quasi-statique avec des forces hydrodynamiques équivalentes simples. La décomposition des masses impulsive/convective est linéaire et peu détaillée.
- RPA 2024 : Encouragement à utiliser des logiciels spécialisés pour des analyses temporelles ou spectrales sophistiquées (ex. ANSYS, SAP2000). Prise en compte des effets non linéaires du matériau béton et analyse multidirectionnelle obligatoire pour les réservoirs critiques.

## VI 4. Paramètres de Conception

- RPA 2003 : Coefficient sismique A défini par zones, facteur d'importance global  $I = 1.2$ , amortissement fixe à 5%.
- RPA 2024 : Révision des coefficients A, différenciation plus détaillée des catégories d'importance (ex.  $I = 1.5$  pour les réservoirs stratégiques), amortissement variable selon les déformations, intégration explicite des composantes verticales sismiques [12]

## VI.5 Exigences de Ductilité et Déraillement

- RPA 2003 : Critères de ferrailage minimaux principalement basés sur la résistance.
- RPA 2024 : Introduction de critères de performance sismique, renforcement du confinement du béton, exigences accrues pour les assemblages et inspiration directe pour la conception des détails.[12]

## VI.6 Autres Considération

- RPA 2003 : Peu de prescriptions concernant la réhabilitation post-sismiques.
- RPA 2024 : Inclusion explicite de méthodologies de réparation et réhabilitation (ISO 23469:2005), avec exigences de documentation analytique rigoureuse pour tout projet soumis à l'analyse hydrodynamique.

## VI.7 Comportement hydrodynamique

Ci-après trois graphiques distincts illustrant les interactions clés des paramètres hydrodynamiques pour un réservoir circulaire sous séisme (zone III, sol S2) :

1. **Force impulsive  $F_i$  et diamètre  $D$**  pour plusieurs hauteurs ( $H = 3, 5, 7$  m).

2. **Force convective  $F_c$  et hauteur  $H$**  pour plusieurs diamètres ( $D = 5, 10, 15$  m).
3. **Moment en base  $M$  et diamètre  $D$**  pour une hauteur fixée ( $H = 5$  m).

Ces courbes (Figure VI.1 ; Figure VI 2 ; Figure VI .3) montrent :

- $F_i$  croît non linéairement avec  $D$ , et augmente avec  $H$  .(Figure VI .1)
- $F_c$  augmente de façon quasi-linéaire avec  $H$ , plus vite pour les plus grands diamètres.(Figure VI .3)
- Le moment  $M$ , combinaison de  $F_i$  et  $F_c$ , s'amplifie fortement avec  $D$ .

Ces graphiques (Figure VI.1 ; Figure VI 2 ; Figure VI .3) peuvent être étendus ou adaptés à d'autres combinaisons (différent zones/sols) selon le même principe.

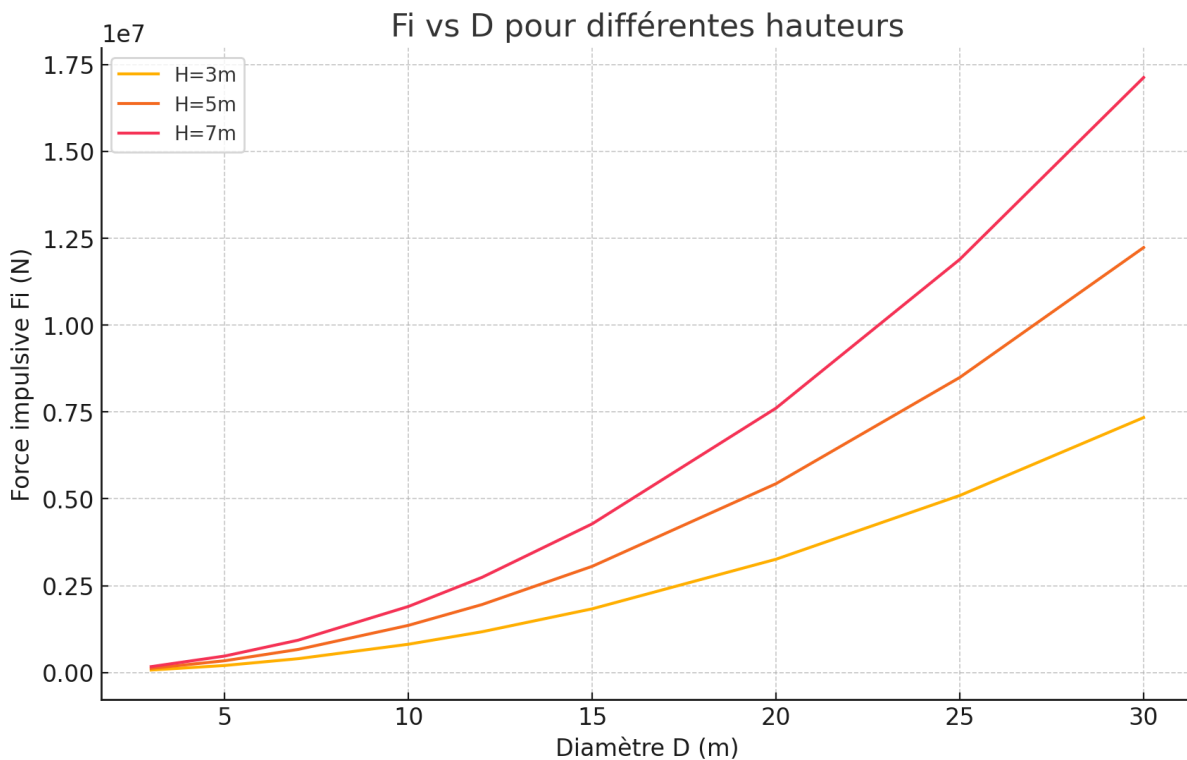


Figure VI.1:Force impulsive  $F_i$  vs diamètre  $D$  pour plusieurs hauteurs (RPA 2003)

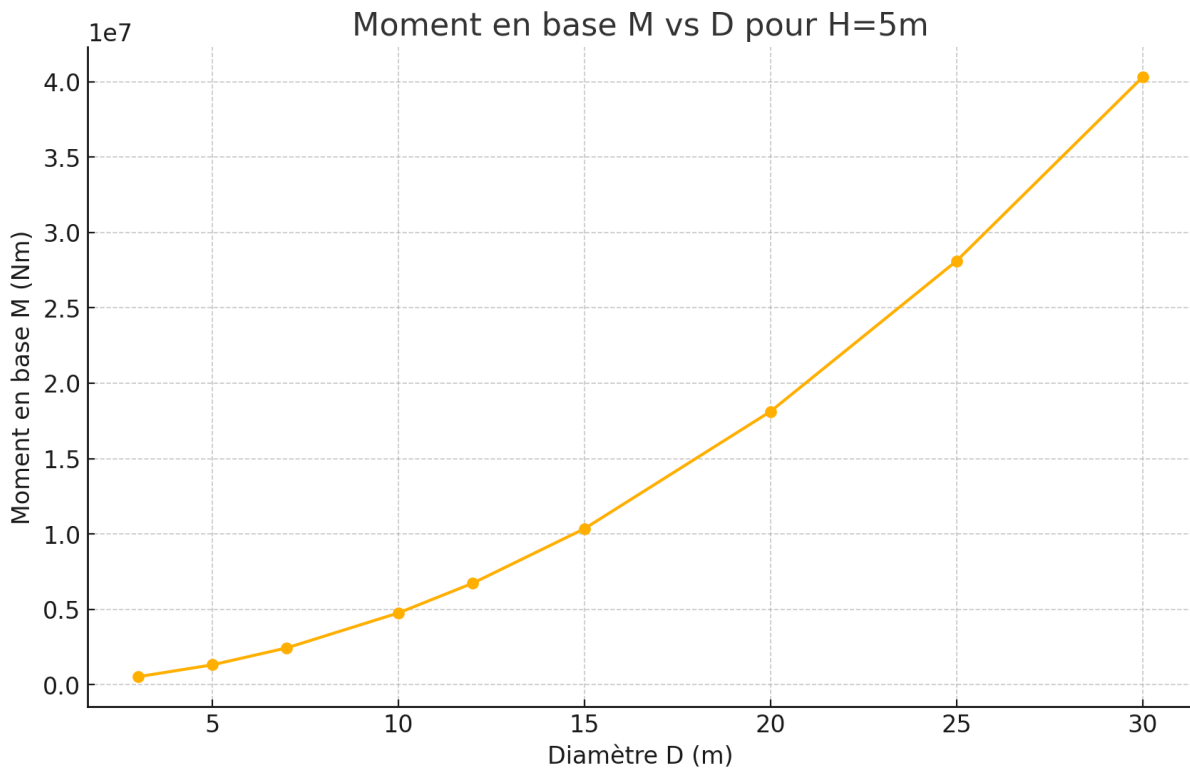
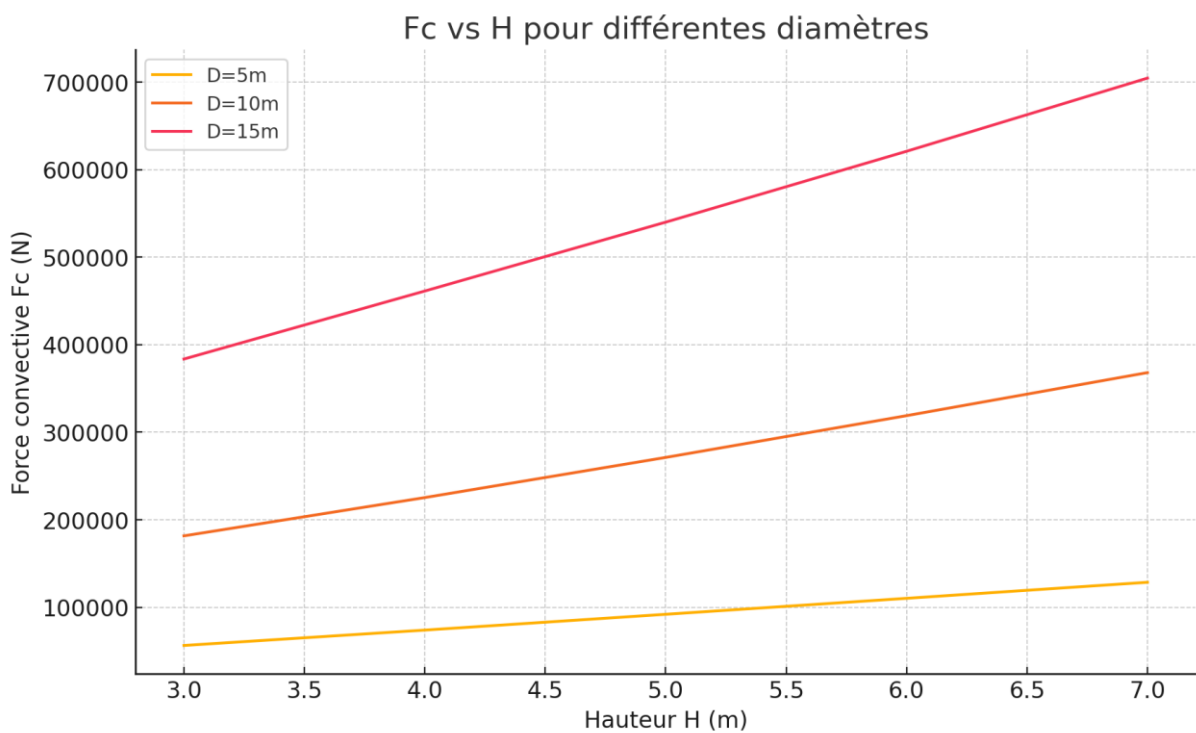


Figure VI 2 :Moment en base M vs diamètre D pour une hauteur fixée (RPA 2003)



## VI.8 Interprétation des trois figures

### 1. $F_i$ vs $D$ pour différentes hauteurs (Figure VI.1)

Cette figure (Figure VI.1) 'montre l'évolution de la force impulsive  $F_i$  en fonction du diamètre  $D$  pour trois hauteurs différentes ( $H = 3 \text{ m}$ ,  $5 \text{ m}$ ,  $7 \text{ m}$ ). On observe que :

- ✓ Pour une hauteur donnée, la force impulsive augmente rapidement avec le diamètre, de façon non linéaire (courbe convexe).
- ✓ Plus la hauteur  $H$  est grande, plus la force impulsive générée pour un même diamètre est élevée.
- ✓ L'écart entre les courbes augmente avec le diamètre, ce qui signifie que l'influence de la hauteur devient plus marquée pour les grands diamètres.

#### ● **Interprétation :**

L'augmentation du diamètre amplifie fortement la force impulsive, et cet effet est renforcé par la hauteur. Cela suggère que les structures de plus grande taille et de plus grande hauteur sont soumises à des forces impulsives nettement supérieures, ce qui doit être pris en compte dans leur conception.

### 2. Moment en base $M$ en fonction de $D$ pour $H = 5 \text{ m}$ (Figure VI.2)

Cette figure représente le moment en base  $M$  en fonction du diamètre  $D$  pour une hauteur fixe de  $5 \text{ m}$

- ✓ Le moment en base croît fortement avec le diamètre, suivant une courbe convexe similaire à celle de la force impulsive.
- ✓ La croissance n'est pas linéaire : le moment augmente beaucoup plus vite que le diamètre.

➤ **Interprétation :**

Le moment en base, qui est crucial pour la stabilité structurelle, dépend très fortement du diamètre.

Ainsi, pour des structures plus larges, les sollicitations en base sont beaucoup plus importantes, ce qui impose des exigences accrues sur la résistance des fondations et des matériaux utilisés .

### **3. Fc en fonction de H pour différents diamètres (Figure VI.3)**

Cette figure présente l'évolution de la force convective  $F_c$  en fonction de la hauteur  $H$ , pour trois diamètres différents ( $D=5$  m, 10 m, 15m).

- ✓ Pour un diamètre donné, la force convective augmente de façon quasi linéaire avec la hauteur.
- ✓ À hauteur égale, la force convective est d'autant plus grande que le diamètre est élevé.
- ✓ Les courbes sont parallèles, ce qui indique que l'influence de la hauteur sur  $F_c$  est similaire quel que soit le diamètre, mais que le niveau de base de la force croît avec le diamètre.

➤ **Interprétation :**

La force convective dépend principalement de la hauteur, mais son intensité globale est déterminée par le diamètre. Les structures de plus grand diamètre subissent des forces convectives nettement supérieures, et cette force augmente proportionnellement avec la hauteur<sup>3</sup>.

### **4. Synthèse générale :**

- ✓ Le diamètre est un facteur déterminant pour toutes les forces et moments considérés : plus il est grand, plus les sollicitations sont importantes.
- ✓ La hauteur a un effet amplificateur, en particulier sur la force impulsive et la force convective.
- ✓ La conception de grandes structures doit donc intégrer ces croissances non linéaires des efforts mécaniques avec les dimensions géométriques.

Cela met en évidence l'importance de l'optimisation des dimensions pour garantir la sécurité et la stabilité des structures soumises à ces types de sollicitations.

## VI.9 Exemple Numérique

Pour  $D=10$  m,  $H=5$  m, Sol S3

- **RPA 2003** :  $V=386$  kN,  $\delta=0.75$  m
- **RPA 2024** :  $V=612$  kN (+58%),  $\delta=1.20$  m (+60%).

## VI.10 Hauteur de vagues

Voici la courbe comparative (Figure VI .4) de la hauteur maximale de houle  $D$  max en fonction de la zone sismique, selon les deux versions du RPA (2003 et 2024), pour un réservoir de :

- ✓ Diamètre : 10 m
- ✓ Hauteur d'eau : 5 m
- ✓ Sol S2
- ✓ Importance moyenne ( $I = 1.2$ )

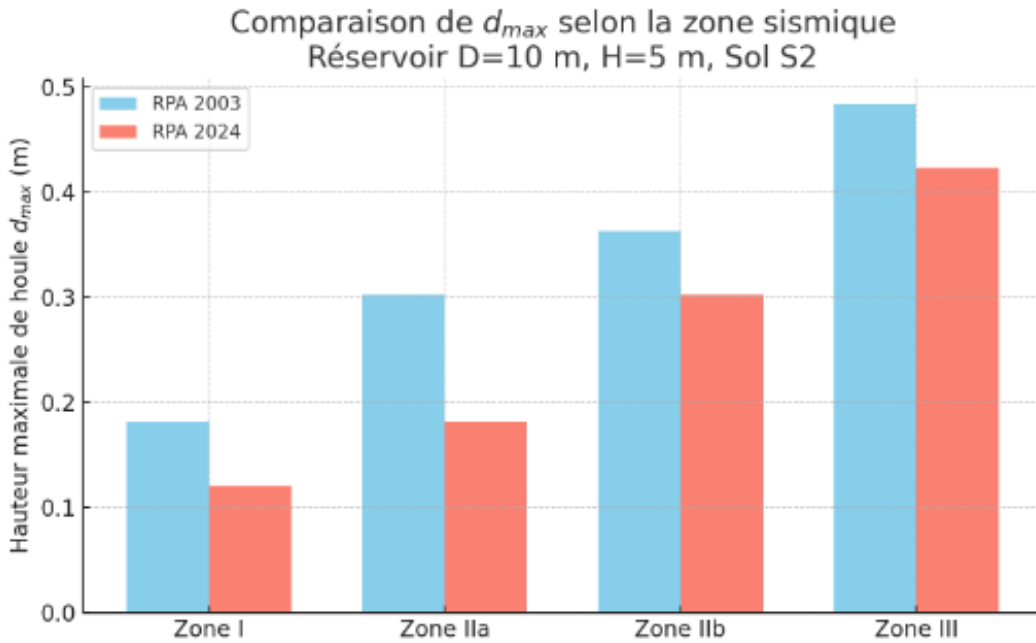


Figure VI .4 Comparaison de Dmax Selon la zone sismique

### VI.11 Observations :

- Le RPA 2024 montre une réduction significative de  $D_{max}$  dans les zones de faible à moyenne sismicité.
- La différence devient moins marquée en zone III, où les deux règlements convergent autour de 0.42–0.48 m.

### VI.12 Abaque de calcul des effets hydrodynamiques

La conception des réservoirs circulaires en béton armé sous sollicitations hydrodynamiques et sismiques représente un défi complexe, nécessitant une évaluation précise des efforts internes (moments, efforts tranchants) et des effets de vaguelettes (*sloshing*). Pour simplifier ce processus, les **abaques de simulation graphique** émergent comme des outils indispensables, offrant une visualisation immédiate des résultats de

calculs hydrodynamiques normalisés.

## Contexte et Justification

Sous l'effet combiné des charges statiques (pression hydrostatique) et dynamiques (séismes), les réservoirs développent des comportements structurels critiques :

- Moments de flexion accrus à la base,
- Efforts tranchants localisés près des ancrages,
- Ondulations de surface (vagues) menaçant le franc-bord.

Les normes comme le RPA 2024 ou l'Eurocode 8 imposent des vérifications fastidieuses, où les abaques deviennent une alternative efficace pour un prédimensionnement rapide.

## Objectifs des Abaques

Ces outils graphiques permettent de :

1. **Corréler les paramètres clés :**
  - Diamètre ( $D$ ), hauteur d'eau ( $H$ ),
  - Zone sismique (I à VI), type de sol (S1 à S4).
2. **Extraire directement :**
  - Les moments ( $M$ ) et efforts tranchants ( $V$ ) pour le ferrailage,
  - La hauteur des vagues ( $\delta$ ) pour le franc-bord minimal.
3. **Comparer les normes** (ex. RPA 2003 vs 2024) via des courbes paramétriques.

## Méthodologie Générale

Les abaques sont générés à partir de :

- Modèles analytiques (méthode de Housner pour les masses équivalentes),
- Simulations numériques (en utilisant le code RPA 2024).
- Validation expérimentale (essais sur maquettes ou données historiques).

## Avantages et Limites

- ✓ Gain de temps : Évite des calculs itératifs complexes.
- ✓ Prise en compte des interactions sol-structure.
- ✗ Précision limitée pour les géométries non standard.

Ces abaques s'adressent aux ingénieurs de conception, aux bureaux d'études, et aux organismes de contrôle, combinant rigueur scientifique et pragmatisme industriel. Leur intégration dans les normes futures pourrait standardiser les pratiques de dimensionnement parasismique.

Cette introduction met en lumière l'utilité des abaques comme passerelle entre la théorie complexe et les besoins opérationnels sur le terrain.

## VI.13 Exemple d'abaque de simulation de la hauteur de vague dans diverses situations

Dans l'exemple suivant (Figure VI.5), nous proposons un abaque qui permet de donner les résultats rapides concernant la hauteur des vagues pour les réservoirs circulaires en béton armé dans diverses situations :

- ✓ Diamètre du réservoir variant entre  $D = 5$  à  $D = 35$  m.
- ✓ Hauteur d'eau de  $H = 4$  à  $H = 6$  m.
- ✓ Zone sismique de I à VI selon RPA 2024.
- ✓ Type de sol : S1, S2, S3, et S4.

Hauteur maximale de vague  $d_{max}$  selon D, H et type de sol – par zone sismique

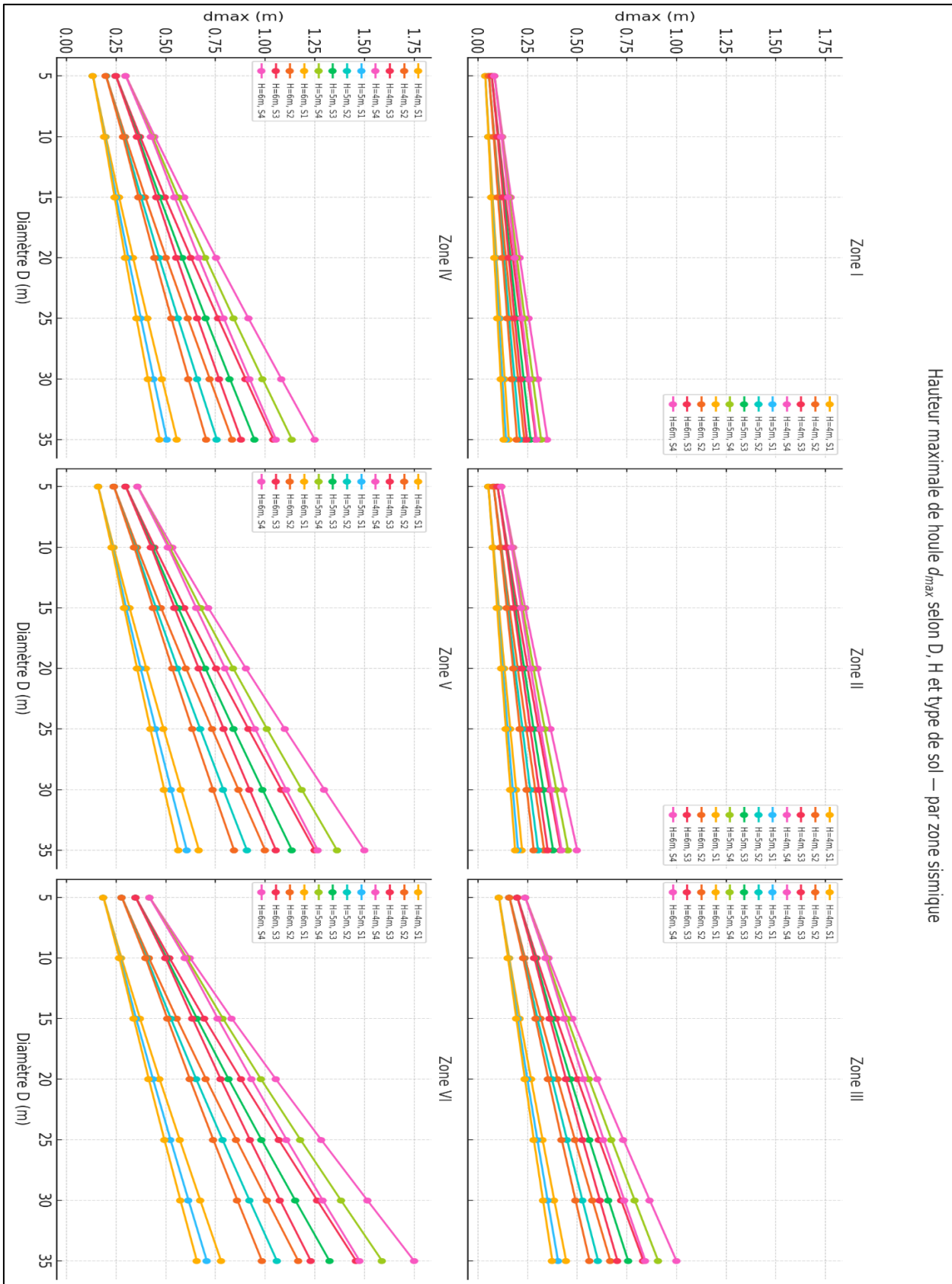


Figure VI.5. Abaque de dimensionnement des réservoirs circulaires soumis aux effets hydrodynamiques. Hauteur max des vagues  $d_{max}$  en fonction de D, H et type de sol suivant RPA 2024.

## Interprétation de l'abaque (Figure VI.5 )

La zone sismique est le facteur dominant : la hauteur de houle  $d_{\max}$  augmente sensiblement avec le niveau de la zone (de I à VI), en raison de l'augmentation de l'accélération de référence.

En zone I, les houles restent faibles (inférieures à 0.15 m pour les combinaisons standards).

En zone VI, elles peuvent dépasser 0.5 m, voire plus pour les grandes hauteurs d'eau et sols souples.

Les sols plus souples (S3 et S4) amplifient fortement la houle, car ils augmentent la réponse spectrale. Pour une même zone et hauteur, la houle sur un sol S4 peut être 2 fois plus élevée que sur un sol S1. Cela montre que la nature du sol est un facteur critique dans le dimensionnement parasismique des réservoirs.

Une hauteur d'eau plus importante (ex : 6 m) allonge la période convective  $T_c$ , ce qui réduit légèrement l'accélération spectrale (à  $T_c$ ) mais augmente la masse convective.

En résultat, la houle augmente globalement avec H, surtout sur sol souple et en zones sismiques élevées.

Les courbes ont toutes une croissance continue de D max en fonction de la zone sismique.

Les écarts entre types de sols sont plus marqués en zones IV à VI, où les effets dynamiques deviennent dominants. Le croisement de certaines courbes montre que pour certaines combinaisons (ex. H = 4 m sur S4 à comparer avec H = 6 m sur S1), les effets peuvent s'équilibrer.

Pour le dimensionnement parasismique d'un réservoir, on doit toujours :

- ✓ Connaître précisément la zone sismique et le type de sol local,
- ✓ Considérer l'effet combiné des différents paramètres sur Dmax
- ✓ Vérifier les pressions dynamiques résultantes sur les parois et le radier.

## **VI.12 Conclusion**

Cette étude a permis de développer un abaque de simulation graphique pour le dimensionnement des réservoirs circulaires en béton armé sous sollicitations hydrodynamiques et sismiques. Bien que l'exemple présenté se limite aux paramètres fondamentaux (diamètre, hauteur d'eau, zone sismique et type de sol), cette méthodologie ouvre la voie à des applications plus vastes et sophistiquées.

En somme, cette méthodologie ne se limite pas à un simple exemple, mais pose les bases d'une approche systémique pour la conception parasismique des réservoirs. Elle combine rigueur analytique et efficacité opérationnelle, tout en encourageant l'innovation numérique au service de la résilience infrastructurelle.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Le calcul hydrodynamique est une étape très importante dans les études des réservoirs, et la négligence de cette étape cause plusieurs risques sur l'ouvrage, le consommateur et l'homme en général.

Dans cette étude on a introduit des généralités sur les réservoirs en béton armé, leurs composants et les risques associés à cette ouvrage hydraulique, puis on a cité les différentes méthodes de calculs hydrodynamiques et on a choisi la méthode analytique de Housner qui tient en compte les actions d'impulsion et les actions d'oscillation dans le concept de l'état limite des réservoirs en cas d'une excitation sismique pour présenter les paramètres de calculs hydrodynamique et l'effet de variation des paramètres principales sur ces actions. Ensuite on a utilisé une application pratique de cette méthode pour des simulations numériques en utilisant les deux codes RPA 2003 et 2024 dans le but de réalisation des abaques de dimensionnement. Et finalement, on a commenté les résultats obtenus lors de calcul pratique de l'effet hydrodynamique, et on a conclu que l'emplacement et la géométrie du réservoir affecte énormément sur les actions hydrodynamique d'un réservoir.

La formulation automatique de la méthode de Housner autorise les ingénieurs des bureaux d'études à calculer facilement l'effet hydrodynamique et vérifier la stabilité de l'ouvrage en fonction des données des paramètres spatiaux et les paramètres géométriques, et les varier pour faire des conceptions plus rigides et résistant aux séismes, avec une meilleure étude technico-économique.

D'après les valeurs obtenues dans cette étude, le calcul hydrodynamique est assez important que le calcul hydrostatique pour le dimensionnement des réservoirs, dont la différence fondamentale entre eux est que le calcul hydrostatique tient en compte que des charges

permanentes et non les charges accidentelles, donc il est indispensable de le prendre en considération pour diminuer la vulnérabilité des ouvrages, et donc le risque posé par les évènements sismiques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

1. I H. Hammoum, « Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des réservoirs en béton armé. Développement de méthodes d'aide à l'expertise », Thèse de doctorat, 2010.
2. N. Miloudi, « Contribution à l'étude de la vulnérabilité des réservoirs en béton par analyse des composantes principales », Mémoire de magister, 2014.
3. A. Seguel et M. Keddou, « Calcul d'un réservoir circulaire en béton précontraint posé au sol de capacité 5000 m<sup>3</sup> », Mémoire de fin d'étude, 2015.
4. L. Sahouane, « L'étude de l'hydrodynamique et fonctionnement d'un réservoir », Mémoire de fin d'étude, 2015.
5. M. Boubaya, « Étude hydrodynamique d'un réservoir de 1500 m<sup>3</sup> », Mémoire de master académique, 2019.
6. L. Tabellout, « Recherche des axes principaux d'inertie d'un support en pilotis d'un réservoir surélevé », Mémoire de master académique, 2014.
7. Eurocode 8, p. 56.
8. Règlement Parasismique Algérien 99, version 2003.
9. A. Aliche, « Contribution à l'analyse de l'évolution de la vulnérabilité des réservoirs en béton dans leur cycle de vie », 2016, p. 1.
10. G. W. Housner, « The dynamic behavior of water tanks », Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 53, no. 2, pp. 381–387, 1963.
11. RPA 2024, Article 7.6.3 (Ouvrages spéciaux).
12. Eurocode 8-4, Complément pour l'interaction sol-réservoir.
13. J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp. 68–73.
14. M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
15. Y. Douadi et Y. Bahlouli, « Étude d'un réservoir semi-enterré de capacité 500 m<sup>3</sup> à Ghailassa Wilaya de B.B.A », Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master, 2018–2019, pp. 20, 23.
16. Cours destiné aux étudiants 3ème Année Licence hydraulique Semestre 2, Université Chahid Mustapha Ben Boulaid Batna 2, Faculté de technologie, Département d'hydraulique, p. 7.