

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de master

Spécialité : génie civil

Option : structure et matériaux

Présenté par :

Melle Slimani Drifa

Thème

**Analyse du risque sismique des réservoirs surélevés
par la méthode de l'indice de vulnérabilité**

Proposé et dirigé par :

M^{me} BOUZELHA Karima

Promotion: 2013

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Madame Bouzelha Karima, maitre de conférence au département de Génie Civil de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, pour le choix de sujet, et pour avoir accepté de me diriger et de m'avoir guidé dans cette recherche, pour ses précieux conseils, son soutien inconditionnel, sa vision exceptionnelle du domaine. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité, je lui dois ce travail

Ce travail n'aurait pas vu le jour sous sa forme actuelle sans l'apport de monsieur Hammoum Hocine chef département génie civil maitre de conférence au département Génie Civil de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, de me donner l'opportunité de réaliser cette thèse, je le remercie pour m'avoir aidé en me prodiguant conseils et encouragements, d'avoir pris de son temps précieux et de ses compétences, qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je tiens également à adresser mes remerciements aux membres du jury, pour avoir accepté de juger ce mémoire et participer aux jurys.

Je remercie l'équipe enseignante, pour tout le bagage scientifique, même éducatif qu'elle nous a donné, ainsi l'équipe administrative, le personnel de la bibliothèque de la faculté de Génie de la Construction.

Merci à ma famille, mes parents, pour m'avoir soutenue, donné de bons conseils et pour être toujours là dans les moments difficiles et heureux, merci à mes sœurs et à mes frères que j'adore.

Je remercie également l'ensemble des étudiants de Génie Civil, particulièrement la section structure et matériaux, pour tous les bons moments, pour leur aide morale et pour le partage des connaissances.

Je prie de m'excuser pour ce que j'ai oublié dans ces remerciements, les années à l'université Mouloud MAMMERY resteront gravées à jamais dans ma mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail à

Mes chers parents, ma mère qui a été à mes côtés dans toutes les circonstances de ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis aujourd'hui, que Dieu vous garde pour nous

Mes adorables sœurs Hayet et Farida, que Dieu vous protège

Mes chères frères Akli et sa femme Farida, yahia et sa femme Djidji

A notre adorable Ritadje que dieu la protège

Ma chère tante Louiza et son fils Hamza

Ma chère tante Yamina et ses enfants

Mes amis : Chahrazed Assia, Brahim ,Nassima, Nissa Fatiha,Ghania, Rahima, Amina, SidAli, Rachida , Lila , Kahina, Massi, , Karima, Djamila.

Tous mes camarades de Génie Civil, option Structure et Matériaux

Résumé

Les réservoirs à ossatures en béton armé sont aujourd'hui très répandus à travers le parc Algérien. Etant donné que ces structures s'élèvent à des hauteurs bien plus élevées que les bâtiments pour pouvoir assurer des pressions convenables dans les réseaux d'eau potables, et compte tenu de l'effet hydrodynamique lorsque les cuves des réservoirs sont entièrement ou partiellement remplies, leur défaillance peut conduire à des dégâts catastrophiques.

Dans ce papier, le concept de vulnérabilité sismique est utilisé afin de prédire le niveau moyen des dégâts pouvant survenir à l'échelle d'un réservoir surélevé sous l'action d'une secousse sismique d'une intensité connue.

Nous proposons, à travers notre article, une méthode simple et pratique permettant à un professionnel du génie civil d'évaluer rapidement la présomption de vulnérabilité au séisme d'un réservoir de stockage.

L'échelle de vulnérabilité est adaptée à partir de la méthode italienne dite « Gruppo Nazionale per le Difesa dai Terremoti » (GNDT), où un recalage des coefficients de pondération ainsi que l'introduction de nouveaux paramètres sont effectués afin de mieux les coller avec le comportement au séisme de ce type de structure.

Dans cette méthode, l'échelle de vulnérabilité fait intervenir 12 paramètres. Certains paramètres caractérisent la géométrie du réservoir, d'autres sont associés à la structure porteuse telle que définie par l'ingénieur concepteur de l'ouvrage et enfin le reste des paramètres est lié au lieu d'implantation de l'ouvrage.

La vulnérabilité telle qu'elle résulte de cette échelle est une notion abstraite qui renseigne sur les dégâts potentiels pouvant se produire suite à un séisme d'intensité connue.

A partir de cet indice, nous proposons une échelle de classification des réservoirs en quatre niveaux de comportement, auxquels sont associés différentes couleurs. Le premier niveau regroupe les réservoirs ayant un bon comportement (couleur verte), le second comprend les réservoirs ayant un comportement moyen (couleur orange 1 et orange 2) et le troisième concerne les réservoirs ayant un mauvais comportement (couleur rouge).

Keywords: *Seismic risk, storage tank, vulnerability index, GNDT method.*

Abstract

The reinforced concrete water storage tanks are now very widespread across the Algerian park. Since these structures amount to heights much higher than the buildings to ensure adequate pressure in drinking water networks, and taking into account the hydrodynamic effect when tanks are fully or partially fulfilled, their failure can lead to catastrophic damage.

In this paper, the concept of seismic vulnerability is used to predict the average level of damage that can occur at scale of an elevated tank under the earthquake action of known intensity.

We propose, through our work, a simple and practical method allowing for a professional of civil engineering a quickly assess of the seismic vulnerability presumption of a storage elevated tank.

The vulnerability scale is adapted from the Italian method called « Gruppo Nazionale per le Difesa dai Terremoti » (GNDT), where retiming weighting coefficients as well as the introduction of new parameters are made in order to better sticking with the seismic behavior of this kind of structure.

In this method, the level of vulnerability involves 12 parameters. Some parameters characterise the geometry of the reservoir, while others are associated with the supporting structure as defined by the design engineer and then the rest of the parameters are related to the location of the elevated tank.

Vulnerability as it results from this scale is abstract concept which provides information on the potential damage that may occur following a seism of known intensity.

From this index, we propose a tank classification scale in four levels of behavior, which are associated with different colors. The first level includes tanks with good behavior (green), the second includes tanks with an average behavior (orange 1 and orange 2) and the third concerns the tanks with bad behavior (red).

Keywords: *Seismic risk, storage tank, vulnerability index, GNDT method.*

Table des matières

Résumé	
Abstract	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : synthèse bibliographique	
Introduction.....	3
1.1. Notion de base.....	3
1.1.1. L'alea sismique	3
1.1.2. Vulnérabilité d'une construction.....	3
1.1.3. Risque sismique	3
1.1.4. Prévention.....	4
1.1.5. Vulnérabilité sismique.....	4
1.1.6. Historique de l'étude de la vulnérabilité sismique.....	4
1.2. Paramètres pouvant influencer sur la vulnérabilité des structures.....	5
1.3. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des villes.....	6
1.3.1. Méthode de l'ATC13.....	7
1.3.2. Méthode de HAZUS.....	8
1.3.3. Méthode probabiliste italienne.....	8
1.3.4. Méthodologie de RISK- UE.....	9
1.3.5. Approche analytique européenne.....	10
1.4. Méthodes d'estimation des dommages pour les constructions.....	11
1.4.1. Méthode de L'ATC21.....	11
1.4.2. Méthode de L'ATC40.....	12
1.4.3. Méthode GNDT, Italie.....	13
1.4.4. Etude de Belhouene.....	14
1.4.5. Méthode de l'indice de vulnérabilité.....	15

1.4.5.1. Méthode de l'indice de vulnérabilité appliquée en Espagne.....	16
1.4.5.2. Méthode de l'indice de vulnérabilité appliquée en Algérie.....	18
1.5. Méthode de l'indice de vulnérabilité des ouvrages hydrauliques.....	19
1.5.1. Méthode de G. Mathieu.....	19
Conclusion.....	21

Chapitre2 : étude au séisme des réservoirs surélevés

Introduction.....	23
2.1. Etude hydrodynamique.....	23
2.1.1. Poids de la masse passive	24
2.1.2. Poids de la masse active.....	25
2.1.3. Les points d'application des forces d'impulsion h_i	25
2.1.4. Les points d'application des forces d'oscillation h_0	25
2.1.5. La pulsation fondamentale de vibration du liquide ω_0	25
2.1.6. Les constantes de raideurs K_1 et K_0	25
2.2. Equation du mouvement.....	26
2.2.1. Détermination des pulsations propres w_1 et w_2 du 1 ^{er} et 2 ^{eme} mode de vibration...28	
2.2.2. Détermination des modes propres de vibration.....	28
2.3. Les déplacements verticaux des vagues.....	29
2.4. Evaluation de la force sismique.....	30
2.5. Etat limite ultime de stabilité.....	32
2.5.1. Calcul des moments de renversement.....	32
2.5.2. Calcul du moment stabilisant.....	33
Conclusion.....	34

Chapitre 3 : Exposé de la méthode vulnérabilité

Introduction.....	35
3.1. Développement de la méthode l'indice de vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau.....	35
3.1.1. Définition des paramètres choisis.....	36
3.1.1.1. Système de contreventement.....	36
3.1.1.2. Qualité du système de contreventement.....	38

3.1.1.3. Comportement au séisme.....	39
3.1.1.4. Type de sol.....	40
3.1.1.5. La régularité en plan.....	41
3.1.1.6. La régularité en élévation.....	43
3.1.1.7. Qualité des nœuds.....	44
3.1.1.8. Détails.....	45
3.1.1.9. Maintenance.....	46
3.1.1.10. Entrechoquement.....	48
3.1.1.11. Implantation du réservoir.....	50
3.1.1.12. Zone sismique.....	51
3.1.2. Détermination de l'indice de vulnérabilité.....	51
3.1.3 Classification.....	52
3.2. Présentation de la fiche d'enquête.....	53
Conclusion.....	53

Chapitre 4 : application de la méthode aux cas réels de réservoirs

Introduction.....	55
4.1. Evaluation de l'indice de vulnérabilité du réservoir de Berrahmoune.....	55
4.1.1. Présentation de l'ouvrage.....	55
4.1.2. Caractéristiques de l'ouvrage.....	57
4.1.3. Présentation du site d'implantation.....	57
4.1.4. Calcul de l'indice de vulnérabilité.....	58
4.1.4.1. Comportement au séisme.....	58
4.1.4.2. Entrechoquement.....	60
4.1.4.3. Système de contreventement.....	61
4.1.4.4. Régularité en plan.....	61
4.1.4.5. La régularité en élévation.....	63
4.1.4.6. Type de sol.....	64
4.1.4.7. Implantation du réservoir.....	64
4.1.4.8. Zone sismique.....	65
4.1.4.9. Qualité des nœuds.....	65

4.1.4.10. Qualité du système de contreventement.....	65
4.1.4.11. Maintenance.....	65
4.1.3.12. Détails.....	66
4.1.5. Calcul de l'indice de vulnérabilité.....	66
4.1.6. Interprétation des résultats.....	67
4.2. Evaluation de l'indice de vulnérabilité du réservoir de Siekh Oumedour.....	67
4.2.1. Présentation de l'ouvrage.....	67
4.2.2. Caractéristiques de l'ouvrage.....	68
4.2.3. Calcul de l'indice de vulnérabilité.....	68
4.2.3.1. Comportement au séisme.....	68
4.2.3.2. Entrechoquement.....	70
4.2.3.3. Système de contreventement.....	70
4.2.3.4. Régularité en plan.....	71
4.2.3.5. La régularité en élévation.....	72
4.2.3.6. Type de sol.....	74
4.2.3.7. Implantation du réservoir.....	74
4.2.3.8. Zone sismique.....	74
4.2.3.9. Qualité des nœuds.....	76
4.2.3.10. Qualité du système de contreventement.....	76
4.2.3.11. Maintenance.....	75
4.2.3.12. Détails.....	76
4.2.4. Calcul de l'indice de vulnérabilité.....	76
4.2.5. Interprétation des résultats.....	77
Conclusion.....	77
Conclusion generale.....	78
References bibliographiques	
annexes	

Liste des figures

Figure 2.1 : Modélisation du château d'eau.....	24
Figure 2.2 : Modèle de calcul	25
Figure 2.3 : Modes propres.....	29
Figure 2.4 : Déplacement vertical des vagues.....	30
Figure 3.1: Réservoirs surélèves en béton armé à console verticale et à masse uniformément repartie	37
Figure 3.2 : Réservoirs à pendule inverse.....	38
Figure 3.3 : Réservoirs sur pilotis.....	38
Figure 3.4 : Distribution de forme d'un réservoir surélevé	41
Figure 3.5 : Support encasté à l'extrémité et articulé à l'autre	42
Figure 3.6 : Rétrécissement et élargissement graduel sur la hauteur.....	44
Figure 3.7 : Les quatre axes du repère.....	46
Figure 3.8. Disposition adjacente des réservoirs.....	49
Figure3.9. Largeur minimum des joints sismiques	49
Figure 4.1. Vue générale du réservoir sis à Berrahmoune.....	55
Figure 4.2. Décomposition structurelle d'un réservoir surélevé.....	56
Figure 4.3. Représentation de l'emplacement du château d'eau.....	58
Figure 4.4. Réservoir à pendule inverse	61
Figure 4.5 : Dimensions de la cuve.....	61
Figure 4.6 : Vue générale du réservoir sis à Seikh Oumedour.....	67
Figure 4.7 : Réservoir sur pilotis.....	71

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Description des niveaux de dommages.....	9
Tableau 1.2. Valeurs des indices de vulnérabilité de base pour les principales typologies de L'ATC21 en fonction de trois niveaux de sismicité.....	12
Tableau 1.3. Classe de vulnérabilité et pondérations de chacun des paramètres structuraux ajustées à partir des endommagements observés.....	13
Tableau 1.4. Classification des paramètres et leurs coefficients	15
Tableau 1.5. Classification des structures en fonction de la vulnérabilité « I_v ».....	15
Tableau 1.6. Les paramètres de la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie et en béton armé, appliquée en Espagne.....	17
Tableau 1.7. Paramètres appliqués dans la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie en Algérie.....	19
Tableau 1.8. Liste des paramètres d'analyse.....	20
Tableau 1.9. Grille de hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre.....	21
Tableau 3.1. Caractérisation de la fissuration d'un parement par l'indice de fissuration.....	48
Tableau 3.2. Tableau 3.2. les différentes zones sismiques données par le (DTR-B-C-2-48,2003).....	51
Tableau 3.3 Les notes élémentaires (K_i) et les pondérations (W_i) pour chaque paramètre.....	52
Tableau 3.4. Classification des réservoirs en fonction de leurs indice de vulnérabilité « I_v ».....	52
Tableau 4.1. Liste des composants d'un réservoir surélevé.....	57
Tableau 4.2. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au comportement au séisme	60
Tableau 4.3. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'entrechoquement.....	60
Tableau 4.4. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au système de contreventement.....	61
Tableau 4.5. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en plan	62
Tableau 4.6. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en élévation.....	64
Tableau 4.7. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au type de sol.....	64
Tableau 4.8. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'implantation du réservoir.....	64
Tableau 4.9. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la zone sismique.....	65

Tableau 4.10. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité des nœuds.....	65
Tableau 4.11. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité du système de contreventement.....	65
Tableau 4.12. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la maintenance.....	66
Tableau 4.13. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au parametre détails.....	66
Tableau 4.14. Résultats de l'application de la méthode sur le réservoir surélevé implanté à Berrahmoune.....	66
Tableau 4.15. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au comportement au séisme	70
Tableau 4.16. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'entrechoquement.....	70
Tableau 4.17. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au système de contreventement.....	71
Tableau 4.18. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en plan	72
Tableau 4.19. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en élévation.....	74
Tableau 4.20. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au type de sol.....	74
Tableau 4.21. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'implantation du réservoir	74
Tableau 4.22. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la zone sismique.....	75
Tableau 4.23. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité des nœuds.....	75
Tableau 4.24. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité du système de contreventement.....	75
Tableau 4.25. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la maintenance.....	75
Tableau 4.26. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au parametre détails.....	76
Tableau 4.27. Résultats de l'application de la méthode sur le réservoir surélevé implanté à Siekh Omedour.....	76

Introduction générale

Le besoin d'améliorer la méthodologie de calcul des constructions soumises à une action sismique a été largement constaté dans les différents codes réglementaires. Le calcul parasismique consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Dans les codes et règlements parasismiques, l'étude de la réponse des structures sous l'action sismique est conduite en faisant appel à des méthodes selon la nature de l'ouvrage et sa destination.

Le phénomène des tremblements de terre n'est pas nouveau ni spécifique à l'Algérie. Il se déclare cycliquement d'une région à l'autre causant parfois des dégâts incommensurables. Pour cela, la réduction des pertes humaines et matérielles passe obligatoirement par l'estimation de la vulnérabilité sismique.

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons pour la première fois une méthode d'estimation de la vulnérabilité sismique des réservoirs surélevés de stockage d'eau, en se basant sur le calcul d'un indice de vulnérabilité I_v afin d'établir leur qualité sismique. A partir de cet indice nous procédons à la classification des réservoirs expertisés en trois niveaux de comportement. Le premier niveau regroupe les réservoirs ayant un bon comportement au séisme, le second comprend les réservoirs ayant un comportement moyen, et le troisième concerne les réservoirs ayant un mauvais comportement au séisme.

Pour mener à terme ce travail, nous avons structuré le manuscrit du mémoire en quatre (04) chapitres.

Le premier chapitre consiste en une étude bibliographique où l'on cite les méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des villes ou des constructions, les plus utilisés dans le monde.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes étapes de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique.

Au troisième chapitre, nous développons, en s'inspirant des approches développées par le groupe national pour la défense contre les séismes (GNDT, 1986) et (Benedetti et al. 1988), une méthode d'estimation de la qualité sismique des réservoirs de stockage d'eau potable, classés par les règlements parasismique algérien comme des ouvrages d'art d'importance socio-économique. Cette méthode offre la possibilité d'une mise à jour pratiquement continue de la qualité sismique des réservoirs.

Au quatrième chapitre, et afin de tester la fiabilité de la méthode développée au chapitre trois (03) nous l'appliquant aux cas concrets de réservoirs surélevés en béton armé. Ainsi nous avons choisi d'expertiser deux réservoirs de stockage d'eau ; à savoir le réservoir à pendule inverse implanté à la commune de Berrahmoune dans la wilaya de Boumerdes et le réservoir sur pilotis implanté à sikh oumedour dans la wilaya de Tizi-Ouzou.

Enfin, une conclusion générale relatera les principaux apports de notre étude que nous souhaitons être en mesure d'apporter un plus pour le large domaine d'expertise.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Introduction

Dans la famille des risques naturels, les séismes occupent un problème d'actualité provoquant assez systématiquement des dégâts dans les ouvrages de génie civil (ponts, bâtiments, réservoirs de stockage d'eau...etc.). C'est la raison pour la quelle les études de la vulnérabilité sismique des constructions ont été développées, pour évaluer les dommages dans les différentes constructions suite à un tremblement de terre.

Dans le cadre de ce chapitre, nous nous intéressons à la définition de la vulnérabilité sismique d'une structure en général et à la présentation succincte des différentes méthodes traitant de la question.

1.1. Définitions

1.1.1. L'alea sismique

L'alea est défini comme étant l'événement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région (un site) au cours d'une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer des dommages tel que le séisme. L'aléa sismique définit les caractéristiques des mouvements sismiques susceptibles de s'y produire dans le futur, en tenant compte de la durée de vie des constructions concernées et des types d'activité qui y sont réalisées.

1.1.2. La vulnérabilité d'une construction

La vulnérabilité d'une construction selon (Plumier André et *al.*, 1985) définit la sensibilité d'une construction à l'aléa. On la caractérise par un indice lié à la géométrie (dimension, hauteur, forme en plan, caractéristiques architecturales) et aux matériaux. Cette notion de vulnérabilité inclut l'importance des bâtiments en termes de coût, mais aussi des vies humaines menacées.

1.1.3. Le risque sismique

Le risque sismique selon (Plumier André et *al.*, 1985) définit l'importance et le coût des dégâts que peut induire un séisme d'un niveau donné, dans une construction donnée. Ce « risque sismique » est d'autant plus important, que l'alea sismique et la vulnérabilité le sont. On définit :

$$\text{Risque sismique} = \text{alea sismique} \times \text{vulnérabilité}$$

De manière plus générale, on parle de risque sismique parce que lors d'un tremblement de terre, les conséquences ne se calculent pas uniquement en termes de dégâts aux constructions.

Les enjeux concernent également l'impact en termes de vies humaines et du nombre de personnes blessées, du coût économique lié à la perturbation ou l'arrêt de l'activité de certaines entreprises, du coût social résultant des populations ayant perdu leur logement...etc.

1.1.4. Prévention

La prévention (Plumier André et *al.*, 1985) concerne les actions à mener connaissant les risques sismiques, de manière à diminuer l'impact des tremblements de terre futurs. Diminuer le risque ne peut se faire qu'en diminuant la vulnérabilité, parce que l'alea découle des contraintes de notre environnement et ne peut être modifié. Le scientifique essaie de l'évaluer au mieux. 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.

1.1.5. La vulnérabilité sismique

Dans la littérature, la définition de la vulnérabilité sismique varie d'un auteur à un autre. (Benedetti et *al.*,1986) l'expliquent par le degré des pertes des éléments concernés par les résultats spécifiques causés par des facteurs bien déterminés. Par contre, Ambraseys (Belhouene, 2006) l'a défini comme étant le degré d'endommagement qu'infligerait un séisme de paramètre X (magnitude, intensité, amplitude...etc.) à une construction donnée. En d'autres termes, c'est la mesure du pourcentage d'endommagement relatif à chaque élément structural exprimée dans une échelle allant de zéro à l'unité comme l'ont défini F. Djaalali et M. boukri (Belhouene, 2006).

Et selon Sandi (Belhouene, 2006), la distinction est nécessaire entre la vulnérabilité observée V_0 qui est évaluée à partir de l'observation de l'effet du séisme sur une construction, et la vulnérabilité prédite, V_p qui est estimée à partir de la prédiction de l'effet qui induirait un séisme futur sur le bâtiment. Cette définition est basée sur l'analyse du comportement de la structure en tenant compte de ses caractéristiques. En d'autres termes, la vulnérabilité est le degré de perte occasionnée à un élément ou à un ensemble d'éléments soumis à une probabilité donnée d'occurrence d'un phénomène naturel (le séisme) de magnitude donnée.

1.1.6. Historique de l'étude de la vulnérabilité sismique

(Whitman et *al.*1986) étaient parmi les premiers à avoir des statistiques systématiquement compilées sur les dommages aux bâtiments, après des séismes réels, à partir d'un aperçu des dommages provoqués par le séisme de San Fernando, du 9 février

1971. ils ont développés des matrices de probabilité des dommages (dommage probabiliste matrice, DPM) pour différents types de bâtiments par (Klang swiss federal institute of technology, zurich, swiss2002.)

Chaque nombre de la matrice exprime la probabilité qu'un bâtiment d'une certaine classe atteigne un niveau des dommages pour une intensité particulière du tremblement de terre. Ce format de matrice de probabilité des dommages est devenu la forme la plus largement répandue pour définir la distribution probable des dommages.

Des fonctions de vulnérabilité ont été développées par (Ciburn et al. année). Elles sont basées sur des données rassemblées pendant différentes études de cas de dommages provoqués par un certain nombre de séismes dans différents pays. Cinq catégories différentes de dommages sont considérées, pour chaque type de bâtiment. La distribution des dommages est exprimée par la probabilité d'une certaine catégorie de dommages donnée.

Suisse Reinsurance company (SRC. année) a étudié les effets de deux séismes celui d'Albstadt en Allemagne du 3 septembre en 1978, et celui du Chili centre du 3 mars 1985. L'ampleur des dommages est exprimée par le rapport des dommages moyens des bâtiments affectés, sur le type et la dimension de la construction. Les dommages moyens sont définis comme la qualité des pertes de tous les bâtiments provoquée par le séisme. Les résultats ont été employés pour estimer le montant total des pertes en fonction de la densité des bâtiments.

L'évolution de l'étude de la vulnérabilité dans le monde a donné naissance à plusieurs méthodes d'évaluation des dommages dans la littérature. Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation de la vulnérabilité des centres urbains et des constructions individuelles. Elles diffèrent les unes des autres en coût, en moyens utilisés et en précision.

Le type de la méthode choisie dépend de l'objectif de l'évaluation, mais également de la disponibilité des données, du matériel et de la technologie utilisés.

1.2. Paramètres pouvant influencer la vulnérabilité des structures

Plusieurs recherches ont été menées pour l'estimation de la vulnérabilité sismique et pour les facteurs influant sur son évaluation. En effet (S.W Cochrane et al. année) ont ainsi montré que la vulnérabilité augmente avec l'âge de la structure. Autrement dit, à cinquante ans la structure devient quatre fois plus vulnérable. Ils précisent que la vulnérabilité des constructions résidentielles est cinq fois plus importante que celle des constructions à usage industriel ou commercial.

Par ailleurs, (Tiedmann. Année) a constaté que la vulnérabilité est plus élevée (jusqu'à environ quatre fois) pour les constructions modérément irrégulières et asymétriques par rapport aux constructions régulières et symétriques ; bien que la régularité et la symétrie dans les bâtiments sont difficilement quantifiables ; d'où leurs influences les moins connues.

- Quant à la vulnérabilité due à l'influence du sol peut avoir deux origines d'après le rapport (Swiss Re1985) à savoir :
 - L'instabilité du sol, due à sa composition, à sa liquéfaction et aux glissements du terrain.
 - L'effet de résonance entre le sol porteur et la hauteur des bâtiments.
- (Benedetti et *al.* 1986) quant à eux considèrent l'influence d'autres paramètres sur le comportement des structures en maçonnerie ; tels que :
 - la nature de la distribution des éléments porteurs,
 - la qualité de connexion entre les murs porteurs,
 - le type et la qualité des planchers,
 - le type du sol,

1.3. Méthode d'estimation de la vulnérabilité sismique des villes

Les premières méthodes d'analyse de la vulnérabilité sismique du bâti existant ont été développées dans des pays à sismicité élevée, tels que les états unis (ATC21, Hazus. année), le japon (Otani.année) et en Italie (Benedetti and petrini, GNDT.année). La plupart de ces méthodes ont été établies sur la base d'observations post-sismique, recensant le niveau de dommage observé en fonction de la nature de la construction.

L'estimation des pertes dues aux séismes, dans une région donnée, nécessite la classification des bâtiments de cette région en catégories. Ces catégories sont établies généralement en fonction du système constructif et de quelques facteurs pris en compte comme le type du système structurel, les matériaux de construction, les dimensions du bâtiment, la résistance de conception au séisme et l'âge de la construction.

Généralement, les méthodes d'évaluation des dommages s'appuient sur l'utilisation des matrices de probabilité de dommages ou de courbes de vulnérabilité qui donnent le pourcentage d'une famille de bâtiment ayant atteint un certain niveau de dommage, on distingue :

- L'approche probabiliste utilisant des matrices de probabilité de dommage. C'est

l'une des premières méthodes développées pour l'estimation des dommages. Les matrices de probabilité de dommage DPM sont issues directement du retour d'expérience et des estimations de dommages après plusieurs séismes. En général, le niveau sismique est exprimé par une intensité pour laquelle l'importance des dommages suivant la typologie est donnée par un degré de l'échelle. A chaque type de construction correspond une DPM qui exprime la fréquence d'atteindre un max de dommage si un séisme d'un certain niveau se produit (AFPS)

- L'approche statistique utilisant des courbes de vulnérabilité, les courbes de vulnérabilité, appelées courbes de fragilité, sont identiques aux matrices de probabilité de dommage mais ont l'avantage d'avoir des expressions analytiques. Chaque courbe de vulnérabilité est associée à un niveau de dommage donc chaque type de construction est défini suivant sa vulnérabilité et la nature des dommages est classée dans une échelle à plusieurs degrés.
- L'approche déterministe utilisant des courbes de vulnérabilité, Cette approche utilise une seconde famille de courbes de vulnérabilité qui donnent le dommage moyen en fonction du niveau sismique. Ce dommage moyen permet de connaître le pourcentage de bâtiments dans un niveau de dommage donné.

Dans le monde, il existe de nombreuses méthodes pour estimer les dommages dus aux séismes. Les premiers à avoir évalué la vulnérabilité sismique des villes ont été les Américains. Maintenant, les Japonais et les européens ont développées d'autres méthodes.

1.3.1 Méthode de l'ATC13

Un des premiers rapports traitant le calcul de la vulnérabilité sismique des constructions est celui de conseil de la technologie appliquée (applied technology conseil « ATC »), qui est repris par l'Agence Fédérale de la gestion des risques (Federal Emergency Management Agency « FEMA »). Ce rapport a été établi en 1971 et récapitulé dans le rapport ATC13 (rapport technique de L'ETS, Marie José Nollet, 2004).

A partir de consultation de 58 experts, le rapport ATC13 (ATC, 1985) dérive des matrices des dommages probables pour 78 classes d'installations dont 36 réfèrent à des bâtiments.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle fait appel à la subjectivité des experts et introduit des incertitudes sur l'estimation des dommages et sur l'opinion formulée. De plus, les matrices développées sont difficilement applicables dans d'autres régions et à d'autres

types de structures. Cette méthode est cependant demeurée la référence jusqu'aux années 1990.

Le rapport ATC 13 a ensuite servi de fondement pour l'élaboration en 1997 du logiciel Hazus par le National Institute of Building Science (NIBS).

1.3.2 Méthode de HAZUS

Une autre méthodologie pour l'évaluation de la vulnérabilité a été faite par l'institut national de la science du bâtiment (National Institute of building science NIBS), aux Etats Unis. Fondé encore par l'Agence Fédérale de la gestion des risques (Fédéral Emergency Management Agency, « FEMA »). Le résultat a été le logiciel 'HAZUS' (rapport technique de L'ETS, Marie José Nollet, 2004). interactif pour l'évaluation des risques, lancé pour la première fois en 1997 et mis à jour en 1999.

Dans cette méthode, on trouve les déplacements spectraux et les accélérations spectrales comme mesures d'entrées sismiques. Cependant l'étude de HAZUS continue à se fonder sur l'opinion d'experts pour estimer l'état des dommages qui résulteraient d'un déplacement et d'une accélération spectrale donnée. Trente six (36) types de modèles de bâtiments sont considérés par la méthodologie et pour chaque type de bâtiment la description de quatre niveaux des dommages est donnée (légers, modérés, importants, et perte totale). On calcul en suite les valeurs limites des paramètres de capacité du bâtiment pour l'initiation des dommages pour chaque niveau de conception sismique. Ces paramètres sont, en autres, le déplacement inter-étages et les déplacements spectraux. Hazus donne pour chaque type de bâtiments les données permettant d'obtenir les courbes de capacité, ou « pushover curves » donnent l'effort de cisaillement total V agissant sur une structure, ou d'accélération spectrale correspondante S_a , en fonction du déplacement latéral maximal, ou le déplacement spectral S_d . Les courbes de fragilité décrivent la probabilité qu'un bâtiment appartenant à une certaine classe atteigne ou dépasse un niveau de dommage donné pour un estimé déterministe de la réponse spectrale (accélération ou déplacement).

1.3.3 Méthode probabiliste italienne

En Italie plusieurs matrices de probabilité de dommage DPM ont été adoptées aux typologies courantes. Elles ont été établies au départ suite aux relevés de dommages effectués après le séisme d'Irpinia du 23 novembre 1980, (thèse Bouhadoun, 2010) puis ont été adoptées ou modifiées suite à plusieurs séismes italiens. Une première classification des typologies à

été proposée en tenant compte des matériaux et des techniques de construction ainsi que leur comportement sismique observé pendant des séismes destructeurs.

La classification des dommages a été définie sur une échelle comportant 7 degrés, proche de ceux proposés dans l'EMS98 (European Macroseismic Scale). Le tableau présente la description des niveaux de dommage

Tableau 1.1. Description des niveaux de dommages

Niveau de dommage	Description
1	Aucun
2	Insignifiant
3	léger
4	Considérable
5	Sérieux
6	Très sérieux
7	Destruction partielle

Une fois les typologies et la description des dommages établis, les matrices de probabilité de dommages (DPM) ont été produites sur la base des observations post-sismiques. Elles dépendent de l'intensité de l'échelle MSK. L'échelle publiée par (Medvedev et *al.*, 1964) fut la première à apporter des précisions sur les avantages et à servi de point de départ à la définition de l'échelle macrosismique européenne, et de taux de dommages atteint. Il est ainsi possible de définir la probabilité qu'une structure de subir un niveau de dommage pour une intensité donnée.

1.3.4 Méthodologie de RISK-UE

Le projet RISK-UE consistait à traiter la vulnérabilité sismique de sept grandes villes européennes, Barcelone (Espagne), Bitola (macédoine), Bucarest (Roumanie), Catane(Italie), Nice(France), Sofia (Bulgarie) et Thessaloniki(Grèce) de façon à permettre l'émergence d'une classification des bâtiments commune plus détaillée que celle de L'EMS 98 et des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique.

RISK-UE est un projet utilisé pour l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments courants. Ce projet repose sur l'évaluation de l'indice de vulnérabilité pour un bâtiment donné, indice qui est fonction de la typologie constructive ainsi que des différents facteurs susceptibles de modifier son comportement. A partir de cet indice, il est possible de définir en fonction de l'intensité macrosismique L'EMS98, des courbes de vulnérabilité et de fragilité qui permettent d'évaluer la répartition des de probabilités de dommages sur un bâtiment. Deux

niveaux d'évaluation des constructions ont été développés : le niveau 1 ou LM1, le niveau 2 ou LM2

La méthode de niveau 2 est une méthode coûteuse nécessitant des moyens et des compétences plus large pour une analyse à grande échelle, car elle se base sur l'analyse de la capacité d'une structure à dissiper de l'énergie.

La méthode LM1 est utilisée pour l'estimation de la vulnérabilité des bâtiments. Elle est basée sur la classification des structures en fonction de leurs systèmes de contreventement et sur les modèles de chargement afin d'avoir des types de dommages semblables lors d'un séisme. La référence généralement utilisée pour telles classifications est les matrices de vulnérabilité de L'ATC13(1985), car elles jouent un rôle indispensable dans l'étude de développement des courbes de fragilité. La méthode LM1 est en grande partie basée sur la corrélation entre l'intensité macrosismique et les dommages observés lors d'un séisme passé

Les principaux inconvénients de la méthodologie RISK-UE sont énoncés ci-dessous :

-pour LM1 les estimations faites surestiment les pertes qui peuvent être réellement occasionnées ; c'est ce qui ressort des principales validations faites de la méthode.

-pour LM2, le problème réside dans le fait que pour certaines constructions leur indice de vulnérabilité peut être négatif ou bien supérieur à un (1). Cependant, dans cette méthode, l'indice est compris par hypothèse entre zéro (0) et un (1) ; d'où la difficulté d'interpréter des valeurs négatifs ou supérieurs à un (1).

1.3.5. Approche analytique européenne

La modélisation simple des bâtiments exige seulement quelques paramètres en entrées, ces méthodes sont plus simples, et moins longues pour une élaboration des scénarios sismiques. Cependant pour que les résultats soient plus fiables, les quelques paramètres d'entrée doivent refléter le comportement sismique des bâtiments (K. Lang « swiss fédéral Institute of technology, Zurich, swiss2002.).

Pour l'évaluation des pertes sismiques des centres- villes historiques, en Europe, une évaluation de la vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie à été développée et appliquée à une étude de cas dans l'Alfama, la zone de Lisbonne, et aux villages de l'ombri –marche en1997, l'approche est basée sur l'identification de la capacité équivalente de cisaillement, exprimée comme une accélération critique, les données de l'état de la géométrie des constructions, basées sur des évaluations visuelles, sont nécessaires.

Les méthodes d'analyse globales des ont été pour la plupart développées sur la base d'étude sur des constructions individuelles, puis les résultats ont été étendus.

1.4 Méthode d'estimations des dommages pour les constructions

Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'estimation des dommages dans les bâtiments nous avons :

1.4.1 Méthode ATC21

L'analyse d'un bâtiment par la méthode de L'ATC21 doit permettre de déterminer son type en le rattachant à une typologie précise. Les principales typologies publiées dans L'ATC21, puis reprise dans le rapport 145 de la FEMA en 1988 sont :

- bâtiments en bois,
- portique en charpente métallique,
- charpente métallique contreventée,
- structures métalliques légères,
- portiques métalliques avec murs en béton armé,
- portique en béton armé,
- murs porteurs en béton armé,
- portique avec remplissage en maçonnerie non armé,
- bâtiment à murs porteurs préfabriqués,
- portique en béton préfabriqué,
- maçonnerie armée,
- et maçonnerie non armée.

L'ATC21 comporte plus de 90 typologies différentes en fonction des hauteurs de l'ouvrage et de l'année de sa construction ; ce qui rend difficile son utilisation.

Une fois la typologie définie, l'indice de vulnérabilité de base de chacune de ces typologies, appelé BSH, est donné en fonction des critères structuraux relevés lors de l'expertise visuelle et qui dépend de la sismicité du site. L'indice BSH est autant plus faible que la sismicité est plus forte. Le tableau suivant exprime les valeurs des indices de

vulnérabilité de base pour les principales typologies de L'ATC21, en fonction de trois niveaux de sismicité :

Tableau 1.2 : Valeurs des indices de vulnérabilité de base pour les principales typologies de L'ATC21 en fonction de trois niveaux de sismicité.

Typologie	Sismicité		
	Faible	Moyenne	forte
Bois	8,0	6,0	4,5
Acier	3,5	4,0	4,5
Acier avec contreventement	2,5	3,0	3,0
Métal	6,5	6,0	5,5
Portique acier avec murs béton	4,5	4,0	3,5
portique béton armé	4,0	3,0	2,0
Murs béton armé	4,0	3,0	2,0
Remplissage maçonnerie	3,0	2,0	1,5
Voiles préfabriqués	3,5	3,5	2,0
Portiques préfabriqués	2,5	2,0	1,5
Maçonnerie armée	4,0	3,5	3,0
Maçonnerie non armée	2,5	2,0	1,0

Les typologies définies dans l'ATC21 représentent des bâtiments construits en Amérique de nord, ce qui rend difficile leurs utilisations dans d'autres régions du monde.

1.4.2 Méthode de L'ATC40

Cette méthode conçue pour les constructions de béton armé, publiée aux Etats Unis en 1986 par Applied Technology Council, est innovante par rapport aux approches classiques. La capacité d'atteindre un niveau de performance est évaluée en termes de déplacements et non en termes de forces, car lors des déformations post élastiques.

L'importance des dommages est d'avantage fonction des déplacements que des forces. des courbes de capacité des déplacements (donc de déformabilité) sont tracées pour le bâtiment étudiés. Elles dépendent des caractéristiques de ces derniers et non pas d'une agression sismique. Les différents degrés de dommages correspondant aux déplacements sont localisés sur la courbe. En corrélant la courbe de capacité de déplacement du bâtiment avec le déplacement maximal, provoqué par un mouvement sismique de sol donné, déterminé par une méthode proposée dans le document, on obtient un point appelé « point de performance ».

La méthode ATC40 a suscité un grand intérêt dans le monde entier. Toutefois elle n'est pas accessible qu'aux spécialistes, car le type de calcul utilisé pour déterminer les courbes de capacité est peu courant calcul statique « pas a pas ».

1.4.3. La méthode GNDT (en Italie)

En Italie l'utilisation d'une technique d'évaluation pour assigner des indices de vulnérabilité a été proposée pour la première fois par (Benedetti et al. , 1984) cette technique a été développée par la suite par le groupe national de défense contre les tremblements de terre (GNDT) du conseil national de recherche de l'Italie (CNR). La méthode (GNDT), maintenant largement utilisée (au Chili 1985 par s'aez sur les maisons d'adobe plus tard utilisé pour le béton armé), a permis de répertorier des milliers des bâtiments à travers l'Italie (Augostic et Ciampoli, 2003) et au nord du Maroc après le séisme qui a frappé la région d'Al Hoceima avec une magnitude de 6,3 (revue canadienne de génie civil volume 35 numero 6 juin 2008). Elle a été établie en distinguant les bâtiments en maçonnerie des bâtiments en béton armé.

L'indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie se calcule, en combinant des informations descriptives (typologiques et qualitatives) et des informations quantitatives. Pour chaque paramètre on définit la classe de vulnérabilité I_{vi} comprise entre A et D avec la moins vulnérable est la classe A elle traduit la conformité de ce paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure. La plus vulnérable est la classe D elle traduit la situation la plus défavorable. Tandis que les classes B et C représentent des états intermédiaires

L'indice de vulnérabilité de base I_{vi} se calcule comme la somme pondérée des I_{vi} . Le tableau 1.4 montre que chaque paramètre structurel est caractérisé par une classe de vulnérabilité entre A et D et par une pondération (W_i) pour tenir compte de l'importance de chacun des paramètres dans le comportement globale de la structure.

Tableau 1.3 : classe de vulnérabilité et pondérations de chacun des paramètres structuraux ajustées à partir des endommagements observés

Paramètres	A	B	C	D	W_i
1	0	5	20	45	1
2	0	5	25	45	0,25
3	0	5	25	45	1,5
4	0	5	25	45	0,75
5	0	5	15	45	var
6	0	5	25	45	0,5
7	0	5	25	45	var
8	0	5	25	45	0,25
9	0	15	25	45	var
10	0	0	25	45	0,25
11	0	5	25	45	1

Pour les paramètres 5,7 et 9 la pondération W_i varie entre 0,5 et 1, suivant la classe de Vulnérabilité.

Cette méthodologie présente l'avantage de reposer sur des analyses statiques du comportement des structures en maçonnerie lors de l'occurrence sismique. Mais l'application de cette méthode demande un expert pour le choix des paramètres 5,7 et 9.

La méthode GNDT est un outil d'évaluation de la vulnérabilité des constructions en maçonneries ou en béton armé et peut être appliquée pour les villes. Mais, pour une bonne évaluation, cette méthode nécessite une auscultation visuelle plus exhaustive de chaque bâtiment, rendant la méthode d'évaluation à grande échelle plus coûteuse.

1.4.4. Etude de Belhouene

Cette étude propose de quantifier la vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé, en développant la méthode de l'indice de vulnérabilité. Ceci a nécessité la définition des paramètres influant sur la détermination de cet indice, ainsi que de leurs coefficients de pondération. L'indice ainsi calculé permet la classification des bâtiments. Pour cette classification, elle propose trois classes. La première regroupe les structures ayant un bon comportement, la seconde, un comportement moyen et enfin la troisième regroupe les constructions ayant une mauvaise tenue au séisme. Elle développe aussi un code de calcul en langage Delphi. Cet outil développé permet de faire le diagnostic des bâtiments existants en béton armé par l'analyse de la vulnérabilité sismique. Cette méthode est développée en tenant compte de l'influence des éléments structuraux et non structuraux sur la réponse sismique de la construction. Elle consiste

à attribuer une valeur numérique à chaque bâtiment, dite indice de vulnérabilité I_v , qui est une représentation de sa qualité sismique.

Les paramètres utilisés pour le calcul de l'indice de vulnérabilité sont au nombre de quatorze définis par l'approche experte, basée sur le retour d'expérience de sismicité en Algérie. Afin de caractériser chacun des paramètres de l'étude, un certain nombre d'informations sur le bâtiment est nécessaire, obtenus par le renseignement de fiche d'évaluation ou d'enquêtes développée dans le cadre de cette recherche.

Tableau 1.4. classification des paramètres et leurs coefficients

N°	paramètres	Classe A	Classe B	Classe C
1	système de contreventement	0, 25	1, 25	2, 25
2	qualité du système de contreventement	0, 00	0, 50	0, 75
3	La capacité sismique	0, 25	0, 25	0, 50
4	type de sol	0, 25	0, 50	0, 75
5	Diaphragme horizontal	0, 25	0, 50	0, 75
6	Régularité en plan	0, 25	0, 50	0, 75
7	Régularité en élévation	0, 25	0, 75	1, 75
8	Qualité des nœuds	0, 25	0, 50	0, 75
9	Phénomène des poteaux courts	0, 25	0, 50	0, 75
10	Détails	0, 25	0, 50	0, 75
11	maintenance	0, 25	0, 75	1, 25
12	Modification	0, 25	0, 50	0, 75
13	Entrechoquement	0, 25	0, 50	0, 75
14	Implantation de l'ouvrage	0, 25	0, 50	0, 75

L'indice de vulnérabilité I_v s'exprime alors comme la somme de $I_v = \sum_{i=1}^{14} K_i$

Tableau 1.5. Classification des structures en fonction de la vulnérabilité « I_v »

Niveau de vulnérabilité	Vert	Orange 1	Orange 2	Rouge
Indice de vulnérabilité I_v	13 - 50	50 - 87	87 - 135	135 - 196

La validation de cette théorie a été réalisée sur plusieurs exemples tirés des rapports d'expertise de l'organisme national de contrôle techniques des constructions « CTC ».

1.4.5. Méthode de l'indice de vulnérabilité

Cette méthode est basée aussi sur l'approche de Benedetti et Petrini et a été développée par F. Yapéze et al en 1995, c'est une méthode qui permet d'obtenir des matrices de

probabilité de dommages et des fonctions de vulnérabilité pour des bâtiments. La qualité sismique structurale des bâtiments est évaluée en employant l'indice italien de vulnérabilité utilisé pour des études à grandes échelles, cet indice est un indicateur de l'état de la structure qui peut être estimée avant comme après l'occurrence de l'événement sismique. Il nous permet de connaître l'état des constructions d'une région et de les classer selon leur vulnérabilité, cette méthode offre la possibilité d'une mise à jour pratiquement continue de la qualité sismiques des bâtiments d'une région.

Les différents paramètres, pris en compte par cette méthode, sont classés en trois catégories.

Chaque paramètre a une valeur exprimant la valeur numérique exprimant la qualité sismique des éléments structuraux et non structuraux influant sur le comportement sismique de la construction. La somme des valeurs numériques de ces paramètres représente l'indice de vulnérabilité I_v de la construction étudiée. L'étude de la vulnérabilité sismique des constructions, en classant ces dernières par la méthode de l'indice de vulnérabilité, a été souvent utilisée en Europe et notamment en Italie. Nous nous proposons, en s'inspirant de ce qui a été développé en Italie de développer une méthode d'estimation de la qualité sismique des constructions en Algérie, en utilisant la méthode de l'indice de vulnérabilité. Cependant, l'application de cette méthode, en Algérie, doit prendre en considération

- les différences des réglementations parasismiques utilisées en Italie et en algérien.
- la différence dans la maîtrise de la mise en œuvre des techniques de construction.
- la différence morphologique du sol entre l'Italie et l'Algérie.

1.4.4.1. Méthode de l'indice de vulnérabilité sismique appliquée en Espagne

Cette méthode est basée aussi sur l'approche de Benedetti et Petrini, et à été développée par F. Yapez et al en 1995. c'est une méthode qui permet d'obtenir des matrices de probabilité de dommages et des fonctions de vulnérabilité pour des bâtiments.

Le comportement de la maçonnerie non-renforcée typique et des bâtiments en béton armé existants dans la région spécifique est simulé pour différents niveaux d'actions sismique prévue dans cette région. La qualité sismique structurale des bâtiments est évaluée en employant l'information de dommages réels de la région endommagée. Les matrices et les fonctions de vulnérabilité sont obtenues par (F. Yapez, A.H.Barbat, et J.A.Canas en 1996) et appliquées à l'étude de la région de Barcelone, en Espagne.

La méthode d'indice de vulnérabilité a été choisie pour les évaluations sismiques structurales. Les paramètres les plus importants ayant une influence sur les dommages dans les bâtiments sont clairement identifiés et individuellement quantifiés, dans une échelle numérique pesée. Pour souligner l'importance relative de ces paramètres, on emploie les valeurs observées dans le tableau (1.7). La classification finale du bâtiment est faite en fonction de l'indice de vulnérabilité « I_v » pour les constructions en maçonnerie établi par (F. Yapez, A.H.Barbat, et J.A .Canas).

Cet indice est normalisé pour les structures en béton armé. L'indice des dommages est définie comme une combinaison des valeurs assignées aux différents composants structuraux et non structuraux, données comme pourcentage cependant, l'étude du tremblement de terre du 23 décembre 1993 et celui du 4 janvier 1994 produits en Espagne du sud, a permis la classification de beaucoup de structures en maçonnerie et en béton armé qui ont été sérieusement endommagées.

Les indices de vulnérabilité et de dommages ont été déterminés pour chaque bâtiment de maçonnerie étudiés et les fonctions de vulnérabilité pour les intensités VII et VIII ont été obtenues au moyen d'une analyse statistique faite par (F. Yapez, A.H.Barbat, et J.A .Canas).

Le tableau 1.7 qui suit représente les facteurs utilisés dans la méthode ainsi que leurs coefficients :

Tableau 1.6. Les paramètres de la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie et en béton armé, appliquée en Espagne

N°	Type de la structure	Maçonnerie					Béton armé		
		Ki=A	Ki=B	Ki=C	Ki=D	Wi	Ki=A	Ki=B	Ki=C
1	Système de contreventement	0	5	20	45	1,00	0,00	-1,00	-2,00
2	Qualité du système de contreventement	0	5	25	45	0,25	0,00	-0,25	-0,50
3	La capacité sismique	0	5	25	45	1,50	0,25	0,00	-0,25
4	Type de sol	0	5	25	45	0,75	0,00	-0,25	-0,50
5	Diaphragme horizontal	0	5	25	45	1,00	0,00	-0,25	-0,50
6	Régularité en plan	0	5	25	45	0,50	0,00	-0,25	-0,50
7	Régularité en élévation	0	5	25	45	1,00	0,00	-0,50	-1,50
8	Qualité des nœuds	0	5	25	45	0,25	0,00	-0,25	-0,50
9	Phénomène des poteaux courts	0	15	25	45	1,00	0,00	-0,25	-0,50
10	Eléments non structuraux	0	5	25	45	0,25	0,00	-0,25	-0,50
11	Maintenance	0	5	25	45	1,00	0,00	-0,50	-1,00

Le calcul de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie est donné par la formule établie par (F. Yapez, A.H.Barbat, et J.A .Canas) :

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i * W_i$$

Les formules normalisées pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des constructions en béton armé sont données comme suit selon (F. Yapez, A.H.Barbat, et J.A .Canas) :

$$I_c = \sum_{i=1}^{11} K_i$$

$$I_v = -10,07 * (I_c - 0,25) \quad \text{si } I_c \geq -6,5.$$

$$I_v = 67,972 - 1,31 * (I_c + 6,5) \quad \text{si } I_c < -6,5.$$

Les taux d'indices sont précédés du signe(-) mais l'indice de vulnérabilité de la construction est déterminé par la valeur absolue des nombres, sans tenir compte du signe.

1.4.4.2. Méthode de l'indice de vulnérabilité sismique appliquée en Algérie

La ville de Blida est située au nord de l'Algérie .elle est classée comme étant région à forte sismicité d'après le règlement parasismique algérien (DTR-B-C-2-48,2003) de part le passe. La ville a été secouée par plusieurs séismes destructeurs. Blida est un grand centre administratif, industriel, commercial, militaire, universitaire, sportif et sanitaire. De ce fait, elle requière une attention particulière pour le protéger contre le phénomène sismique. A cet effet, un scénario catastrophe sismique de la ville de Blida a été réalisé en utilisant la méthode RADIUS (Risk Assesement Tools For Diagnostic Of Urbain Areas Against Seismic Disaster).

L'analyse est faite en considérant les aspects géologiques du terrain ainsi que les aspects structuraux du système urbain de la ville. Ce scénario a permis d'évaluer les pertes humaines et matérielles provoquées par un éventuel séisme, ceci permettra aux autorités locales de mener des actions préventives pour réduire les dégâts.

A Alger et plus particulièrement dans les communes les plus anciennes, le bâti existant est constitué en majeure partie de constructions en maçonnerie (pierre et/ou brique) ce parc immobilier constitue un patrimoine de valeur socio-économique et culturelle importante. Les expertises effectuées sur ce bâti ainsi que les enquêtes post- sismiques qui ont eu lieu sur ce territoire ont montré la faible résistance de ce type de constructions vis -à-vis du séisme en conséquence, l'étude de la vulnérabilité sismique de ces constructions s'avère nécessaire et constitue une étape primordiale pour la réduction des pertes dues aux séismes dans cette ville. Cette vulnérabilité peut être réduite si des mesures préventives sont prises. La méthode de l'indice de vulnérabilité consiste à identifier des paramètres structuraux et non structuraux ayant une influence sur la réponse sismique de la structure, en se basant sur le développement

effectués par (Benedetti et al, 1988), le tableau 1.8 illustre les paramètres interviennent pour l'estimation de la qualité sismique des constructions à Alger.

Tableau 1.7. Paramètres appliqués dans la méthode de l'indice de vulnérabilité pour les constructions en maçonnerie en Algérie

N°	Paramètres	A	B	C	D	Facteur de pondération
1	Resistance totale au cisaillement	0	5	25	45	1,5
2	Régularité en plan	0	5	25	45	0,5
3	Régularité en élévation	0	5	25	45	0,5
4	Connexion des murs	0	5	25	45	1,0
5	Type de murs	0	5	25	45	0,25
6	Plancher	0	5	25	45	0,25
7	Toiture	0	15	25	45	0,25
8	Conditions de sol	0	5	25	45	0,75
9	Détails	0	0	25	45	0,25
10	Maintenance	0	5	25	45	1,0
11	Socioculturel	0	5	25	45	0,5

Les résultats de cette étude, appliquée sur la ville d'Alger, sont satisfaisants et ont été conformité avec les endommagements enregistrés lors des séismes de Zemouri du 21 mai 2003.

1.5. Méthode de l'indice de vulnérabilité des ouvrages hydrauliques

Parmi les études les plus intéressantes dans le cadre de ce domaine, on trouve les travaux faits par l'équipe de G.Mathieu au Cemagref (Aix en Provence, France) qui ont été repris, adapté à la réalité algérienne par (H.Hammoum, 2012.UMMTO, Algérie).

1.5.1. Méthode de G. Mathieu

Dans le domaine des réservoirs de stockage, (Mathieu, 2003) au Cemagref (Aix en Provence) a mené des recherches depuis les années 1990 et a proposé des méthodes ayant pour but d'indiquer les ouvrages qui ont un environnement sensible, un caractère stratégique important et ceux qui présentent ou non des désordres structurels visuels de gravité variable. Par ailleurs, (Hammoum, 2012) s'est intéressé à l'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton aux aléas naturels (séisme...etc.), par la détermination d'un indice « Iv ». Le calcul de cet indice fait intervenir treize (13) paramètres influents (environnementaux, structuraux et fonctionnels) qui sont résumés dans le tableau (1.8)

Chacun des treize paramètres sera sanctionné par une note élémentaire N_{ei} . Le principe de notation choisi correspond aux critères d'amplification des notes en fonction de

l'accroissement des risques de vulnérabilité. Chaque élément de notation est affecté d'un coefficient P_i de pondération.

La note élémentaire N_{ei} de chaque paramètre est comprise entre 1 et 4 : 1 correspond à la situation idéale et 4 à la situation critique avec des notes intermédiaires. Il en est de même des poids de pondération P_i dont les valeurs varient de 1 à 4 : 1 pour une pénalisation minimale du paramètre et 4 pour une pénalisation maximale en considérant des situations intermédiaires.

Une plage d'évaluation plus large obligerait à plus de finesse dans l'analyse, ce qui peut donner lieu à des controverses au sein d'un même groupe d'experts qui aurait à analyser un même défaut ou pathologie. Donc, une analyse sur un nombre important de valeurs pose des difficultés de recouplement des classes qualitatives et engendre une divergence d'analyse entre experts. L'expérience du Cemagref, dans le domaine d'évaluation des dégradations des ouvrages hydrauliques a montré qu'une analyse à 4 valeurs est bien adaptée au diagnostic rapide. C'est pour ces raisons que nous avons adopté une analyse qualitative des états sur quatre valeurs pour les défauts et dégradations.

Tableau 1.8. Liste des paramètres d'analyse.

Type d'analyse	N°	Désignation des paramètres
Analyse environnementale	1	Implantation du réservoir
	2	Zone sismique
	3	Type de sol
	4	Zone de la neige
	5	Zone du vent
Analyse structurelle	6	Type de la structure
	7	Type de fondation
	8	Étanchéité des parois
	9	Étanchéité de la couverture
Analyse fonctionnelle	10	Défauts apparents
	11	Rôle de réservoir
	12	Importance du réservoir
	13	Fréquence d'entretien

La note partielle d'un paramètre est alors obtenue par le produit ($N_{ei} \cdot P_i$) et l'indice de vulnérabilité « I_v » s'exprime comme la somme des notes partielles des différents paramètres

comme donné par l'équation (1).

$$I_v = \sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot P_i \quad (1)$$

Pour un critère donné, nous pouvons construire une grille d'évolution de sa note partielle ($N_{ei} \cdot P_i$), en tenant compte de tous les scénarios possibles. Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau (1.9)

Tableau 1.9. Grille de hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre

		Note élémentaire N_{ei}			
		1	2	3	4
Pondération P_i	1	1	2	3	4
	2	2	4	6	8
	3	3	6	9	12
	4	4	8	12	16

En considérant tous les critères d'analyse énumérés précédemment (Tab. 1) au nombre de treize, nous proposons une classification, répartie en quatre niveaux de vulnérabilité :

- Le niveau vert : $13 \leq I_v \leq 49$: L'ouvrage présente un bon comportement aux aléas naturels et ne nécessite pas une attention particulière après sa réalisation et sa mise en service.
- Le niveau orange 1 : $49 \leq I_v \leq 87$: Le réservoir présente une vulnérabilité moyenne aux aléas naturels.
- Le niveau orange 2 : $87 \leq I_v \leq 136$: Le réservoir a une vulnérabilité assez élevée aux aléas naturels.
- Le niveau rouge : $136 \leq I_v \leq 196$: Le réservoir présente une vulnérabilité élevée aux aléas naturels. Le réservoir doit être mis hors service ou à défaut en situation de restriction d'utilisation, immédiatement.

Conclusion

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures sont généralement développées sur la base des observations post-sismiques des pays à forte sismicité.

Afin de réduire les pertes et les dommages dus aux séismes, l'étude de la vulnérabilité sismique de ces constructions constitue une étape primordiale. Cette vulnérabilité peut être réduite si des mesures préventives sont prises.

L'évolution de l'étude de la vulnérabilité sismique dans le monde a donné naissance à plusieurs méthodes d'évaluation des dommages. Elles sont essentiellement élaborées à partir d'observations post-sismiques et fonctionnent toutes de la même façon. Elle repose sur la définition de l'aléa sismique sur l'inventaire et la cartographie des constructions de la zone d'étude et sur l'état du bâti vis-à-vis des séismes. Ce dernier est représenté par des indices de vulnérabilité obtenus à l'aide d'évaluation plus ou moins sophistiquée. L'étape finale propose une estimation des taux de dommages, résultat de la combinaison entre aléa et vulnérabilité.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des centres urbains. Elles diffèrent les unes des autres en coût en moyens utilisés et en précision. Le type de la méthode choisie dépend de l'objectif de l'évaluation, de la disponibilité des données, du matériel et de la technologie utilisés.

Dans ce chapitre, nous avons cité les méthodes les plus connues d'estimation de la vulnérabilité sismique des villes et des structures. Ces méthodes ont été développées dans des pays à sismicité élevée. La compréhension de la structure et la recherche des critères structuraux peuvent s'avérer complexes. Il faut donc trouver un équilibre entre les moyens mis en œuvre, les méthodes applicables et les résultats recherchés. D'autre part, ces méthodes varient suivant leurs degrés de précision et de sophistication, ce qui engendre dans des pays à sismicité modérée des coûts d'application importants ou des incertitudes élevées à cause de la complexité des informations recherchées.

En s'inspirant des différentes méthodes suscitées, tout particulièrement de la méthode GNDT, nous développons pour la première fois une méthode pour l'estimation de la vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau. Celle-ci fera l'objet du troisième chapitre.

Pour comprendre le comportement au séisme des réservoirs surélevés nous développons au chapitre le détail de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique.

Chapitre 2

Etude au séisme des réservoirs surélevés

Introduction

Dans les codes parasismiques l'étude de la réponse des structures aux effets de l'action sismique est menée en utilisant des méthodes simplifiées. Ces mêmes codes recommandent pour l'analyse des structures complexes ; des méthodes d'analyse plus avancées.

Dans le cas des ouvrages hydrauliques les relations empiriques proposées par le règlement parasismique algérien (DTR-B-C-2-48, 2003) sont applicables uniquement aux bâtiments, c'est pour cela au niveau de ce chapitre on illustre les différentes étapes de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique.

2.1. Etude hydrodynamique

L'étude hydrodynamique nous permet de calculer les efforts exercés sur les parois de la cuve dus aux poussées des eaux et les moments créés par efforts ainsi que les hauteurs des vagues sur les parois.

Pour étudier l'action du liquide sur les parois du réservoir on utilise l'approche développée par « Houzner » dans la quelle l'action du liquide est décomposée en une action passive et une action active :

- **Action passive** : Elle est due à la masse passive provoquant des efforts d'impulsion.
- **Action active** : Elle est due à la masse active du fluide en mouvement d'oscillation provoquant des efforts d'oscillation.
- Les efforts d'impulsion proviennent du fait qu'une partie de liquide réagit par inertie à la translation des parois du réservoir ; le système équivalent mécanique est modélisé par une masse (M_i) liée rigidement au réservoir à une hauteur (h_i) telle qu'elle exerce sur les parois, les mêmes efforts horizontaux que la masse d'eau équivalente (figure 2.1).
- Les efforts d'oscillation proviennent du fait qu'une partie de la masse du fluide dite masse active se propage en surface en forme d'oscillation sous l'effet du séisme ; Le système mécanique équivalent est modélisé par une masse (M_o) liée au réservoir par deux ressorts de constante de raideur chacun ($K_1/2$) appliquée à une hauteur (h_o) à partir de la base du réservoir (figure 2.1).

- le modèle mathématique adopté pour le réservoir surélevé (figure 2.1.), est tel que la masse " M_0 " est reliée à la structure par une tige de même raideur " K_1 " formant un couplage avec " M_i ", tandis que " M_i " est reliée au sol par une tige représentant le support de la structure de constante de raideur " K_0 ". Le système est donc à deux DDL.

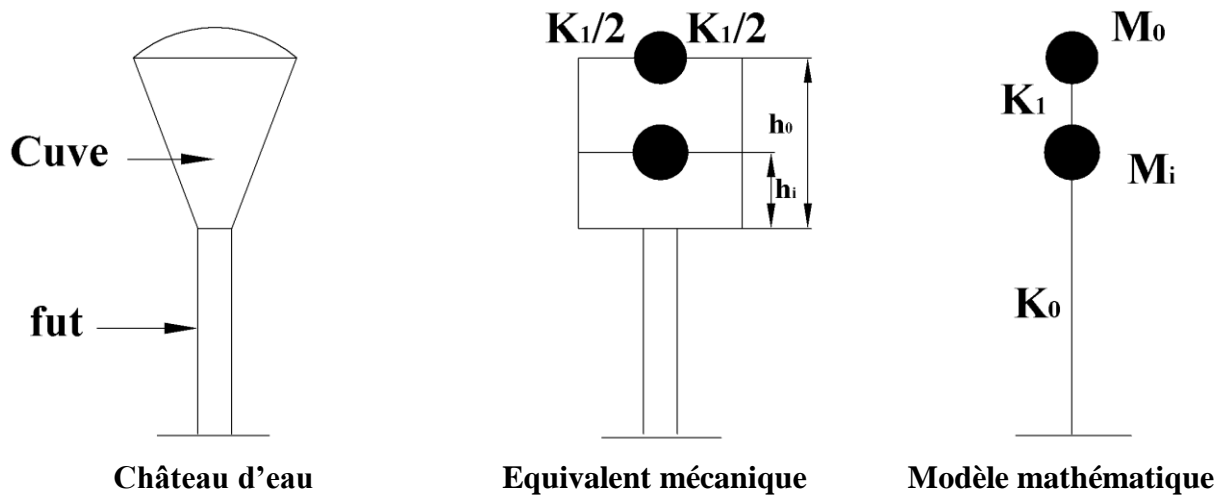


Figure 2.1 .modélisation du château d'eau

Les paramètres M_0 , M_i , h_0 , h_i , ne dépendent que de la géométrie de la cuve, et peuvent être calculés par les relations données par les formules suivantes :

2.1.1. poids de la masse passive

$$M_i = M_e \cdot \frac{th \left(\frac{\sqrt{3}R_i}{h} \right)}{\left(\frac{\sqrt{3} \cdot R_i}{h} \right)} + M_v + \frac{1}{2} M_f \quad (2-1)$$

où

R_i : rayon intérieur de la cuve.

h : hauteur d'eau utile dans la cuve.

M_v : poids de la cuve vide : $M_v = P_v \cdot g$

M_t : poids total de la cuve : $M_t = M_v + M_e$

M_f : poids du fût $M_f = P_f \cdot g$

M_e : poids de l'eau

2.1.2. Poids de la masse active

$$M_o = M_e . 0,318 . \frac{Ri}{h} th\left(\frac{1,84h}{Ri}\right) \quad (2-2)$$

2.1.3. Le point d'application des pressions d'impulsion h_i

$$h_i = \frac{3}{8} h \quad (2-3)$$

2.1.4. Le point d'application des pressions d'oscillation h_0

$$h_0 = h \times \left[1 - \frac{ch\left(\frac{1,84h}{Ri}\right) - 1}{\frac{1,84h}{Ri} Sh\left(\frac{1,84h}{Ri}\right)} \right] \quad (2-4)$$

2.1.5. La pulsation fondamentale de vibration du liquide ω_0

$$\omega_0^2 = \frac{g}{Ri} \left[1,84 th\left(1,84 \frac{h}{Ri}\right) \right] \quad (2-5)$$

2.1.6. Les constantes de raideurs K_1 et K_0

- Calcul de la raideur K_1

La raideur de couplage ($M_0 - M_i$) K_1 est donnée par la relation 2-6

$$K_1 = m_1 . \omega_0^2 \quad (2-6)$$

avec :

$$m_1 = \frac{M_o}{g}$$

- Calcul de la raideur K_0

D'après Rayleigh, pour une masse concentrée au sommet d'une console de section constante de masse négligeable, la période du 1^{er} mode de vibration est donnée par :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P' L^3}{3g . EI}} \quad (2-7)$$

avec :

$$P' = p + \frac{33}{140} M_f \quad (2-8)$$

p: poids de la masse concentrée(t).

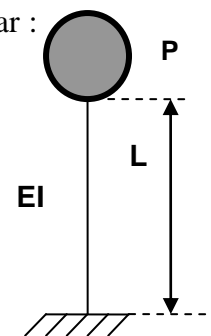


Figure 2.2 : modèle de calcul

P' : poids de la masse concentrée et la masse du support.

I : moment d'inertie minimum de la section transversale du support (m^2).

E : module de déformation instantanée du béton en (t/m^2).

D'après le BAEL 99 $E=11000 \sqrt[3]{f_c}$ (2-9)

L : hauteur du support.

On a : $T = 2\pi \omega$ (2-10)

on déduit alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} \quad \text{ou } T^2 = 4\pi^2 \frac{P' L^3}{3gEI} \quad \text{conformément à la relation (2-7)} \end{array} \right. \quad (2-11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega^2 = \frac{K_o}{M} \end{array} \right. \quad (2-12)$$

$$\frac{3gEI}{P' L^3} = \frac{K_o}{M} \Rightarrow K_o = \frac{3gMEI}{P' L^3} \quad (2-13)$$

2.2. Equation du mouvement

Le système étudié est un système à 2 DDL, d'où les équations d'équilibre peuvent être formulées sous forme matricielle. Le mouvement est défini par l'équation d'équilibre suivante :

$$\{F_i(t)\} + \{F_a(t)\} + \{F_e(t)\} = \{F(t)\} \quad (2-14)$$

$\{F_i(t)\}$ est le vecteur des forces d'inertie $\{F_i(t)\} = [M]\{\ddot{X}(t)\}$.

$\{F_a(t)\}$ est le vecteur des forces d'amortissement $\{F_a(t)\} = [C]\{\dot{X}(t)\}$.

$\{F_e(t)\}$ est le vecteur des forces élastiques $\{F_e(t)\} = [K]\{X(t)\}$.

$\{F(t)\}$ est le vecteur des forces extérieures.

L'amortissement est supposé nul, l'équation du mouvement (2.14) devient :

$$\{F_i(t)\} + \{F_e(t)\} = \{F(t)\}. \quad (2-15)$$

Nous supposons que le mouvement de la structure est de type harmonique ; ainsi la réponse s'écrit sous la forme :

$$\{X(t)\} = \{a\} \sin(\omega t + \phi) \quad (2-16)$$

Le système étudié est le système à oscillation libre, ce qui donne :

$$\{F(t)\} = \{0\}$$

D'où l'équation d'équilibre s'écrit sous la forme suivante :

$$\{F_i(t)\} + \{F_e(t)\} = \{0\}$$

avec :

$$\{F_i(t)\} = [M]\{\ddot{X}(t)\}.$$

$$\{F_e(t)\} = [K]\{X(t)\}.$$

d'où

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{0\} \quad (2-17)$$

On a

$$\{X(t)\} = \{a\} \sin(\omega t + \phi)$$

D'où ;

$$\{\ddot{X}(t)\} = -\{a\}\omega^2 \sin(\omega t + \phi) = -\omega^2\{X(t)\} \quad (2-18)$$

L'équation d'équilibre (2-17) s'écrit alors :

$$-[M]\omega^2\{X(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{0\} \quad (2-19)$$

$$([K] - [M]\omega^2)\{X(t)\} = \{0\} \quad (2-20)$$

La solution de l'équation d'équilibre, donnée par la relation (2-20) est tel que :

$$\{X(t)\} = \{0\}$$

Cette solution correspond à la position non déformée du réservoir, cependant, comme la structure oscille donc se déforme, à un instant donné elle aura une déformation ; ce qui donne $\{X(t)\} \neq \{0\}$, et pour que le système admette une solution il faut que $([K] - [M]\omega^2) = 0$.

avec

$$[K] \text{ matrice de rigidité } K = \begin{bmatrix} K_{00} & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} \end{bmatrix}$$

$$[M] \text{ La matrice de masse } M = \begin{bmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix}$$

donc :

$$[K] - [M] w^2 = \begin{bmatrix} K_{00} & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} \end{bmatrix} - w^2 \begin{bmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2-21)$$

2.2.1. Détermination des pulsations propres w_1 et w_2 du 1^{er} et 2^{eme} mode de vibration

La résolution de l'équation (2-20) nous donne les pulsations propres des deux modes principaux de vibration

$$w_{1-2}^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{K_{00}}{m_0} + \frac{K_{11}}{m_1} \pm \sqrt{\left(\frac{K_{00}}{m_0} - \frac{K_{11}}{m_1} \right)^2 + 4 \frac{K_{01}K_{10}}{m_0 m_1}} \right] \quad (2-22)$$

avec :

$$K_{00} = K_0 + K_1$$

$$K_{01} = K_{10} = -K_1$$

$$K_{11} = K_1$$

$$m_0 = \frac{M_i}{g}, \quad m_1 = \frac{M_0}{g}$$

Les périodes sont données par connaissance des pulsations propres des modes de vibration

$$T_{1/2} = \frac{2\pi}{W_{1/2}} \Rightarrow \begin{cases} T_1 = \frac{2\pi}{w_1} \\ T_2 = \frac{2\pi}{w_2} \end{cases} \quad (2-23)$$

2.2.2. Détermination des modes propres de vibration

$$\text{Mode 1 : } w_1 \Leftrightarrow a_1 = \begin{bmatrix} a_{01} \\ a_{11} \end{bmatrix}$$

$$\text{Mode 2 : } w_2 \Leftrightarrow a_2 = \begin{bmatrix} a_{20} \\ a_{21} \end{bmatrix}$$

La détermination des modes propres revient à résoudre l'équation donnée par la relation

(2-22) suivante :

$$([K] - [M] w^2)\{a\} = 0 \tag{2-24}$$

pour un mode de vibration (i), donné nous avons :

$$([K] - [M] w_i^2)\{a_i\} = 0$$

$$\left[\begin{array}{cc} K_{00} & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} \end{array} \right] - w_i^2 \left[\begin{array}{cc} m_0 & 0 \\ 0 & m_1 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} a_{i0} \\ a_{i1} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \right\} \tag{2-25}$$

$$\left. \begin{array}{l} K_{00} - w_i^2 m_0 \ a_{i0} + K_{01} \ a_{i1} = 0 \\ K_{10} \ a_{i0} + (K_{11} - w_i^2 m_1) \ a_{i1} = 0 \end{array} \right\} \tag{2-26}$$

La résolution du système donné par la formule (2-24) comme un système de Cramer nous donne $a_{i0} = a_{i1} = 0$.

De fait que tout mode propre correspond à une déformée, la solution doit être différente de zéro. Pour cela on donne une valeur arbitraire à l'une des inconnues et on calcul l'autre par la suite, cette valeur est généralement prise égale à l'unité (1). Cela revient à poser $a_{i0} = 1$ et on déduit a_{i1} donné par la relation (2-25) ci-dessous :

$$a_{i1} = -\frac{K_{00} - w_i^2 m_0}{K_{01}} a_{i0} \tag{2-27}$$

$$\frac{a_{i0}}{a_{i1}} = \frac{-K_{01}}{K_{00} - w_i^2 m_0} \tag{2-28}$$

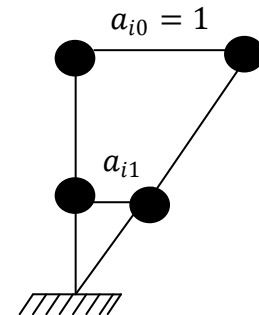


Figure 2.3 : Modes propres

2.3. Les déplacements verticaux des vagues

L'expression du déplacement vertical des vagues pour les réservoirs cylindriques est donnée par la relation (2-26) ci-après :

$$d_{\max,i} = \frac{0,408 Ri}{\left[\frac{g}{(\omega_i \cdot \theta_{0i} Ri)} - 1 \right] \cdot th \left(1,84 \frac{h}{Ri} \right)} \tag{2-29}$$

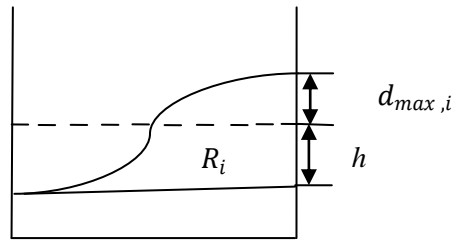


Figure 2.4 : Déplacement vertical des vagues

Selon Houzner θ_{0i} dépend de l'amplitude de vibration du mode (i) ? elle est donnée par la formule suivante :

$$\theta_{0i} = \left[1,53 \frac{(X_{0i} - X_{1i})}{Ri} \right] .th \left(1,84 \frac{h}{Ri} \right) \quad (2-30)$$

avec X_{0i} et X_{1i} sont les déplacements horizontaux donnés par les relations (2-31) et (2-32)

$$X_{0i} = \gamma_I \cdot g \frac{S_{a1}}{\omega I^2} \quad (2-31)$$

$$X_{1i} = X_{0i} \cdot \frac{a_{i1}}{a_{i0}} \quad (2-32)$$

2.4. Evaluation de la force sismique

- application de la méthode dynamique d'analyse modale spectrale
- hypothèses de calcul
 - Les masses sont supposés concentrées au niveau des nœuds principaux.
 - Seul, les déplacements horizontaux des nœuds sont pris en compte.
- Calcul de la force sismique

Le règlement parasismique algérien (DTR-B-C-2-48, 2003) permet sous certaines conditions de calculer la structure par une méthode pseudo dynamique qui consiste à considérer la structure comme étant soumise à un effort tranchant qui est fonction de plusieurs paramètres, alors la force sismique au niveau (k) et au mode (i) est donné par la relation

(2-28) ci-dessous :

$$F_{ki} = \frac{S_a}{g} \cdot \gamma_i \cdot M_k \cdot a_{ik} \quad (2-33)$$

avec :

i : indice désignant le numéro du mode propre,

k : indice désignant le numéro de masse,

γ_i : Coefficient de distribution au mode (i) donné par la relation (2-29) suivante

$$\gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^n M_k \cdot a_{ik}}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot a_{ik}^2} \quad (2-34)$$

W_K : poids total de la structure (pleine ou à vide),

a_{ik} : amplitude au niveau (k) et au mode (i),

g : accélération de la pesanteur,

S_a : Spectre de réponse de calcul,

L'action sismique est représentée par le spectre de réponse de calcul donné par la relation

(2-30) suivante

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases} \quad (2-35)$$

A : coefficient d'accélération de zone, qui dépend de la zone sismique et du groupe d'usage de la structure.

η : Facteur de correction d'amortissement donné par la formule suivante :

$$\eta = \sqrt{7/(2+\xi)} \geq 0.7 \quad (2-36)$$

Où: ξ (%) est le pourcentage d'amortissement critique, donné en fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

T_1 et T_2 périodes caractéristiques, associées à la catégorie du site.

R: Coefficient de comportement global de la structure, Sa valeur unique dépend du système de Contreventement.

Q : Facteur de qualité sa valeur est déterminée par la formule (2-32) suivante :

$$Q = 1 + \sum_1^6 P_q \quad (2-37)$$

P_q : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité q " est satisfait ou non".

2.5. Etat limite ultime de stabilité

Sous l'effet de l'action sismique à L'ELU, la stabilité d'ensemble du réservoir vis-à-vis de l'effondrement doit être satisfaite. la stabilité d'ensemble se rapportant à un comportement de corps rigide peut être perdue par glissement ou renversement. A cet effet, il ya lieu de satisfaire l'inégalité suivante :

- Moment stabilisant \geq Moment renversant

2.5.1. Calcul des moments de renversement

➤ Action d'impulsion

Le moment de renversement d'ensemble sous l'action d'impulsion est donné par la relation (2-33) ci-après

$$M_{ri} = P_i \cdot h_i^* \quad [t.m] \quad (2-38)$$

où

M_{ri} :est le moment de renversement d'ensemble sous l'action d'impulsion.

h_i^* est le niveau d'application des pressions d'impulsion incluant l'effet de la pression sur la base s'écrit :

$$h_i^* = \frac{3}{8} h + \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{3} \frac{R_i}{h}}{\text{th} \frac{R_i}{h}} - 1 \right) \quad (2-39)$$

h : hauteur d'eau utile dans le réservoir[m],

R_i : rayon intérieur du réservoir[m],

P_i : est la résultante des pressions hydrodynamiques horizontales d'impulsion, il est donné par la formule suivante :

$$P_i = M_i \cdot S_a \quad (2-40)$$

M_i : est le poids de la masse passive, provoquant des efforts d'impulsions.

S_a : spectre de réponse de calcul donné par la relation (2-35)

➤ Action d'oscillation

Le moment de renversement d'ensemble sous l'action d'oscillation est exprimé par la relation (2-36)

$$M_{r0} = P_0 \cdot h_0^* \quad (2-41)$$

M_{r0} : est le moment de renversement d'ensemble sous l'action d'oscillation.

h_0^* : Le niveau d'application des pressions d'oscillation incluant l'effet de la pression sur la base est tel que illustré par la relation (2-37) :

$$h_0^* = h \left(1 - \frac{\text{ch}\left(1,84 \frac{h}{R_i}\right) - 2}{1,84 \left(\frac{h}{R_i} \text{sh}\left(1,84 \frac{h}{R_i}\right)\right)} \right) \quad (2-42)$$

P_0 : est la résultante des pressions hydrodynamiques horizontales d'oscillation, donnée par la relation (2-38)

$$P_0 = M_0 \cdot S_a \quad (2-43)$$

M_0 est le poids de la masse active, du fluide en mouvement d'oscillation provoquant des efforts d'oscillation, donnée par la formule (2-2).

2.5.2. Calcul du moment stabilisant

Le moment stabilisant est donné par la formule (2-39) suivante :

$$M_S = N_S \cdot \frac{D_r}{2} \quad (2-44)$$

avec :

N_S est l'effort normal appliqué sur le réservoir donné par la relation (2-40)

$$N_S = (M_e + M_f + M_c) \cdot g \quad (2-45)$$

avec :

M_e est le poids de l'eau,

M_f est le poids du fut,

M_C est le poids de la cuve,

D_r est le diamètre du radier exprimé par

$$D_r = \sqrt{\frac{4.N_s}{\pi.\sigma_{sol}}} \quad (2-46)$$

où

σ_{sol} : est la contrainte dans le sol donnée par la relation (2-46) ci-après

$$\sigma_{sol} = \frac{N_s}{A_{radier}} \quad (2-47)$$

A_{radier} : est la section d u radier.

Conclusion

Le chapitre que nous venons de développer, illustre les différentes étapes de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique.

L'étude au séisme de ce type d'ouvrage, permet d'avoir une connaissance approfondie du comportement des réservoirs surélevés sous l'action sismique. Ainsi sur la base de cette étude, nous développons pour la première fois une méthode pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau. Celle-ci fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Exposé de la méthode de l'indice de vulnérabilité

Chapitre 3

réservoirs surél

Introduction

La vulnérabilité sismique d'une structure est définie comme étant le taux de dommages que celle-ci peut subir lors d'un séisme donné. Le degré de vulnérabilité sismique de cette structure est évidemment fonction de plusieurs paramètres tels que la nature du sol, le système structurel, la nature des matériaux de construction utilisés, l'âge de cette structure...etc.

Dans le but d'évaluer ce degré de vulnérabilité, il devient nécessaire de procéder au classement bien défini de ces constructions, en fonction des différents paramètres influant sur son comportement face au séisme.

Dans ce chapitre, nous nous proposons, en s'inspirant des approches développées par le groupe national pour la défense contre les séismes (GNDT,1986) et (Benedetti et *al.* 1988) de développer, pour la première fois, une méthode d'estimation de la qualité sismique des réservoirs de stockage d'eau potable, classés par les règlements parasismique algérien comme des ouvrages d'art d'importance socio-économique. Cette méthode, offre la possibilité d'une mise à jour pratiquement continue de la qualité sismique des réservoirs.

3.1. Développement de la méthode de l'indice de vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau

Dans cette étude, nous proposons de quantifier la vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau potable, en développant une méthode d'indice de vulnérabilité vis-à-vis de l'aléa sismique. Le développement de cette méthode suit les étapes énumérées ci-dessous :

- 1- Définition des paramètres influant sur le comportement sismique des réservoirs.
- 2- Classement des paramètres les uns par rapport aux autres, en fonction de l'importance de chacun d'eux par rapport à sa contribution dans la réponse sismique de la structure.
- 3- Affectation de chaque paramètre, en fonction de sa classe, d'une valeur numérique afin de le quantifier. La somme des valeurs numériques de ces paramètres représente l'indice de vulnérabilité « I_v » de la construction étudiée.
- 4- Classification des réservoirs en fonction de leur indice de vulnérabilité. Pour cette classification, nous proposons trois classes A, B et C, comme suit :

La première regroupe les structures ayant un bon comportement, la seconde, un comportement moyen et enfin, la troisième regroupe les constructions ayant une mauvaise tenue au séisme.

3.1.1. Définition des paramètres influant

Les paramètres à considérer pour la détermination de l'indice de vulnérabilité sismique des réservoirs sont en partie tirés de la méthode GNDT (Gruppo Nazionale Per la Difesa dai Terremoti, 1986), complétés par d'autres facteurs influant sur le comportement global des réservoirs ; donc sur sa réponse sismique. On distingue des paramètres de type descriptif ou typologique (comme le type du système de contreventement, la régularité en plan, et en élévation, le type de sol etc.), et des paramètres de type qualitatif qui concerne la qualité de l'exécution, le respect des normes en vigueur (comme les paramètres qualité du système de contreventement, qualité des nœuds, détails, maintenance...etc). Notons aussi que la définition des paramètres choisis est basée sur le règlement parasismique algérien, (DTR-B-C-2-48, 2003). Dans ce qui suit, nous présentons les différents paramètres considérés.

3.1.1.1. Système de contreventement

Le système de contreventement est l'ensemble d'éléments d'une structure assurant sa rigidité et sa stabilité vis-à-vis des forces horizontales, engendrées par le séisme. La classification de ce paramètre est définie en tenant compte de la fiabilité et de la capacité de dissipation de l'énergie vis-à-vis de l'action sismique et de déformation. L'évaluation du système résistant est définie en trois classes définies ci-après :

- **Classe A :** Cette classe regroupe les structures résistantes à rigidité constante. le système résistant dans cette classe fonctionne en console verticale à masse uniformément répartie, comme l'illustre les figures (3.1.a, 3.1.b) qui suivent :



(a) Réservoir surélevé de 500 m³ de Fom El Oued (Maroc)



(b) Réservoir surélevé de 800 m³ D'Elmarsa (Maroc)

Figures 3.1 : Réservoirs surélevés en béton armé à console verticale et à masse uniformément répartie.

- **Classe B :** Cette classe concerne les structures déformable à rigidité variable ; c'est le cas des réservoirs à pendule inverse ou 50% ou plus de la masse est concentrée dans le tiers supérieure de la structure. Nous citons par exemple des réservoirs toriques proéminent sur jupe cylindrique, ou conique plus resserrée comme l'illustre les figures (3.2.a, 3.2.b, 3.2.c, 3.2.d) ci-après :



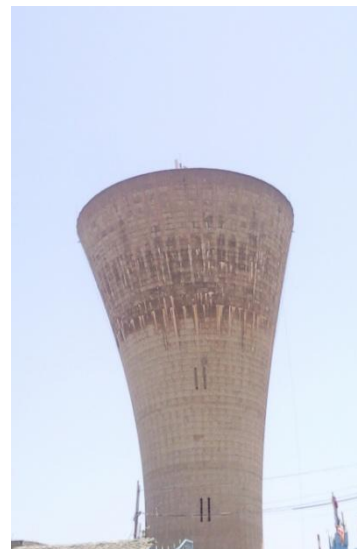
(a) Réservoir surélevé de 500 m³ à Smara (Algérie).



(f) réservoir surélevé de 300 m³ à EL-Eulma (Algérie).



(a) Réservoir surélevé de 1500 m^3 à Boumerdes (Algérie)



(b) Réservoir surélevé de 2000 m^3 à Boumerdes (algérie)

figures 3.2 : Réservoirs à pendule inverse.

- **Classe C** : Dans cette classe, on retrouve les structures résistantes à rigidité faible. Pour ce type de réservoir, la distribution de masse et de rigidité changent d'une manière brusque. On retrouve les réservoirs sur pilotis, sans remplissage en maçonnerie comme le montre les figures (3.3.a, 3.3.b).



(a) réservoir surélevé de 30 m^3 au Mali.



(b) réservoir surélevé de 60 m^3 de Foundou (Mauritanie).

Figures 3.3 : Réservoirs sur pilotis.

3.1.1.2. Qualités du système de contreventement

Pour ce paramètre la classification est faite selon le contrôle de la qualité des matériaux, et le contrôle de la qualité d'exécution et l'état du système.

❖ **Qualité des matériaux utilisés** : la qualité des matériaux utilisés dans la construction joue un rôle important dans la résistance aux efforts sismiques. La rigidité des matériaux permet de limiter les problèmes de stabilité de forme, ainsi que la ductilité et la capacité des matériaux à se déformer plastiquement lors d'efforts élevés sans diminution significative de la résistance pendant plusieurs cycles de chargement.

❖ **La qualité d'exécution et l'état du système**. Il est prévu contractuellement une mission de suivi des travaux sur chantier. Cette mission doit comprendre une supervision des essais effectués sur les matériaux, afin de satisfaire aux conditions générales de conception, de calcul, et d'exécution.

Ainsi, nous définissons trois classes pour la qualité du système de contreventement :

- **Classe A** : Dans cette classe, on trouve les réservoirs dont la résistance caractéristique du béton f_{c28} est comprise entre 27 et 30 MPa. la qualité du système du contreventement est bonne.
- **Classe B** : Cette catégorie regroupe les réservoirs dont la résistance caractéristique du béton f_{c28} est comprise entre 22 et 27 MPa. la qualité du système résistant est moyenne.
- **Classe C** : enfin, la classe C est réservée aux réservoirs dans ce cas, la résistance caractéristique du béton f_{c28} est inférieure 22 MPa. la qualité du système de contreventement est mauvaise.

Notons que si la valeur de f_{c28} n'est pas disponible au niveau des archives, il est nécessaire de procéder à des essais de résistance à l'ultrason ou au scléromètre en cours de mission d'expertise (Le fascicule 74, cahier des clauses technique générales N°98-3 T.O).

3.1.1.3. Comportement au séisme

L'action du séisme se traduit par un brusque déplacement horizontal ou vertical du sol, entraînant les fondations et les parties enterrées du réservoir. Pour l'étude de ce paramètre, nous utiliserons la méthode de « HOUZNER » qui repose sur la décomposition de l'action de l'eau en action d'impulsion et d'oscillation (Houzner, 1963). La stabilité d'ensemble se rapportant à un comportement de corps rigide peut être perdue par glissement ou renversement. A cet effet, il ya lieu de satisfaire l'inégalité suivante :

- Moment stabilisant \geq Moment renversant

Le moment stabilisant M_S est donné par la formule (2-44) suivante :

$$M_S = N_S \cdot \frac{D_r}{2}$$

Pour le moment de renversement, nous considérons, la somme des deux moments de renversement d'impulsion M_{ri} et d'oscillation M_{r0} , donnés par les formules (2-38) et (2-40) comme suit:

$$M_{ri} = P_i \cdot h_i^* \quad [\text{t.m}]$$

$$M_{r0} = P_0 \cdot h_0^* \quad [\text{t.m}]$$

La classification de ce paramètre se fait en fonction d'un coefficient de sécurité F_s défini comme étant le rapport entre le moment stabilisant M_s et le moment renversant M_r .

- **Classe A** : dans cette classe, on trouve les réservoirs présentant un coefficient de sécurité F_s supérieur à 3. Autrement dit le moment stabilisant est largement supérieur au moment de renversement et donc les réservoirs présentent une bonne résistance à l'effort sismique.
- **Classe B** : on y trouve les réservoirs dont le coefficient F_s est compris entre 1,5 et 3. Donc la résistance à la force sismique est moyenne.
- **Classe C** : dans cette catégorie les réservoirs présentent un coefficient de sécurité F_s inférieur à 1,5. Les structures de cette classe présente une mauvaise tenue au séisme.

3.1.1.4. Type de sol

L'aspect géologique est pris en compte en analysant la catégorie du site d'implantation, qui est fonction des propriétés mécaniques du sol. Les sites sont classés en quatre catégories par le règlement parasismique algérien (DTR-B-C2-48,2003), en fonction de la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement. Notre classification de ce paramètre, pour la méthode de l'indice de vulnérabilité, est comme suit :

- **Classe A** : on trouve dans cette classe, la catégorie du sol S1 (sol rocheux) dont la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement est $V_s \geq 800\text{m/s}$. Donc la nature du site d'implantation est bonne
- **Classe B** : cette catégorie regroupe le type du sol S2 (sol ferme), c'est-à-dire les dépôts, très denses, de sables ou de graviers et/ou d'argile sur consolidées sur 10 à 20 m avec une

vitesse moyenne de l'onde de cisaillement $V_s \geq 400\text{m/s}$. Donc le type de sol d'implantation est moyen

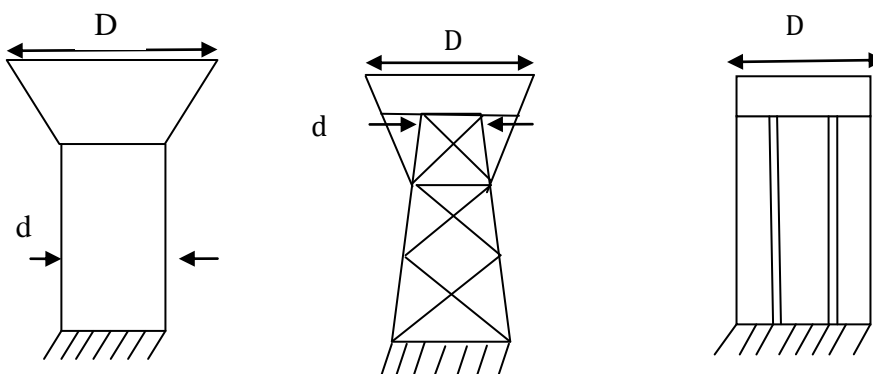
- **Classe C** : sont classés les sols de catégorie S3 (sol meuble) et de catégorie S4 (sol très meuble). On trouve, dans cette classe, les dépôts de sable et de graviers moyennement denses ou lâches ainsi que les dépôts d'argile moyennement raide ou molle. Pour cette classe le type de sol d'implantation est mauvais.

3.1.1.5. La régularité en plan

La régularité a pour fonction d'offrir une meilleure résistance aux séismes. Les ouvrages doivent de préférence avoir d'une part des formes simples, d'autre part une distribution aussi régulière que possible des masses et des rigidités tant en plan qu'en élévation. Le but recherché est d'assurer la meilleure répartition possible des sollicitations à travers la structure, de façon à faire participer tous les éléments à l'absorption et à la dissipation de l'énergie développée par l'action sismique. La définition de la régularité en plan est fonction de la forme géométrique en plan.

En s'inspirant des règles de construction parasismique (PS69 révisé en 92), appliqué aux bâtiments, nous pouvons considérer les critères suivants :

- le réservoir doit représenter une configuration sensiblement symétrique dans les deux directions, aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celles des masses.
- la forme du réservoir doit être compacte et les dimensions des parties rentrantes ou saillantes ne doit pas excéder 25 % de la dimension totale du réservoir dans la direction correspondante comme le montre la figure (2.4) qui suit :



$$\frac{D - d}{D} \leq 0,25$$

(3-1)

Figure 3. 4. : Distribution de forme d'un réservoir surélevé.

c- L'élanement géométrique λ_g du support défini le rapport entre la longueur du flambement L_f et le rayon de giration minimale de la section droite du béton doit être compris entre les valeurs suivantes :

$$3 \leq \lambda_g = \frac{L_f}{i_{min}} \leq 5 \quad (3-2)$$

Pour un support encasté à une extrémité et articulé à l'autre L_f est donné par :

$$L_f = 2L_0 \quad (3-3)$$

ou L_0 est la hauteur du support.

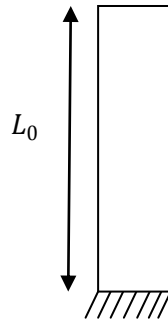


Fig. 3.5. Support encasté à l'extrémité et articulé à l'autre.

Le rayon de giration de la section droite du béton est donné par l'équation suivante :

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{B}} \quad (3-4)$$

I : représente le moment d'inertie minimal de la section du support par rapport à l'axe qui passe par le centre de gravité et parallèle au plan du flambement est donné par la formule ci-après

B : étant la section droite du support.

d- Pour chaque direction de calcul l'excentricité structurale doit vérifier la condition suivante :

$$e \leq 0,20 r \text{ et } r \geq 0,2L \quad (3-5)$$

avec

$$r^2 = \sum \frac{\text{raideurs de torsion}}{\text{raideurs de translation}} \quad (3-6)$$

Ainsi, nous définissons les trois classes qui suivent :

- **Classe A** : est la classe de forme régulière. On trouve les réservoirs qui respectent les trois critères suscités.
- **Classe B** : est la classe de forme partiellement irrégulière dans cette catégorie, sont classés les réservoirs respectant partiellement les critères suscités.
- **Classe C** : est la classe de forme irrégulière. Dans cette classe, sont regroupés les réservoirs ne respectant aucun critère cité précédemment.

3.1.1.6. La régularité en élévation

L'importance de ce paramètre, dans la méthode de l'indice de vulnérabilité, réside dans les deux aspects essentiels :

- la variation de la distribution de la masse entre la cuve et le fut,
- la variation de la résistance du système résistant entre les deux éléments cités auparavant.

En s'inspirant des règles de construction parasismique (PS69 révisé en 92), nous considérons les critères de classifications suivants :

- a- La distribution des masses doit être sensiblement régulière sur la hauteur de l'ouvrage, le rapport des masses étant compris entre les valeurs suivantes

$$0,85 \leq \frac{M_0}{M_i} \leq 1,33 \quad (3-7)$$

Avec :

M_0 est le Poids de la masse passive et M_i est le poids de la masse active.

- b- La distribution des raideurs doit être sensiblement régulière sur la hauteur de l'ouvrage, le rapport des raideurs étant compris entre les valeurs suivantes :

$$0,67 \leq \frac{K_1}{K_0} \leq 1,3 \quad (3-8)$$

avec :

K_1 est la raideur de couplage ($M_0 - M_i$) et K_0 est la raideur du support.

c- cas d'un rétrécissement graduel sur la hauteur et préservant sensiblement la symétrie du réservoir, le retrait global ne dépasse pas 33% de la dimension en plan de l'ouvrage au niveau du sol comme l'illustre la figure (2.6. a).

d- cas d'un élargissement graduel sur la hauteur et préservant sensiblement la symétrie du réservoir, dont le rapport d'élargissement ne doit pas dépasser 25 % de la dimension en plan de l'ouvrage au niveau du sol comme l'illustre la figure (3.6.b).

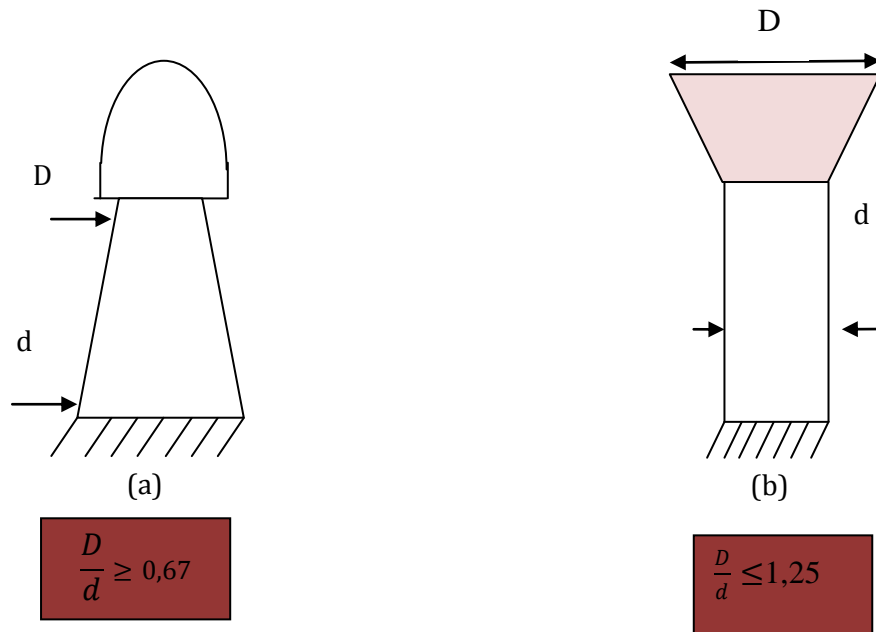


Figure 3.6. Rétrécissement et élargissement graduel sur la hauteur

Pour la classification de ce paramètre, nous définissons :

- **Classe A** : Classe de forme régulière. Le réservoir est classé, dans ce groupe, si tous les critères de classification pour la régularité en élévation sont respectés.
- **Classe B** : classe de forme faiblement irrégulière. Dans cette catégorie, on trouve les réservoirs partiellement irréguliers en élévation,
- **Classe C** : classe de forme irrégulière. Dans cette classe sont regroupés les réservoirs irréguliers en élévation, c'est-à-dire ceux qui ne respectent pas les critères cités auparavant

3.1.1.7. Qualité des nœuds

On définit par les nœuds les zones de connexion entre les éléments structuraux. Autrement dit, la zone de l'union (fondation- support, et support- cuve). L'importance de ce paramètre est que l'application de la force sismique se fait dans ces zones de connexion. C'est

ainsi que la classification de ce paramètre devient fonction de l'état et de la qualité des zones de connexion des éléments structuraux. Ainsi, nous proposons trois catégories de classification pour ce paramètre :

- **Classe A** : cette classe regroupe les réservoirs dont l'état des zones de connexion de leurs éléments structuraux est bon.
- **Classe B** : dans cette catégorie, on trouve les réservoirs dont la qualité de ses nœuds est moyenne.
- **Classe C** : sont classés, ici, les réservoirs dont la qualité des zones de connexion des éléments structuraux est mauvaise.

3.1.1.8. Détails

On entend souvent par le paramètre détail l'état et la qualité des éléments non structuraux, qui peuvent influencer sur le comportement du réservoir lors d'un séisme ainsi que l'état des divers réseaux qui influent sur la fonctionnalité de la structure. Les éléments à prendre en considération sont :

- Les équipements : les équipements hydrauliques du château d'eau sont présentés par le système de canalisation (conduites d'adduction, conduites de distribution, conduite du trop plein, conduite de vidange, conduite by-pass.).
- L'état de la couverture : (coupole, dalle circulaire pleine, dalle nervurée, un cône, un tronc de cône, ...etc.).
- L'état de l'acrotère.
- L'état de l'escalier d'accès.

Les trois groupes de classification pour ce paramètre sont définies comme suit :

- **Classe A** : c'est la classe où plus de trois quarts des éléments non structuraux sont en bon état.
- **Classe B** : le paramètre « détail » est classé dans cette catégorie, si l'ensemble des éléments non structuraux en bon état est compris entre la moitié et les trois quarts des éléments le composant. Ou l'état des éléments non structuraux et l'état des divers réseaux est moyen.
- **Classe C** : dans ce groupe, on trouve que parmi l'ensemble des éléments non structuraux, moins de leur moitié est en bon état. donc la qualité des éléments non structuraux est mauvaise.

3.1.1.9. Maintenance

Les expériences sismiques ont montré l'importance de l'étude de ce facteur. Car ce paramètre touche l'ensemble des éléments du réservoir :

- les éléments résistants en élévation,
- les éléments non structuraux.

La classification de ce paramètre est faite selon La méthode LPC n °47 elle à pour objet de quantifier de façon simple et rapide l'état de fissuration et de caractériser de manière conventionnelle l'état d'endommagement à un instant donné d'un parement d'un ouvrage en béton armé, afin d'en établir un classement mais aussi d'ensuire d'évolution dans le temps. Cette méthode présente l'intérêt de concerner toutes les fissures existantes dans une zone donnée.

La méthode consiste à relever à l'aide d'un fissuromètre et de façon exhaustive toutes les fissures interceptant quatre axes tracés dans une zone d'un mètre carré sur la partie du parement à étudier.

- **Traçage du repère**

Un repère constitué de quatre axes gradués de 0,1 en 0,1m (un axe vertical d'un mètre de longueur), est tracé sur le parement au moyen du gabarit (figure 1) si la forme de la partie de l'ouvrage le requiert, une adaptation des dimensions du repère est évidemment possible. Le traçage sera réalisé avec précautions en évitant d'altérer les lèvres des fissures.

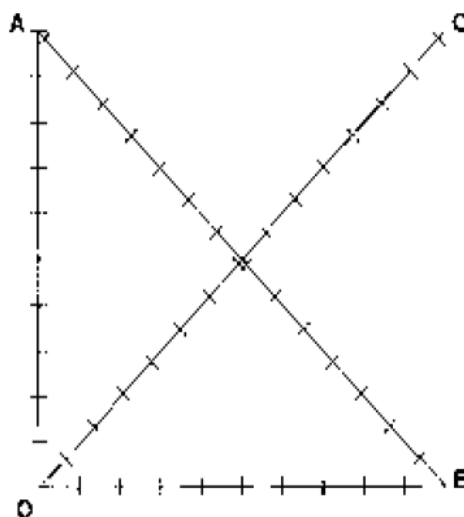


Figure 3.7. Les quatre axes du repère

- Relevé des fissures

Toutes les fissures ayant une ouverture supérieure à 0,05mm sont recherchées et mesurées à l'aide d'un fissuromètre jusqu'à 2mm d'ouverture, et avec la loupe micrométrique pour les fissures plus larges. Il est possible d'humecter la surface du béton pour mieux visualiser les fines fissures.

Les valeurs obtenues pour chaque segment de 0,1m de chaque axe sont reportées dans les cases correspondantes du tableau de la feuille de mesure (exemple annexe 1). On peut aussi le cas échéant placer sur le graphe les fissures principales.

Chaque fissure est à mesurer à 0, 1mm près juste au droit de son intersection avec l'axe du repère ou à son voisinage immédiat si, à cet endroit la l'orientation de la fissure trop de son orientation générale ou que ses lèvres sont épaufrées, colmatées ou de forme ambiguë, l'ouverture est toujours mesurée suivant une perpendiculaire à sa direction principale et non suivant la longueur interceptée par l'axe (annexe 2). Une fissure qui par ses méandres intercepterait plusieurs fois le repère est à compter autant de fois qu'il y a d'interceptions effectives on s'attachera néanmoins lors de l'implantation du repère à éviter ce genre de configuration. Le micro-faiencage n'est pas relevé mais sa présence est simplement signalée.

Si les mesures rentrent dans le cadre d'un renouvellement périodique de relevé, on les comparera aussitôt avec le relevé précédent pour éviter toute erreur de grossière de lecture ou de transcription.

On complétera la feuille de mesure en précisant la date les conditions atmosphériques du jour et toutes observations utiles.

Enfin, un cliché photographique rapproché du repère est effectué.

- Calcul de l'indice des fissures

Pour chacun des quatre classes sont calculées l'ouverture cumulée totale, l'ouverture moyenne par fissure et l'ouverture moyenne par mètre de longueur d'axe. Ces valeurs peuvent être complétées par un histogramme de distribution des ouvertures. L'indice de fissuration IF est calculé en effectuant la moyenne des quatre ouvertures moyennes par mètre obtenues sur chaque axe.

Les indices obtenus peuvent être comparés à l'échelle de caractérisation donnée au tableau 3.1 suivant :

Tableau 3.1. Caractérisation de la fissuration d'un parement par l'indice de fissuration

Echelle de caractérisation de fissuration d'un parement par l'indice de fissuration	
Valeur IF	Importance de la fissuration
0 à 0,5	Négligeable
0,5 à 1	Faible
1 à 2	Modérée
2 à 5	Forte
5 à 10	Très forte
>10	Considérable

La classification de ce paramètre est la suivante :

- **Classe A** : on y trouve, les réservoirs dont tous les éléments résistants dont l'importance de la fissuration donnée par la méthode d'essai (LCPC n°47) est négligeable avec un indice de fissuration IF compris entre 0 et 0,5 ou une fissuration faible avec un indice de fissuration IF compris entre 0,5 et 1.

La stabilité des éléments non structuraux est assurée. Ce qui implique que l'état du réservoir est bon.

- **Classe B** : dans cette classe, on regroupe les réservoirs qui présentent une fissuration modérée avec un indice de fissuration IF compris entre 1 et 2 ou une fissuration forte avec un indice de fissuration compris entre 2 et 5. Ce qui rend l'état du réservoir moyen.

- **Classe C** : cette classe regroupe les réservoirs dont plus de 30% des éléments résistants sont fissurés ou la fissuration est très forte avec un indice de fissuration IF compris entre 5 et 10 ou une fissuration considérable avec un indice de fissuration IF >10. Ce qui rend l'état du réservoir très mauvais.

3.1.1.10. Entrechoquement

L'entrechoquement est l'interaction entre deux réservoirs (ou plus) adjacents, dont l'effet du comportement sismique de l'un par rapport à l'autre, durant l'occurrence sismique est important. La figure (3.8) ci-dessous représente quelques réservoirs adjacents.



Bouquet de réservoirs surélevés à Paris (France)

Figure 3.8: Disposition adjacente des réservoirs.

La classification de ce paramètre est fonction de la largeur minimum des joints sismiques donnée par la formule suivante :

$$d_{\min} = \delta + \delta_1 + \delta_2 \quad (3.13)$$

δ_1 et δ_2 sont les déplacements maximums des deux réservoirs adjacents tel que le montre la figure 2.10 et δ est la distance résiduelle entre les deux réservoirs adjacents après déplacement, prise égale 100cm.

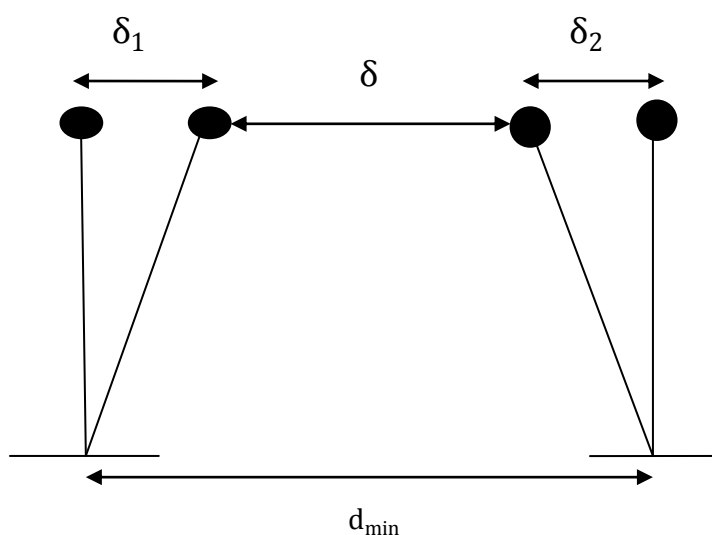


Figure. 3.9 : Largeur minimum du joint

➤ **Détermination des déplacements maximum δ_1 et δ_2**

Le déplacement horizontal δ_1 ou δ_2 est donné par la relation (2.31) conformément au règlement parasismique algérien (DTR- B-C-2-48, 2003) :

$$\delta_1 = \gamma_1 \cdot \frac{S_{a1}}{w_1^2} \quad (3.14)$$

γ_1 est le coefficient de distribution donné par la formule

S_{a1} est le spectre d'accélération,

w_1 est la pulsation propre de vibration donnée par la formule

Les trois classes définies pour ce paramètre sont :

- **Classe A** : est la classe où les réservoirs ne représentent pas de risque d'entrechoquement. En effet, ces réservoirs sont soit isolés, soit séparés par des joints sismiques dont la distance résiduelle δ est supérieure à 100cm.
- **Classe B** : sont regroupés, dans cette classe, les réservoirs dont le risque d'interaction entre les réservoirs adjacents est moyen, dont la distance résiduelle δ est comprise entre 50cm et 100cm.
- **Classe C** : dans ce groupe, on trouve les réservoirs dont le risque d'interaction entre les réservoirs adjacents est fort, dont la distance résiduelle δ est inférieure à 50 cm.

3.1.1.11. Implantation du réservoir

Un réservoir est exposé à diverses agressions de son milieu d'implantation naturel. Notons que le (DTR-B-C-2-48,2003) recommande lors de l'implantation d'un ouvrage les points suivants :

- éviter les sols liquéfiables, les sols fortement fracturés, les sols faiblement cimentés, les zones de remblais ainsi que le bord des falaises. Il est par ailleurs recommandé de :
- préférer les sols rocheux et les sols fermes aux sols meubles de faible portance, donnant lieu à des tassements excessifs et irréguliers.
- veiller à ce que la couche d'appui des fondations soit suffisamment épaisse et qu'elle ne repose pas elle-même sur une couche instable.
- implanter autant que possible les réservoirs élevés sur des sites rocheux ou sites de sols fermes de faible épaisseur et ce pour éviter le phénomène de résonance.

Vu l'importance de ce paramètre dans les dégâts sismiques, nous l'avons introduit dans le calcul de l'indice de vulnérabilité moyennant cette classification :

- **Classe A** : on trouve, dans cette classe, les réservoirs qui sont implantés dans des sites qui ne présentent aucun risque. En effet sont des réservoirs implantés au niveau des montagnes ou le site d'implantation est bon.
- **Classe B** : pour cette catégorie sont regroupés les réservoirs implantés au niveau des vallées, ou la qualité du site d'implantation est moyenne.
- **Classe C** : dans ce groupe, on trouve les réservoirs implantés dans des sites à risque, les réservoirs qui représentent des risques sont des réservoirs implantés aux abords d'une falaise, en haut ou en bas d'une colline ou sur un terrain accidenté avec changement de pente important. Dont la qualité du site d'implantation est mauvaise.

3.1.1.12. Zone sismique

En Algérie, le critère de zonage sismique (DTR-B-C-2-48,2003), classe le territoire en cinq zones de sismicité croissante :

Tableau 3.2.les différentes zones sismiques données par le (DTR-B-C-2-48,2003)

N°	Zone	Sismicité
1	Zone 0	négligeable
2	Zone I	Faible
3	Zone IIa	moyenne
4	Zone IIb	moyenne
5	Zone III	Elevée

La classification pour la méthode de l'indice de vulnérabilité dans notre cas est comme suit :

- **Classe A** : on trouve, dans cette classe, les réservoirs implantés dans des régions à faible sismicité telle que la zone 0 et la zone 1.
- **Classe B** : cette catégorie regroupe les réservoirs implantés au niveau des régions à sismicité moyenne ; telle que la zone IIa et la zone IIb.
- **Classe C** : on y trouve les réservoirs implantés dans des régions à sismicité élevée telle que la zone III.

La carte des zones de sismicité et le tableau associé qui précise cette répartition sont définis dans l'annexe (03).

3.1.2. Détermination de l'indice de vulnérabilité

Pour chaque paramètre, nous définissons trois classes de vulnérabilité. La classe A traduit la conformité du paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure. La classe C est la

plus vulnérable, elle traduit la situation la plus défavorable, et enfin la classe B représente la situation intermédiaire.

Chaque classe est sanctionnée par une note élémentaire K_i . Le principe de notation est fonction de l'accroissement du risque de vulnérabilité.

La note élémentaire K_i prend trois valeurs 0 ;5 ou 15, qui correspondent respectivement à la situation idéale, situation intermédiaire et situation critique, comme le montre le tableau 3.3 ci-après :

Par ailleurs, des pondérations « W_i » sont affectées à chaque paramètre allant de 0,25 à 1,75 pour tenir compte de l'importance de chacun des paramètres dans le comportement global de la structure, comme l'illustre le tableau (3.3) ci-dessous :

Tableau 3.3. Les notes élémentaires (K_i) et les pondérations (W_i) pour chaque paramètre

N°	paramètres	Notes élémentaires K_i			Pondération W_i
		Classe A	Classe B	Classe C	
1	Le comportement au séisme	0	5	15	1,75
2	Entrechoquement	0	5	15	1,75
3	Système de contreventement	0	5	15	1,50
4	Régularité en plan	0	5	15	1,50
5	Régularité en élévation	0	5	15	1,50
6	Type de sol	0	5	15	1,00
7	Implantation du réservoir	0	5	15	1,00
8	Zone sismique	0	5	15	1,00
9	Qualité des nœuds	0	5	15	0,75
10	Qualité du système de contreventement	0	5	15	0,75
11	Maintenance	0	5	15	0,50
12	Détails	0	5	15	0,25

La note partielle d'un paramètre est obtenue par le produit « $K_i W_i$ », et l'indice de vulnérabilité (I_v) s'exprime par la somme des notes partielles des différents paramètres :

$$I_v = \sum_{i=1}^{12} k_i w_i \quad (3-14)$$

3.1.3. Classification

En considérant tous les paramètres d'analyse énumérés précédemment (tableau 3.4), nous proposons la classification suivante :

Tableau 3.4. Classification des réservoirs en fonction de leurs indice de vulnérabilité

« I_v »				
Classe	vert	Orange1	Orange2	Rouge
I_v	0 - 33	33 - 90	90 - 133	133 - 199

Le niveau vert : $0 \leq I_v \leq 33$ exprime que le réservoir expertisé n'est pas vulnérable au séisme. L'ouvrage présente un bon comportement et une bonne résistance à l'alea sismique.

Le niveau orange1 : $33 \leq I_v \leq 90$ exprime que la résistance sismique est assez bonne. Donc le réservoir expertisé est moyennement vulnérable.

Le niveau orange 2 : $90 \leq I_v \leq 133$ exprime que la résistance sismique est faible. Donc le réservoir expertisé présente une vulnérabilité assez élevée.

Le niveau rouge: $133 \leq I_v \leq 199$ exprime que les réservoirs ont une résistance sismique très faible et donc le réservoir présente une vulnérabilité sismique élevé.

Les réservoirs appartenant à la classe verte ne nécessitent pas d'intervention. Celles appartenant à la classe orange (orange 1 et orange 2) nécessitent un renforcement, une étude dans ce sens devra être effectuée. Quant à celles appartenant à la classe rouge elles doivent être évacuées immédiatement et démolis, à moins qu'elles n'appartiennent à un patrimoine préservé dans ce cas une étude particulière devra être entreprise.

3.2. Présentation de la fiche d'enquête

Une fiche d'enquête est présentée en annexe quatre 4 ; regroupant l'ensemble des informations permettant le calcul de l'indice de vulnérabilité : cette fiche que nous avons décrite comprend une fiche descriptive où l'on retrouve les renseignements généraux du réservoir (nom, localisation, adresse, typologie, âge caractéristiques hydrauliques etc.) et l'évaluation des différents paramètres influant le comportement sismique de l'ouvrage.

Conclusion

La méthode que nous avons développée dans ce chapitre est basée sur l'indice de vulnérabilité des réservoirs de stockage en béton armé, pour pouvoir classer ces derniers en constructions non vulnérables, moyennement vulnérable et très vulnérables à l'action sismique. A cet effet, nous avons proposé une classification dépendant de la valeur de l'indice de vulnérabilité. Ce dernier a été calculé en fonction de plusieurs paramètres.

Nous avons considéré des paramètres utilisés en générale dans la méthode (GNDDT, 1986), influant sur le comportement sismique des structures, auxquels nous avons ajouté des paramètres supplémentaires (zone sismique, entrechoquement, implantation du réservoir et détails) et que nous avons adapté aux cas de réservoirs surélevés. Chaque paramètre peut prendre trois valeurs en fonction de la classe à la quelle il appartient. Nous avons donc défini ces trois classes et les avons affectés de notes élémentaires. Chaque parametre considéré est affecté d'une pondération pour tenir compte de son importance dans le comportement de la structure vis-à-vis de l'alea sismique.

Chapitre 4

Application de la méthode aux cas réels de réservoirs

Introduction

Le chapitre 4 consiste à appliquer la méthode de l'indice de vulnérabilité sismique développée précédemment au cas réels de réservoirs surélevés de stockage d'eau. Pour ce faire, nous avons choisi d'expertiser deux types de réservoirs :

- le réservoir type pendule inverse implanté à Berrahmoune commune Corso, dans la wilaya de Boumerdes,
- le réservoir type réservoir sur pilotis, implanté à Oued- Aissi, dans la wilaya de Tizi Ouzou.

L'indice de vulnérabilité ainsi calculé permettra de classer chacun des réservoirs en fonction de sa vulnérabilité.

4.1. Evaluation de l'indice de vulnérabilité du réservoir de Berrahmoune

4.1.1. Présentation de l'ouvrage

Le réservoir qui fait l'objet de cette expertise est un réservoir de stockage d'eau potable de capacité $1500m^3$, implanté à Berrahmoune commune CORSO, dans la wilaya de Boumerdes. Ce réservoir surélevé, en forme tronconique (figure4.1), est réalisé en en béton armé en 2012. Cet ouvrage à fait l'objet d'un projet de fin d'étude réalisé par (Boukais Said, 2012) à l'université des sciences et de la technologie Houari Boumediene.



Figure 4.1 : Vue générale du réservoir sis à Berrahmoune

Dans ce qui suit nous présentons à titre indicatif, le détail des composants d'un réservoir surélevé (figure 3.2).

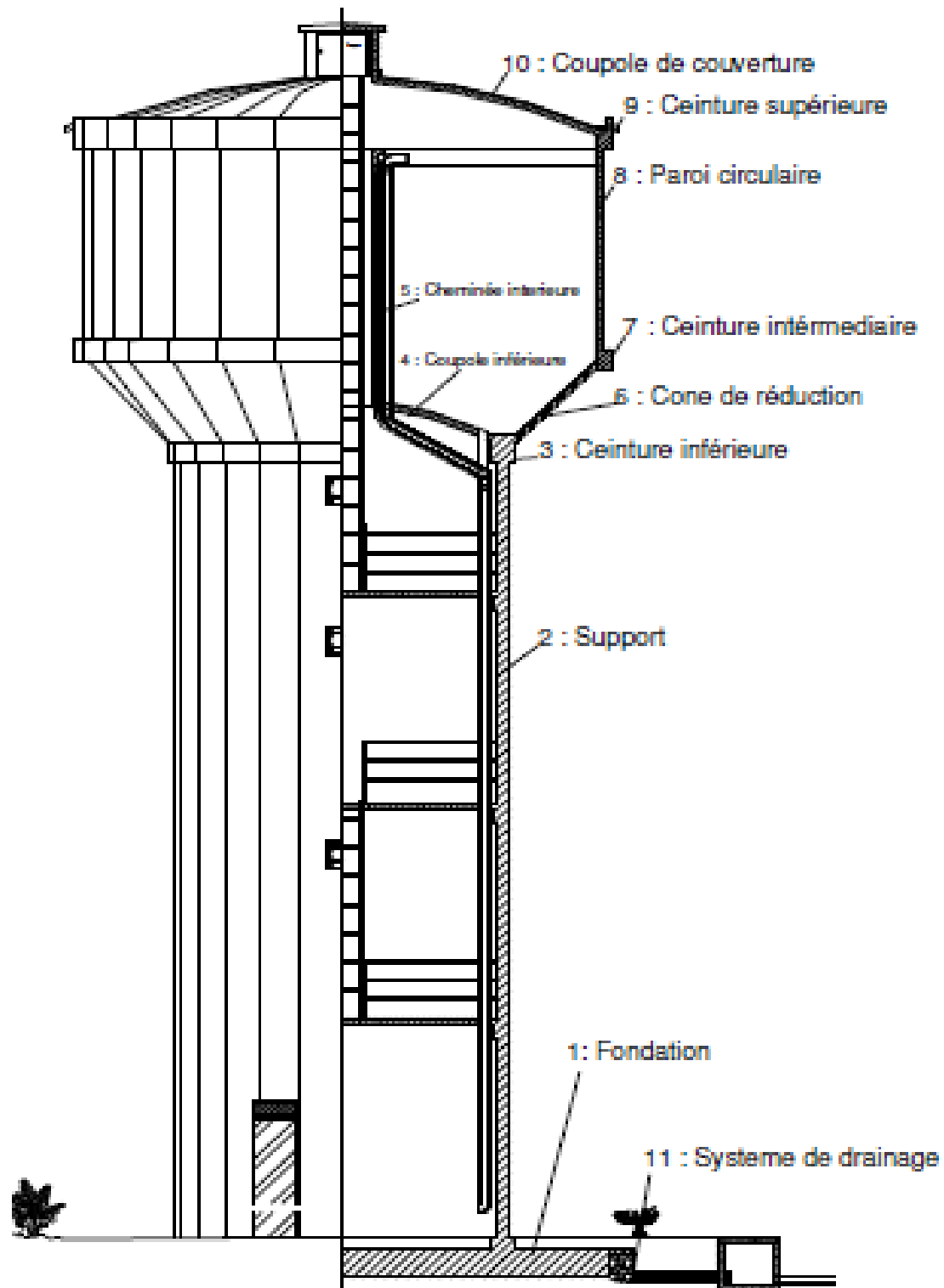


Figure 4.2 : Décomposition structurelle d'un réservoir surélevé

Le tableau 4.1 ci-dessous représente les différents composants d'un réservoir surélevé en béton armé

Tableau 4.1. Liste des composants d'un réservoir surélevé

N° de nomenclature	Nom du composant	Nature du matériau
1	Fondation	Béton armé
2	Support	Béton armé
3	Ceinture inférieure	Béton armé
4	Coupole inférieure	Béton armé
5	Cheminé intérieure	Béton armé
6	Cône de réduction	Béton armé
7	Ceinture intermédiaire	Béton armé
8	Paroi circulaire	Béton armé
9	Ceinture supérieure	Béton armé
10	Coupole de couverture	Béton armé
11	Système de drainage	Drain en moellons
		Buses en béton

4.1.2. Caractéristiques de l'ouvrage

Les caractéristiques du réservoir surélevé « château d'eau » faisant l'objet de notre objet sont :

- la hauteur totale de l'ouvrage H est : $H=40,70$ m.
- forme géométrique de la cuve : la forme est tronconique.
- hauteur d'ancrage 3,00 m
- capacité 1500 m^3
- hauteur utile d'eau 7,50 m
- diamètre de la coupole supérieure 23,50 m
- diamètre de la coupole inférieure 8,50 m

4.1.3. Présentation du site d'implantation

- **situation géographique**

L'assiette retenue pour contenir le château d'eau est située au niveau de la localité de Berrahmoune, situé sur le territoire de la commune de Corso, Wilaya de Boumerdes (figures, 4.3) ci-dessous :



Figure 4.3 : représentation de l'emplacement du château d'eau

4.1. 4. Calcul de l'indice de vulnérabilité

Pour le calcul de l'indice de vulnérabilité, nous déterminons les classes K_i ainsi que les pondérations W_i correspondantes à chaque paramètre défini dans la méthode de l'indice de vulnérabilité sismique développée au chapitre 3.

4.1.4.1. Comportement au séisme

a- Calcul du moment stabilisant M_S

$$M_S = N_S \cdot \frac{D_r}{2}$$

$$N_S = 5449,87 \times 10^4 \text{ N.}$$

$$D_r = 21 \text{ m}$$

Ce qui donne $M_S = 15619,346 \text{ t.m}$

b- Calcul du moment de renversement

b1- Action d'impulsion

$$M_{ri} = P_i \cdot h_i^* \quad [\text{t.m}]$$

- Calcul de la résultante des pressions d'impulsion

$$P_i = M_i \cdot S_a$$

avec :

le poids de la masse passive $M_i = 26,694 \times 10^6 \text{ N.}$

- Calcul de la période fondamentale de vibration :

Le poids de la masse concentrée $P' = 27,692 \times 10^6$ N

La hauteur du support $L = 26,30$ m

Le moment d'inertie minimum de la section transversale du support $I = 118,698 m^4$

Le module de déformation instantanée du béton armé d'après $E = 3,2210^6$ N/ m^2

Ce qui donne la période fondamentale $T = 0,41$ s

Spectre de réponse de calcul S_a est donné en fonction des paramètres suivants :

Coefficient d'accélération de zone $A = 0,40$

Période caractéristique $T_1 = 0,15$ s }
 Période caractéristique $T_2 = 0,70$ s } On a $T = 0,41$ s et $T_1 = 0,15$ s $< T = 0,41$ s $< T_2 = 0,70$ s

D'après la formule (2,35)

$$\frac{S_a}{g} = 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{Q}{R}\right)$$

Facteur de qualité $Q = 1,1$

Facteur de correction d'amortissement $\eta = 0,764$

Coefficient de comportement global de la structure $R = 2$

Ce qui donne $S_a = 5,15025$ m/s²,

La résultante des pressions d'impulsion $P_i = 1154,79$ t

- calcul du niveau d'application des pressions d'impulsion

$$h_i^* = \frac{3}{8} H_e + \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{3} \frac{R_i}{H_e}}{\text{th} \frac{R_i}{H_e}} - 1 \right) = 3,31 \text{ m}$$

Le moment de renversement d'impulsion $M_{r,i} = 3822,355$ t.m

b2- action d'oscillation

$$M_{r0} = P_0 \cdot h_0^*$$

avec :

$$P_0 = M_0 \cdot S_a$$

Poids de la masse active $M_0 = 5,15 \times 10^6 \text{ N}$

Spectre de réponse de calcul $S_a = 5,15025 \text{ m/s}^2$,

Ce qui donne la résultante des pressions d'oscillation $P_0 = 270,38 \text{ t}$

- calcul du niveau d'application des pressions d'oscillation

$$h_0^* = h \left(1 - \frac{\text{ch}\left(1,84 \frac{h}{R_i}\right) - 2}{1,84 \left(\frac{h}{R_i} \text{sh}\left(1,84 \frac{h}{R_i}\right)\right)} \right) = 6,16 \text{ m.}$$

Le moment de renversement d'oscillation $M_{r0} = 1665,541 \text{ t}$.

Enfin, le moment de renversement. $M_r = 5487,896 \text{ t m}$.

Ce qui donne le coefficient de sécurité $F_s = \frac{M_s}{M_r} = 2,85$.

La classification de ce paramètre est fonction de la valeur du coefficient de sécurité. Pour notre réservoir $F_s = 2,85 < 3$, donc le paramètre comportement au séisme est de classe B et la valeur de l'indice de vulnérabilité associée est illustrée au tableau 4.2 ci-après :

Tableau 4.2. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au comportement au séisme

Paramètre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi = Ki.Wi
Comportement au séisme	5	1,75	8,75

4.1.4.2. Entrechoquement

Le réservoir étudié est isolé donc il n'y a pas de risque d'entrechoquement sous l'effet de l'action sismique. La classe correspondante est la classe A et l'indice de vulnérabilité associé est donné par le tableau 4.3 ci-dessous :

Tableau 4.3. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'entrechoquement

Paramètre	Classe A	Pondération « Wi »	Ivi = Ki.Wi
Entrechoquement	0	1,75	0

4.1.4.3. Système de contreventement

Le réservoir étudié est classé en B ; réservoir à pendule inverse ou plus de 50% de la masse est concentrée dans le tiers supérieure de la structure, comme le montre la figure 4.5ci-après.



Figure 4.4. Réservoir à pendule inverse

La valeur de l'indice de vulnérabilité partiel associée au paramètre système de contreventement est illustrée au niveau du tableau 4.4 ci-après :

Tableau 4.4. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au système de contreventement

Parametre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Système de contreventement	5	1,50	7,5

4.1.4.4. La régularité en plan

La classification de la régularité en plan se fait en fonction des critères donnés par la méthode développée au chapitre 3, et pour le réservoir étudié nous avons :

- a- le réservoir expertisé présente une configuration sensiblement symétrique dans les deux directions, aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celles des masses.

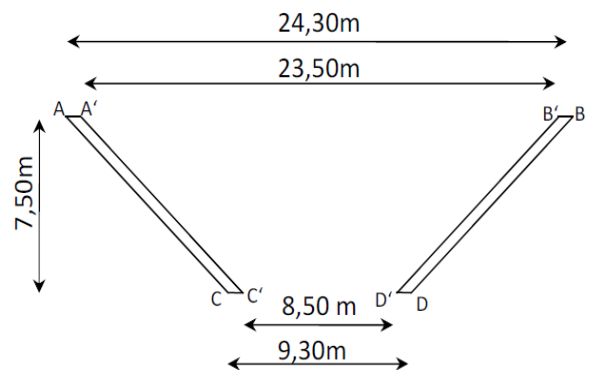


Figure 4.5. Dimensions de la cuve

b- Le rapport des diamètres

Le diamètre extérieure de la cuve $D_1 = 24,30$ m.

Le diamètre extérieure du support $d_1 = 9,30$ m

$$\frac{D_1 - d_1}{D_1} = \frac{24,30 - 9,30}{24,30} = 0,61 > 0,25 \Rightarrow \text{Le critère n'est pas vérifié.}$$

c- L'élancement géométrique

L'élancement géométrique λ_g du support définit le rapport entre la longueur du flambement L_f et le rayon de giration minimale de la section droite du béton

$$\lambda_g = \frac{L_f}{i}$$

- Calcul de la longueur de flambement L_f

$$L_f = 2L_0$$

avec

L_0 est la hauteur du support. $L_0 = 26,30$ m

La longueur de flambement $L_f = 52,6$ m

- le rayon de giration i donné par la formule suivante

$$i = \sqrt{\frac{I_{\min}}{B}}$$

I : moment d'inertie minimum de la section transversale = $118,698 m^4$

B : étant la section du support égale à

$$B = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) = 12,36 m^2$$

D'où $i = 3,098$ m

Ce qui donne l'élancement géométrique $\lambda_g = 16,98 > 5 \Rightarrow \text{Le critère n'est pas vérifié.}$

Le paramètre régularité en plan est partiellement vérifié, donc il est classé en B et la valeur de l'indice de vulnérabilité correspondante est donnée dans le tableau 4.5 ci-après :

Tableau 4.5. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en plan

Paramètre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi = Ki.Wi
Régularité en plan	5	1,50	7,5

4.1.4.5. La régularité en élévation

Ce paramètre est classé en fonction des critères donnés par la méthode développée au chapitre 3, et pour le réservoir expertisé on a :

a- Le rapport des masses

$$\frac{M_0}{M_i}$$

Poids de la masse active $M_0 = 5,15 \times 10^6 \text{N}$

Poids de la masse passive $M_i = 26,694 \times 10^6 \text{N}$

Le rapport des masses $\frac{M_0}{M_i} = 0,19 < 0,85 \implies$ **le critère n'est pas vérifié**

b- Le rapport des raideurs

$$\frac{K_1}{K_0}$$

- Calcul de K_1

$$K_1 = m_1 \cdot \omega_0^2$$

$$m_1 = \frac{M_0}{g} = 0,515 \times 10^6 \text{kg}$$

$$\omega_0^2 = \frac{g}{R} \left[1,84th \left(1,84 \frac{h}{R} \right) \right] = 2,093$$

$$\Rightarrow \omega_0 = 1,447 \text{rd/s}$$

La raideur de couplage $K_1 = 1,078 \times 10^6 \text{N/m}$.

- Calcul de K_0

$$\begin{cases} \omega_0^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} \\ \omega_0^2 = \frac{K_0}{M} \end{cases}$$

$$\frac{3gEI}{P'L^3} = \frac{K_0}{M} \implies K_0 = \frac{3gMEI}{P'L^3}$$

$$K_0 = 586,335 \times 10^6 \text{N/m}$$

Le rapport des raideurs $\frac{K_1}{K_0} = 0,001 < 0,67 \implies$ **le critère n'est pas vérifié.**

c- Le rapport d'élargissement

Le réservoir expertisé représente un élargissement graduel sur la hauteur ; le rapport d'élargissement est donné par la relation ci-après

$$\frac{D_1}{d_1}$$

avec :

Le diamètre extérieur de la cuve $D_1=24,30$ m.

Le diamètre extérieure du support $d_1=9,30$ m

Le rapport d'élargissement $\frac{D_1}{d_1}=2,61 > 1,25 \Rightarrow$ **le critère n'est pas vérifié**

Les critères de la régularité en élévation ne sont pas vérifiés. Donc le réservoir étudié est de forme irrégulière classé en C. Et la valeur de l'indice de vulnérabilité associée est illustrée au niveau du tableau 4.6 qui suit :

Tableau 4.6. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en élévation

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Régularité en élévation	15	1,50	22,5

4.1.4.6. Type de sol

Le site d'implantation de notre réservoir est le site S4 (site très meuble).

Le parametre type de sol est de classe C, et la valeur de l'indice de vulnérabilité correspondante est donnée par le tableau 4.7. Ci-après

Tableau 4.7. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au type de sol

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Type de sol	15	1,00	15

4.1.4.7. Implantation du réservoir

Le réservoir qui fait l'objet de notre étude est implanté dans un site très meuble, constitué par une couverture essentiellement sableuse assez épaisse, 10 à 11m de profondeur qui repose sur un substratum marneux. Donc la qualité du site d'implantation est très mauvaise, et le réservoir étudié est classé en C. L'indice de vulnérabilité correspondant est illustré dans le tableau 4.8.

Tableau4.8. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'implantation du réservoir

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Implantation du réservoir	15	1,00	15

4.1.4.8. Zone sismique

Le réservoir qui fait l'objet de notre expertise est implanté dans une région de forte sismicité (zone III), d'où la note élémentaire correspondante est $K_i=C$ et la valeur de l'indice de vulnérabilité I_{vi} est donné par le tableau 4.9.

Tableau4.9. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la zone sismique

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Zone sismique	15	1,00	15

4.1.4.9. Qualité des nœuds

La qualité des nœuds ou bien les zones de connexion entre les éléments structuraux (fondation- support, et support- cuve) est bonne, d'où le réservoir expertisé est classé en A et la valeur de l'indice de vulnérabilité associée est illustrée dans le tableau 4.10.

Tableau4.10. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité des nœuds

Parametre	Classe A	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Qualité des nœuds	0	0,75	0

4.1.4.10. Qualité du système de contreventement

La classification de ce parametre est fonction de la résistance caractéristique du béton f_{c28} . Pour notre réservoir la valeur de la résistance caractéristique du béton à la compression est $f_{c28}=25\text{MPa}$. Est comprise entre 27 et 30 MPa, donc le réservoir expertisé est de classe B et la valeur de l'indice de vulnérabilité pour ce parametre est donnée par le tableau 4.11.

Tableau4.11. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité du système de contreventement

Parametre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Qualité du Système de contreventement	5	0,75	3,75

4.1.4.11. Maintenance

La classification de ce paramètre est faite selon la méthode LPC n°47, qui présente l'intérêt de concerner toutes les fissures existantes dans une zone donnée, et pour notre cas

les éléments résistants du réservoir présentent une fissuration négligeable, d'où la classe correspondante est la classe A et l'indice de vulnérabilité I_{vi} est illustré dans le tableau 4.12.

Tableau 4.12. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la maintenance

Parametre	Classe A	Pondération « W_i »	$I_{vi} = K_i \cdot W_i$
Qualité du Système de contreventement	0	0,50	0,00

4.1.4.12. Détails

Pour le paramètre « détails » on a l'ensemble des éléments non structuraux en bon état est plus de trois quarts. Ce qui implique que la classe correspondante est A. La valeur de l'indice de vulnérabilité I_{vi} est donnée par le tableau 4.13.

Tableau 4.13. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au parametre détails

Parametre	Classe B	Pondération « W_i »	$I_{vi} = K_i \cdot W_i$
Détails	5	0,25	1,25

4.1.5. Calcul de l'indice de vulnérabilité

L'application de la méthode de l'indice de vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau potable, sur le réservoir surélevé sis à Berrahmoune a donné une classification des paramètres comme l'indique le tableau 3.2 suivant :

Tableau 4.14. Résultats de l'application de la méthode sur le réservoir surélevé implanté à Berrahmoune

N°	Paramètres	classe	« K_i »	Pondération « W_i »	$I_{vi} = K_i \cdot W_i$
1	Le comportement au séisme	B	5	1,75	8,75
2	Entrechoquement	A	0	1,75	0
3	Système de contreventement	B	5	1,50	7,5
4	Régularité en plan	B	5	1,50	7,5
5	Régularité en élévation	C	15	1,50	22,5
6	Type de sol	C	15	1,00	15
7	Implantation du réservoir	C	15	1,00	15
8	Zone sismique	C	15	1,00	15
9	Qualité des nœuds	A	0	0,75	0
10	Qualité du système de contreventement	B	5	0,75	3,75
11	Maintenance	A	0	0,50	0
12	Détails	A	0	0,25	0

L'indice de vulnérabilité (I_v) s'exprime par la somme des notes partielles des différents paramètres :

$$I_v = \sum_{i=1}^{12} k_i w_i = 95.$$

Iv=95

Classe	vert	Orange1	Orange2	Rouge
Iv	0 - 33	33 - 90	90 - 133	133 - 199

4.1.6. Interprétation des résultats

Le résultat de l'indice de vulnérabilité obtenu par la méthode de développée au chapitre 3 montre que le réservoir étudié est classé orange 2 ; donc présente une vulnérabilité assez élevée vis-à-vis de l'action sismique malgré sa mise en service 2012. Ceci peut être justifié par les raisons suivantes :

- le réservoir est implanté sur un site très meuble (S4) ;
- le réservoir étudié est implanté dans une zone de forte sismicité (zone III).
- le réservoir présente une régularité en plan partiellement vérifiée.
- la forme du réservoir en élévation est irrégulière
- la distribution de masse et de rigidité est variable entre le support et la cuve.

4.2. Evaluation de l'indice de vulnérabilité du réservoir implanté à Oued Aissi

4.2.1. Présentation de l'ouvrage

Le réservoir qui fait l'objet de cette expertise est un réservoir de stockage d'eau potable de capacité $100m^3$, implanté à, dans la wilaya de Tizi Ouzou comme le montre la figure 4.6 Ce réservoir sur pilotis, en forme tronconique, est réalisé en en béton armé en

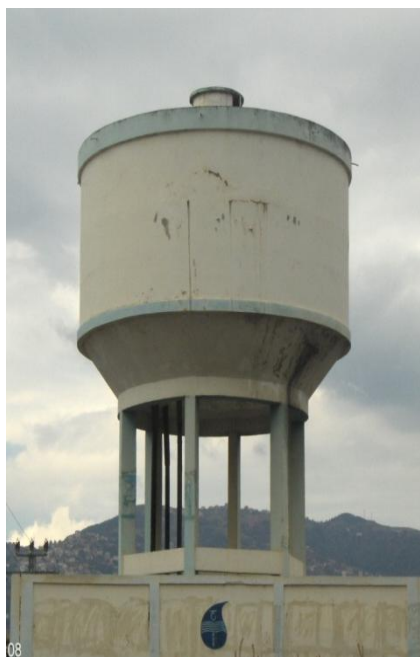


Figure 4.6 : Vue générale du réservoir sis à Seikh Oumedour

4.2.2. Caractéristiques de l'ouvrage

Les caractéristiques du réservoir surélevé faisant l'objet de notre étude

- la hauteur totale de l'ouvrage H est : H=13,40 m.
- forme géométrique de la cuve : la forme est tronconique.
- hauteur d'ancrage 1, 50 m
- capacité 100 m³
- hauteur utile d'eau 4, 25 m
- diamètre de la coupole supérieure 6, 2m
- diamètre de la coupole inférieure 4, 2 m

4.2.3. Calcul de l'indice de vulnérabilité

Pour le calcul de l'indice de vulnérabilité, nous déterminons les classes K_i ainsi que les pondérations W_i correspondantes à chaque paramètre défini dans la méthode de l'indice de vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau potable.

4.2.3.1. Comportement au séisme

a- Calcul du moment stabilisant

$$M_S = N_S R_{ext (fut)}$$

$$N_S = 1657 \text{ KN.}$$

$$R_{ext (fut)} = 2,2 \text{ m}$$

Ce qui donne $M_S = 3645 \text{ KN.m}$

b- Calcul du moment renversant

b1- action d'impulsion

$$M_{ri} = P_i \cdot h_i^* \quad [\text{t.m}]$$

- Calcul de la résultante des pressions d'impulsion

$$P_i = M_i \cdot S_a$$

avec :

le poids de la masse passive $M_i = 121,49 \times 10^4 \text{ N.}$

- Calcul de la période fondamentale de vibration :

Le poids de la masse concentrée $P' = 155,37 \times 10^4 \text{ N}$

La hauteur du support $L = 7,3 \text{ m}$

Le moment d'inertie minimum de la section transversale du support $I = 2,3424 \text{ m}^4$

Le module de déformation instantanée du béton armé d'après $E = 32164,2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

Ce qui donne la période fondamentale $T = 0,1 \text{ s}$

Spectre de réponse de calcul S_a est donné en fonction des paramètres suivants :

Coefficient d'accélération de zone $A = 0,2$

Période caractéristique $T_1 = 0,15 \text{ s}$ }
 Période caractéristique $T_2 = 0,40 \text{ s}$ } On a $T = 0,1 \text{ s}$ et $T_1 = 0,15 \text{ s}$ et $T_2 = 0,40 \text{ s}$

D'après la formule (2,35)

Facteur de qualité $Q = 1,1$

Facteur de correction d'amortissement $\eta = 0,88$

Coefficient de comportement global de la structure $R = 2$

Ce qui donne $S_a = 2,86 \text{ m/s}^2$,

La résultante des pressions d'impulsion $P_i = 347,46 \text{ KN}$

- calcul du niveau d'application des pressions d'impulsion

$$h_i^* = \frac{3}{8} H_e + \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{3} \frac{R_i}{H_e}}{\text{th} \frac{R_i}{H_e}} - 1 \right) = 2,46 \text{ m}$$

Le moment de renversement d'impulsion $M_{r,i} = 854,75 \text{ KN.m}$

b2- action d'oscillation

$$M_{r0} = P_0 \cdot h_0^*$$

avec :

$$P_0 = M_0 \cdot S_a$$

Poids de la masse active $M_0 = 23,96 \times 10^4 \text{ N}$

Spectre de réponse de calcul $S_a = 2,86 \text{ m/s}^2$,

Ce qui donne la résultante des pressions d'oscillation $P_0 = 68,52 \text{ KN}$

- calcul du niveau d'application des pressions d'oscillation

$$h_0^* = h \left(1 - \frac{\text{ch}\left(1,84\frac{h}{R_i}\right) - 2}{1,84\left(\frac{h}{R_i}\text{sh}\left(1,84\frac{h}{R_i}\right)\right)} \right) = 3,087\text{m.}$$

Le moment de renversement d'oscillation $M_{r0} = 211,52\text{KN.m}$

Enfin, e moment de renversement. $M_r = 1066,27\text{KN.m}$.

Ce qui donne le coefficient de sécurité $F_s = \frac{M_s}{M_r} = 3,41 > 3 \implies$ **Le critère n'est pas vérifié**

La classification de ce parametre est fonction de la valeur du coefficient de sécurité. Pour notre réservoir $F_s = 3,41 > 3$ donc le parametre comportement au séisme est de classe A et la valeur de l'indice de vulnérabilité associée est illustrée au tableau 4.15 ci-après :

Tableau 4.15. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au comportement au séisme

Parametre	Classe A	Pondération « Wi »	Ivi = Ki.Wi
Comportement au séisme	0	1,75	8,75

4.2.3.2. Entrechoquement

Le réservoir étudié est isolé donc il n'y a pas de risque d'entrechoquement sous l'effet de l'action sismique. La classe correspondante est la classe A et l'indice de vulnérabilité associé est donné par le tableau 4.16 ci-dessous :

Tableau 4.16. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'entrechoquement

Parametre	Classe A	Pondération « Wi »	Ivi = Ki.Wi
Entrechoquement	0	1,75	0

4.2.3.3. Système de contreventement

Le réservoir étudié est classé en C ; réservoir sur pilotis qui est une structure à rigidité faible qui présente une distribution de masse et de rigidité qui change d'une manière brusque, comme le montre la figure (4.7) ci-après.

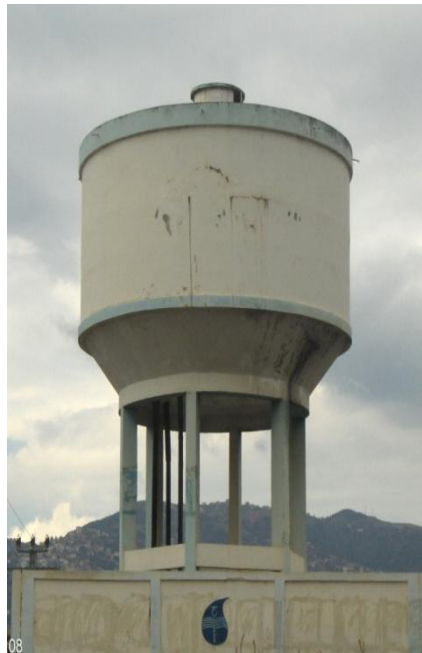


Figure 4.7 : Réservoir sur pilotis

La valeur de l'indice de vulnérabilité partiel associée au paramètre système de contreventement est illustrée au niveau du tableau 4.17. Ci-après :

Tableau 4.17. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au système de contreventement

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Système de contreventement	15	1,50	7,5

4.2.3.4. La régularité en plan

La classification de la régularité en plan se fait en fonction des critères donnés par la méthode développée au chapitre 3, et pour le réservoir étudié on a :

- a- le réservoir expertisé présente une configuration sensiblement symétrique dans les deux directions, aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celles des masses.

b- Le rapport des diamètres

Le diamètre extérieur de la cuve $D = 6,2\text{m}$

Le diamètre extérieure du support $d = 4,2\text{m}$

$$\frac{D_1 - d_1}{D_1} = \frac{6,2 - 4,2}{6,2} = 0,32 > 0,25 \Rightarrow \text{le critère n'est pas vérifié.}$$

c- L'élançement géométrique

L'élançement géométrique λ_g du support définit le rapport entre la longueur du flambement L_f et le rayon de giration minimale de la section droite du béton

$$\lambda_g = \frac{L_f}{i}$$

- Calcul de la longueur de flambement L_f

$$L_f = 0,5L_0$$

avec

L_0 est la hauteur du support. $L_0 = 3,9$ m

La longueur de flambement $L_f = 1,95$ m

- Calcul du rayon de giration i donné par la formule suivante

$$i = \sqrt{\frac{I_{\min}}{B}}$$

I : moment d'inertie minimum de la section transversale $I = 2,3424$ m⁴

B : étant la section du support $B = 0,82$ m²

Le rayon de giration $i = 1,70$ m

L'élançement géométrique $\lambda_g = 1,14 < 3 \Rightarrow$ Le critère n'est pas vérifié.

Le paramètre régularité en plan est partiellement vérifié, donc il est classé en B et la valeur de l'indice de vulnérabilité correspondante est donnée dans le tableau 4.18 ci-après :

Tableau 4.18. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en plan

Paramètre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi = Ki.Wi
Régularité en plan	5	1,50	7,5

4.2.3.5. La régularité en élévation

Ce paramètre est classé en fonction des critères donnés par la méthode développée au chapitre 3, et pour le réservoir expertisé on a :

a- Le rapport des masses

$$\frac{M_0}{M_i}$$

Poids de la masse active $M_o = 23,96 \times 10^4 \text{N}$

Poids de la masse passive $M_i = 121,49 \times 10^4 \text{N}$

Le rapport des masses $\frac{M_o}{M_i} = 0,19 < 0,85 \Rightarrow$ le critère n'est pas vérifié

b- Le rapport des raideurs

$$\frac{K_1}{K_0}$$

- Calcul de K_1

$$K_1 = m_1 \cdot \omega_0^2$$

$$m_1 = \frac{M_o}{g} = 23,96 \times 10^3 \text{kg}$$

$$\omega_0^2 = \frac{g}{R} \left[1,84th \left(1,84 \frac{h}{R} \right) \right] = 6,068$$

$$\omega_0 = 2,46 \text{rd/s}$$

La raideur de couplage $K_1 = 1,078 \times 10^6 \text{N/m}$.

- Calcul de K_0

$$\begin{cases} \omega_0^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} \\ \omega_0^2 = \frac{K_0}{M} \end{cases}$$

$$\frac{3gEI}{P'L^3} = \frac{K_o}{M} \Rightarrow K_o = \frac{3gMEI}{P'L^3}$$

$$K_0 = 0,57 \times 10^6 \text{N/m}$$

Le rapport des raideurs $\frac{K_1}{K_0} = 1,89 > 1,3 \Rightarrow$ le critère n'est pas vérifié.

c- Le rapport d'élargissement

Le réservoir expertisé représente un élargissement graduel sur la hauteur ; le rapport d'élargissement est donné par la relation ci-après

$$\frac{D_1}{d_1}$$

Avec

Le diamètre extérieur de la cuve $D_1 = 6,2$ m.

Le diamètre extérieure du support $d_1 = 4,2$ m

Le rapport d'élargissement $\frac{D_1}{d_1} = 1,47 > 1,25 \Rightarrow$ **le critère n'est pas vérifié**

Les critères de la régularité en élévation ne sont pas vérifiés. Donc le réservoir étudié est de forme irrégulière classé en C. Et la valeur de l'indice de vulnérabilité associée est illustrée au niveau du tableau 4.19 qui suit :

Tableau 4.19. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la régularité en élévation

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Régularité en élévation	15	1,50	22,5

4.2.3.6. Type de sol

Le site d'implantation de notre réservoir est le site S2 (site ferme).

Le parametre type de sol est de classe B, et la valeur de l'indice de vulnérabilité correspondante est donnée par le tableau 4.20. Ci-après

Tableau 4.20. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au type de sol

Parametre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Type de sol	5	1,00	5

4.2.3.7. Implantation du réservoir

Le réservoir qui fait l'objet de notre étude est implanté dans un site ferme. Donc la qualité du site d'implantation est moyenne, et le réservoir étudié est classé en B et l'indice de vulnérabilité correspondant est illustré dans le tableau 4.21 ci-dessous

Tableau 4.21. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à l'implantation du réservoir

Parametre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Implantation du réservoir	5	1,00	5

4.2.3.8. Zone sismique

Le réservoir qui fait l'objet de notre expertise est implanté dans une région de moyenne sismicité (zone IIa), d'où la note élémentaire correspondante est $K_i=B$ et la valeur de l'indice de vulnérabilité Ivi est donné par le tableau 4.22 qui suit :

Tableau4.22. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la zone sismique

Parametre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Zone sismique	5	1,00	5

4.2.3.9. Qualité des nœuds

La qualité des nœuds ou bien les zones de connexion entre les éléments structuraux (fondation- support, et support- cuve) est mauvaise, d'où le réservoir expertisé est classé en C et la valeur de l'indice de vulnérabilité associée est illustrée dans le tableau 4.23 ci-après :

Tableau4.23. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité des nœuds

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Qualité des nœuds	15	0,75	11,25

4.2.3.10. Qualité du système de contreventement

La classification de ce parametre est fonction de la résistance caractéristique du béton f_{c28} . Pour notre réservoir la valeur de la résistance caractéristique du béton à la compression est $f_{c28}=25\text{MPa}$. Est comprise entre 27 et 30 MPa, donc le réservoir expertisé est de classe B et la valeur de l'indice de vulnérabilité pour ce parametre est donnée par le tableau 4.24 suivant :

Tableau4.24. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la qualité du système de contreventement

Parametre	Classe B	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Qualité du Système de contreventement	5	0,75	3,75

4.2.3.11. Maintenance

La classification de ce parametre est faite selon la méthode LPC n°47, qui présente l'intérêt de concerner toutes les fissures existantes dans une zone donnée, et pour notre cas les éléments résistants du réservoir présentent une fissuration négligeable, d'où la note élémentaire correspondante est $K_i=A$ et l'indice de vulnérabilité I_{vi} est illustré dans le tableau4.25 ci-après :

Tableau4.25. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé à la maintenance

Parametre	Classe A	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Qualité du Système de contreventement	0	0,50	0,00

4.2.3.12. Détails

Pour le paramètre « détails » on a l'ensemble des éléments non structuraux en mauvais état. Ce qui implique que la note élémentaire correspondante est $K_i=C$ et la valeur de l'indice de vulnérabilité I_{vi} est donné par le tableau 4.26 qui suit :

Tableau4.26. Valeur de l'indice de vulnérabilité associé au paramètre détails

Parametre	Classe C	Pondération « Wi »	Ivi =Ki.Wi
Détails	15	0,25	3,75

4.2.4. Calcul de l'indice de vulnérabilité


L'application de la méthode de l'indice de vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau potable, sur le réservoir surélevé sis à Berrahmoune a donné une classification des paramètres comme l'indique le tableau 3.2 suivant :

Tableau4.27. Résultats de l'application de la méthode sur le réservoir surélevé implanté à Siekh Oumedour

N°	Paramètres	classe	« Ki »	Pondération « Wi »	Ivi= Ki .Wi
1	Le comportement au séisme	B	0	1,75	0
2	Entrechoquement	A	0	1,75	0
3	Système de contreventement	C	15	1,50	7,5
4	Régularité en plan	B	5	1,50	7,5
5	Régularité en élévation	C	15	1,50	22,5
6	Type de sol	B	5	1,00	5
7	Implantation du réservoir	B	5	1,00	5
8	Zone sismique	B	5	1,00	5
9	Qualité des nœuds	C	15	0,75	11,25
10	Qualité du système de contreventement	B	5	0,75	3,75
11	Maintenance	C	15	0,50	7,5
12	Détails	C	15	0,25	3,75

L'indice de vulnérabilité (I_v) s'exprime par la somme des notes partielles des différents paramètres :

$$I_v = \sum_{i=1}^{12} k_i w_i = 87,5.$$



$$I_v = 78,75$$

Classe	vert	Orange1	Orange2	Rouge
Iv	0 - 33	33 - 90	90 - 133	133 - 199

4.2.5. Interprétation des résultats

Le résultat de l'indice de vulnérabilité obtenu par la méthode développée au chapitre 3 classé le réservoir en orange 1 ; donc présente une vulnérabilité moyenne vis-à-vis de l'action sismique malgré sa mise en service. Ceci peut être justifié par les raisons suivantes :

- le réservoir est implanté sur un site ferme (S2) ;
- le réservoir étudié est implanté dans une zone à moyenne sismicité (zone IIa).
- le réservoir présente une régularité en plan partiellement vérifiée.
- la forme du réservoir en élévation est irrégulière
- la distribution de masse et de rigidité est variable entre le support et la cuve.

Conclusion

La méthodologie à base d'indice de vulnérabilité, appliquée aux cas deux réservoirs\$

- le réservoir type pendule inverse implanté à Berrahmoune commune Corso, dans la wilaya de Boumerdes,
- le réservoir sur pilotis implanté à Siekh-Oumedour, dans la wilaya de Tizi Ouzou.

Permet une évaluation simple et rapide de la vulnérabilité des réservoirs surélevés en béton armé.

L'expertise des deux réservoirs à montrée que Les paramètres (zone sismique, type de sol, régularité en élévation et en plan) influent la vulnérabilité de la structure vis-à-vis de l'action sismique. C'est le cas pour le réservoir de berrahmoun, qui est classé en orange 2 malgré sa mise en service 2012.

Conclusion générale

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures sont généralement développées sur la base des observations post-sismiques des pays à forte sismicité.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des centres urbains. Elles diffèrent les unes des autres en cout en moyens utilisés et en précision. Le type de la méthode choisie dépend de l'objectif de l'évaluation, de la disponibilité des données, du matériel et de la technologie utilisés.

L'étude au séisme des réservoirs surélevés permet d'avoir une connaissance approfondie du comportement des réservoirs surélevés sous l'action sismique pour cela on illustre les différentes étapes de calcul des réservoirs surélevés vis-à-vis de l'action sismique.

En s'inspirant des approches développées par le groupe national pour la défense contre les séismes (GNDT, 1986) et (Benedetti et *al.* 1988) de développer, pour la première fois, une méthode d'estimation de la qualité sismique des réservoirs de stockage d'eau potable, classés par les règlements parasismique algérien comme des ouvrages d'art d'importance socio-économique. Cette méthode, offre la possibilité d'une mise à jour pratiquement continue de la qualité sismique des réservoirs.

Cette méthodologie à base d'indice de vulnérabilité présentée, permet une évaluation simplifiée et rapide de la vulnérabilité des réservoirs en béton armé. Elle est appliquée au cas des réservoirs (le réservoir type pendule inverse implanté à Berrahmoune commune Corso, dans la wilaya de Boumerdes, le réservoir type réservoir sur pilotis, implanté à siekh - oumedour, dans la wilaya de Tizi Ouzou). Elle permet une évaluation simple et rapide de la vulnérabilité des réservoirs.

La détermination de l'indice de vulnérabilité dans le cycle de vie du réservoir montre, à travers l'expertise des réservoirs permettent de définir le comportement vis-à-vis de l'action sismique e fonction de la classification développée dans la méthode

Des fiches d'enquêtes à renseigner ont été élaborées de telle manière à intégrer les coordonnées géographiques, afin de permettre l'expertise.

La méthode de l'indice de vulnérabilité présente un excellent outil décisionnel au stade préliminaire de l'expertise entre les mains des ingénieurs experts.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

APPLIED TECHNOLOGIE COUNCIL, " The seismic evaluation and retrofit of concrete "building ",ATC 40, volumes 1 and 2, Redwood, City, California 1996. "

BAEL, " Recgles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la methode des états limites **BAEL91**révisé **99**, "1999.

BELHOUENE F., " Détermination de l'indice de vulnérabilité pour les bâtiments en béton armé, " Thèse de magister en génie civil, Blida, juin 2006.

BOUHADOUN D.,BELKACEM F., " Evaluation d'un parc de patrimoine de réservoirs par la détermination de l'indice de vulnérabilité dans un système informatique géographique " Thèse de master en génie civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2010.

BOUKAIS S., " Etude d'un chateau d'eau tronconique de capacité 1500 m3 implanté a berrahmoun commune de corso, wilaya de boumerdes these d'ingenieur d'etat en Genie civil, Université des sciences et de la technologie Houarri Boumedien, 2012.

DTR B-C – 2 48, 2003.Regles de construction parasismiques algeriennes (addenda2003) CGS, Alger, juin 2003.

EUROCODES 8., " Conception et dimensionnement des structures pour la résistance au séisme partie 4 : Silos réservoirs et canalisation 1998".

FASCICUL 74., " Texte officiel, Construction des reservoirs en Beton- Cahier des clauses techniques generales, Ministere de l'équipement des transports et du logements, paris, mars 1998"

DAVIDOVICI V., HADDADI A., " Calcul pratique des réservoirs en zone sismique, 1982".

HAMITOUCHE S., HAMMOUM H., BOUZELHA K., HANNACHI N.E., Expertise of an apartments building surmounted by a tank with a container capacity of 1000 m³ in Algiers, proceedings of the 4th International Conference on integrity, reliability and failure 2013, from 23 to 27 june 2013, in Funchal, Ed. INEGI, pp. 393-394, ISBN 978-972-8826-27-7, Porto, Portugal (www.inegi.up.pt).

HAMMOUM H., " Diagnostic et analyse de risques lies au vieillissement des réservoirs en béton arme. Développement de méthodes d'aide à l'expertise ", Thèse de doctorat des sciences en Génie Civil, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2012.

HAMIZI M., KAHIL A., BOUKAIS S., HANNACHI N.E., "Recherche de la position optimale des voiles et endommagement des structures sous charges dynamiques", Communication de 10^{ème} Congres de Mécanique, Oujda, Maroc, 2011.

HEMSAS M., ELACHACHI S.M., " Evaluation de la performance et analyse du comportement non linéaire des murs voiles en B.A. soumis à une action sismique ", 25^o rencontres de l'AUGC, 23-27, Bordeaux, mai 2007.

KAHIL A. " Evaluation de la performance sismique des bâtiments ", thèse de magister en génie civil, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2008.

Méthode d'essai LPC N° 47, Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton», Octobre 1997.

MARIE JOSE NOLLET., "ETS-RT-2004- 001 Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants, rapport technique de L'ETS, Département de génie de la construction Ecole Technologie Supérieure Université de Québec Montréal, 16juin 2004".

PS 69- révisé en 92., "Règles de construction parasismiques applicables aux bâtiments PS92", normes NFP06-013.

PLUMIER A, CAMELBEECK T, BARSZEZ M., "Le risque sismique et sa prévention en région Wallonne, Mécanique des Structures, et des Matériaux Université de Liège, 2003".

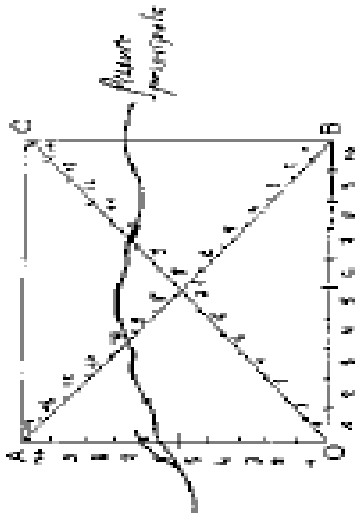
Annexes

Annexe 1

Indice de fissuration - feuille de relevé

INDICE DE FISSURATION - feuille de relevé

date : 17/4/91 opérateur : P. FAVEN
 ouvrage : 59 PS 17 sur A12 à Tournay
 partie d'ouvrage : Mer en site Cote Sud Cote Tournoy
 base : 01 température : 8,1°C

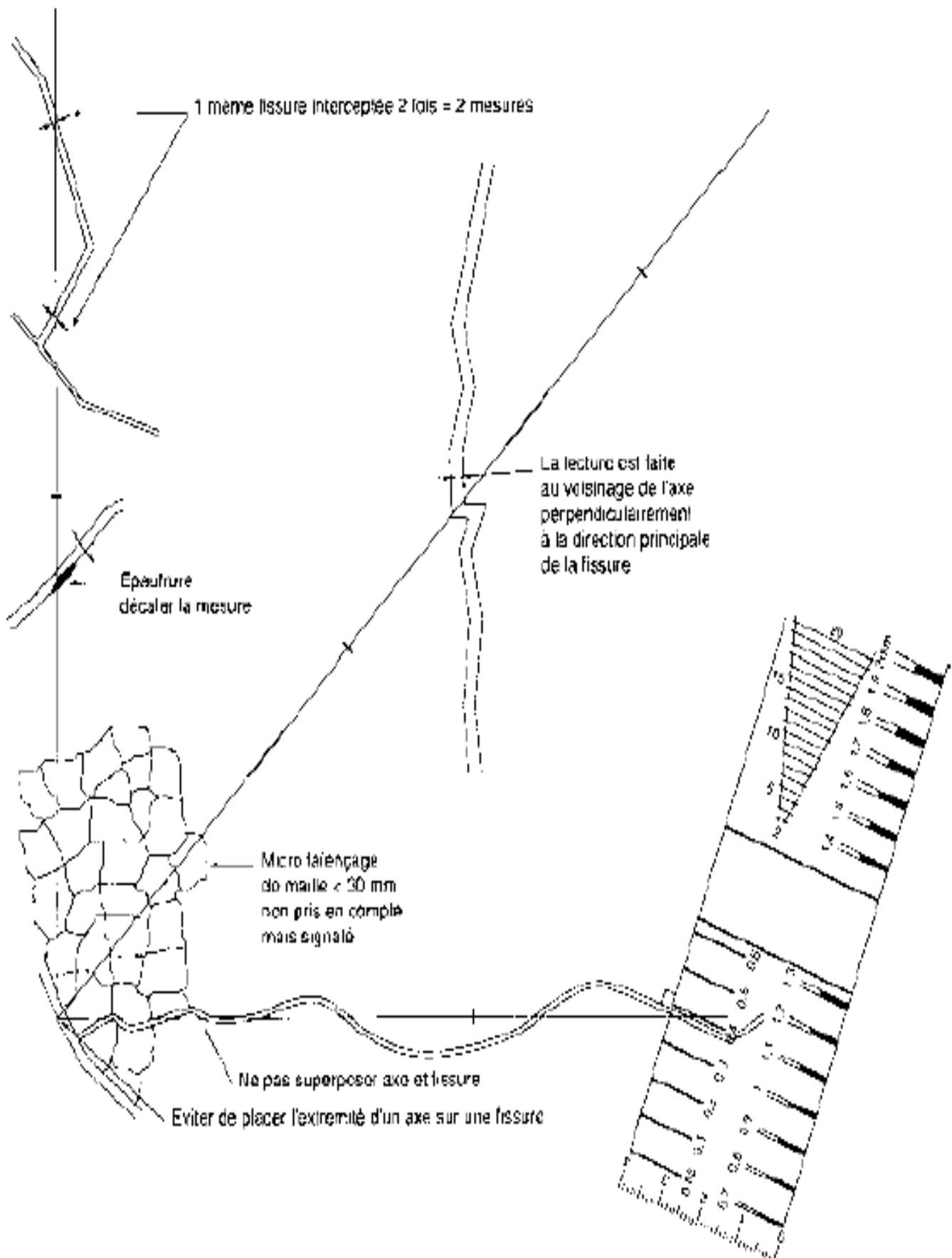


inter- veille	long base (m)				Nbre fiss.	long base (m)	ouverture (mm)		moyenne globale (IF)
	1	2	3	4			totale (cumul)	par fissure (moy)	
DA	01	08	-	-	7	1	4,85	0,68	4,85
	0,9	0,2	-	0,7					
OB	02	02	-	0,2	8	1	0,85	0,40	0,85
	0,2	0,2	0,2	0,1					
	0,3	0,3	0,5	0,4		1,4	4,55	0,54	2,85
OC	03	-	-	-	8	1,4	4,55	0,54	2,85
	0,5	0,6	-	-					
AB	06	-	01	01	7	1,4	4,00	0,54	2,86
	0,6	-	-	-					

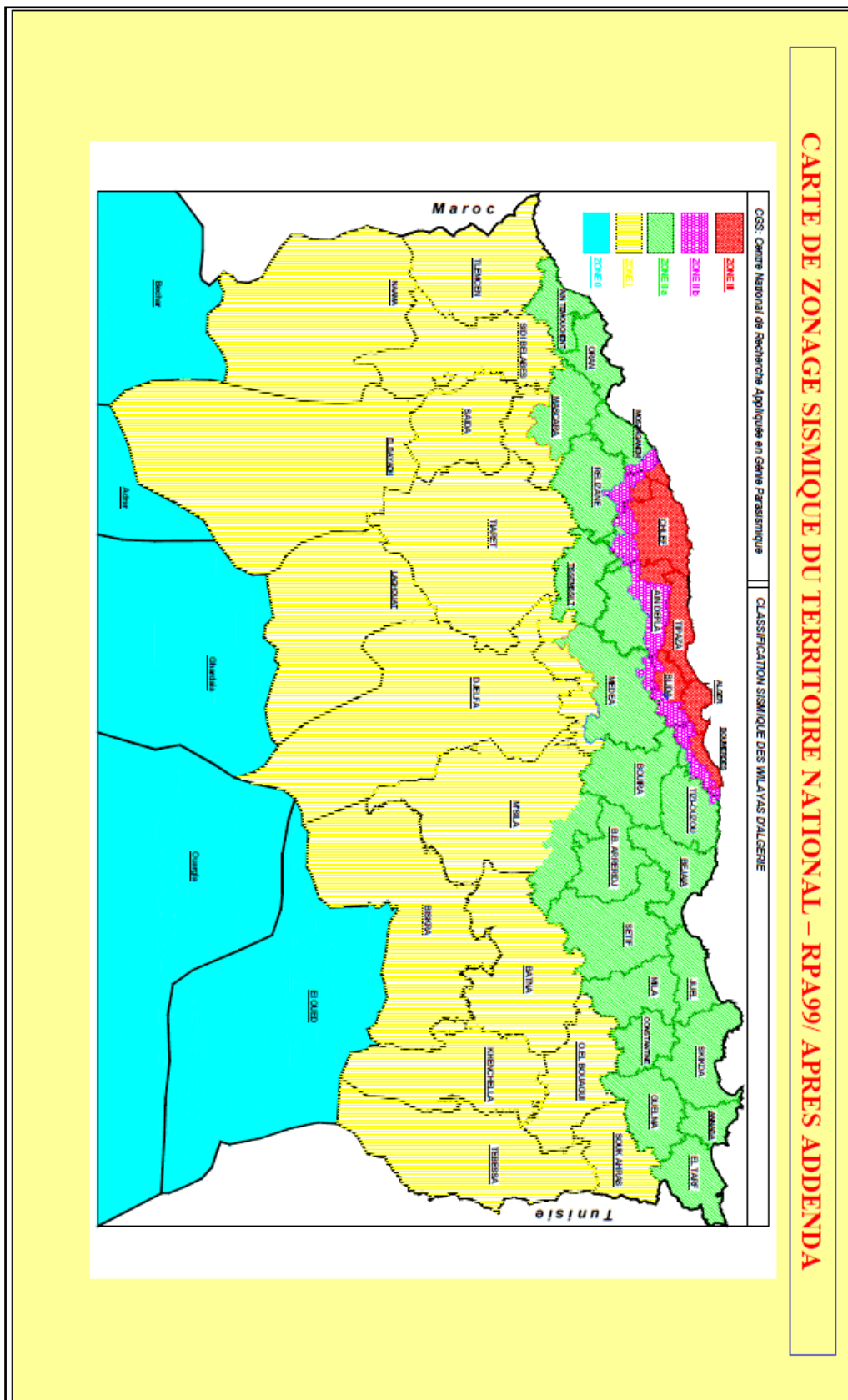
Observations : 1. fissure principale subhorizontale - réseau de fissure subvertical

Annexe 2

Indice de fissuration convention de mesure de l'ouverture des fissures



Annexe 3-a
Carte de zonage Sismique Du Territoire National
(DTR-B-C-2-48,2003)



Annexe 3-b
classification sismique des wilayas et communes d'Algérie

Extrait de DTR-B-C-2-48,2003.

N°	WILAYAS OU COMMUNES	ZONE SISMIQUE
01	ADRAR	0
02	CHLEF	
	<p align="center">Groupe de communes A Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes B et C</p> <p align="center">Groupe de communes B El karimia, Harchoun, sendjas, Oued sly, Boukadir</p> <p align="center">Groupe de communes C Ouled Ben Abd El Kader Hadjadj</p>	<p align="center">III</p> <p align="center">IIb</p> <p align="center">IIa</p>
03	LAGHOUAT	I
04	OUMEL BOUAGHI	I
05	BATNA	I
06	BEJAIA	IIa
07	BISKRA	I
08	BECHAR	0
09	BLIDA	
	<p align="center">Groupe de communes A Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes B</p> <p align="center">Groupe de communes B Meftah, Djebabra, Souhane, Larbaa, Ouled Selama, Bougara, Hammam Melouane, Ain Romana</p>	<p align="center">III</p> <p align="center">IIb</p>
10	BOUIRA	IIa
11	TAMENRASSET	0
12	TEBESSA	I
13	TLEMCEN	I

14	TIARET	I
15	TIZIOUZOU	
	Groupe de communes A Mizrana	IIb
	Groupe de communes B Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes A	IIa
16	ALGER	III
17	DJELFA	I
18	JIJEL	IIa
19	SETIF	IIa
20	SAIDA	I
21	SIKDA	IIa
22	SIDI BEL-ABBES	I
23	ANNABA	IIa
24	GUELMA	IIa
25	CONSTANTINE	IIa
26	MEDEA	
	Groupe de communes A El hamdania , Medea, Tamesguida,	IIb
	Groupe de communes B Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes A et C	IIa
	Groupe de communes C Bou Aiche, Chahbounia, Boughzoul, Sareg, Meftaha, Ouled Maref, El Aounet, Ain Boucif, Sidi Damed, Ain Ouksir, Cheniguel	I
27	MOSTAGANEM	
	Groupe de communes A Ouled Boughalem, Achaacha, Khadra, Nekmaria	III
	Groupe de communes B Sidi Lakhdar, Tasghait, Ouled Maalah	IIb
	Groupe de communes C Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes A et B	IIa

28	<p>M'SILA</p> <p>Groupe de communes A Beni Ilmane, Ounougha, Hammam Dalaa, Tarmount, Ouled Mansour, M'sila, M'tarfa, Maadid, Ouled Derradj, Ouled Addi, Dahahna, Berhoum, AinKadra, Magra, Belaiba</p> <p>Groupe de communes B Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes A</p>	<p>IIa</p> <p>I</p> <p>I</p>
29	<p>MASCARA</p> <p>Groupe de communes A Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes B</p> <p>Groupe de communes B Ain Fares, Ain fekran, Bouhanifia, Guerdjou, Oued Taria, Ghris, Benain, Mokhda, Aouf, Gharous, Nesmot, M'hamid, Hachem, Oued El Abtal, Ain Ferrah.</p>	<p>IIa</p> <p>I</p>
30	OUARGLA	0
31	ORAN	IIa
32	EL BAYADH	I
33	ILLIZI	0
34	BORDJ BOU ARRERIDJ	IIa
35	<p>BOUMERDES</p> <p>Groupe de communes A Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes B et C</p> <p>Groupe de communes B Afir, Benchoud, Taouerga, Baghlia, Oued Aissa, Naciria, Bordj Menail, Isser, Beni Amrane, Souk El Had, Bouzegza Kedar, El Kharouba, Larbatache, Khemis El khechna, Ouled Moussa, Hammadi.</p> <p>Groupe de communes C Timezrit, Ammal, Chaabet El Ameur</p>	<p>III</p> <p>IIb</p> <p>IIa</p>

		IIa
36	TARF	0
37	TINDOUF	IIa
		0
38	TISSEMSILT	I
39	EL OUED	I
40	KHENCHELA	III
41	SOUK AHRAS	IIa
42	TIPAZA	
43	MILA	III
44	AIN DEFLA	
	Groupe de communes A	
	Tacheta, Zougagha, El Abadia, Ain Bouyahia, El Attaf	IIb
	Groupe de communes B	
	El Amra, Mekhtaria, Arib, Rouina, Ain Defla, Bourashed, Zeddine, Tiberkanine, Sen Allah, Meliana, Ain Torki , Hammam Righa, Ain Benian, Houceinia, Boumadfaa	IIa
	Groupe de communes C	
	Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes A et B	I
		IIa
45	NAAMA	0
46	AIN TEMOUCHENT	
47	GHARDAIA	III
48	RELIZANE	
	Groupe de communes A	
	Mediouna, Sidi M'hamed Ben Ali, Mazouna, El Guettar	IIb
	Groupe de communes B	
	Merdja Sidi Abed, Oued Rhiau, Quartzenz, Djidiouia, Hamri, Beni Zentis	IIa
	Groupe de communes C	
	Toutes les communes autres que celles figurant au groupe de communes A et B	

4.4. Evaluation du comportement sismique du réservoir surélevé

4.4.1. Comportement au séisme

Note élémentaire K_i	Classe A	Classe B	Classe C
Pondération w_i	$F_s > 3$	$1,5 < F_s < 3$	$F_s < 1,5$
1,75			

4.4.2. Entrechoquement

Note élémentaire K_i	Classe A	Classe B	Classe C
Pondération w_i	$\delta > 100$	$100 < \delta < 50$	$\delta < 50$
1,75			

4.4.3. Système de contreventement

Note élémentaire K_i	Classe A	Classe B	Classe C
Pondération w_i	$\delta > 100$	$100 < \delta < 50$	$\delta < 50$
1,50			

4.4.4. Régularité en plan

Note élémentaire K_i	Classe A	Classe B	Classe C
Pondération w_i	Forme régulière	Forme partiellement régulière	Forme irrégulière
1,50			

4.4.5. Régularité en élévation

Note élémentaire K_i	Classe A	Classe B	Classe C
Pondération w_i	Forme régulière	Forme partiellement régulière	Forme irrégulière
1,50			

4.4.6. Type de sol

Note élémentaire K_i	Classe A	Classe B	Classe C
Pondération w_i	Sol rocheux (S1)	Sol ferme (S2)	Sol meuble et très meuble (S3 et S4)
1,00			

4.4.7. Implantation du réservoir

Note élémentaire K_i			
Pondération w_i	Classe $k_i=A$ Qualité du site d'implantation est bonne	Classe $k_i=B$ Qualité du site d'implantation est moyenne	Classe $k_i=C$ Qualité du site d'implantation est mauvaise
1,00			x

4.4.8. Zone sismique

Note élémentaire K_i			
Pondération w_i	Classe $k_i=A$ Zone (0 et I)	Classe B Zone (IIa et IIb)	Classe C Zone (III)
1,00			

4.4.9. Qualité des nœuds

Note élémentaire K_i			
Pondération w_i	Classe A Qualité des nœuds est bonne	Classe B Qualité des nœuds est moyenne	Classe C Qualité des nœuds est mauvaise
0,75			

4.4.10. Qualité du système de contreventement

Note élémentaire K_i			
Pondération w_i	Classe A $27MPa \leq f_{c28} < 30MPa$	Classe B $25MPa \leq f_{c28} < 27MPa$	Classe C $f_{c28} < 25MPa$
0,75			

4.4.11. Maintenance

Note élémentaire K_i			
Pondération w_i	Classe A $0 < IF < 0,5$ Ou $0,5 < IF < 1$	Classe B $1 < IF < 2$ Ou $2 < IF < 5$	Classe C $5 < IF < 10$ Ou $IF > 10$
0,50			

4.4.12. Détails

Note élémentaire K_i			
Pondération w_i	Classe A les éléments non structuraux sont en bonne état	Classe B l'état des éléments non structuraux est moyen	Classe C l'état des éléments non structuraux est mauvais
0,25			

Annexe 5

Fiche d'enquête d'un réservoir surélevé

5.1. Fiche descriptive

- Nom du réservoir : réservoir de berrahmoune
- Date d'expertise : 2013
- Ingénieur chargé de l'expertise : Slimani Drifa
- Date de mise en service : 2012
- Typologie du réservoir : béton armé

5.2. localisation du réservoir

- Wilaya : Boumerdes
- Commune : Berrahmoune
- Adresse: /
- Cordonnées UTM : /



Le réservoir de berrahmoune

5.3. Caractéristiques du réservoir

- Capacité: $1500m^3$
- la hauteur totale de l'ouvrage H est : $H=40,70$ m.
- forme géométrique de la cuve : la forme est tronconique.
- hauteur d'ancrage 3, 00 m
- hauteur utile d'eau 7, 50 m
- diamètre de la cuve 23, 50 m
- diamètre de fut 8, 50 m
- Forme de l'ouvrage : Circulaire (x) Rectangulaire ()
 Carré () Quelconque ()

5.3.1. Comportement au séisme

Note élémentaire K_i	Classe A $F_s > 3$	Classe B $1,5 < F_s < 3$	Classe C $F_s < 1,5$
Pondération w_i			
1,75	X		

5.3.2. Entrechoquement

Note élémentaire Ki	Classe A $\delta > 100$	Classe B $100 < \delta < 50$	Classe C $\delta < 50$
Pondération wi			
1,75	X		

5.3.3. Système de contreventement

Note élémentaire Ki	Classe A $\delta > 100$	Classe B $100 < \delta < 50$	Classe C $\delta < 50$
Pondération wi			
1,50	X		

5.3.4. Régularité en plan

Note élémentaire Ki	Classe A Forme régulière	Classe B Forme partiellement régulière	Classe C Forme irrégulière
Pondération wi			
1,50		X	

5.3.5. Régularité en élévation

Note élémentaire Ki	Classe A Forme régulière	Classe B Forme partiellement régulière	Classe C Forme irrégulière
Pondération wi			
1,50			X

5.3.6. Type de sol

Note élémentaire Ki	Classe A Sol rocheux (S1)	Classe B Sol ferme (S2)	Classe C Sol meuble et très meuble (S3 et S4)
Pondération wi			
1,00			X

5.3.7. Implantation du réservoir

Note élémentaire Ki	Classe A Qualité du site d'implantation est bonne	Classe B Qualité du site d'implantation est moyenne	Classe C Qualité du site d'implantation est mauvaise
Pondération wi			
1,00			X

5.3.8. Zone sismique

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A Zone (0 et I)	Classe B Zone (IIa et IIb)	Classe C Zone (III)
1,00			X

5.3.9. Qualité des nœuds

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A Qualité des nœuds est bonne	Classe B Qualité des nœuds est moyenne	Classe C Qualité des nœuds est mauvaise
0,75	X		

5.3.10. Qualité du système de contreventement

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A $27MPa \leq f_{c28} < 30MPa$	Classe B $25MPa \leq f_{c28} < 27MPa$	Classe C $f_{c28} < 25MPa$
0,75		X	

5.3.11. Maintenance

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A $0 < IF < 0,5$ Ou $0,5 < IF < 1$	Classe B $1 < IF < 2$ Ou $2 < IF < 5$	Classe C $5 < IF < 10$ Ou $IF > 10$
0,50	X		

5.3.12. Détails

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A les éléments non structuraux sont en bonne état	Classe B l'état des éléments non structuraux est moyen	Classe C l'état des éléments non structuraux est moyen
0,25	X		

Annexe 6

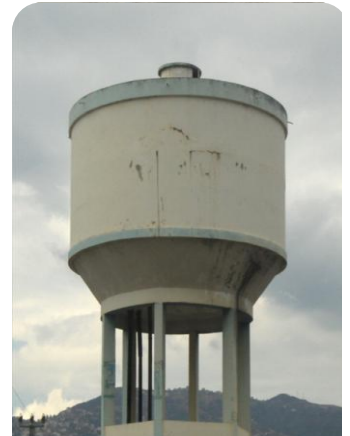
Fiche d'enquête d'un réservoir surélevé

6.1. Fiche descriptive

- Nom du réservoir : réservoir de siekh oumedour
- Date d'expertise : 2013
- Ingénieur chargé de l'expertise : Slimani Drifa
- Date de mise en service : /
- Typologie du réservoir : béton armé

6.2. localisation du réservoir

- Wilaya : tizi ouzou
- Commune : Oued Aissi
- Adresse: /
- Cordonnées UTM : /



Le réservoir de siekh oumedour

6.3. Caractéristiques du réservoir

- Capacité: $100m^3$
- la hauteur totale de l'ouvrage H est : $H=13,40$ m.
- forme géométrique de la cuve : la forme est tronconique.
- hauteur d'ancrage 1, 50 m
- hauteur utile d'eau 4, 25 m
- diamètre de la cuve 6, 2 m
- diamètre de fut 4, 2 m
- Forme de l'ouvrage : Circulaire (x) Rectangulaire ()
 Carré () Quelconque ()

6.3.1. Comportement au séisme

Note élémentaire K_i	Classe A $F_s > 3$	Classe B $1,5 < F_s < 3$	Classe C $F_s < 1,5$
Pondération w_i			
1,75	X		

6.3.2. Entrechoquement

Note élémentaire Ki	Classe A $\delta > 100$	Classe B $100 < \delta < 50$	Classe C $\delta < 50$
Pondération wi			
1,75	X		

6.3.3. Système de contreventement

Note élémentaire Ki	Classe A $\delta > 100$	Classe B $100 < \delta < 50$	Classe C $\delta < 50$
Pondération wi			
1,50	X		

6.3.4. Régularité en plan

Note élémentaire Ki	Classe A Forme régulière	Classe B Forme partiellement régulière	Classe C Forme irrégulière
Pondération wi			
1,50		X	

6.3.5. Régularité en élévation

Note élémentaire Ki	Classe A Forme régulière	Classe B Forme partiellement régulière	Classe C Forme irrégulière
Pondération wi			
1,50			X

6.3.6. Type de sol

Note élémentaire Ki	Classe A Sol rocheux (S1)	Classe B Sol ferme (S2)	Classe C Sol meuble et très meuble (S3 et S4)
Pondération wi			
1,00			X

6.3.7. Implantation du réservoir

Note élémentaire Ki	Classe A Qualité du site d'implantation est bonne	Classe B Qualité du site d'implantation est moyenne	Classe C Qualité du site d'implantation est mauvaise
Pondération wi			
1,00			X

6.3.8. Zone sismique

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A Zone (0 et I)	Classe B Zone (IIa et IIb)	Classe C Zone (III)
1,00			X

6.3.9. Qualité des nœuds

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A Qualité des nœuds est bonne	Classe B Qualité des nœuds est moyenne	Classe C Qualité des nœuds est mauvaise
0,75	X		

6.3.10. Qualité du système de contreventement

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A $27MPa \leq f_{c28} < 30MPa$	Classe B $25MPa \leq f_{c28} < 27MPa$	Classe C $f_{c28} < 25MPa$
0,75		X	

6.3.11. Maintenance

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A $0 < IF < 0,5$ Ou $0,5 < IF < 1$	Classe B $1 < IF < 2$ Ou $2 < IF < 5$	Classe C $5 < IF < 10$ Ou $IF > 10$
0,50		X	

6.3.12. Détails

Note élémentaire K_i Pondération w_i	Classe A les éléments non structuraux sont en bonne état	Classe B l'état des éléments non structuraux est moyen	Classe C l'état des éléments non structuraux est moyen
0,25	X		

Les réservoirs à ossatures en béton armé sont aujourd'hui très répandus à travers le parc Algérien. Etant donné que ces structures s'élèvent à des hauteurs bien plus élevées que les bâtiments pour pouvoir assurer des pressions convenables dans les réseaux d'eau potables, et compte tenu de l'effet hydrodynamique lorsque les cuves des réservoirs sont entièrement ou partiellement remplies, leur défaillance peut conduire à des dégâts catastrophiques.

Dans ce papier, le concept de vulnérabilité sismique est utilisé afin de prédire le niveau moyen des dégâts pouvant survenir à l'échelle d'un réservoir surélevé sous l'action d'une secousse sismique d'une intensité connue.

Nous proposons, à travers notre article, une méthode simple et pratique permettant à un professionnel du génie civil d'évaluer rapidement la présomption de vulnérabilité au séisme d'un réservoir de stockage.

L'échelle de vulnérabilité est adaptée à partir de la méthode italienne dite « Gruppo Nazionale per le Difesa dai Terremoti » (GNDT), où un recalage des coefficients de pondération ainsi que l'introduction de nouveaux paramètres sont effectués afin de mieux les coller avec le comportement au séisme de ce type de structure.

Dans cette méthode, l'échelle de vulnérabilité fait intervenir 12 paramètres. Certains paramètres caractérisent la géométrie du réservoir, d'autres sont associés à la structure porteuse telle que définie par l'ingénieur concepteur de l'ouvrage et enfin le reste des paramètres est lié au lieu d'implantation de l'ouvrage.

La vulnérabilité telle qu'elle résulte de cette échelle est une notion abstraite qui renseigne sur les dégâts potentiels pouvant se produire suite à un séisme d'intensité connue.

A partir de cet indice, nous proposons une échelle de classification des réservoirs en quatre niveaux de comportement, auxquels sont associés différentes couleurs. Le premier niveau regroupe les réservoirs ayant un bon comportement (couleur verte), le second comprend les réservoirs ayant un comportement moyen (couleur orange 1 et orange 2) et le troisième concerne les réservoirs ayant un mauvais comportement (couleur rouge).

Keywords: *Seismic risk, storage tank, vulnerability index, GNDT method.*