

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GÉNIE CIVIL
N° :



DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIES
FILIERE : GÉNIE CIVIL
OPTION : STRUCTURE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

THEME

**Contribution à l'analyse dynamique des
barrages-poids en béton compte tenu de
l'interaction fluide structure**

Dirigé par :
Mr. ouzandja djamel

Présenté par :
OULD MOUSSA MOHAMED

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciements

Je remercie avant tout notre seigneur le tout puissant, le miséricordieux de m' avoir donné la capacité, la volonté et la force afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Je remercie les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements à mon Encadreur Mr. ouzandja djamel

Votre compétence, votre encadrement ont toujours suscité mon profond respect. Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils. Veuillez trouver ici, l'expression de mes gratitude et de ma grande estime.

Je tiens à remercier tous les employés de l'Université de Mohamed Boudiaf de M'sila.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis l'école primaire jusqu'aux études universitaires.

Comme je tiens à remercier tous ceux qui de loin ou de près ont contribué à finaliser ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire :

À Ma tendre Mère Fatimetou ment mohamed lkorie : Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as montré que tu es l'exemple palpable d'une mère qui puisse faire tout pour que ces enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

À Mon très cher Père Moussa Beidal : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous.

À mes frères et mes sœurs.

*À ma très chère sœur Maryem Moussa
En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Malgré la distance, vous êtes toujours dans mon cœur.*

À tous les membres de ma famille, petites et grandes.

À mes chères ami (e)s.

À mes chers collègues.

À tous ceux et toutes celles qui m'ont accompagnés et soutenus durant toutes années de formation.

Résumé:

La prévision de la réponse dynamique d'un barrage-poids en béton constitue un défi important. Ceci dépend de son interaction avec le réservoir d'eau. L'objectif de ce travail est de présenter la réponse dynamique des barrages-poids en béton compte tenu de l'interaction fluide-structure. Le barrage-poids de Oued Fodda, situé dans la Wilaya de Chlef au Nord-Ouest de l'Algérie est investigué dans la présente étude. Un modèle à deux dimensions en utilisant le Code ANSYS est créé pour modéliser le corps du barrage et le réservoir d'eau. Les analyses dynamiques du système barrage-réservoir montrent que la pression hydrodynamique du réservoir augmente les déplacements et les contraintes dans le corps du barrage.

Mots clés: Barrages-poids en béton, interaction fluide-structure, réponse dynamique, méthode des éléments finis, ANSYS

Abstract:

Predicting the dynamic response of a concrete weir is an important challenge. This depends on its interaction with the water tank. The aim of this work is to present the dynamic response of concrete dams to the fluid-structure interaction. The Oued Fodda dam, located in the Wilaya of Chlef in the northwest of Algeria, is investigated in this study. A two-dimensional model using the ANSYS Code is created to model the body of the dam and the water tank. Dynamic analyzes of the dam-reservoir system show that the hydrodynamic pressure of the reservoir increases displacements and stresses in the dam body.

Keywords: Concrete Dams, fluid-structure interaction, dynamic response, finite element method, ANSYS

ملخص:

التنبؤ بالاستجابة الديناميكية لسد خطورة ملموسة تمثل تحديا كبيرا. هذا يعتمد على تفاعلها مع خزان المياه. والهدف من هذا العمل هو تقديم الاستجابة الديناميكية لسدود نظرا للخطورة الملموسة للتفاعل السائل-هيكل. ويجري التحقيق في هذه الدراسة على سد وادي الفضة الواقعة في ولاية الشلف شمال غرب الجزائر. يتم إنشاء نموذج ثنائي الأبعاد لتصميم نظام السد وخزان المياه باستخدام ANSYS برنامج التحليل الديناميكي للنظام سد المكنم تبين أن الضغط الهيدروديناميكية لنظام سد خزان يزيد من التشرير وتشدد في الجسم السد

الكلمات المفاتيح:

السدود الجاذبية مصنوعة من الخرسانة المسلحة، تفاعل السائل هيكل، الاستجابة الديناميكية، طريقة العناصر المحدودة. ANSYS

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les barrages	
I.1 INTRODUCTION :.....	3
I.2 DÉFINITION :.....	3
I.3 LES DIFFÉRENTS TYPES DE BARRAGES :.....	3
I.3.1 Barrages en béton :.....	3
I.3.2 Barrages en remblais.....	5
I.3.3 Barrages mobiles.....	6
I.4 CLASSIFICATION DES BARRAGES.....	6
I.4.1 Les matériaux de construction.....	6
I.4.2 La façon à résister à la poussée de l'eau.....	6
I.5 CHOIX DU SITE DU BARRAGE :.....	7
I.6 CHOIX DU TYPE DE BARRAGE EN BÉTON :.....	7
I.6.1 Barrage poids :.....	7
I.6.2 Barrage voûte.....	8
I.6.3 Barrage à contreforts ou multi-voûtes.....	8
I.6.4 Barrage en BCR.....	9
I.7 AVANTAGES ET PARTICULARITÉS EN BÉTON :.....	10
I.7.1 Barrages poids :.....	10
I.7.2 Barrages à contrefort :.....	10
I.7.3 Barrages voûtes.....	11
I.8 ANALYSE DE LA STABILITÉ D'UN BARRAGE POIDS.....	11
I.8.1 Actions agissants sur les barrages poids.....	11
I.8.2 Manifestations des actions.....	12
I.8.2.1 Le poids propre P_0	12
I.8.2.2 Poussée des sédiments déposés au pied amont Q_2	13
I.8.2.3 Poussée hydrostatique amont Q_1	13
I.8.2.4 Poussée hydrostatique aval Q_3	14
I.8.2.5 Sous pressions P_1	14
I.8.2.6 Poussée de glaces.....	16

I.8.2.7 Actions accidentelles	16
I.8.3 Amélioration de la sécurité du barrage	17
I.9 CONCLUSION.....	17

CHAPITRE II : Méthode d'interaction fluide-structure

II.1 INTRODUCTION.....	18
II.2 DIFFÉRENTES MÉTHODES D'INTERACTION FLUIDE-STRUCTURE.....	19
II.2.1 La méthode de masse ajoutée	19
II.2.1.1 Effet d'inertie	20
II.2.1.2 Effet de compressibilité	21
II.2.1.3 Effet de viscosité	21
II.2.2 Détermination de la masse d'eau entraînée	22
II.3 SOLUTION DE WESTERGAARD.....	23
II.4 COUPLAGE FLUIDE-STRUCTURE À L'AIDE DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS.....	24
II.4.1 SYSTÈME COUPLÉ FLUIDE-STRUCTURE	24
II.4.1.1 Équation du mouvement	25
II.4.1.2 Modèle de l'analyse directe dans le domaine temporel	31
II.4.1.3 Modèle de l'analyse transitoire dans le domaine temps du système barrage-réservoir en introduisant l'effet du bas de réservoir	33
II.5 CONCLUSION.....	36

CHAPITRE III : Présentation du code de calcul ANSYS

III.1 INTRODUCTION.....	37
III.2 GÉNÉRALITES.....	37
III.3 TYPE D'ANALYSE.....	38
III.4 DÉMARCHE UTILISÉE POUR LA CRÉATION D'UN MODÈLE ANSYS.....	40
III.4.1 A partir de l'icône préférence	40
III.4.2 A partir de l'icône préprocesseur	40
III.4.3 A partir de l'icône solution	42
III.4.4 A partir de l'icône General Post proc.....	43
III.4.5 Barre de commande ANSYS	44
III.5 CONCLUSION.....	44

CHAPITRE IV : Application numérique

IV.1 INTRODUCTION.....	45
IV.2 PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE.....	45
IV.3 PROFIL TYPE DU BARRAGE.....	46
IV.4 MODÉLISATION DU SYSTÈME BARRAGE-RÉSERVOIRE PAR ÉLÉMENTS FINIS....	47
IV.5 ANALYSE DYNAMIQUE.....	48
IV.5.1 Analyse modale.....	48
IV.5.2 Analyse transitoire.....	51
IV.5.2.1 Variation des déplacements.....	51
IV.5.2.2 Variation des contraintes.....	53
IV.6 CONCLUSION.....	56
CONCLUSIO GÉNÉRALE.....	57

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Propriétés des matériaux du barrage-poids de l'Oued Fodda.....	47
Tableau IV.2 : Cinq premières fréquences naturelles du système couplé barrage-réservoir	48

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Classification de barrage en béton	4
Figure I.2 : Schéma simplifié des barrages en béton.....	4
Figure I.3 : Classification de barrage en remblai	5
Figure I.4 : Schéma simplifié des barrages en remblai	5
Figure I.5 : Barrage de Chatou-France	6
Figure I.6 : Le barrage-poids de Pine Flat	7
Figure I.7 : Barrage de Sainte Croix.....	8
Figure I.8 barrage de d'Albertville -contrefort	9
Figure I.9 barrage de la Girotte-multi-voûtes	9
Figure I.10 : barrage de Koudiat Bouira-Algérie	9
Figure I.11 : barrage de Tabellout Jijel-Algérie.....	9
Figure I.12 : les différentes actions agissantes sur barrage poids	11
Figure I.13 : Action du poids propre du barrage	12
Figure I.14 : Action des sédiments sur le barrage	13
Figure I.15 : Action de la poussée hydrostatique	14
Figure I.16 : Action de la poussée hydrostatique aval Q_3	14
Figure I.17 : Diagrammes indicatifs des sous-pressions en fonction de l'injection et de drainage ..	15
Figure I.18 : Diagramme de la répartition des sous-pressions.....	16

CHAPITRE II

Figure II.1 : Barrage-réservoir	18
Figure II.2 : IFS méthode de masse ajoutée WESTERGAARD	19
Figure II.3 : Pression hydrodynamique sur la face amont du barrage	21
Figure II.4 : Modélisation géométrique d'un barrage-poids.....	22
Figure II.5 : Géométrie du réservoir - notations des bords.....	25
Figure II.6 : Fluctuations de surface libre	28
Figure II.7 : Conditions aux limites sur le fond	30
Figure II.8 : Présentation du système barrage-réservoir	31
Figure II.9 : Le système barrage-réservoir	33

CHAPITRE III

Figure III.1 : fenêtre de choix des domaines d'études	38
Figure III.2 : fenêtre de choix des types d'analyses.....	40
Figure III.3 : Fonction de l'icône préprocesseur	41
Figure III.4 : Fonction de l'icône solution	42
Figure III.5 : Fonction de l'icône général postproc	43
Figure III.6 : Fonction de l'icône TimeHist postpro.....	43
Figure III.7 : Fonction de la barre de commande ANSYS.....	44

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Situation géographique du barrage de l'Oued Fodda	46
Figure IV.2 : Profil type du barrage de l'Oued Fodda	46
Figure IV.3 : Discrétisation par éléments finis du système barrage-réservoir.....	47
Figure IV.4 : Premier mode de vibration et la répartition des déplacements	48
Figure IV.5 : Deuxième mode de vibration et la répartition des déplacements.....	49
Figure IV.6 : Troisième mode de vibration et la répartition des déplacements.....	49
Figure IV.7 : Quatrième mode de vibration et la répartition des déplacements	50
Figure IV.8 : Cinquième mode de vibration et la répartition des déplacements.....	50
Figure IV.9 : Enregistrements du séisme de Boumerdes (2003)	51
Figure IV.10 : Variation des déplacements horizontaux à la crête du barrage	50
Figure IV.11 : Contours de déplacement (m) dans la direction horizontale du système barrage-réservoir	50
Figure IV.12 : Variation des contraintes de traction en fonction du temps au pied du barrage	53
Figure IV.13 : Variation des contraintes de traction en fonction du tem à la crête du barrage	53
Figure IV.14 : Variation des contraintes de compression en fonction du temps au pied du barrage	54
Figure IV.15 : Variation des contraintes de compression en fonction du temps à la crête du barrage	54
Figure IV.16 : Contours des contraintes principales de traction du système barrage-réservoir	55
Figure IV.17 : Contours des contraintes principales de compression du système barrage-réservoir.....	55

Abréviations et notations

BCR : Béton compacté au rouleau.
 BCV : Béton conventionnel vibré.
 CRN : Côte retenue normale.
 CVM : Côte volume mort.
 PHE : Plus hautes eaux.
 RN : Retenue normale.
 φ : Angle de frottement interne des sédiments.
 P : Est la pression en Pa (Pascal).
 g : Est l'accélération de la pesanteur.
 h : La hauteur d'eau au-dessus du point considéré.
 H : Niveau d'eau du réservoir.
 Z : Côté dans la partie immergée de la face amont.
 γ_w : Le poids volumique.
 ρ_b : Masse volumique de béton.
 ρ_e : Masse volumique de l'eau.
 ρ_s : Masse volumique des sédiments.
 K_0 : Coefficient de la poussée des sédiments.
 P_0 : Force due au poids propre du barrage.
 P_1 : Force due aux sous pressions.
 Q_1 : Force de la charge d'eau en amont.
 Q_2 : Force de la charge des sédiments.
 Q_3 : Force de la charge d'eau en aval.
 n : Coefficient de Poisson.
 \ddot{u}_g : Accélération du sol.
 k : Module de compressibilité de l'eau.
 T : Période du mouvement de l'écran, supposé harmonique.
 T_0 : Période propre du réservoir.
 [M] : Matrices de masse, amortissement et raideur.
 [C] : Matrices d'amortissement.
 [K] : Matrices de raideur.
 Γ_F : Surface délimitant le fond du réservoir.
 Γ_I : Surface d'interaction fluide structure.
 Γ_R : Surface de troncature du réservoir.
 Γ_S : Surface libre de réservoir.
 σ_v : Contrainte normale à l'amont.
 Ω : Domaine fluide.
 ∇ : Opérateur gradient.
 g : Accélération de la pesanteur.
 C : Célérité des ondes sonores dans l'eau.
 H_B : Hauteur de barrage.
 L_B : Largeur de la base du barrage.
 H_C : Hauteur en crête.
 L_C : Largeur en crête.
 H_F : Hauteur de la retenue d'eau.
 L_F : Longueur de la retenue d'eau.
 $\{u\}$: Déplacement total de la structure.
 $\{u_i\}$: Déplacement au nœud de la structure.
 $\{u_f\}$: Le déplacement au nœud de la fondation.

$d\sigma_{ij}$: Tenseur de comportement tangent.

$[\bar{K}]$: Matrice de rigidité tangente.

r : Vecteur de couplage dynamique.

I : Matrice identité.

Δ : Tenseur de déformation.

φ : Angle de frottement.

ψ : Angle de dilatance.

δ : Facteur de dilatance.

α_R, β_R : Coefficients de Rayleigh.

τ : Contrainte tangentiel dans une direction.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les barrages représentent des systèmes constructifs complexes à caractères économique et stratégique importants. Leur rupture, sous l'effet des séismes, est en général accompagnée par des conséquences dramatiques sur le double plan, humain et matériel. En conséquence, il est nécessaire d'étudier de manière précise le comportement dynamique des barrages en vue de l'évaluation de leur performance et de leur sécurité sous l'action des séismes. Les modèles numériques développés doivent conduire à une évaluation fiable et efficiente des déformations et des contraintes dynamiques induites dans les corps des barrages, compte tenu des interactions sismiques fluide-structure.

Les problèmes d'interaction fluide-structure peuvent intervenir dans divers domaines des sciences de l'Ingénieur. En particulier, l'importance du phénomène d'interaction fluide-structure sur le comportement dynamique des barrages poids en béton sous actions sismiques constitue un domaine actif de recherche. La prédiction des mouvements couplés du système barrage-réservoir ainsi que l'évaluation des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur le parement amont du barrage est une tâche particulièrement complexe.

Les modèles numériques développés doivent conduire à une évaluation fiable et efficiente des déformations et des contraintes dynamiques induites dans les corps des barrages, compte tenu de l'interaction sismique fluide-structure.

Le travail présent dans ce mémoire a pour objet d'étudier la réponse dynamique des barrages poids en béton compte tenu de l'interaction fluide-structure. L'effet de la pression hydrodynamique du réservoir d'eau est basé sur l'approche Westergaard avec une formule simple comme masses ajoutées. Pour cela on a pris une modélisation du barrage-réservoir. La modélisation a été faite en 2-D par le logiciel ANSYS, le logiciel est basé sur la méthode des éléments finis. Différents types d'analyse ont été menés sur le barrage on citera ; l'analyse statique, analyse modale et analyse dynamique.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on commence tout d'abord par une définition de tous les types de barrage et on s'attardera sur les barrages en béton.

Le deuxième chapitre présente les différentes méthodes d'interaction fluide-structure.

Le troisième chapitre définira le code ANSYS avec ses multiples fonctionnalités, la méthode à suivre pour la création d'un modèle ANSYS.

Dans le dernier chapitre des simulations ont été réalisées sur le système barrage-réservoir (barrage poids d'Oued Fodda) par le code de calcul ANSYS, les différents résultats obtenus ont été ensuite interprétés.

La thèse est clôturée par une conclusion générale qui retrace les grandes lignes du travail effectué et souligne les différents résultats obtenus tant du point de vue formulation et modélisation que du point de vue comportement dynamique des systèmes couplés barrage-réservoir.

Chapitre I

Généralités sur les barrages

I.1 INTRODUCTION

Un barrage est un ouvrage artificiel disposé en travers d'un cours d'eau pour arrêter son écoulement, créer une retenue ou élever le niveau de l'eau en amont.

Plusieurs objectifs conduisent à la construction d'un barrage :

Concentrer la pente naturelle d'une rivière dans un site donné, rendant ainsi possible la production d'électricité à partir de l'énergie potentielle de l'eau (énergie hydroélectrique), stocker, puis amener l'eau des rivières vers des canaux et des systèmes d'irrigation, augmenter la profondeur des rivières pour la navigation, contrôler le débit de l'eau pendant les périodes de sécheresse et de crue, créer des lacs artificiels destinés aux loisirs. De nombreux barrages cumulent plusieurs de ces fonctions. La conception d'un barrage doit tenir compte des caractéristiques hydrologiques, topographiques et géologiques du milieu où il sera construit. On doit, par exemple, considérer les apports moyens en eau et leurs fluctuations saisonnières, les caractéristiques topographiques concernent essentiellement l'adaptation du barrage au relief, on doit également tenir compte des risques de séisme : des analyses rigoureuses sont effectuées sur les fondations naturelles et la cuvette à remplir, qui doivent être étanches et avoir la résistance nécessaire pour supporter le poids du barrage, ainsi que celui de l'eau. Tout défaut d'étanchéité, à l'intérieur ou sous un barrage, doit être prévenu afin d'éviter des pertes d'eau, mais surtout pour empêcher l'affouillement (érosion) de la structure elle-même. Les géologues mesurent également la profondeur à laquelle se trouve le sol rocheux de fondation, sous la couche alluviale. La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site déterminant le type de barrage.

I.2 DÉFINITION

Un barrage est un ouvrage hydraulique construit à travers un cours d'eau, pour retenir l'eau. De cette façon, l'homme constitue un grand réservoir d'eau, qu'il utilise pour :

- Contrôler le débit d'un fleuve ou d'une rivière et ainsi rendre le cours d'eau navigable (en diminuant la pente naturelle),
- Irriguer les cultures,
- Alimenter la zone en eau potable,
- Lutter contre les incendies,
- L'élevage des poissons artificiels ou réservoir,
- Maîtriser les crues pour prévenir les catastrophes naturelles (inondations),
- Créer de l'électricité (on appelle un tel barrage un barrage hydroélectrique),
- L'utilisation touristique et sportive.

I.3 LES DIFFÉRENTS TYPES DE BARRAGES

Chaque structure et matériau de construction définit le type de barrage. On distingue :

I.3.1 Barrages en béton

- Barrages-poids,
- Barrages-voûtes,
- Barrages à contreforts.

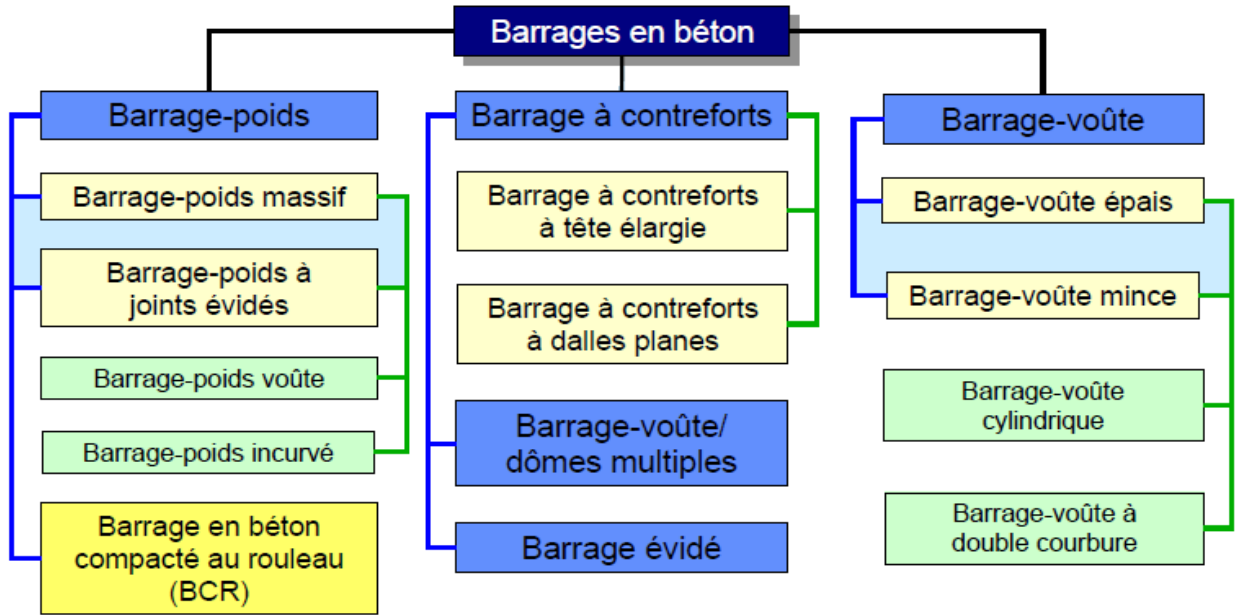


Figure I.1 : Classification de barrage en béton

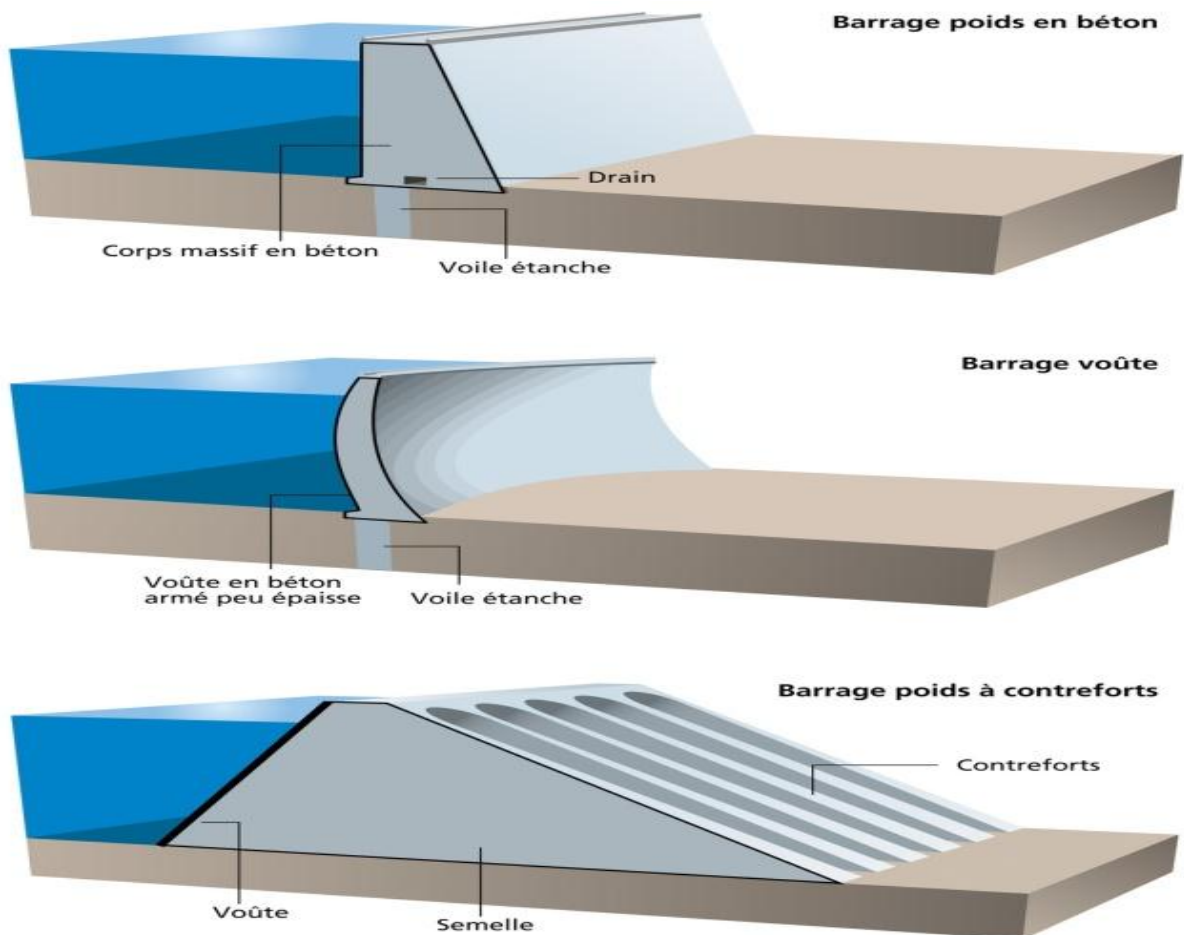


Figure I.2 : Schéma simplifié des barrages en béton

I.3.2 Barrages en remblais

- Barrages en terre,
- Barrages en enrochement.

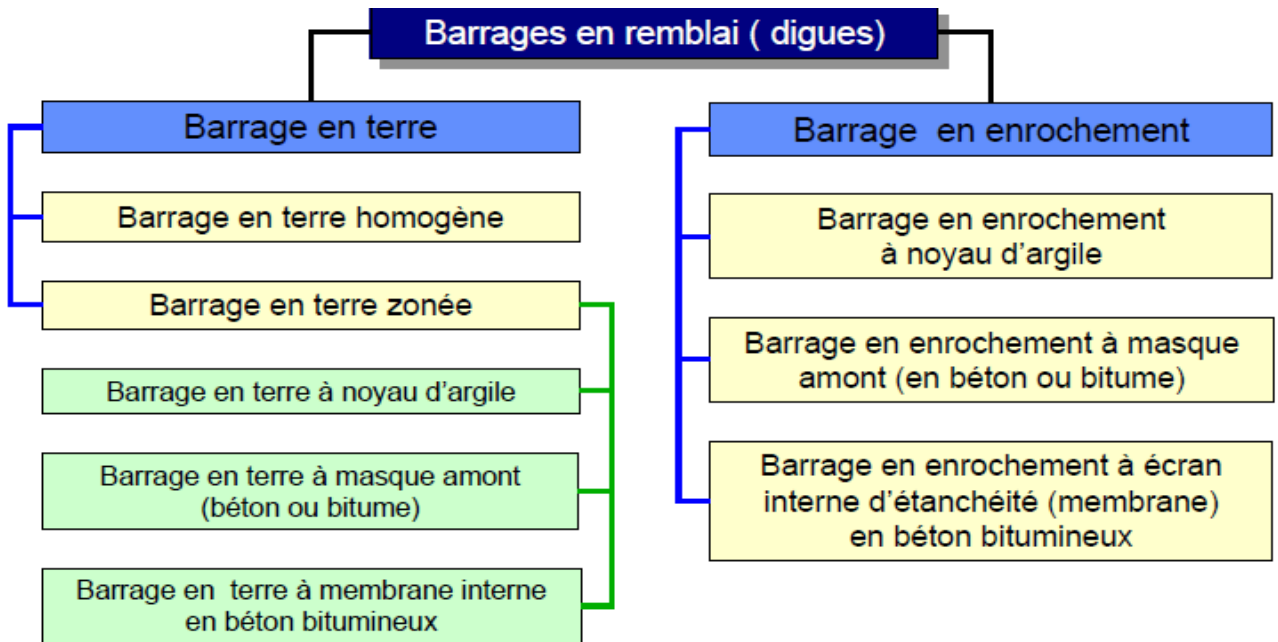


Figure I.3 : Classification de barrage en remblai

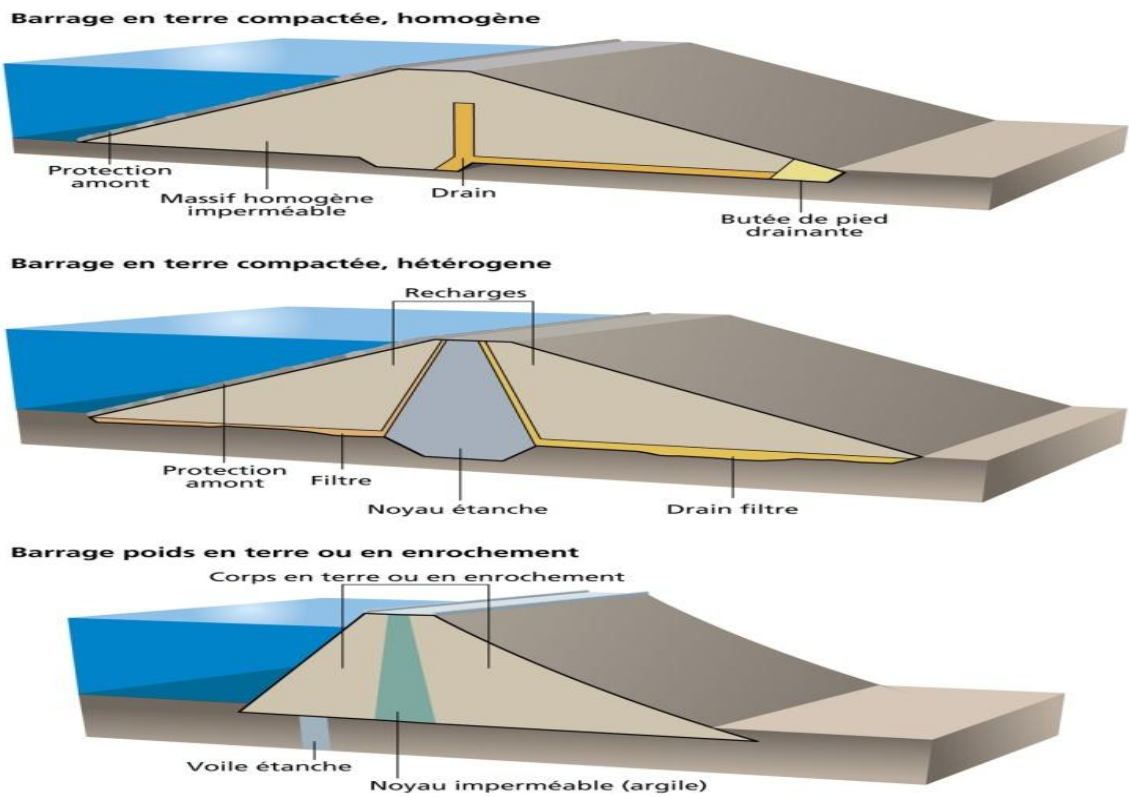


Figure I.4: Schéma simplifié des barrages en remblai

I.3.3 Barrages mobiles

Ont une hauteur limitée, ils sont généralement édifiié en aval du cours des rivières, de préférence à l'endroit où la pente est la plus faible. On utilise généralement ce type de barrage dans l'aménagement des estuaires et des deltas pour rendre les rivières navigables en les canalisant.



Figure I.5 : Barrage de Chatou-France

I.4 CLASSIFICATION DES BARRAGES

Un barrage fluvial permet la régulation du débit d'une rivière ou d'un fleuve, l'irrigation des cultures, une prévention relative des catastrophes naturelles (crues, inondations), par la création de lacs artificiels ou de réservoirs. Un barrage autorise aussi sous certaines conditions la production de forces motrices (moulin à eau) et d'électricité (on parle alors de barrage hydro-électrique).

La classification des barrages est faite en fonction des critères suivants :

I.4.1 Les matériaux de construction

- Barrages rigides : en béton, béton compacté au rouleau (BCR), maçonneries,
- Barrages souples : en terre ou enrochement.

I.4.2 La façon à résister à la poussée de l'eau

- Barrages à stabilité de forme (barrages voutes) : sa forme arquée horizontalement et verticalement, permet de reporter la poussée de l'eau sur les flancs de la vallée. Il doit donc s'appuyer sur une fondation rocheuse résistante.
- Barrage à stabilité de poids (barrages poids) : un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple (leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangulaire).

I.5 CHOIX DU SITE DU BARRAGE

Les principaux paramètres à prendre en compte dans le choix du site et du type de barrage sont les suivants :

- La topographie et les apports du bassin versant,
- La morphologie de la vallée,
- Les conditions géologiques et géotechniques,
- Le contexte météorologique et le régime des crues,
- Sismicité de la région.

I.6 CHOIX DU TYPE DE BARRAGE EN BÉTON

Il existe quatre types principaux de barrage en béton :

I.6.1 Barrage poids

Un barrage-poids est un ouvrage massif en maçonnerie ou en béton dont la stabilité, sous l'effet de la poussée de l'eau, est assurée par le poids propre du barrage.



Figure I.6 : Le barrage-poids de Pine Flat

Le barrage-poids de Pine Flat a été édifié entre 1947 et 1954 sur la Kings River, dans le centre de la Californie (États-Unis). Long de 560 mètres pour 130 mètres de haut, il a été conçu spécialement pour contrôler les risques d'inondation, mais il sert également à la production d'énergie, à l'irrigation et à l'agrément. Il a engendré la création du lac Pine Flat qui est l'un des plus grands réservoirs de Californie.

I.6.2 Barrage voûte

Un barrage-voûte profite de sa forme arquée en plan pour reporter une part importante de l'effort de poussée de l'eau sur les flancs de la vallée. Ceux-ci reçoivent une force concentrée et donc subissent des contraintes importantes, ce qui exige un rocher de fondation excellent au plan mécanique.

Les barrages-voûtes sont, par rapport aux barrages-poids, très économes en béton. Cela représente couramment un gain de 50% de matière. La finesse de la structure impose par conséquent à la fondation des gradients hydrauliques très élevés, ce qui renforce encore la nécessité d'avoir une fondation d'excellente qualité.



Figure I.7 : Barrage de Sainte Croix

I.6.3 Barrage à contreforts ou multi-voûtes

Les barrages à contreforts sont des barrages en béton constitués des murs, généralement de forme triangulaire, construits dans la vallée parallèlement à l'axe de la rivière. Ces murs sont les contreforts.

Des bouchures entre les contreforts pour maintenir l'eau de la retenue. Ces bouchures s'appuient sur les contreforts auxquelles elles transmettent la poussée de l'eau.

Les bouchures sont très souvent inclinées vers l'aval pour que la poussée de l'eau soit orientée vers le bas de façon à améliorer la stabilité des contreforts. Dans le sens transversal, notamment vis-à-vis des effets sismiques de rive à rive, les contreforts peuvent être munis de butons.

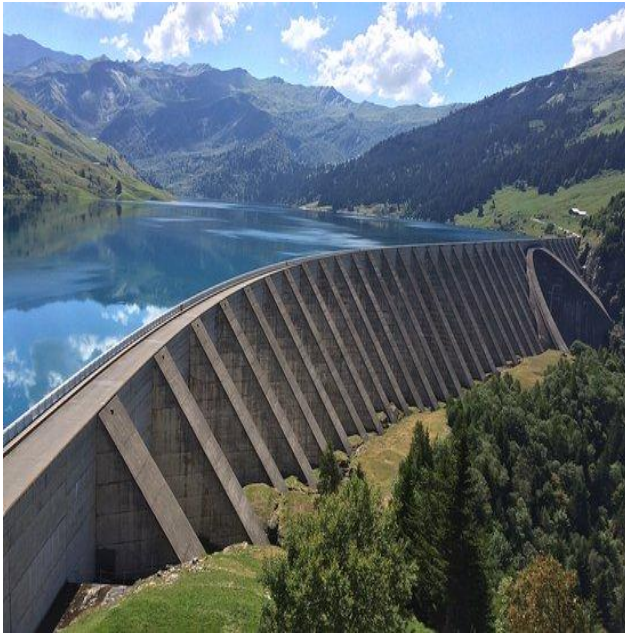


Figure I.8 barrage de d'Albertville -contrefort



Figure I.9 barrage de la Girotte- multi-voûtes

I.6.4 Barrage en BCR

Les plus récents sont en béton compacté au rouleau (BCR) : le barrage est construit par couches successives mises en place par des engins de terrassement et compactées avant de passer à la couche suivante. Les barrages sont ainsi construits très rapidement, ce qui apporte pour les chantiers un intérêt économique certain.



Figure I.10 : barrage de Koudiat Bouira-Algérie

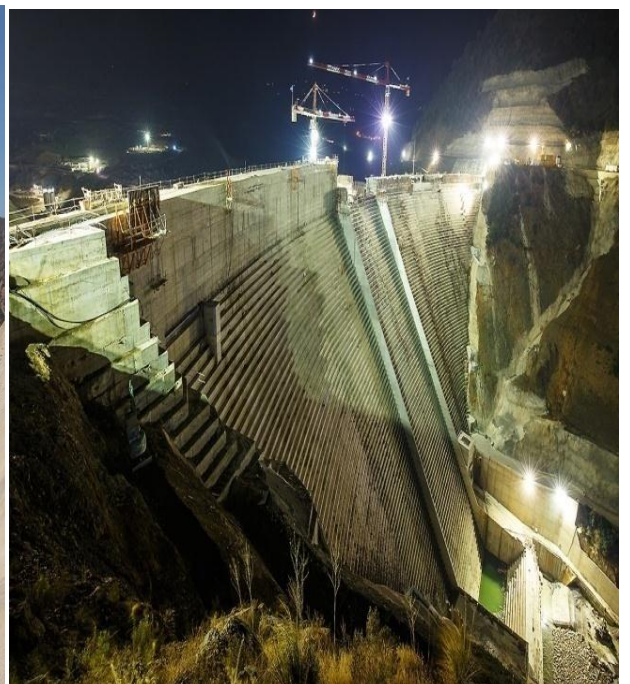


Figure I.11 : barrage de Tabellout Jijel- Algérie

I.7 AVANTAGES ET PARTICULARITÉS EN BÉTON

Ils sont dimensionnés de façon à ce que leurs charges (poids et pression hydrostatique) s'opposent l'une à l'autre. Dans ce qui suit, on dressera un bilan de comparaison permettant aux concepteurs, à priori, de faire le point sur les alternatives de choix primaire des types de barrages.

I.7.1 Barrages poids

a) Avantage :

- ✓ faibles contraintes dans le béton,
- ✓ faibles contraintes transmises aux roches,
- ✓ Les variations de température ne produisent que des contraintes faibles,
- ✓ Gradient des sous-pressions sous la fondation faible,
- ✓ Evacuateur de crues peut facilement être intégré.

b) Particularités :

- ✓ Volume d'excavation important,
- ✓ Volume de béton important,
- ✓ Refroidissement artificiel est nécessaire lors de la prise du béton,
- ✓ Sous-pressions importantes sous la fondation,
- ✓ Sensibilité aux tassements,
- ✓ Sensibilité aux séismes.

I.7.2 Barrages à contrefort

a) Avantage :

- ✓ Les contraintes transmises par la fondation au rocher sont moyennes,
- ✓ Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles,
- ✓ Le volume du béton est faible donne un échauffement faible,
- ✓ Moyens risques de tassement.

b) Inconvénients :

- ✓ Susceptibilité aux séismes est très forte,
- ✓ La résistance à l'accélération est presque non existante,
- ✓ Importantes fouilles,
- ✓ Les contraintes dues au gradient de température peuvent devenir importantes à la tête du contrefort.

I.7.3 Barrages voûtes

a) Avantage :

- ✓ Le volume du béton est faible,
- ✓ La fouille est assez petite,
- ✓ La résistance au séisme est haute,
- ✓ Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles.

b) Inconvénients :

- ✓ Les contraintes sont importantes dans le béton et dans le rocher,
- ✓ Les forces sont transmises obliquement dans les appuis,
- ✓ Le risque de tassement est moyen,
- ✓ L'échauffement du béton par la prise du ciment est considérable,
- ✓ L'intégration de l'évacuateur de crue (grand débit) est difficile,
- ✓ Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est très grand,
- ✓ Les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis.

I.8 ANALYSE DE LA STABILITÉ D'UN BARRAGE POIDS

Dans l'analyse de la stabilité d'un barrage poids, il convient de garder présent de l'esprit que la grande majorité des ruptures des barrages poids recensées dans le monde s'est produit lors des crues. Ceci est facilement compréhensible car la poussée de l'eau variant comme le carré de la hauteur d'eau, tout dépassement du niveau de la crue de projet entraîne une diminution de la stabilité de l'ouvrage, diminution qui est proportionnellement d'autant plus forte que le barrage est de faible hauteur. L'évaluation de la crue de projet et du niveau atteint par l'eau devra être faite avec une grande rigueur et on tiendra compte de l'imprécision ou des incertitudes sur l'hydrologie examinant les conséquences 'd'un dépassement significatif de la crue de projet qui aura été retenue.

I.8.1 Actions agissantes sur les barrages poids

La figure (I.12) illustre les différentes actions agissantes sur un barrage poids :

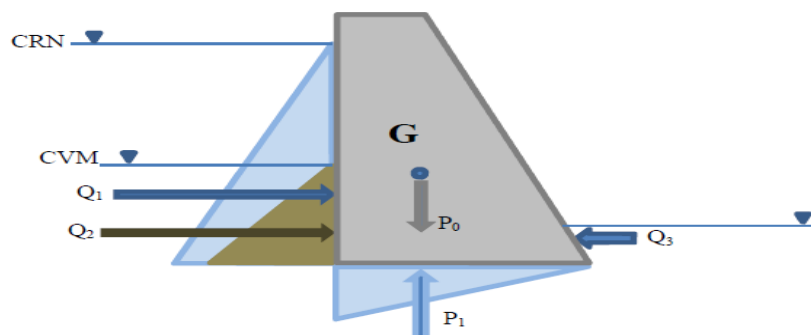


Figure I.12 : les différentes actions agissantes sur barrage poids

On peut classer ces actions en fonction de leurs types :

- **Actions permanentes :**

Elles commencent avec la réalisation du barrage et continuent durant toute la vie de ce dernier :

- Poids propre,
- Poussées des sédiments.

- **Actions variables :**

Elles sont variables en fonction des variations du niveau de la retenue :

- Poussées de l'eau et des matières en suspensions,
- Poussées des glaces.

- **Actions accidentelles :**

Ces actions sont relatives aux excitations sismiques :

- Les séismes.

I.8.2 Manifestations des actions

I.8.2.1 Le poids propre P_0

La densité d'un BCV (béton conventionnel vibré) de barrages poids est généralement de l'ordre de 2,4. D'autres valeurs plus élevées ou moins élevées sont à prendre en compte lorsqu'une différence de densité des agrégats significativement de l'ordre de 2,7, on doit tenir compte de la présence des galeries selon le mode d'auscultation prévu. La densité d'un BCR est variable selon la granulométrie des agrégats et le dosage en liant ; la densité d'un BCR pauvre en fines peut descendre à 2,3. L'ensemble (granulats et liant) forme un béton (BCR ou BCV) à l'ensemble à une masse de considérable influence sur les fondations et aussi pour la réaction sur la poussée hydrostatique (figure I.13). Les barrages poids résistent d'eux-mêmes grâce à leurs dimensions et à leur masse fantastique qui peut atteindre plusieurs dizaines de millions de tonnes. Ces barrages travaillent par gravité. Ils sont dimensionnés de façon à ce que leurs charges (poids et pression hydrostatique) s'opposent l'une à l'autre.

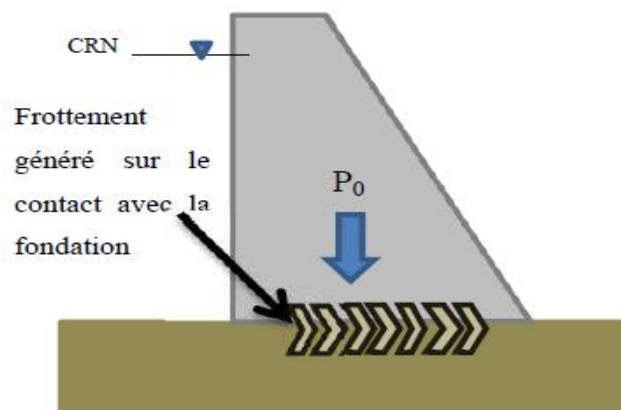


Figure I.13 : Action du poids propre du barrage

I.8.2.2 Poussée des sédiments déposés au pied amont Q_2

Les sédiments en cours de consolidation exercent une poussée est a priori légèrement inclinée sur l'horizontale (figure I.14). Le coefficient de poussée peut être pris égal à :

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (\text{formule de Jacky}) \quad (\text{I. 1})$$

Avec : φ : angle de frottement interne des sédiments.

Il convient de faire le calcul en contraintes effectives, c'est-à-dire avec la densité déjaugée pour les sédiments, car la poussée de l'eau est par ailleurs considérée sur toute la hauteur du barrage.

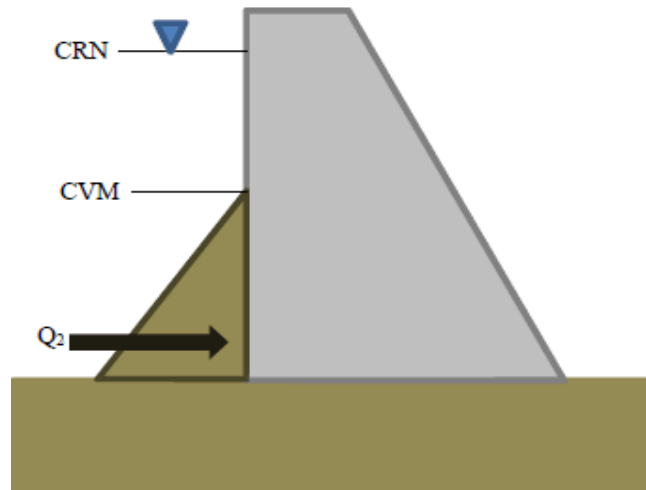


Figure I.14 : Action des sédiments sur le barrage

I.8.2.3 Poussée hydrostatique amont Q_1

Tout d'abord un barrage est soumis à des pressions, dont la plus importante est la pression hydrostatique (figure I.15). C'est une force horizontale exercée par l'eau sur sa surface immergée. On en tire l'expression de la pression suivante :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{I. 2})$$

Avec :

- P : est la pression en Pa (Pascal),
- ρ : la masse volumique de l'eau en $\text{kg} \cdot \text{M}^3$,
- g : est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m}^2/\text{s}$),
- h : la hauteur d'eau au-dessus du point considéré en m.

On constate que la pression dépend de la hauteur d'eau et non de la largeur du barrage. Etant donné que c'est la hauteur d'eau qui est responsable de la pression hydrostatique.

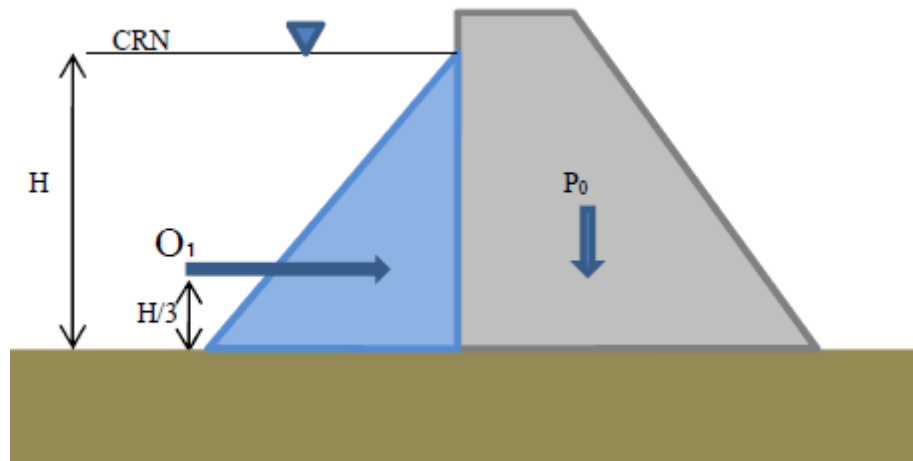


Figure I.15 : Action de la poussée hydrostatique

I.8.2.4 Poussée hydrostatique aval Q_3

Parmi les conséquences de la poussée hydrostatique, une retenue se forme à l'aval et peut être agissante sur le barrage, sa valeur Q_3 n'est pas de même importance que Q_1 mais on la prend en considération comme action agissante.

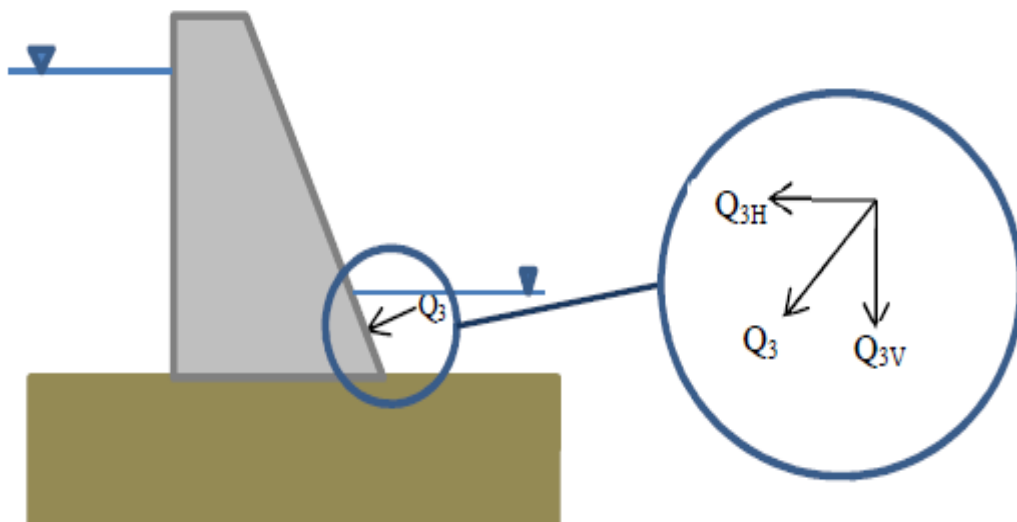


Figure I.16 : Action de la poussée hydrostatique aval Q_3

I.8.2.5 Sous pressions P_1

En l'absence de drainage, on considère habituellement un diagramme trapézoïdal avec la pleine sous-pression (U_m) du plan d'eau en pied amont et une sous-pression (U_v) égale au niveau d'eau en pied aval.

En l'absence de drainage, le diagramme des sous-pressions peut être plus favorable que le diagramme trapézoïdal (a) de la (figure I.17) si les fissures du rocher ont tendance à se refermer au pied aval. Lorsque l'étude géologique conduit à redouter cette hypothèse, des drains doivent impérativement être forés au pied aval.

En cas de drainage et dans l'hypothèse d'un entretien régulier des drains, il est recommandé de considérer que le drainage est efficace à 50%, ce qui revient à dire que les sous-pressions sont abaissées de moitié au droit du voile de drainage :

$$U_A = U_B = (U_A - U_C)/2 \quad (I.3)$$

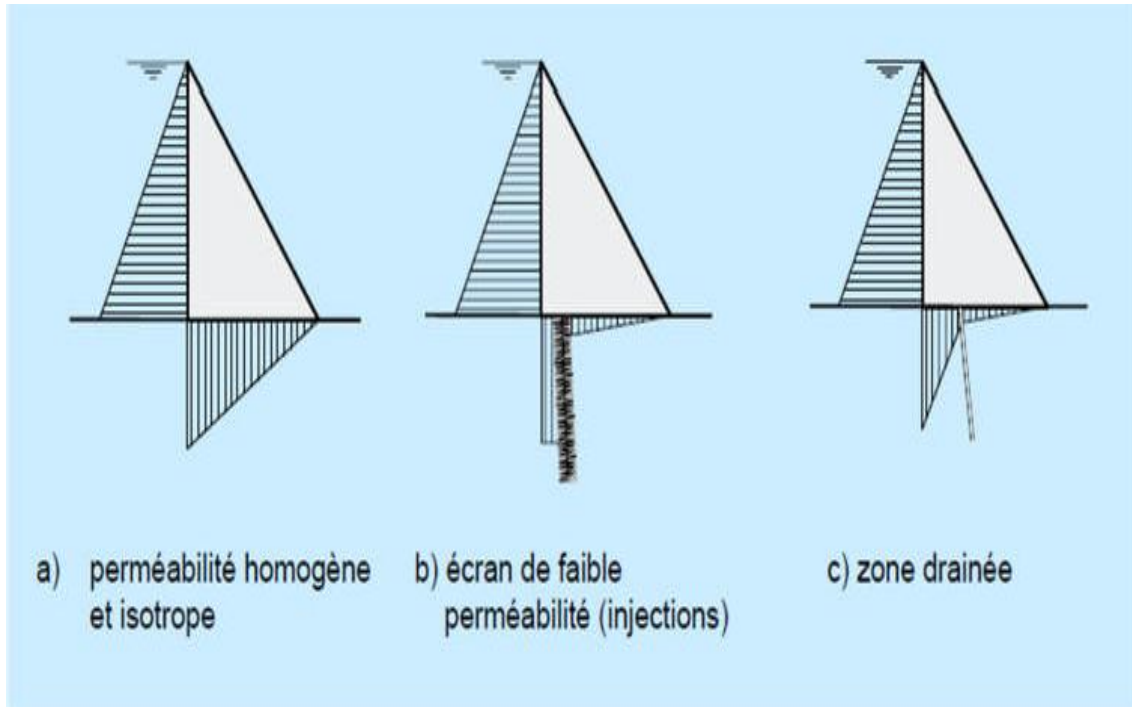


Figure I.17 : Diagrammes indicatifs des sous-pressions en fonction de l'injection et de drainage

Avec :

- a) – sans injection ni drainage,
- b) – avec voile d'injection,
- c) – avec drainage.

De même, si un voile d'injection a été réalisé en fonction près du pied amont, et pour autant que le pied amont ne soit pas soumis à des tractions, on considère que le voile a pour effet de diminuer d'un tiers la sous-pression juste à son aval (par rapport à un diagramme trapézoïdal avec la pleine sous-pression côté amont) :

$$U_A - U_B = (U_A - U_C)/3 \quad (I.4)$$

La considération des sous-pressions, élément du comportement des barrages poids du point de stabilité, diffère d'un pays à l'autre. La figure (I.18) illustre les différents cas de diagrammes considérés pour l'évaluation des sous-pressions tenant compte des voiles d'injection et de drainage.

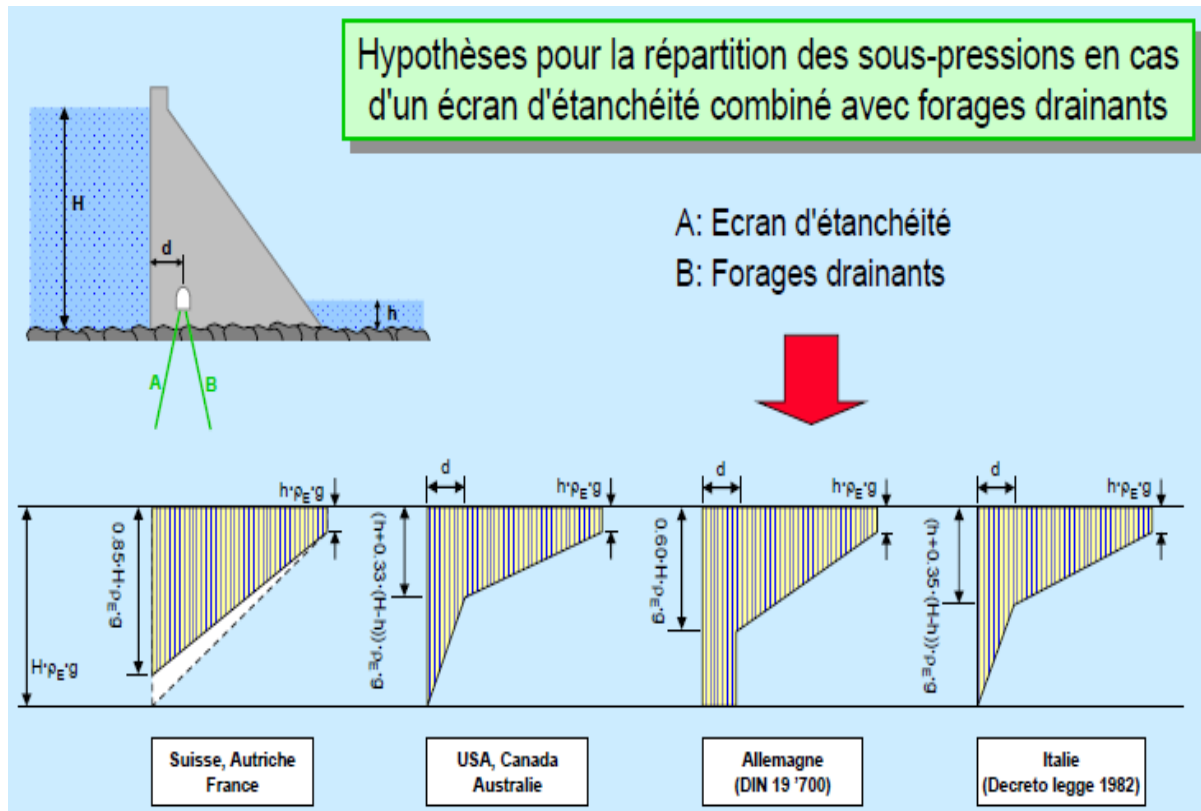


Figure I.18 : Diagramme de la répartition des sous-pressions

Le diagramme de contrainte de à la base de la fondation du barrage poids doit être obligatoirement aux limites admissibles en compression en pied aval et en traction en pied amont.

I.8.2.6 Poussée de glaces

Cette action n'est à considérer que si l'environnement climatique du barrage le justifie. Elle n'est en général pas déterminante pour la stabilité, car elle est simultanée avec la crue du projet.

I.8.2.7 Actions accidentelles

Les actions accidentelles qui peuvent déstabiliser un barrage poids sont une approximation des séismes. La valeur (α, g) est l'intensité du composante horizontale correspond au vecteur (g). La contrainte de poussée de l'eau à la profondeur Z est augmentée d'une valeur fonction de plusieurs paramètres :

$$\Delta P = 0,875 \cdot \alpha \cdot \gamma_w \cdot (H \cdot Z)^{1/2} \text{ en Kpa.} \tag{I.5}$$

Avec

- H** la hauteur du barrage (m),
- γ_w** : Le poids volumique en (KN/m^3).

Dans le cas d'un barrage déversant la poussée totale de l'eau est augmentée d'une valeur additive :

$$\Delta P = 0,58 \cdot \alpha \cdot H^2 \text{ en (Kpa).} \tag{I.6}$$

I.8.3 Amélioration de la sécurité du barrage

Si la vérification de la stabilité du barrage enregistre des insuffisances, l'amélioration de la stabilité est réalisée en :

- Augmenter les forces verticales, c'est-à-dire :
 - Réduire l'angle du parement aval,
 - Incliner le parement amont,
 - Réduire les sous pressions.
- Réduire les forces de poussée horizontales, c'est-à-dire :
 - Incliner la fondation vers l'amont.
- Augmenter la valeur de l'angle de frottement, c'est-à-dire :
 - Traitement des arrêts de bétonnage,
 - Redans coffrés,
 - Injection dans le rocher.

I.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre on peut conclure les remarques suivantes :

Les barrages poids en maçonnerie, malgré leur très bonne performance, apparaissent réservés aux contextes où la main-d'œuvre est abondante, le barrage poids en béton classique ne se justifie en général que pour les barrages comportant des ouvrages hydrauliques complexes, en particulier les barrages mobiles, le barrage poids en BCR s'impose comme une solution économique et sûre, dès que le volume de béton dépasse 35 à 40 000 m³, barrage symétrique en remblai dur à mesure est à considérer sur les sites difficiles caractérisés par une fondation rocheuse de faibles caractéristiques mécaniques, de fortes crues ou une exposition aux séismes.

L'étude de la stabilité d'un barrage poids tenir en compte non pas ses fortes dimensions et sa grande masse qu'elle peut être par fois le principal facteur stabilisateur; mais aussi l'influence du traitement des fondations qui est toujours en développement.

Les techniques du traitement des fondations des barrages poids les plus utilisées sont l'injection, les parois étanches et le drainage.

Ces nouvelles technologies ont un impact capital car elles donnent accès pendant les opérations de réhabilitation au résultat des travaux alors que sans elles, le traitement des fuites est jugé une fois les travaux terminés. Ces techniques restent onéreuses car l'exigence d'une entreprise spécialisée est impérativement.

Chapitre II

Méthode d'interaction fluide-structure

II.1 INTRODUCTION

Les problèmes d'interaction fluide-structure peuvent intervenir dans divers domaines des sciences de l'Ingénieur. En particulier, l'importance du phénomène d'interaction fluide-structure sur la réponse dynamique des barrages poids en béton compte tenu de l'interaction fluide-structure constitue un domaine actif de recherche. La prédiction des mouvements couplés du système barrage-réservoir ainsi que l'évaluation des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur le parement amont du barrage est une tâche particulièrement complexe (figure II.1).

L'interaction fluide-structure s'intéresse au comportement d'un système constitué par deux entités mécaniques considérées comme distinctes : une structure mobile (rigide ou déformable) et un fluide (en écoulement ou au repos) autour ou à l'intérieur de la structure. L'évolution de chacune des deux entités dépendant de celle de l'autre, un phénomène de couplage apparaît. Plus précisément, le mouvement de la structure est influencé par l'écoulement du fluide à travers les efforts transmis à l'interface, et réciproquement, le mouvement de la structure influence transmis à l'interface, et réciproquement, le mouvement de la structure influence l'écoulement du fluide par les déplacements de l'interface qui entraîne le fluide dans son mouvement.

En pratique, on suppose que la force fluide exercée sur une structure peut se décomposer en trois contributions :

- une force, dite aléatoire ou force indépendante du mouvement : elle désigne la force exercée par le fluide sur la structure fixe. Elle est due à la perte de charge et aux frottements visqueux au niveau de la paroi fixe. Elle peut être stationnaire ou présenter un caractère aléatoire lors de lâcher de tourbillons ou en présence d'écoulements turbulents ou diphasiques.
- une force fluide-structure : elle apparaît lorsqu'on a une structure vibrante dans un fluide au repos sans écoulement propre.
- une force fluide-élastique : cette force est due au mouvement de la structure dans un écoulement fluide.

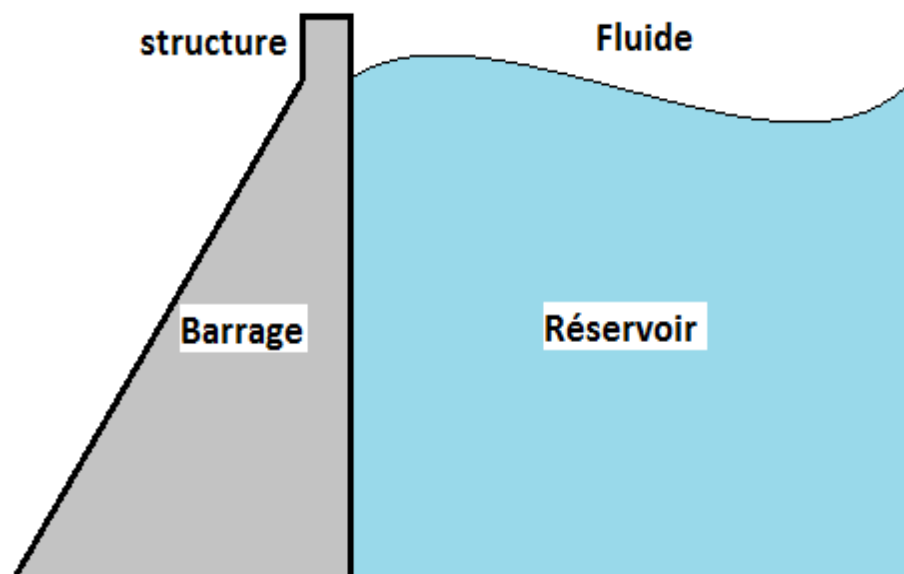


Figure II.1 : Barrage-réservoir

II.2 DIFFÉRENTES MÉTHODES D'INTERACTION FLUIDE-STRUCTURE

II.2.1 La méthode de masse ajoutée

L'interaction barrage-réservoir se produit lorsque le mouvement de l'eau sur le talus amont du barrage engendre une propagation d'ondes de pression vers la direction amont du réservoir.

L'interaction barrage-réservoir est simulée par la masse ajoutée concentrée (solution de WESTERGAARD) aux nœuds submergés de la face amont de la prise d'eau. Ces masses sont déterminées en multipliant la pression hydrodynamique évaluée au niveau d'un nœud de la face amont par la surface dépendant de ce nœud. La pression hydrodynamique $P(y)$, varie en fonction de la profondeur.

L'hypothèse de Westergaard néglige la compressibilité de l'eau et, l'amortissement supplémentaire qui devrait être introduit par la propagation d'ondes vers l'amont du réservoir.

Cette hypothèse constitue la solution de Westergaard (1933) qui est fréquemment utilisée dans l'analyse dynamique des barrages et qui reste une bonne approximation de la distribution verticale de la pression hydrodynamique dans un liquide incompressible. Cette solution est basée sur l'hypothèse d'un système bidimensionnel dans lequel un barrage rigide, à paroi amont verticale, est en avec un réservoir d'eau incompressible de profondeur constante et de longueur infinie. Bien que cette soit habituellement choisie dans la modélisation pour sa simplicité.

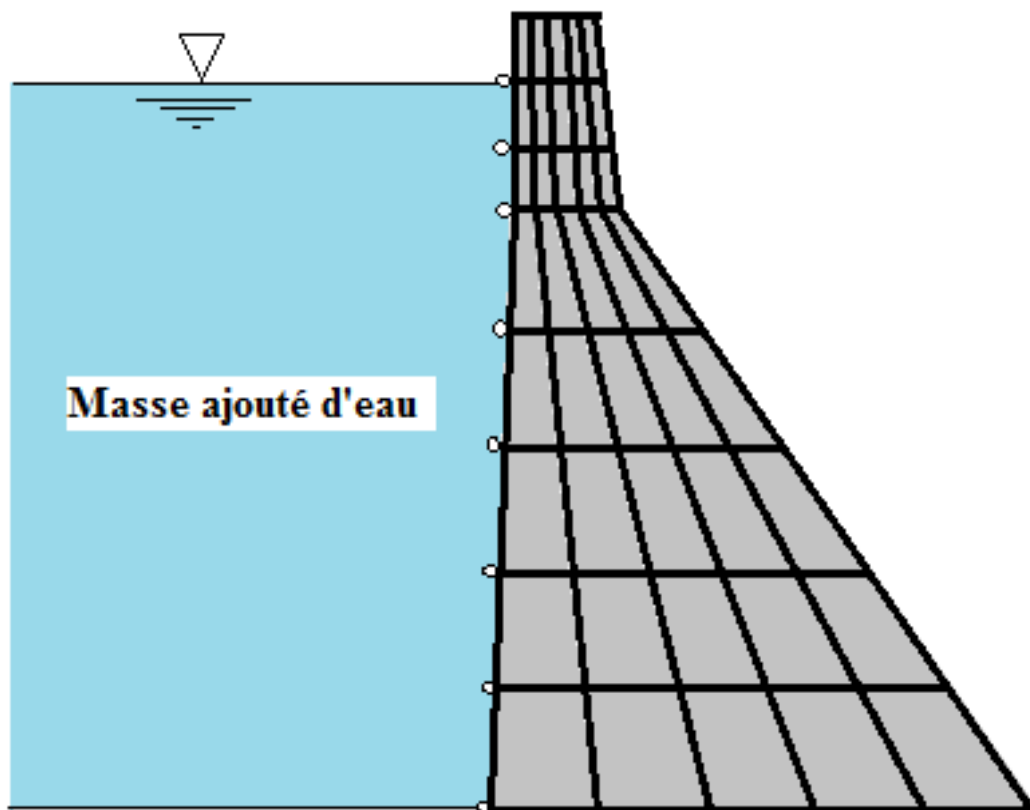


Figure II.2 : IFS méthode de masse ajoutée WESTERGAARD

Le problème de compressibilité de l'eau a été pris en considération dans une étude faite par WESTERGAARD, et d'après ces résultats, il a remarqué que pour une hauteur du parement limitée à 100 m, l'augmentation en pression n'excède pas 5%, alors la compressibilité peut être négligée.

L'effet du fluide non compressible peut être simplement pris en compte par ajout d'une masse appropriée à chaque nœud de contact barrage-fluide du parement amont, donc selon la structure, le fluide peut introduire :

- Un effet d'inertie (qui s'ajoute à l'inertie de la structure),
- Un effet de compressibilité (qui produit des modes de résonance),
- Un effet de viscosité (qui produit un facteur d'amortissement ajouté).

II.2.1.1 Effet d'inertie

Selon WESTERGAARD, l'effet du fluide sur la structure est caractérisé par l'adjonction à la matrice masse de la structure d'une matrice des masses ajoutées, pour cela, il a proposé de représenter le volume d'eau par un tronçon de parabole.

Les hypothèses sur lesquelles repose cette méthode :

- Le barrage est rigide,
- La face amont est un plan vertical,
- Le liquide est incompressible,
- Le réservoir est étendu à l'infini dans la direction amont.

Le fluide est supposé incompressible, parfait, non visqueux et les écoulements sont supposés *i* rotationnels. Dans ce cas la pression s'annule à la surface libre Westergaard a présenté à une équation approximative conservatrice pour la distribution parabolique (ou elliptique éventuellement), défini par l'expression :

$$P(y = 0) = \frac{7}{8} \rho_w H \left(1 - \frac{Z}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \ddot{U}_g \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

P : Surpression sur la face amont ($y=0$).

H : Niveau d'eau du réservoir.

Z : Coté de la partie immergée de la face amont.

ρ_w : Masse volumique du fluide.

\ddot{u}_g : Accélération du sol.

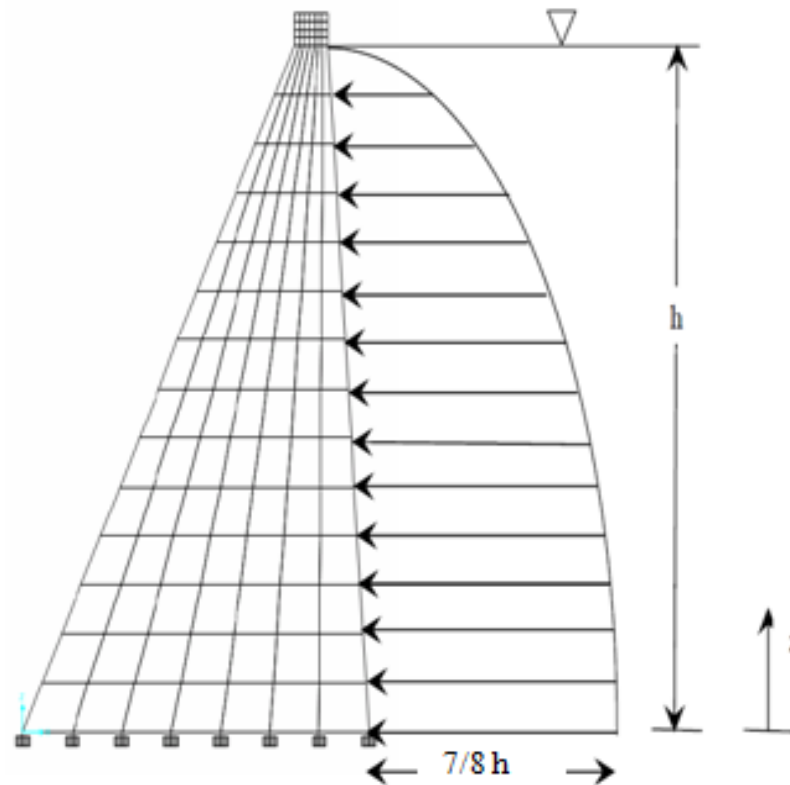


Figure II.3 : Pression hydrodynamique sur la face amont du barrage

Le même effet peut être obtenu par un bloc d'eau attaché à la face amont du barrage. Conformément à la théorie de WESTERGAARD, ce bloc doit avoir une forme parabolique avec une épaisseur à la base égale à $7/8 H$ (figure II.3).

Les masses ajoutées, aux éléments de la matrice masse du barrage, correspondant aux d.d.l de l'interface barrage-fluide, sont proportionnelles aux aires tributaires de chaque nœud de la face amont.

II.2.1.2 Effet de compressibilité

Il engendre un effet d'amortissement qui correspond à l'absorption des ondes sismiques à l'infini. Cet effet est toujours très faible par rapport aux autres effets amortisseurs rencontrés dans la structure, sauf dans le cas de grand barrage où les résultats négligeant cet effet sont sans significations.

Des études effectuées par Chopra à l'université de Californie, Berkeley, semble indiquer que la présence d'une couche de vase a pour résultat une réduction importante du phénomène de compressibilité et de réflexion, autrement dit que la vase est parfois bénéfique.

II.2.1.3 Effet de viscosité

Contrairement à l'effet d'inertie et à l'effet de compressibilité (quand il est important), l'effet de viscosité est souvent faible et ne modifie quasiment pas les fréquences de résonance et les déformées modales des structures.

II.2.2 Détermination de la masse d'eau entraînée

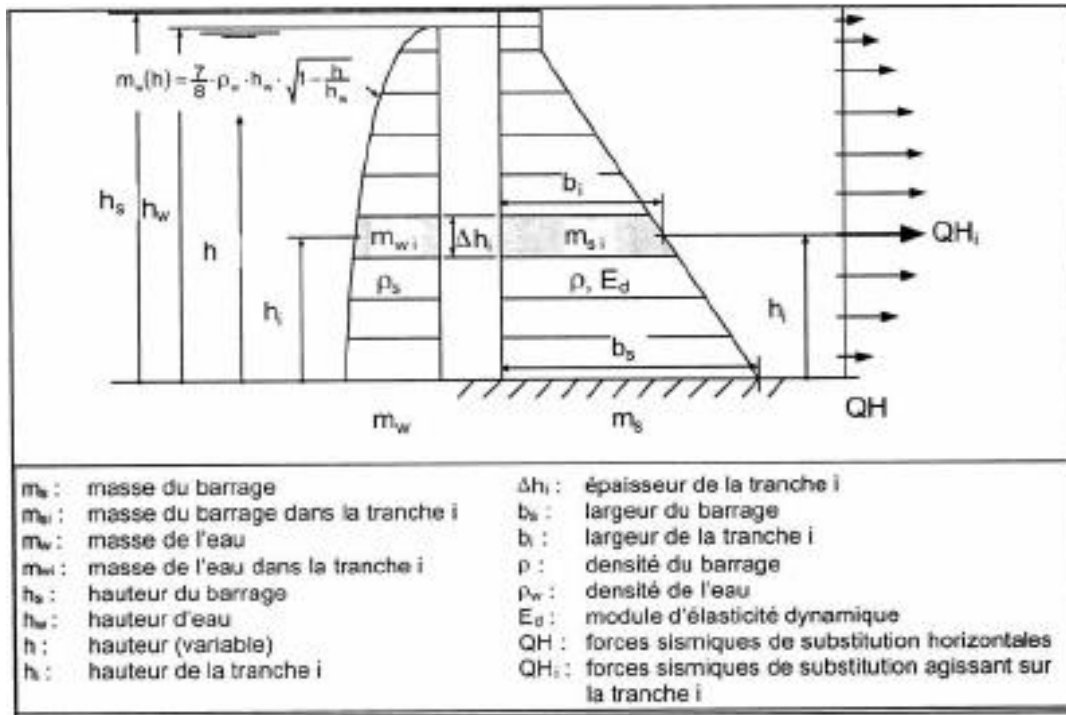


Figure II.4 : Modélisation géométrique d'un barrage-poids

La masse oscillant avec le barrage représentant l'effet hydrodynamique de l'eau sur le barrage avec un parement amont approximativement vertical se calcule en fonction de la hauteur h selon l'équation suivante de Westergaard (figure II.4) :

$$m_w(h) = \frac{7}{8} \rho_w h_w \sqrt{1 - \frac{h}{h_w}} \quad (II.2)$$

Pour des raisons pratiques, le barrage est divisé en plusieurs tranches horizontales. Le choix de cette division se fait en fonction de la forme du barrage, du niveau d'eau et de la précision souhaitée du calcul. Les différentes tranches peuvent être d'épaisseur variable. Pour la tranche i , on peut écrire :

$$m_{wi}(h) = \frac{7}{8} \rho_w h_w \sqrt{1 - \frac{h_i}{h_w}} \Delta h_i \quad (II.3)$$

Westergaard a présenté à une équation approximative conservatrice pour la distribution parabolique de force hydrostatique pour un barrage rigide :

$$P_w(h) = \frac{7}{8} \sqrt{h_w(h_w - h)} \rho_w \ddot{U}_g \quad (II.4)$$

Avec \ddot{U} : accélération de sol.

II.3 SOLUTION DE WESTERGAARD

La solution exacte donnée par WESTERGAARD est exprimée sous forme d'un développement en série de fonctions sinusoïdales :

$$C_n = \sqrt{1 - \frac{16\gamma_w H_1^2}{n^2 g k T^2}} = \left[1 - \frac{1}{n^2} \left(\frac{T_0}{T}\right)^2\right]^{1/2} \text{ et } T_0 = \frac{4H}{C} \quad (\text{II. 5})$$

$$P(Z) = \frac{8\alpha H}{\pi^2} \gamma_w \sum_{1,3,5} \frac{1}{n^2 C_n} \sin\left(\frac{n\pi}{2H} Z\right) \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

P : Pression sur l'écran.

α : Coefficient de l'intensité sismique en direction horizontale, sur le site.

γ_w : Poids volumique de l'eau.

H : Profondeur de l'eau.

k : Module de compressibilité de l'eau.

T : Période du mouvement de l'écran, supposé harmonique.

T_0 : Période propre du réservoir.

C : Célérité des ondes de compression dans l'eau ($C \cong 1440 \text{ m/s}$).

On constate que le terme correctif $1 - \frac{1}{n^2} \left(\frac{T_0}{T}\right)^2$ dû à la compressibilité de l'eau est négligeable, dès que la période propre du réservoir (T_0) est petite devant la période propre de l'écran.

Si la compressibilité de l'eau est négligeable, il est possible d'établir une expression approchée de forme parabolique ou elliptique, indépendante de la période de vibration de l'écran. On a :

- La répartition parabolique de WESTERGAARD :

$$P(Z) = \frac{7}{8} \alpha \gamma_w \sqrt{HZ} \quad (\text{II. 7})$$

- La répartition elliptique de KARMAN :

$$P(Z) = 0.707 \alpha \gamma_w \sqrt{Z(2H - Z)} \quad (\text{II. 8})$$

➤ **Remarque :**

Pour l'évaluation de la pression hydrodynamique, M.Hatanaka recommande d'introduire, dans la relation de WESTERGAARD, un coefficient d'amplification \hat{C}_0 . En cas d'un mouvement du sol de type choc ce coefficient peut atteindre sa valeur maximale estimée à 1,5. On aura :

$$P(Z) = \frac{7}{8} \hat{C}_0 \alpha \gamma_w \sqrt{HZ} \quad (\text{II. 9})$$

II.4 COUPLAGE FLUIDE-STRUCTURE À L'AIDE DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie. Elle connaît, depuis 1970 environ, une extension fantastique, qui va de pair avec le développement et l'accroissement de la puissance des micros ordinateurs. Elle est devenue un outil de travail, de calcul et de conception de l'ingénieur dans des domaines aussi variés que l'analyse des structures, le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, les écoulements souterrains, la combustion ou encore la diffusion des polluants.

Néanmoins, la nécessité de représenter des configurations géométriques quelconques du réservoir et des conditions aux frontières complexes ne se prêtant pas toujours à un traitement analytique, ainsi que le besoin de prédire les dégâts susceptibles d'être engendrés par le comportement non linéaire des barrages en zones de forte sismicité impliquent que la solution doit être déterminée dans le domaine temporel.

La méthode des éléments finis met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

- La mécanique de structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité,...etc.
- L'analyse numérique : méthodes d'approximation, résolution des systèmes linéaires,...etc.
- L'informatique appliquée : techniques de développement et de la maintenance de grands logiciels.

II.4.1 SYSTÈME COUPLÉ FLUIDE-STRUCTURE

Dans ce qui suit, une modélisation par éléments finis est utilisée aussi bien pour le barrage que pour le réservoir. La flexibilité du barrage et la compressibilité du fluide sont intégrées dans le modèle proposé (figure II.5). L'écriture du système global couplé s'obtient en regroupant les deux systèmes en un seul comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho \mathbf{Q}^T & \mathbf{M}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{Q} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{P} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_g \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (\text{II. 10})$$

Où :

ρ : Masse volumique du fluide du réservoir,

Les vecteurs \mathbf{U} et \mathbf{P} désignent respectivement les déplacements nodaux de la structure et les pressions nodales dans le réservoir.

Les matrices $\mathbf{M}_s, \mathbf{C}_s$ et \mathbf{K}_s représentent les matrices assemblées de masse, d'amortissement et de rigidité de la structure, et les matrices $\mathbf{M}_F, \mathbf{C}_F$ et \mathbf{K}_F sont leurs analogues pour le fluide.

L'amortissement global du barrage est évalué selon le concept d'amortissement de Rayleigh : $\mathbf{C}_s = \alpha \mathbf{M}_s + \beta \mathbf{K}_s$ avec α et β sont des constantes de proportionnalité fonctions du taux d'amortissement et des fréquences propres de vibration de la structure.

Le vecteur force $\mathbf{F}_s = -\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}}_g$ contient les composantes des forces d'entraînement générées par le vecteur des accélérations sismiques appliquées aux nœuds de la structure.

Les forces hydrodynamiques agissant sur la face amont du barrage sont reliées au vecteur inconnu des pressions nodales, à travers la matrice d'interaction fluide-solide Q .

La matrice globale "masse fluide" M_F inclue la compressibilité de l'eau et les effets des ondes de surface.

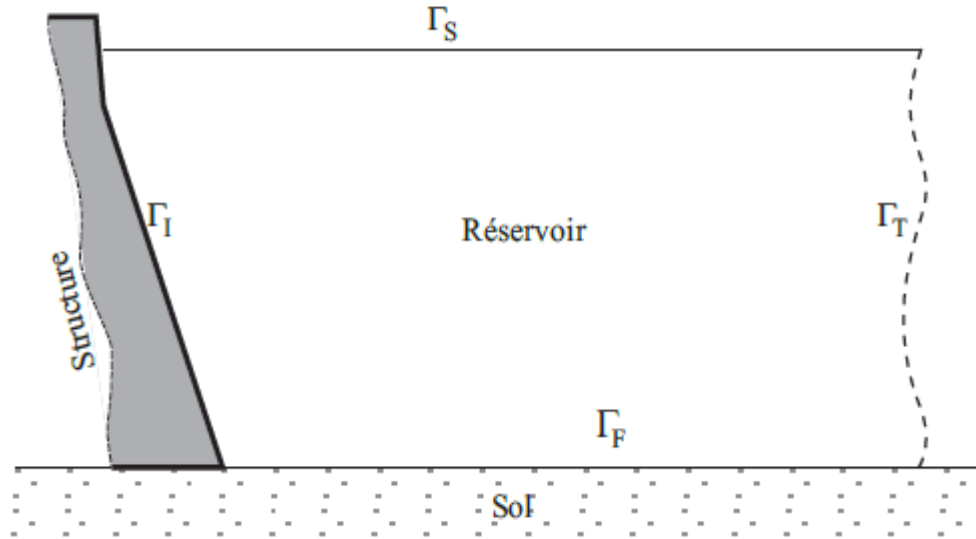


Figure II.5 : Géométrie du réservoir - notations des bords

II.4.1.1 Équation du mouvement

Le mouvement du système de barrage-réservoir est considéré comme bidimensionnel et limité à des petites amplitudes. Le fluide est assumé qu'est non visqueux et se prolonge à l'infini dans la direction ascendante. Cependant, les effets des vagues extérieures, compressibilité de l'eau, flexibilité de barrage, rayonnement atténuant à la frontière ascendante du réservoir sont négligés.

- **Formulation en pression**

Il est connu que, dans le cadre de l'interaction fluide structure dans le cas des barrages, la contribution des contraintes dues aux effets visqueux est faible comparée aux effets induits par les forces d'inertie.

Si l'on néglige les contraintes visqueuses, l'équation de la dynamique s'écrit :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p \quad (\text{II. 11})$$

Où v est la vitesse particulière et p la pression. Sous hypothèse de fluide linéairement compressible, le changement relatif de volume ($\Delta v/v$) est relié, selon la théorie de l'élasticité linéaire, à la pression appliquée p par le coefficient d'incompressibilité

$$p = -K \frac{\Delta v}{v} = -K \text{Tr}(\varepsilon) \quad (\text{II. 12})$$

Où K est le module d'incompressibilité du fluide et ε est le tenseur des déformations dont la trace est la divergence du champ des déplacements \mathbf{u}_ℓ des particules du fluide :

$$\text{Tr}(\varepsilon) = \nabla \cdot \mathbf{u}_\ell \quad (\text{II. 13})$$

Le dérivé de (II.12) par rapport au temps donne :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \nabla v \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \mathbf{u}_\ell = \nabla \frac{\partial \mathbf{u}_\ell}{\partial t}$$

La vitesse v peut maintenant être éliminée des équations en prenant la divergence de (II.11) et la dérivée par rapport au temps de (II.14)

$$\Delta p = -\rho \nabla \frac{\partial v}{\partial t} ; \quad \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -K \frac{\partial}{\partial t} \nabla v$$

Ceci donne l'équation scalaire suivante :

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II. 15})$$

Qui est l'équation de propagation d'ondes de pression. Le milieu est caractérisé par sa densité et son coefficient d'incompressibilité. Le rapport de ces deux paramètres correspond au carré de la vitesse de propagation d'onde :

$$c^2 = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Dans le cas d'un fluide incompressible, le changement de volume $\Delta v/v$ reste quasiment nul quelle que soit la pression appliquée, ce qui donne un coefficient de compressibilité infini et donc une propagation d'onde instantanée ($c = \infty$). L'équation (II.15) se réduit alors à l'équation de Laplace :

$$\Delta p = 0 \quad (\text{II. 16})$$

Bien que cette dernière équation ne décrive pas la propagation et l'atténuation des surpressions hydrodynamiques, elle constitue cependant une bonne approximation pour l'estimation des effets du réservoir sur la réponse sismique des barrages. Elle est ainsi utilisée dans beaucoup de travaux traitant les problèmes de réponse sismique avec interaction fluide – structure.

- **Condition à l'interface fluide - structure**

Sur l'interface fluide-structure Γ_I , on considère la continuité du champ des vitesses et des efforts (contraintes coté solide et pressions coté fluide) pour la formulation en pression et la continuité des déplacements pour la formulation mixte (ϕ, p) (figure II.5). L'équation d'équilibre (II.11) s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \ddot{u}_I \cdot n \text{ sur } \Gamma_I \quad (\text{II. 17})$$

Où $\ddot{u}_I = \partial v / \partial t$ représente l'accélération des particules solides à l'interface. Dans le cas d'une structure rigide en translation, ces accélérations sont égales à celles du sol \ddot{u}_g qui sont supposées connues. Par contre, dans le cas d'une structure souple elles restent inconnues et font partie du problème couplé. Elles comprennent toujours les accélérations sismiques \ddot{u}_g auxquelles s'ajoutent celles provenant des déformations de la structure \ddot{u}_s . Il convient donc de les décomposer en ces deux composantes : $\ddot{u} = \ddot{u}_s + \ddot{u}_g$ dont \ddot{u}_s reste inconnu.

Cette condition s'écrit pour la formulation mixte (ϕ, p) comme suit :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = u_I \cdot n \text{ sur } \Gamma_I \quad (\text{II. 18})$$

Où u_I est le déplacement couplé des particules fluides et solides à l'interface.

En se référant à la (figure II.5), la frontière du réservoir est constituée de la surface libre (Γ_S), du fond (Γ_F), et de l'interface avec le barrage (Γ_I).

- **Condition à la surface libre**

La condition la plus simple consiste à prendre une pression hydrodynamique nulle sur la surface de l'eau, ce qui revient à négliger les fluctuations de la surface libre. Ceci conduit également à un potentiel nul sur la surface.

$$p = 0 ; \phi = 0 \text{ sur } \Gamma_I \quad (\text{II. 19})$$

Cette condition est utilisée dans la plupart des travaux traitant le problème de la réponse sismique des barrages. De plus il a été montré que les effets de ballonnement ou de fluctuation de la surface libre de l'eau sur le comportement dynamique de l'ensemble barrage-réservoir sont souvent négligeables.

Toutefois une approche simplifiée mais efficace permet de quantifier ces effets. Elle revient à interpréter par une pression hydrostatique toute élévation ou abaissement de hauteur h de la surface libre par rapport à sa position initiale (figure II.6).

La pression relative par rapport au niveau initial de la surface libre est :

$$p = \rho g h$$

Cette relation donne directement la condition à la limite sur le gradient du potentiel des déplacements :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = h = \frac{p}{\rho g} \quad \text{sur } \Gamma_S \quad (\text{II. 20})$$

L'application de l'équation de la dynamique (II.11) permet de relier la hauteur h à la pression p par l'intermédiaire de la vitesse particulière évaluée à la surface libre ($v = \partial h / \partial t$) :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \text{sur } \Gamma_S \quad (\text{II. 21})$$

Cette condition est connue sous le nom d'onde de surface linéarité. Elle contribue à l'inertie du volume d'eau (matrice de masse) et son effet est important lorsque le liquide est contenu dans un réservoir de dimensions finies. Il est d'autant plus important que le rapport largeur/hauteur est plus faible.

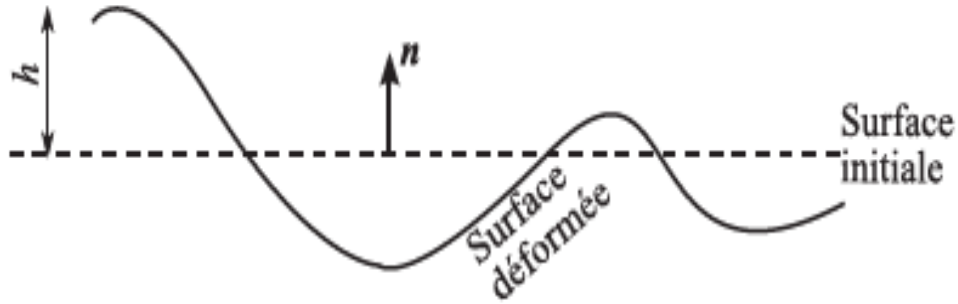


Figure II.6 : Fluctuations de surface libre

- **Condition sur la surface en fond de réservoir**

Le fond du réservoir est constitué de couches de sédiments saturés pouvant être considérés comme des solides poroélastiques. Ces couches peuvent avoir des épaisseurs très variables d'un barrage à un autre. Il a été montré dans plusieurs travaux que ces couches peuvent avoir un effet d'absorption sur les ondes de pression, lors de matériau relativement perméables.

Si l'on néglige cet effet d'absorption, et si l'on considère le sol comme non poreux, on retrouve la même condition que celle de l'interface barrage - réservoir donnée par (II.17) et (II.18).

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_f \cdot n ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = u_f \cdot n \quad \text{sur } \Gamma_F \quad (\text{II. 22})$$

Les vecteurs déplacements et accélérations sont constitués chacun de la composante sismique u_g et d'une composante due aux déformations du sol. Pour le cas d'un fond horizontal et d'excitation sismique aussi horizontale, le vecteur déplacement u et le vecteur normal n étant perpendiculaires, la condition se réduit simplement à :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_F \quad (\text{II. 23})$$

Une méthode simple permettant de tenir compte des effets d'absorption d'onde consiste à exprimer le gradient normal de la pression et celui du potentiel en fonction des dérivées temporelles et des accélérations du sol. Pour cela, il est supposé que le sol est constitué d'une seule couche infinie et homogène dans laquelle, l'onde se propage perpendiculairement à l'interface eau – sol, ce qui donne un problème de propagation axiale selon la normale \mathbf{n} (Figure II.7).

On note \mathbf{u}_n la composante du champ des déplacements du sol dans la direction \mathbf{n} . Avec hypothèse d'élasticité linéaire, dans le cas uni-axial, la pression est liée à la déformation normale $\varepsilon_n = \partial \mathbf{u}_n / \partial \mathbf{n}$ par le module Young axial E_n de la couche.

$$\mathbf{p} = -E_n \frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial \mathbf{n}} \quad (\text{II. 24})$$

Le gradient de pression est donné, selon l'équation d'équilibre (II.11), en fonction de l'accélération normale totale comme suit :

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} = -\rho(\ddot{\mathbf{u}}_g \cdot \mathbf{n} + \ddot{\mathbf{u}}_n) \quad (\text{II. 25})$$

Par ailleurs, l'équation d'ondes de compression "ondes \mathbf{p} " s'applique pour \mathbf{u}_n elle a pour expression :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}_n}{\partial \mathbf{n}^2} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \mathbf{u}_n}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II. 26})$$

$c_s^2 = E_n / \rho_s$ Est la vitesse de propagation d'ondes \mathbf{P} dans la couche homogène de densité ρ_s .

En supposant que la couche du sol est d'une épaisseur infinie, la seule onde incidente est celle réfractée à l'interface sol-eau.

La solution de d'Alembert de cette équation est : $\mathbf{u}_n = \mathbf{G}(r + c_s t)$, r étant la distance mesurée dans la direction de \mathbf{n} .

En notant par \mathbf{G}' la dérivée totale de \mathbf{G} :

$$\mathbf{G}' = d\mathbf{G}/d(r + c_s t)$$

On peut écrire :

$$\frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial r} = \mathbf{G}' ; \quad \frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial t} = c_s \mathbf{G}' \quad (\text{II. 27})$$

D'où :

$$\frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial \mathbf{n}} = \frac{1}{c_s} \frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial t} \quad (\text{II. 28})$$

Cette expression est remplacée dans (II.24) puis, par dérivation par rapport au temps, on exprime une relation entre les accélérations relatives de la couche du sol et la pression de l'eau à l'interface sol-réservoir.

$$\frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = -\frac{c_s}{E_n} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{II. 29})$$

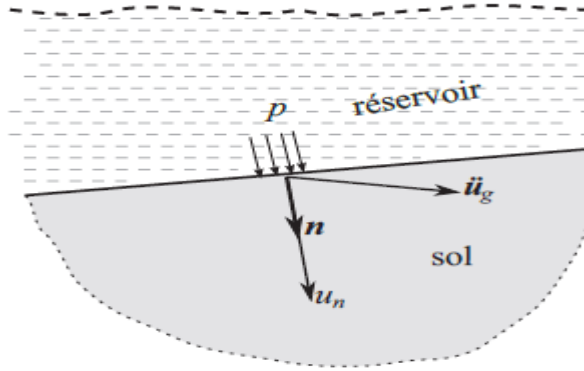


Figure II.7 : Conditions aux limites sur le fond

L'équation d'équilibre à l'interface (II.25) peut maintenant être écrite comme suit :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_g \cdot n - \frac{\rho}{\rho_s c_s} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{II. 30})$$

Cette relation est souvent donnée sous la forme suivante :

$$\frac{\partial p}{\partial n} + q \frac{\partial p}{\partial t} = -\rho \ddot{u}_g \cdot n \quad \text{sur } \Gamma_F \quad (\text{II. 31})$$

Dans cette expression, on retrouve bien le cas d'interface rigide sol-eau pour lequel $c_s = \infty$ et $q=0$. Le paramètre $q = \rho/(\rho_s c_s)$ est le coefficient d'amortissement, il est aussi appelé admittance. Il caractérise les effets d'absorption d'onde de pression hydrodynamique.

En remplaçant p par $-\rho_F \ddot{\phi}$, selon l'équation, la condition (II.31) s'écrit pour le potentiel des déplacements, après une double intégration par rapport au temps, comme suit :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = q \frac{\partial \phi}{\partial t} + \ddot{u}_g \cdot n \quad \text{sur } \Gamma_F \quad (\text{II. 32})$$

Si le sol de fondation est compris dans le modèle numérique, les conditions (II.17) et (II.18) deviennent suffisantes. Les effets de dissipation seront pris en compte par la déformabilité de l'interface sol-eau et par les conditions aux limites qui seront appliquées à la partie modélisée du sol.

• **Condition à la surface de troncature :**

Le principal effet dynamique dans cette région est dû à la propagation d'ondes de pression voyageant à partir de l'interface fluide-structure vers l'amont du réservoir, supposé étendu assez loin pour être considéré comme infini et sans source de réflexion d'ondes. La condition peut alors s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t}$$

Où :

c : Célérité des ondes de pression dans l'eau.

Cette condition, appelée condition de radiation de Sommerfeld, a été appliquée pour les problèmes d'interaction fluide-structure par Zienkiewicz.

II.4.1.2 Modèle de l'analyse directe dans le domaine temporel

C'est un modèle de calcul dynamique par la méthode des éléments finis pour l'analyse directe dans le domaine temporel des systèmes réservoir-barrages compte tenu des effets d'interaction hydrodynamique issu de la méthode présentée par B.TILIOUINE et A.SEGHIR, 97. Le système est représenté dans la figure (II.8) avec les différentes conditions aux limites.

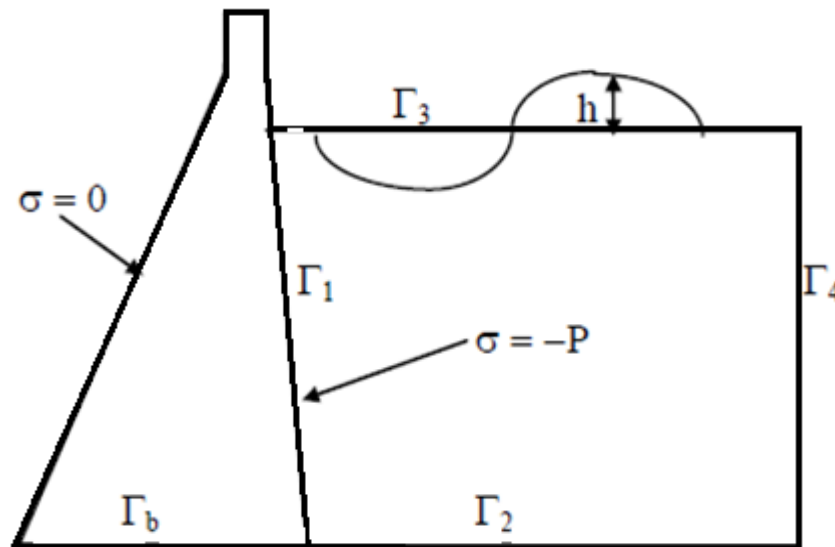


Figure II.8 : Présentation du système barrage-réservoir

- Les équations d'équilibre dynamique :

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = QP - F \tag{II. 33}$$

$$S\ddot{P} + D\dot{P} + HP = -\rho Q^T \ddot{U} \tag{II. 34}$$

Où les symboles (') et (") représentent les dérivées première et seconde par rapport au temps des variables de base associées.

$S\ddot{P}$: représentent les effets combiné de compressibilité de l'eau et des ondes gravitaires de surface (dans le cas d'un fluide incompressible ce terme devient nul si les ondes de surfaces dont l'effet est en général peu important son ignorées).

$D\dot{P}$: représente les forces d'amortissement associées à la dissipation d'énergie par atténuation des ondes à la limite de rayonnement.

HP : Ces forces caractérisent les effets de déplacement du front d'ondes de pressions à partir de l'interface.

$\rho Q^T \ddot{U}$: Les forces transmises au réservoir par le biais des accélérations des nœuds du parement amont du barrage.

Les matrices Q , S , D et H sont données par les expressions suivantes :

$$Q = - \int_{\Gamma_1} N_u^T n N_p d\Gamma \quad (\text{II.35})$$

$$S = \int_{\Omega} N_p^T \frac{1}{c^2} N_p d\Omega - \int_{\Gamma_3} N_p^T \frac{1}{g} N_p d\Gamma \quad (\text{II.36})$$

$$D = \int_{\Gamma_4} N_p^T \frac{1}{C} N_p d\Gamma \quad (\text{II.37})$$

$$H = \int_{\Omega} \nabla N_p^T \nabla N_p d\Omega \quad (\text{II.38})$$

Où N_p et N_u sont, respectivement, les fonctions de forme retenues pour l'interpolation des variables pressions et des déplacements, T : symbole de transposition de matrice, n : la normale à la frontière Γ considérée, Ω : domaine fluide, ∇ : opérateur gradient, g : accélération de la pesanteur et C : célérité des ondes sonores dans l'eau.

A la fin les équations d'équilibre peuvent être réécrites sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} M & \mathbf{0} \\ \rho Q^T & S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -Q \\ \mathbf{0} & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Si nous considérons uniquement le comportement en vibrations libres et omettons par suite toutes formes de dissipation d'énergie, le système se réduit à :

$$\begin{bmatrix} M & \mathbf{0} \\ \rho Q^T & S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -Q \\ \mathbf{0} & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (\text{II.40})$$

On note immédiatement, que ce système n'est pas symétrique, et que par conséquent, les méthodes d'analyse modales usuelles ne sont pas directement applicables. Une symétrisations du système est possibles en tirant de la deuxième ligne : $\mathbf{P} = -\mathbf{H}^{-1}(\mathbf{S}\dot{\mathbf{P}} + \rho\mathbf{Q}^T\dot{\mathbf{U}})$ et en remplaçant dans la première. En multipliant la deuxième par $\mathbf{S}\mathbf{H}^{-1}$ on obtient finalement le système symétrique suivant:

$$\begin{bmatrix} \rho\mathbf{M} + \mathbf{Q}\mathbf{H}^{-1}\rho^2\mathbf{Q}^T & \rho\mathbf{Q}\mathbf{H}^{-1}\mathbf{S} \\ \rho\mathbf{S}\mathbf{H}^{-1}\mathbf{Q}^T & \mathbf{S}\mathbf{H}^{-1}\mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho\mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{P} \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (\text{II. 41})$$

II.4.1.3 Modèle de l'analyse transitoire dans le domaine temps du système barrage-réservoir en introduisant l'effet du bas de réservoir

Une analyse transitoire dans le domaine temps du système barrage-réservoir en introduisant l'effet du bas de réservoir tout ça à l'aide de la méthode des éléments finis, la procédure de couplage est faite à l'aide de la méthode de sous-structure issu de la méthode présenté par S.

KÜÇÜKARSLAN, S.B. COSKUN, B. TASKIN. La figure (II.9) illustre la géométrie du système étudié.

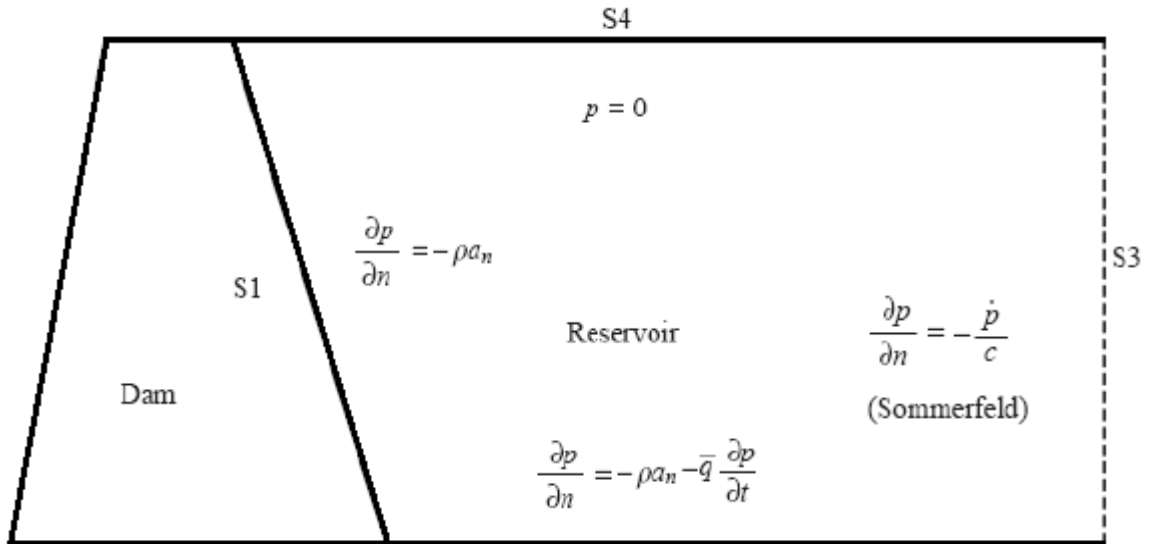


Figure II.9 : Le système barrage-réservoir

Les équations du système sous l'effet de l'action sismique s'écrivent sous la forme suivante :

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} = -[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{U}}_g\} + \{\mathbf{E}(t)\} \quad (\text{II. 42})$$

$\{\mathbf{E}(t)\}$: Le vecteur nodal des forces associées à la pression hydrodynamique du réservoir.

On utilise la matrice d'amortissement de type Rayleigh :

$$[\mathbf{C}] = b_1[\mathbf{M}] + b_2[\mathbf{K}] \quad (\text{II. 43})$$

(b_1, b_2 Des facteurs variables pour obtenir l'amortissement désiré du système).

On considère un fluide compressible non visqueux, la pression hydrodynamique p résultante de la réponse du sol pour un barrage rigide est :

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (\text{II.44})$$

En introduisant les conditions aux limites et après une discrétisation à l'aide de la méthode des éléments finis, on aura :

$$[G]\{\ddot{p}\} + [C_f]\{\dot{p}\} + [H]\{p\} = \{b\} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$$H_{ij} = \sum_{\text{Re}} \int \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dR; \quad (\text{II.46})$$

$$G_{ij} = \sum_{\text{Re}} \frac{1}{c^2} \int N_i N_j dR; \quad (\text{II.47})$$

$$\{b\}^T = \{-\rho S^T(\ddot{u}_S + \ddot{u}_g) \quad -\rho S^T \ddot{u}_g \quad 0 \quad 0\} \quad (\text{II.48})$$

$$[C_f] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

On utilise la technique de sous-structure, et on applique les conditions aux limites de pression et déplacement à l'interface de contact barrage-réservoir (S1).

- Appliquant la méthode de Newmark à l'équation (II.42) :

$$[\bar{K}]\{u^i\} = \{R^i\}; \quad i^{eme} \text{ étape.} \quad (\text{II.50})$$

Avec :

$$[\bar{K}] = [K] + a_0[M] + a_1[C]$$

$$\{R^i\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} + [E^i] + [M](a_0\{u^{i-1}\} + a_2\{\dot{u}^{i-1}\} + a_3\{\ddot{u}^{i-1}\}) \\ + [C](a_1\{u^{i-1}\} + a_4\{\dot{u}^{i-1}\} + a_5\{\ddot{u}^{i-1}\})$$

$$a_0 = \frac{1}{\beta \Delta t^2}, a_1 = \frac{\gamma}{\beta \Delta t}, a_2 = \frac{1}{\beta \Delta t}, a_3 = \frac{1}{2\beta} - 1, a_4 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\gamma}{\beta} - 2 \right)$$

$$\gamma=0.5, \beta=0.5.$$

- Appliquant la même méthode à l'équation (II.45) :

$$[\bar{H}]\{p^i\} = \{b^i\} \quad (\text{II. 51})$$

Avec :

$$[\bar{H}] = [H] + a_0[G] + a_1[C_f]$$

$$\{b^i\} = \begin{Bmatrix} -\rho S^T(\ddot{u}_s + \ddot{u}_g) \\ -\rho S^T \ddot{u}_g \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} + [G](a_0\{p^{i-1}\} + a_2\{\dot{p}^{i-1}\} + a_3\{\ddot{p}^{i-1}\}) \\ + [C_f](a_1\{p^{i-1}\} + a_4\{\dot{p}^{i-1}\} + a_5\{\ddot{p}^{i-1}\})$$

- Accélération nodale à l'interface barrage-réservoir est donnée par :

$$\{\ddot{u}_s^i\} = a_0(\{u_s^i\} - \{u_s^{i-1}\}) - a_2\{\dot{u}_s^{i-1}\} - a_3\{\ddot{u}_s^{i-1}\} \quad (\text{II. 52})$$

Avec :

$$[h] = [\bar{H}]^{-1} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$\{P^i\} = [h]\{b^i\}$$

$$\{E^i\} = [S]\{P_1^i\}$$

$$[\hat{K}]\{u^i\} = \{\hat{R}^i\}$$

Donc :

$$[\hat{K}] = [K] + a_0([M] + [\bar{M}]) + a_1[C] \quad (\text{II. 53})$$

$$\{\hat{R}^i\} = -([M] + [\bar{M}])\{\ddot{u}_g\} + ([M] + [\bar{M}])(a_0\{u^{i-1}\} + a_2\{\dot{u}^{i-1}\} + a_3\{\ddot{u}^{i-1}\}) \\ + [C](a_1\{u^{i-1}\} + a_4\{\dot{u}^{i-1}\} + a_5\{\ddot{u}^{i-1}\}) - \{E^*\} \quad (\text{II. 54})$$

$$[\bar{M}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{M}_s \end{bmatrix} / [\bar{M}_s] = \rho[S][h_{11}][S^T] \quad (\text{II.55})$$

$$[E_{S1}^*] = [S][h_1][G][G](a_0\{P^{i-1}\} + a_2\{\dot{P}^{i-1}\} + a_3\{\ddot{P}^{i-1}\}) \\ + [S][h_1][C_f](a_1\{P^{i-1}\} + a_4\{\dot{P}^{i-1}\} + a_5\{\ddot{P}^{i-1}\}) + \rho[S][h_{12}][S^T][\ddot{u}_g^i] \quad (\text{II. 56})$$

- La vitesse et l'accélération :

$$\{\dot{\mathbf{u}}^i\} = \{\dot{\mathbf{u}}^{i-1}\} + \mathbf{a}_6\{\ddot{\mathbf{u}}^{i-1}\} + \mathbf{a}_7\{\ddot{\mathbf{u}}^i\} \quad (\text{II. 57})$$

$$\{\ddot{\mathbf{u}}^i\} = \mathbf{a}_0(\{\mathbf{u}^i\} - \{\mathbf{u}^{i-1}\}) - \mathbf{a}_2\{\dot{\mathbf{u}}^{i-1}\} - \mathbf{a}_3\{\ddot{\mathbf{u}}^{i-1}\} \quad (\text{II. 58})$$

$$\mathbf{a}_6 = \Delta t(\mathbf{1} - \boldsymbol{\gamma}) \text{ et } \mathbf{a}_7 = \boldsymbol{\gamma}\Delta t \quad (\text{II. 59})$$

- La première et la seconde dérivée de la pression :

$$\{\dot{\mathbf{p}}^i\} = \{\dot{\mathbf{p}}^{i-1}\} + \mathbf{a}_6\{\ddot{\mathbf{p}}^{i-1}\} + \mathbf{a}_7\{\ddot{\mathbf{p}}^i\} \quad (\text{II. 60})$$

$$\{\ddot{\mathbf{p}}^i\} = \mathbf{a}_0(\{\mathbf{p}^i\} - \{\mathbf{p}^{i-1}\}) - \mathbf{a}_2\{\dot{\mathbf{p}}^{i-1}\} - \mathbf{a}_3\{\ddot{\mathbf{p}}^{i-1}\} \quad (\text{II. 61})$$

Répétition pour l'incrément de temps suivant remplacer i par $i+1$ et répéter les différentes étapes.

I.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons surtout essayé de mettre en évidence le problème de l'interaction fluide-structure à l'aide de deux méthodes :

La méthode de Westergaard qui est fréquemment utilisée dans l'analyse dynamique des barrages et qui reste une bonne approximation de la distribution verticale de la pression hydrodynamique dans un liquide incompressible.

La méthode des Éléments finies qui comprend deux modèles : Modèle de l'analyse directe dans le domaine temporel et Modèle de l'analyse transitoire dans le domaine temps du système barrage-réservoir en introduisant l'effet du bas de réservoir. Cette méthode des éléments finies est consacré aux études des barrages aussi bien que les réservoirs ce qui donne une spécificité à cette méthode.

Chapitre III

Présentation du code de calcul ANSYS

III.1 INTRODUCTION

Logiciel ANSYS est abrégé de « Analyse Système » basé sur la méthode des éléments finis. Il est utilisé pour l'étude et la simulation d'une grande variété de problème dans les sciences de l'ingénieur, ces simulations ont pour objectif de réduire les essais sur les prototypes. Parmi les domaines qu'ils traitent, on cite des analyses des structurales statiques, dynamiques, mécanique des ruptures, fatigue, voilement, effet de contact, le fluage, le gonflement, transfert de chaleur, magnétique, électronique, acoustique et tous ces calculs peuvent se faire avec et sans effet temporels.

Ce programme s'adapte à plusieurs types de comportement structuraux tel que l'élasticité linéaire et non linéaire et la plasticité.

La bibliothèque d'éléments finis que possède ce programme compte une soixantaine d'éléments finis adaptés pour chaque type d'analyse cité au-dessus.

Le logiciel ANSYS a commencé à être commercialiser à partir des années 70 depuis, il a connue plusieurs versions et là on peut citer le 7.4, comme plusieurs 7, 8, 9, 10, 11 et puis la dernière 12.

En fonction de l'utilisation on peut distinguer trois versions :

- La version démo : c'est une version purement commerciale et très limitée, elle ne permet pas de faire de véritables simulations, car les résultats peuvent contenir des erreurs qui sont dues à une limitation du nombre de nœuds maximaux utilisables ou à un certain nombre de modules qui ne fonctionnent pas.
- La version universitaire : consacrée aux recherches (ANSYS release 12, 2009).

III.2 GÉNÉRALITES

Le code ANSYS est utilisé par des ingénieurs du monde entier dans pratiquement tous les domaines d'ingénierie :

- Structurale,
- Thermique,
- Fluide, incluant CFD (Dynamique des Fluides Numérique),
- Electrique/Electrostatique,
- Electromagnétique.

ANSYS/Multiphysics est le produit phare d'ANSYS, incluant toutes les fonctionnalités d'ANSYS dans toutes les disciplines d'ingénierie.

Il y a trois principaux produits dérivés d'ANSYS/Multiphysics :

- ANSYS/Mechanical - fonctionnalités structurales et thermiques,
- ANSYS/Emag-électromagnétique,
- ANSYS/FLOTRAN-fonctionnalités CFD.

Autres lignes de produits :

- ANSYS/LS-DYNA : Pour des problèmes structuraux fortement non linéaires,
- Design Space : Un outil de conception et d'analyse facile d'utilisation pour des analyses rapides sous environnement CAO,
- ANSYS/ProFEA : Pour l'analyse ANSYS et l'optimisation de modèles sous Pro/ENGINEER.

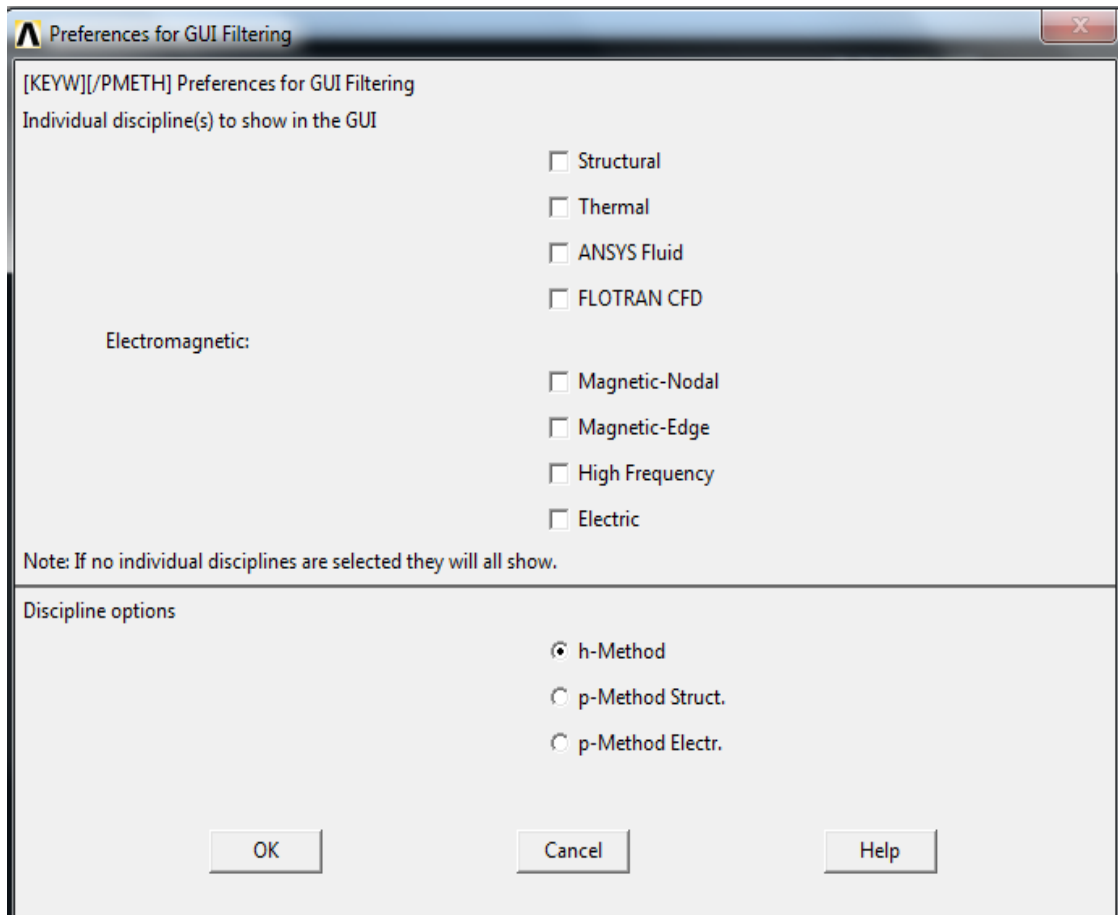


Figure III.1 : fenêtre de choix des domaines d'études

III.3 TYPE D'ANALYSE

Différents types d'analyses peuvent être assurées par ANSYS.

L'analyse structure : est utilisée pour déterminer les déformations, les contraintes, et les forces de réaction.

- Analyse statique :
 - Utilisée pour des conditions de chargement statique,
 - Les comportements non linéaires comme les grands déplacements, fortes déflexions, les raideurs géométriques, le contact, la plasticité, l'hyper élasticité, et le fluage peuvent être simulés.

- Analyse dynamique :
 - Elle inclut les effets de masse et d'amortissement,
 - L'analyse modale calcule les fréquences propres et les modes propres,
 - L'analyse harmonique détermine la réponse d'une structure à des charges sinusoïdales d'amplitude et de fréquences connues,
 - L'analyse transitoire dynamique détermine la réponse d'une structure à des charges variables dans le temps et peut inclure un comportement non linéaire.

- Autres fonctionnalités structurales :
 - Analyse spectrale,
 - Vibrations aléatoires,
 - Déformation "Eigenvalue",
 - Sous-structuration.

L'analyse Thermique: l'analyse thermique est utilisée pour déterminer la répartition de la température d'un corps. D'autres grandeurs sont intéressantes incluant la quantité de chaleur échangée, les gradients et les flux thermiques.

Les trois modes primaires de transfert de chaleur peuvent être simulés : conduction, convection, rayonnement.

L'analyse électromagnétique: est utilisée pour calculer le champ magnétique dans des appareils électromagnétiques.

Analyse en Champs Couplés: L'Analyse en Champs Couplés étudie l'interaction mutuelle entre deux ou plusieurs champs. Chaque champ étant dépendant d'un autre, la résolution séparée de chacun est impossible. On a donc besoin d'un programme qui permet la résolution des deux problèmes physiques en les combinant.

Exemples:

- Analyse thermo-mécanique,
- piézoélectricité (électrique & structural),
- Acoustique (fluide & structural),
- Analyse thermo-électrique,
- chauffage par induction (magnétique et thermique),
- Analyse électrostatique-structurale.

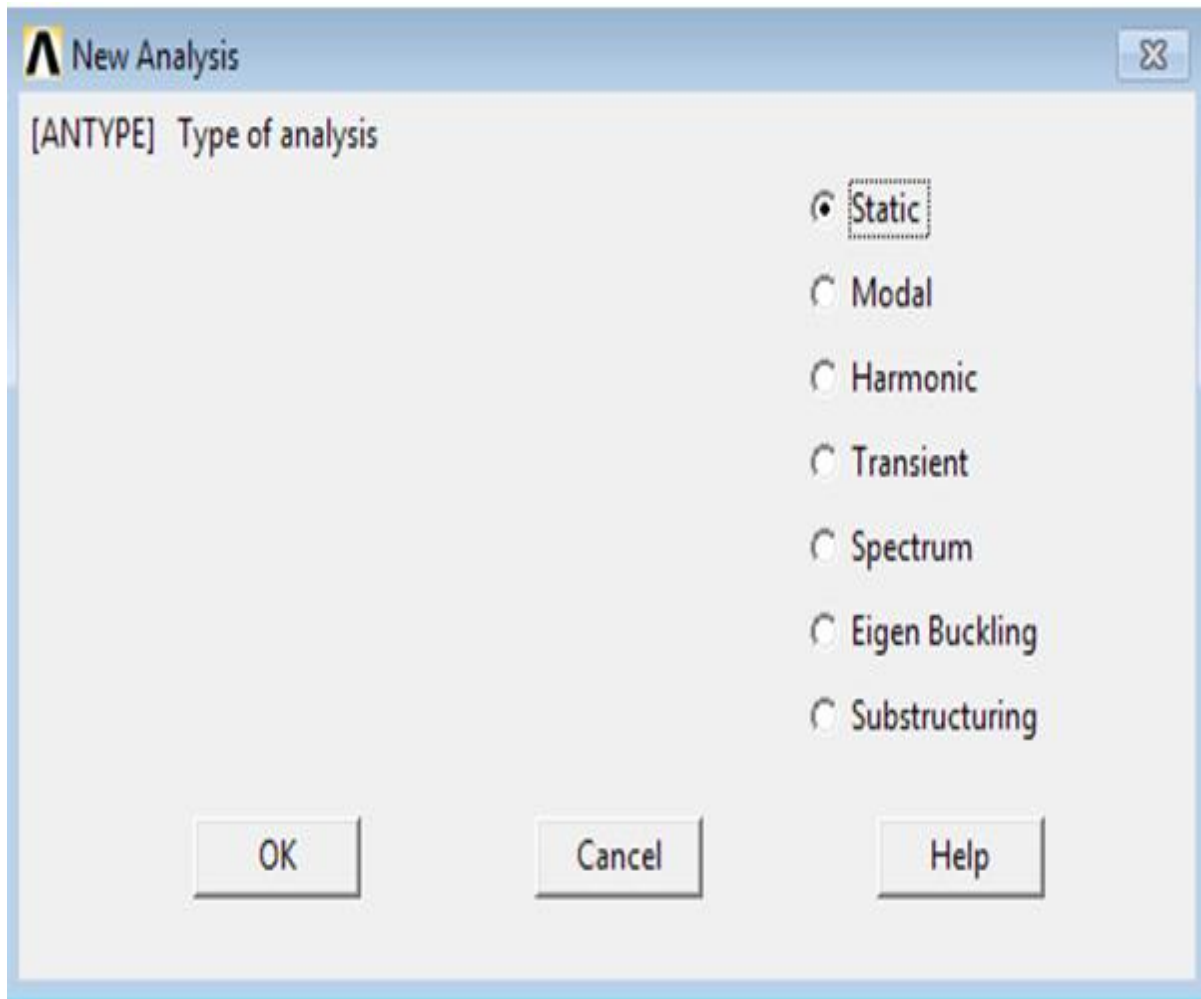


Figure III.2 : fenêtre de choix des types d'analyses

III.4 DÉMARCHE UTILISÉE POUR LA CRÉATION D'UN MODÈLE ANSYS

La démarche de modélisation par le code ANSYS, est résumée comme suit :

III.4.1 A partir de l'icône préférence

On choisie l'option structural : c'est pour spécifier des qu'il s'agit d'un calcul de structure.

III.4.2 A partir de l'icône préprocesseur

Tous d'abord on commencera par choisir le type d'éléments :

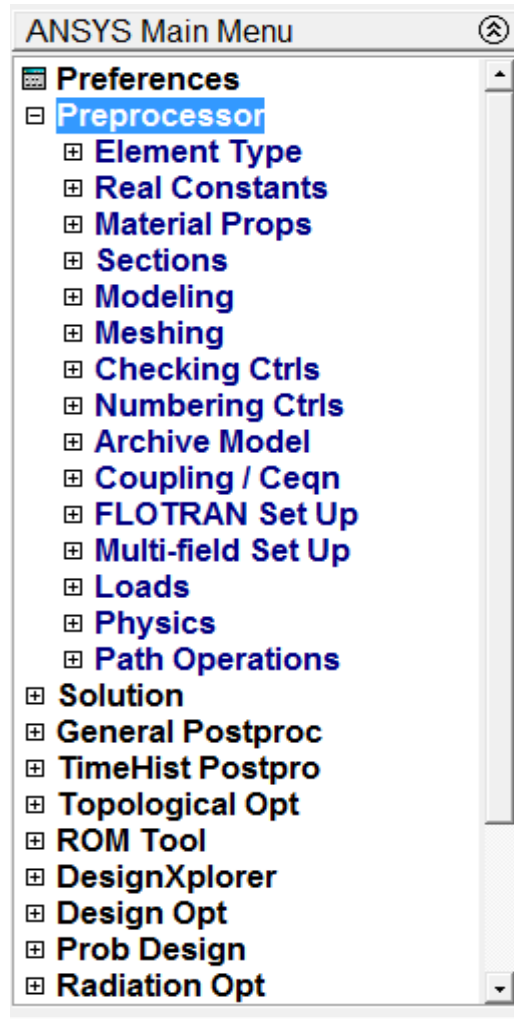


Figure III.3 : Fonction de l'icône préprocesseur

- ❖ Dans l'icône « *Élément Type* » on choisit le type d'élément à utiliser dans notre étude et qui convient aux matériaux et à la situation ; des éléments plan, éléments fluide, éléments de volume...
- ❖ On définit les matériaux à utiliser, dans l'icône « Material Props », leurs masses volumiques, leurs coefficients.
- ❖ On définit la géométrie de la structure (objet d'étude), en commençant par la création des points, des lignes, des surfaces, ainsi que les volumes. Cette étape est assurée par l'option « *modelling* » puis « *create* ».
- ❖ On affectera pour chaque surface ou volume le matériau correspondant, puis on optera pour un maillage pour discrétiser le système. Le maillage ainsi que l'affectation des matériaux se fait à l'aide d'option « *meshing* ». Il est à noter que le logiciel dispose d'un nombre très importants des éléments finis pour le maillage de n'importe quelle structure.
- ❖ À partir de l'option « *define load* », on introduit les conditions aux limites de notre modèle, c à d ; un encastrement au niveau des frontières du sol ainsi que l'accélération de l'apesanteur qui est de (9.81m/s^2) , le signal sismique et la pression hydrostatique.

III.4.3 A partir de l'icône solution

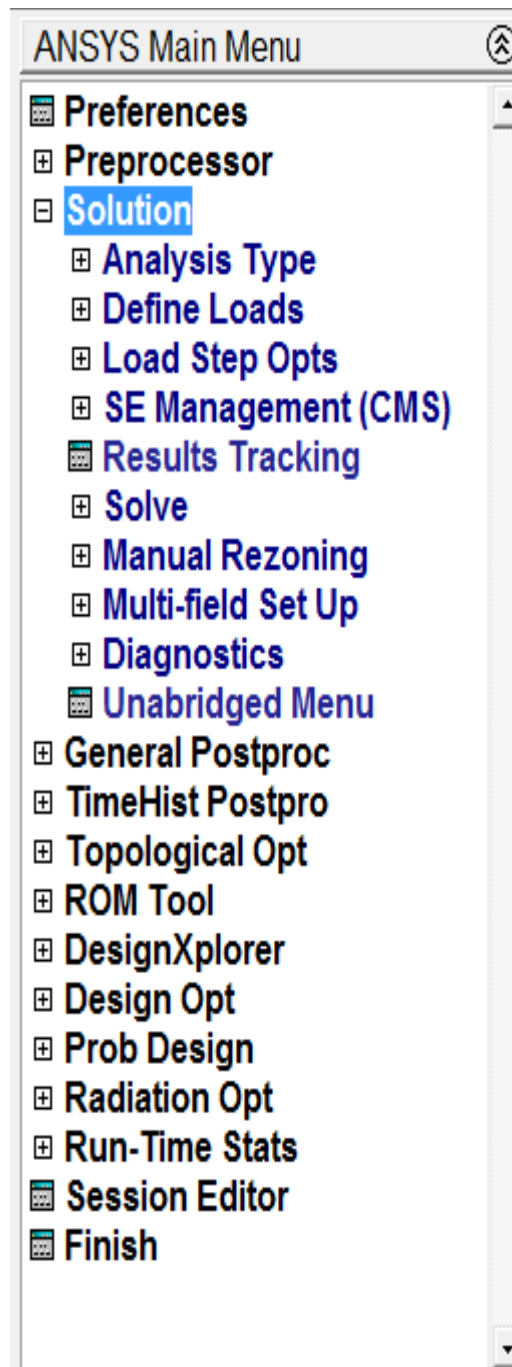


Figure III.4 : Fonction de l'icône solution

- ❖ On choisie le type d'analyse qu'on veut exécuter, ainsi que les détails de chaque analyse (nombre de mode, pas de temps.....).
- ❖ L'exécution de l'analyse se fait par l'icône « *Solve*→*current LS* ».
- ❖ La lecture des résultats se fait par un fichier output qu'on crée avant l'exécution.

III.4.4 A partir de l'icône General Post proc

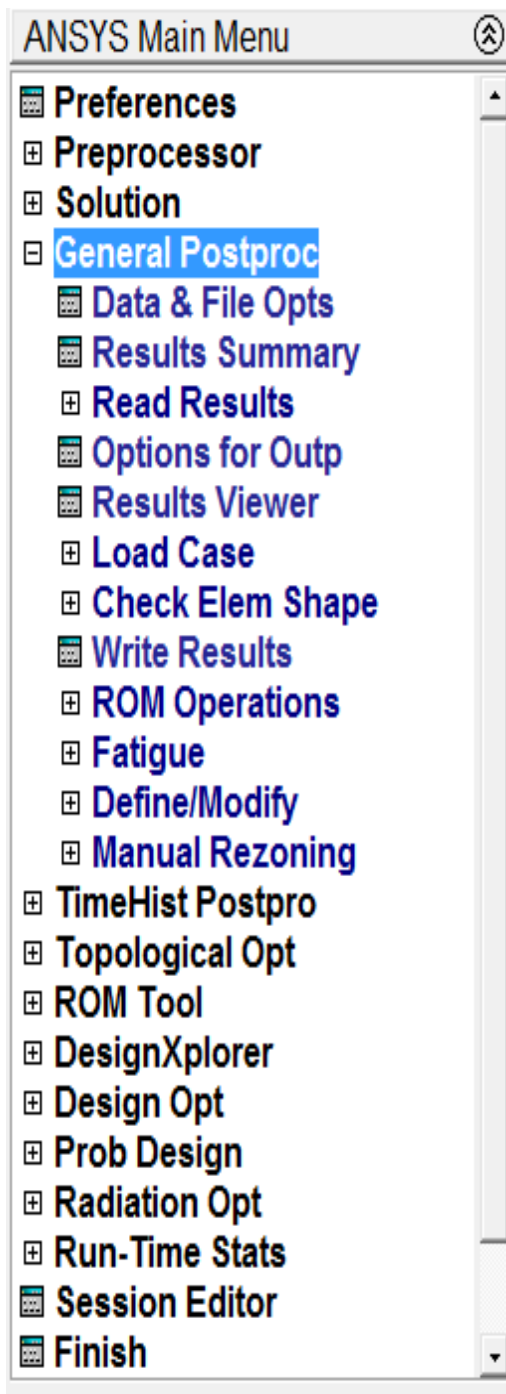


Figure III.5 : Fonction de l'icône général postproc

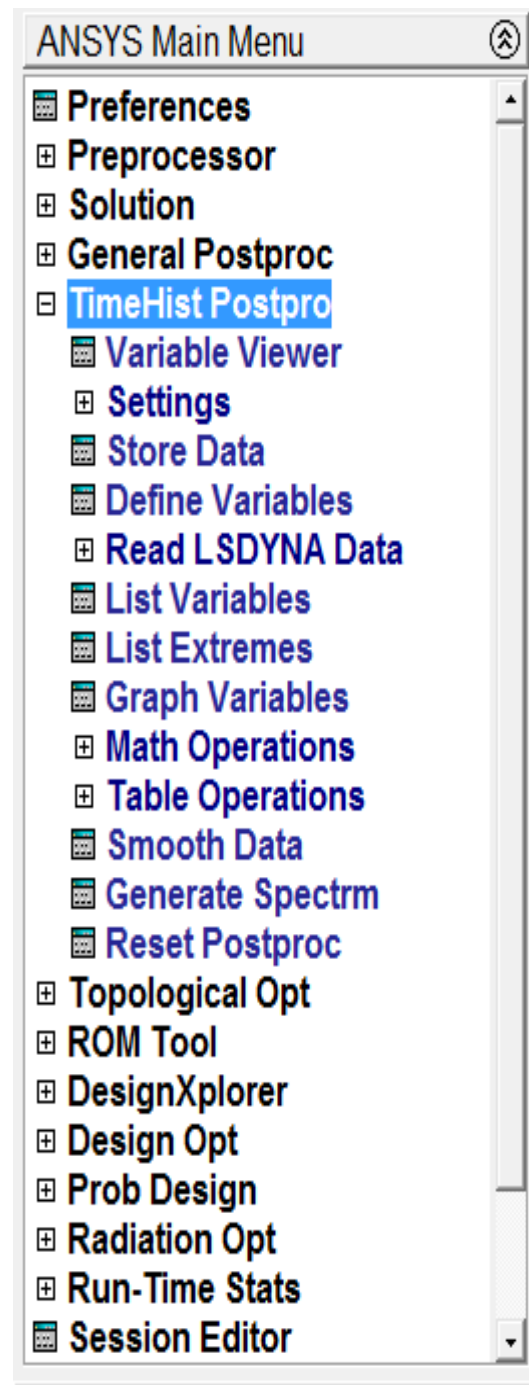


Figure III.6 : Fonction de l'icône TimeHist postpro

- Toute la lecture des résultats se fait dans cette partie ; analyse modale, analyse statique et dynamique.
- La représentation des résultats se fait par représentation graphique, ou bien par des images d'iso valeurs.

III.4.5 Barre de commande ANSYS



Figure III.7 : Fonction de la barre de commande ANSYS

Dans cette partie de logiciel, la barre de commande sert à créer des fichiers de sortie « OUTPUT », pour la lecture des résultats en format TXT. Elle peut être utilisée aussi pour l'insertion des programmes.

Les fonctions des deux icônes sur la droite de la barre, servent à créer les éléments de contact ainsi que la variation du coefficient de contact.

III.5 CONCLUSION

Ce chapitre est un apprentissage du code ANSYS et ses différentes méthodes d'analyse. L'application de cet apprentissage se fera dans le chapitre qui suit.

Chapitre IV

Application numérique

IV.1 INTRODUCTION

Les problèmes d'interaction fluide-structure peuvent intervenir dans divers domaines des sciences de l'ingénieur. En particulier, l'importance du phénomène d'interaction fluide-structure sur le comportement dynamique des barrages poids en béton sous actions sismiques constitue un domaine actif de recherche. La prédiction des mouvements couplés du système barrage-réservoir ainsi que l'évaluation des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur le parement amont du barrage est une tâche particulièrement complexe.

De nombreux travaux de recherche antérieurs réalisés ont été spécifiquement effectués dans le domaine fréquentiel en utilisant une discrétisation par éléments finis bidimensionnels des monolithes de barrage supposés linéairement élastiques et une représentation analytique de la solution de l'équation des ondes de pression régnant dans un réservoir semi-infini. Ces efforts ont ainsi permis d'identifier un certain nombre de paramètres susceptibles d'avoir un effet significatif sur la réponse sismique des barrages.

Néanmoins, la nécessité de représenter des configurations géométriques quelconques du réservoir et des conditions aux frontières complexes ne se prêtant pas toujours à un traitement analytique, ainsi que le besoin de prédire les dégâts susceptibles d'être engendrés par le comportement non linéaire des barrages en zones de forte sismicité impliquent que la solution doit être déterminée dans le domaine temporel.

L'objet de ce travail est de présenter un modèle de calcul dynamique par la méthode des éléments finis pour l'analyse directe dans le domaine temporel des systèmes réservoir-barrages poids compte tenu des effets d'interaction hydrodynamique. Une étude a été effectuée aux fins de mieux appréhender le comportement dynamique du barrage de l'Oued Fodda, situé dans la Wilaya de Chlef au Nord-Ouest de l'Algérie, sous l'excitation du séisme de Boumerdes (2003).

IV.2 PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le barrage de l'Oued Fodda, appelé aussi "barrage Steeg", est le premier des grands barrages construits en Algérie. L'étude de faisabilité a débuté en 1910 mais sa construction a commencé en 1926 pour se terminer en 1932. Cet ouvrage est situé à 20 Km environ de la ville de Oued Fodda, dans la Wilaya de Chlef au Nord Ouest de l'Algérie (figure IV.1), au confluent de Oued Fodda (d'où le nom du barrage). Le cours de cet Oued se fraye un passage dans une gorge profonde, à travers du massif calcaire connu sous le nom de "Koudiat Larouah".

L'ouvrage construit pour le compte du service central des irrigations en Algérie barre une vallée profonde composée de calcaires très fissurés qui ont nécessité pour leur imperméabilisation l'injection à haute pression de produits chimiques et de ciment. Cette région de l'Oued Fodda a été affectée par de grands séismes et cette nouvelle technique s'avéra efficace car plusieurs secousses telluriques n'eurent aucune conséquence pour le barrage. La cuvette du barrage draine les eaux d'un bassin versant de 800 km². Sa capacité de 225 Hm³ permettait d'irriguer 18 000 Ha sur la rive gauche de la vallée de Chlef en amont du seuil de Pontéba dans la vallée de l'Oued Fodda.



Figure IV.1 : Situation géographique du barrage de l'Oued Fodda

IV.3 PROFIL TYPE DU BARRAGE

Le barrage de l'Oued Fodda est un barrage de type poids en béton, il possède les caractéristiques suivantes (figure IV.2) :

- Hauteur de barrage (H_B) : 101 m
- Largeur de la base du barrage (L_B) : 65.5 m
- Hauteur en crête (H_C) : 4.6 m
- Largeur en crête (L_C) : 5 m
- Hauteur de la retenue d'eau (H_F) : 96.4 m
- Longueur de la retenue d'eau (L_F) : 300 m

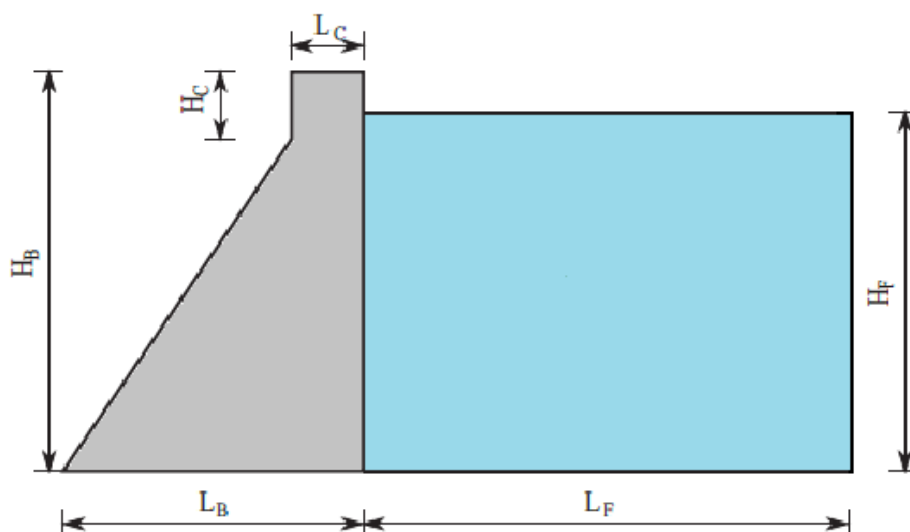


Figure IV.2 : Profil type du barrage de l'Oued Fodda

Les propriétés mécaniques des matériaux du barrage-poids en béton et du réservoir d'eau sont récapitulées dans le tableau (IV.1). Le béton du barrage a une résistance à la traction de 1,6 MPa et une résistance à la compression de 20 MPa.

Matériau	Propriétés des matériaux		
	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson	Densité (kg/m ³)
Barrage (béton)	24600	0.2	2640
Réservoir d'eau	2070	0.49	1000

Tableau IV.1 : Propriétés des matériaux du barrage-poids de l'Oued Fodda

IV.4 MODÉLISATION DU SYSTÈME BARRAGE-RÉSERVOIRE PAR ÉLÉMENTS FINIS

Une discrétisation par éléments finis à deux dimensions (2D) représentée dans la figure (IV.3), est utilisée pour la modélisation du système barrage-réservoir. Ce modèle d'éléments finis est créé en utilisant software ANSYS qui est l'un des principaux programmes commerciaux d'éléments finis dans le monde et peut être appliquée à un grand nombre d'applications dans l'ingénierie.

Un modèle d'éléments finis avec 336 éléments solides (Plane42) est utilisé pour modéliser le barrage. Un modèle d'élément finis avec 720 éléments fluides (Fluid79) est utilisé pour modéliser le réservoir d'eau.



Figure IV.3 : Discrétisation par éléments finis du système barrage-réservoir

IV.5 ANALYSE DYNAMIQUE

Dans ce chapitre on va concentrer sur les deux types d'analyses, analyse modale et analyse transitoire.

IV.5.1 Analyse modale

L'analyse des vibrations libres du barrage-réservoir constitue l'objet de la première étape de cette étude. On s'intéresse à l'extraction des modes et périodes propres à partir des matrices de masse et de raideur. Les plus basses cinq fréquences naturelles du système couplé barrage-réservoir sont présentés dans le tableau (IV.2).

Mode	Fréquence (Hz)	Période (second)
1	2.8583	0.3498
2	3.6730	0.2722
3	4.3965	0.2274
4	5.8231	0.1717
5	7.4675	0.1339

Tableau IV.2 : Cinq premières fréquences naturelles du système couplé barrage-réservoir

Les figures suivantes représentent les cinq modes de déformations :

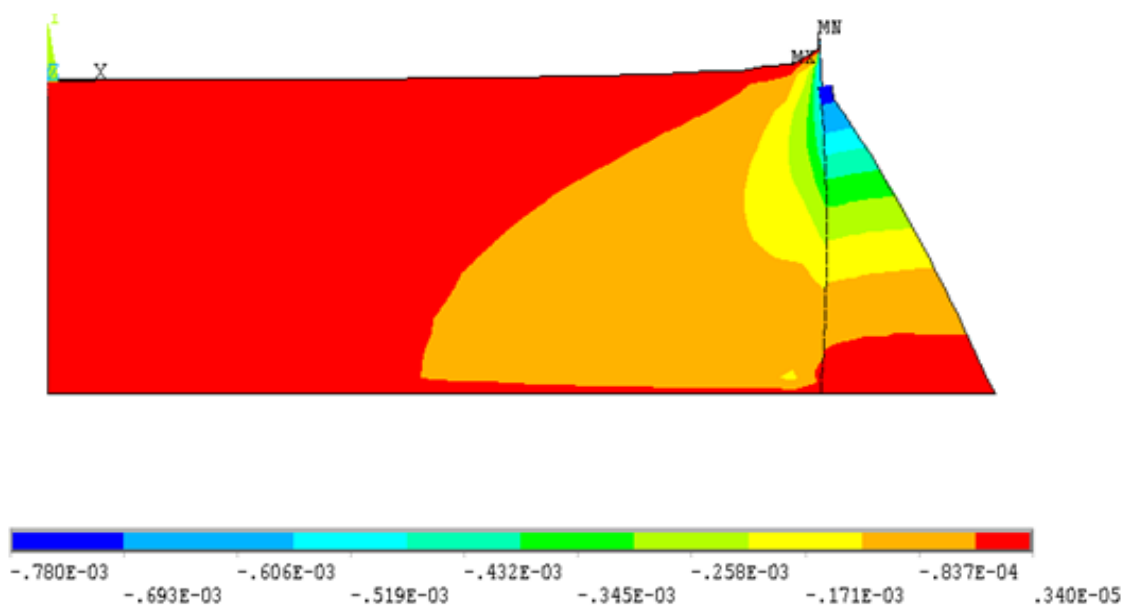


Figure IV.4 : Premier mode de vibration et la répartition des déplacements

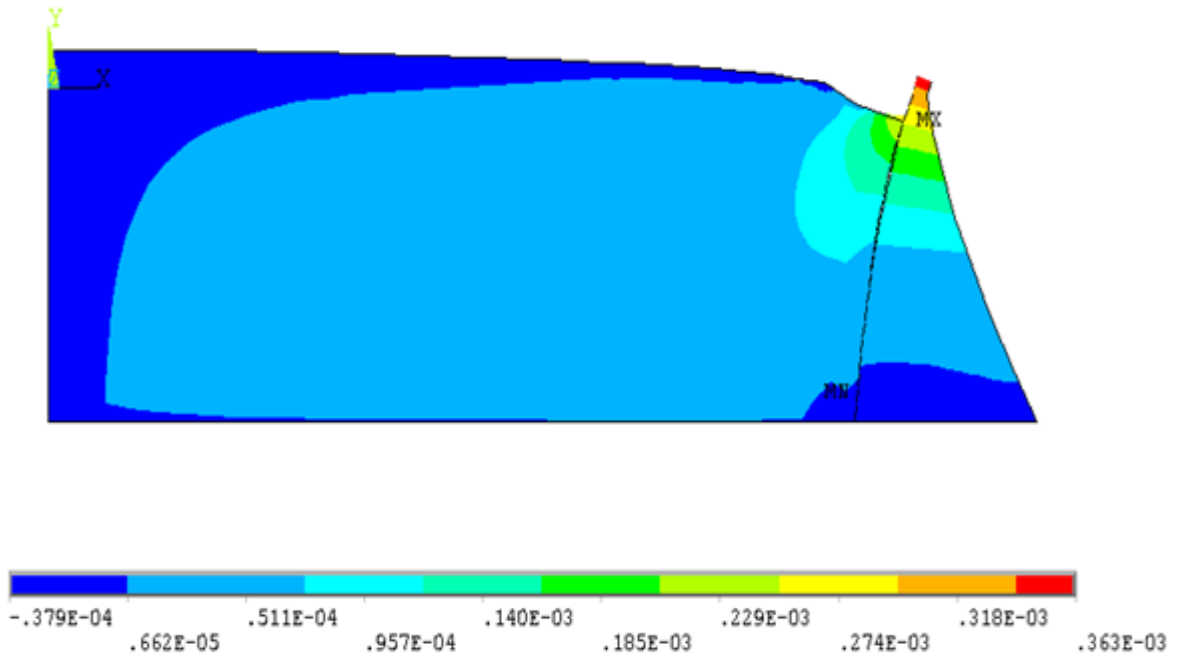


Figure IV.5 : Deuxième mode de vibration et la répartition des déplacements

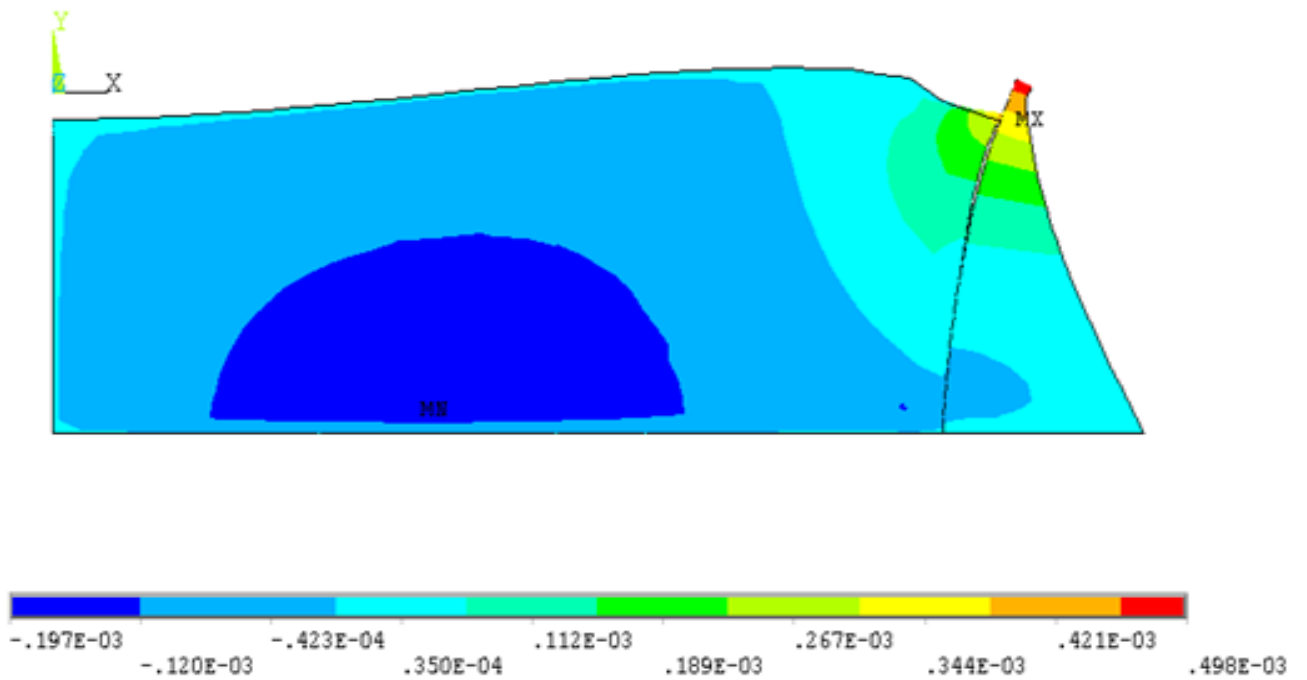


Figure IV.6 : Troisième mode de vibration et la répartition des déplacements

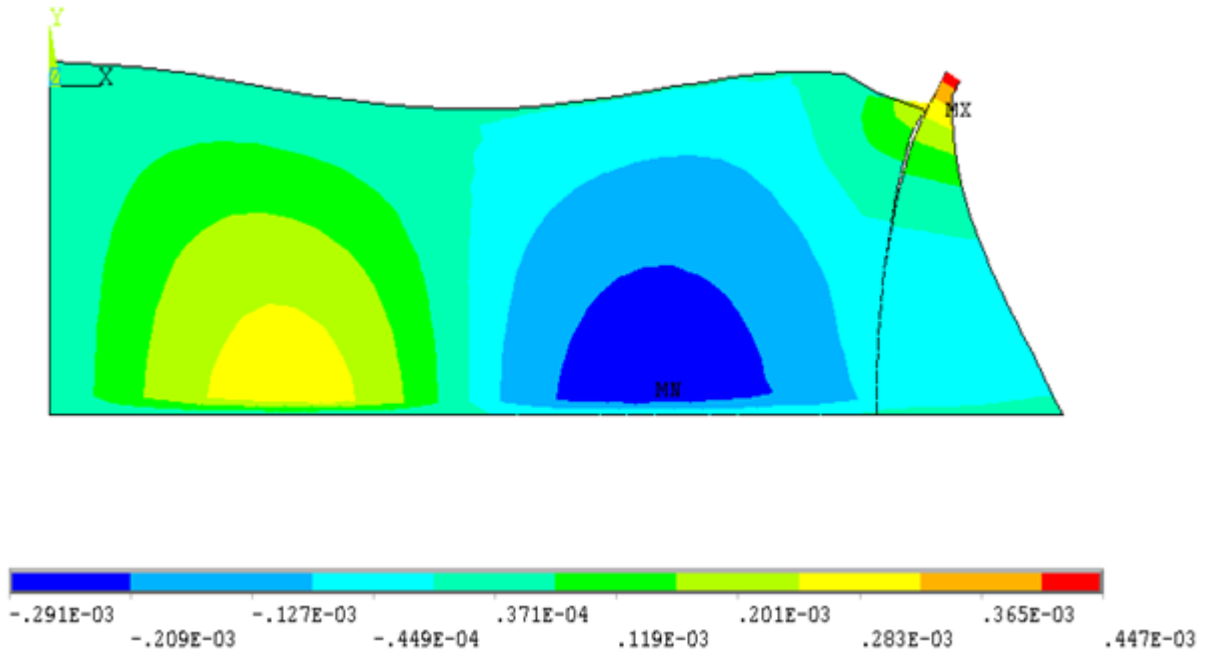


Figure IV.7 : Quatrième mode de vibration et la répartition des déplacements

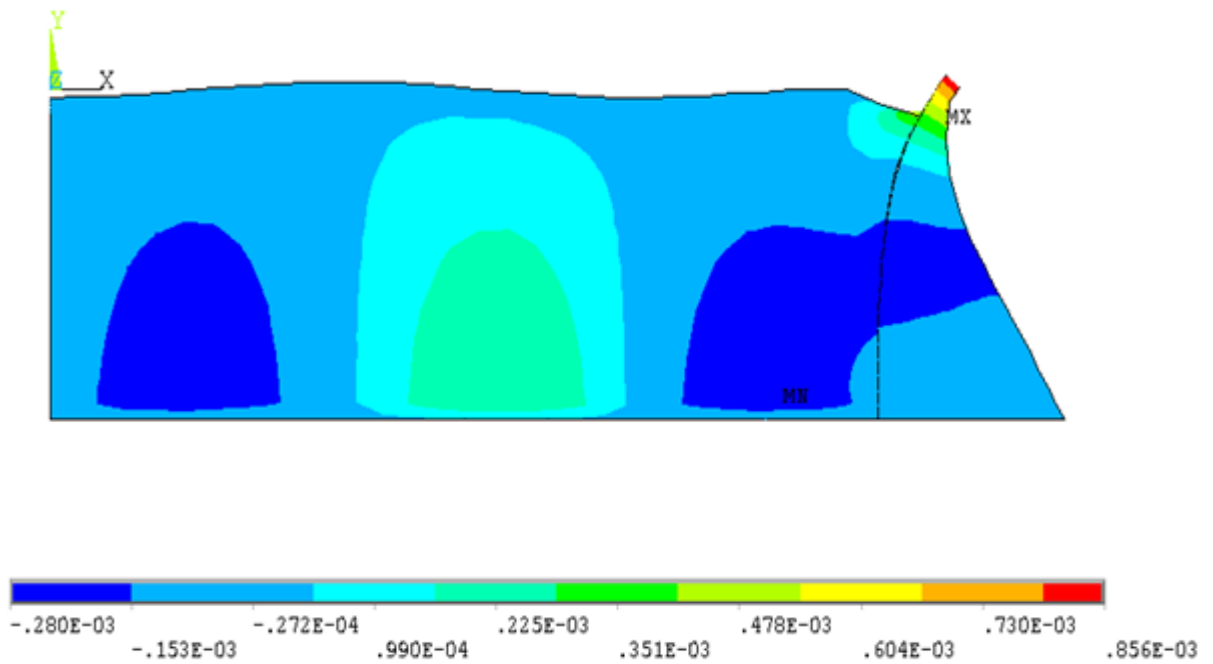


Figure IV.8 : Cinquième mode de vibration et la répartition des déplacements

IV.5.2 Analyse transitoire

La réponse sismique du barrage a été étudiée compte tenu du comportement linéaire d'interaction barrage-réservoir soumis aux accélérations du séisme de Boumerdes (2003) (figure IV.9). Une analyse transitoire en utilisant la méthode de Newmark est effectuée pour les trois modèles représentant le barrage-poids.

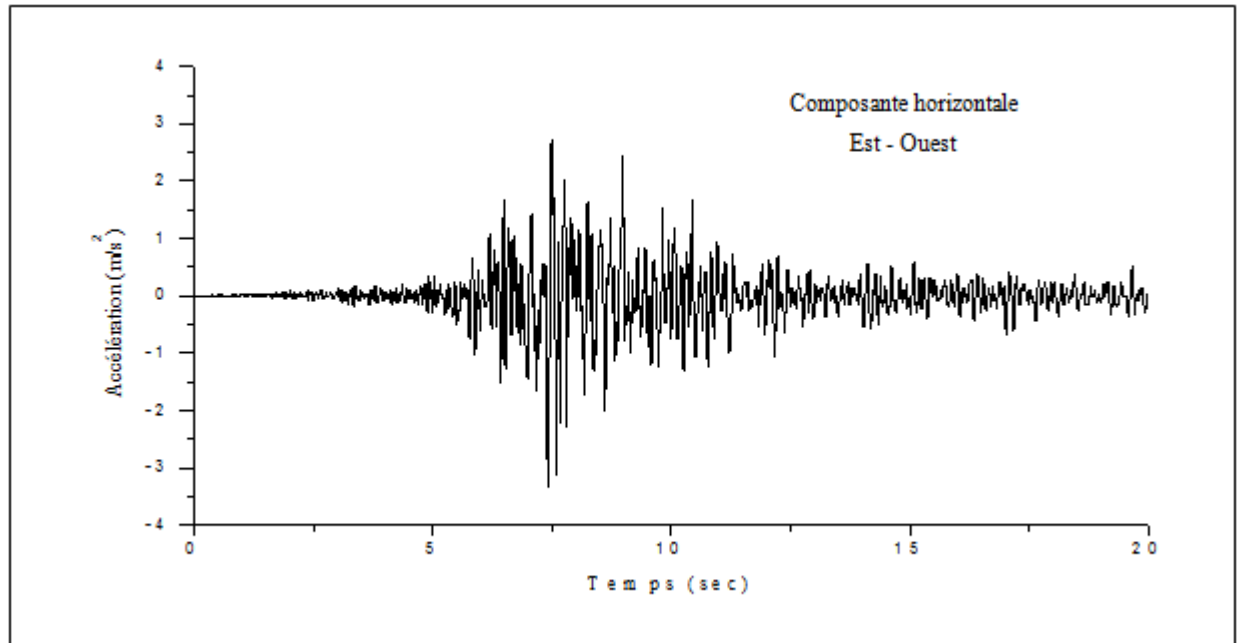


Figure IV.9 : Enregistrements du séisme de Boumerdes (2003)

IV.5.2.1 Variation des déplacements

La figure (IV.10) représente les déplacements en fonction du temps dans la direction horizontale à la crête du barrage.

La figure (IV.11) représente les contours des déplacements dans la direction horizontale du système barrage-réservoir. On remarque une déformation latérale importante dans le barrage en s'éloignant de la base du barrage, tel que le déplacement maximal est observé à la crête du barrage et atteint une valeur de $u_{\max} = 2.06$ cm.

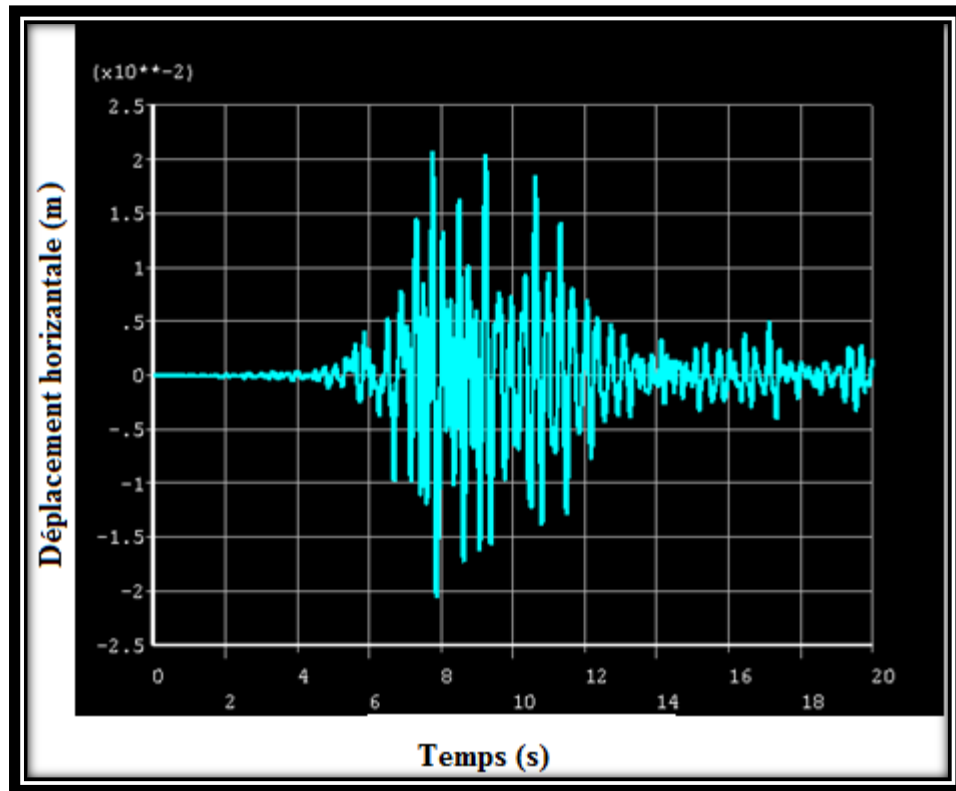


Figure IV.10 : Variation des déplacements horizontaux à la crête du barrage

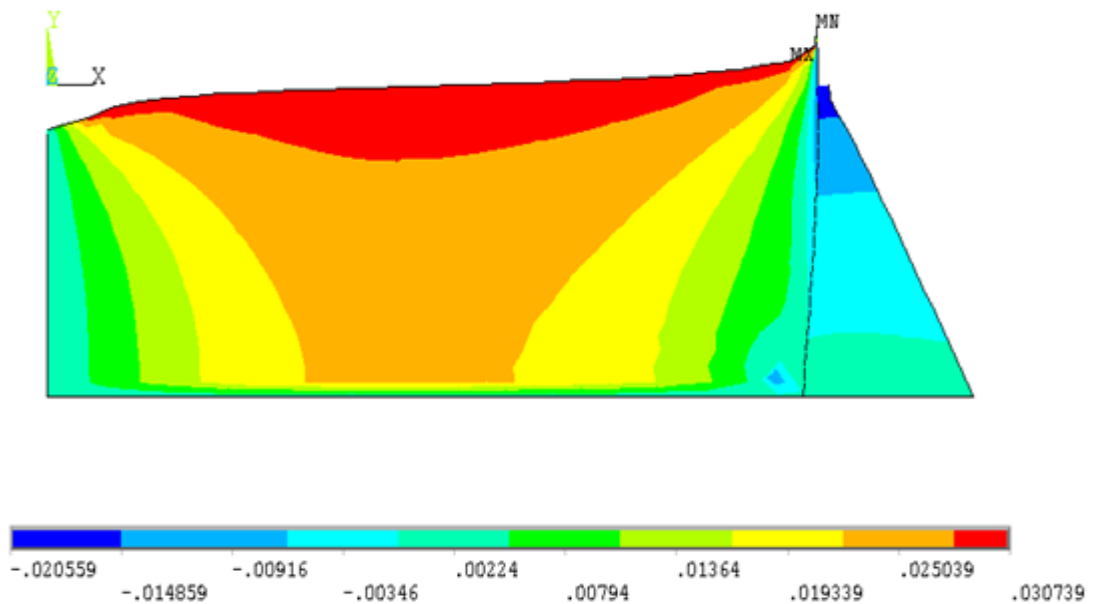


Figure IV.11 : Contours de déplacement (m) dans la direction horizontale du système barrage-réservoir

IV.5.2.2 Variation des contraintes

Les figures (IV.12) et (IV.13) montrent la variation des contraintes principales de traction en fonction du temps au pied et à la crête du barrage, respectivement. On constate que la contrainte principale maximale de traction au pied atteint de $2.613 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, tandis que, elle atteint de 131613 N/m^2 à la crête du barrage. Les contraintes principales de traction diminuent en s'éloignant de la base du barrage.

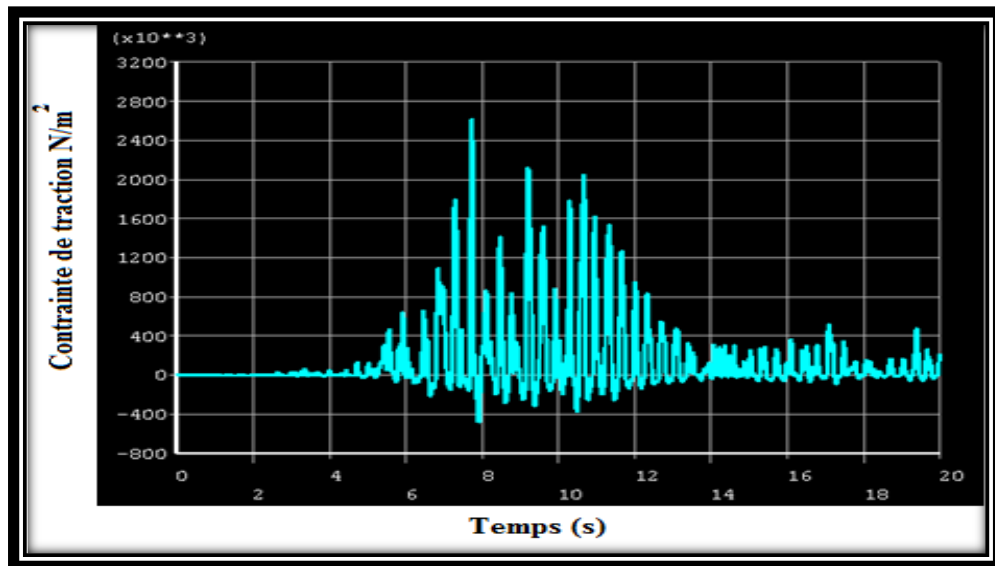


Figure IV.12 : Variation des contraintes de traction en fonction du temps au pied du barrage

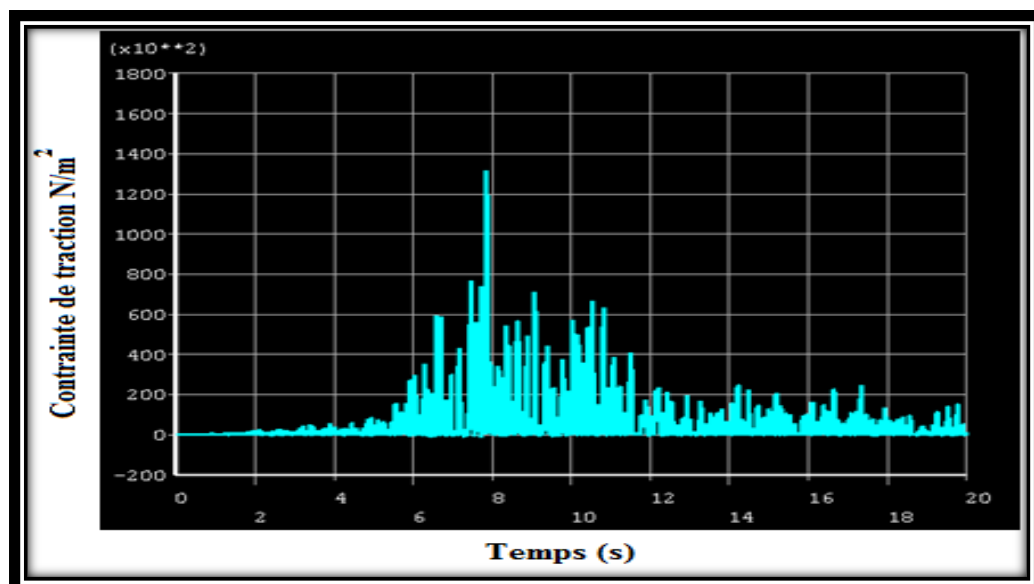


Figure IV.13 : Variation des contraintes de traction en fonction du temps à la crête du barrage

Les figures (IV.14) et (IV.15) montrent la variation des contraintes principales de compression en fonction du temps au pied et à la crête du barrage, respectivement. On constate que la contrainte principale maximale de traction au pied atteint de $-2.801 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, tandis que, elle atteint de -113812 N/m^2 à la crête du barrage. Les contraintes principales de compression diminuent en s'éloignant de la base du barrage.

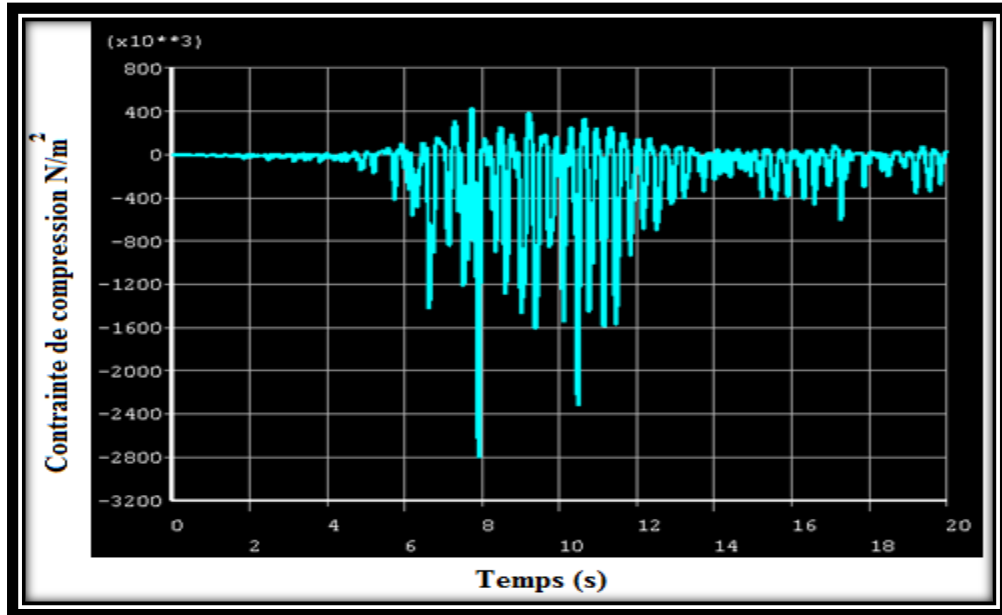


Figure IV.14 : Variation des contraintes de compression en fonction du temps au pied du barrage

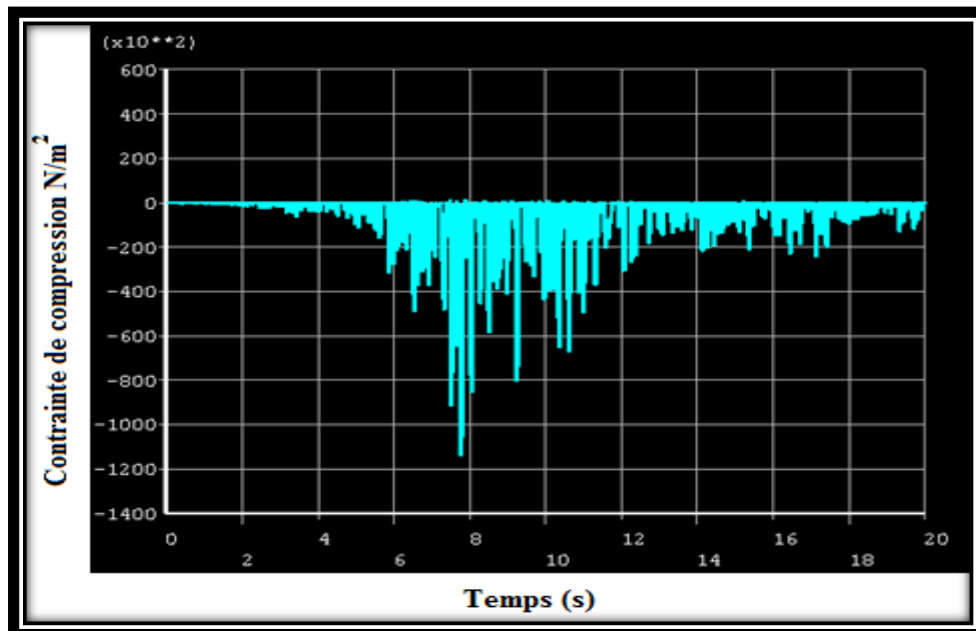


Figure IV.15 : Variation des contraintes de compression en fonction du temps à la crête du barrage

Les figures IV.16 et IV.17 montrent les contours des contraintes principales de traction et de compression du système barrage-réservoir, respectivement.

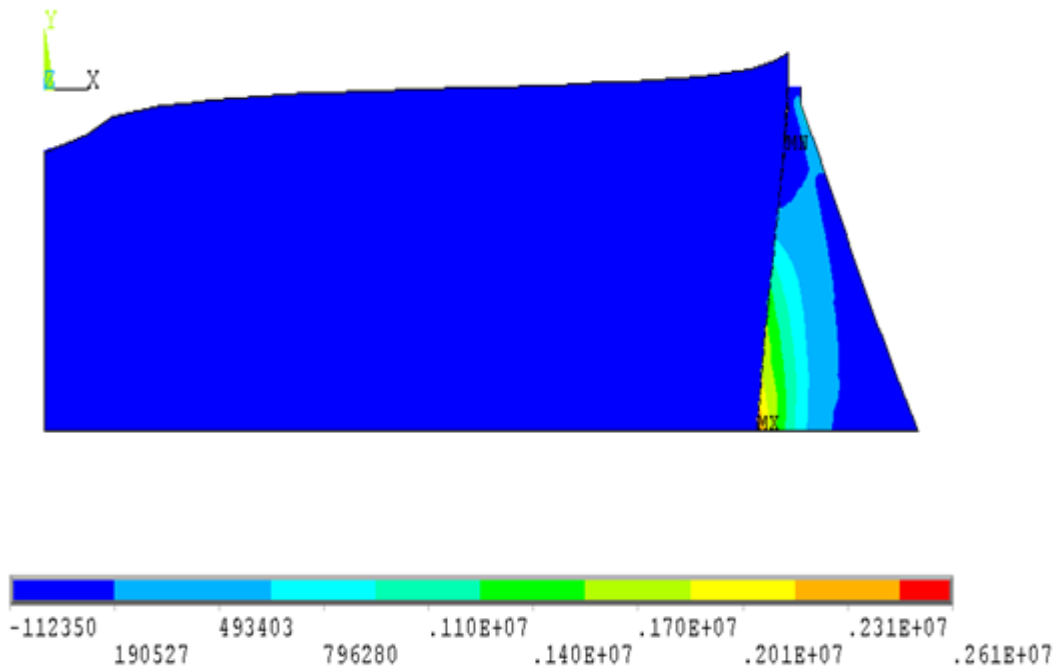


Figure IV.16 : Contours des contraintes principales de traction du système barrage-réservoir

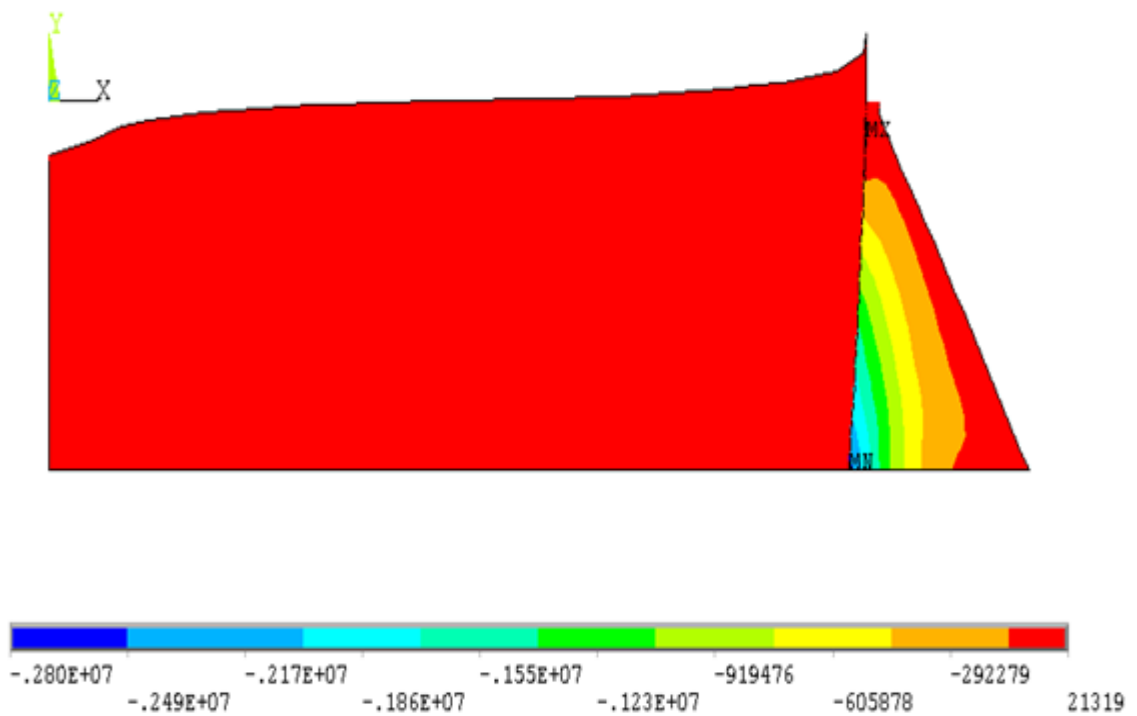


Figure IV.17 : Contours des contraintes principales de compression du système barrage-réservoir

IV.6 CONCLUSION

A partir des études réalisées dans ce chapitre on peut tirer comme conclusion les points suivants :

- Le barrage est très rigide cela est dû à la variation croissante (base vers crêtes) de la fréquence.
- Plus en s'éloignant de la base on remarque une déformation latérale importante dû au déplacement horizontal du système barrage-réservoir.
- Une diminution de la contrainte toute en s'approchant de la crête.

La pression exercée par l'eau sur le barrage provoque un déplacement important au niveau de la crête avec une faible contrainte à ce niveau.

Par contre en se rapprochant à la base du barrage on remarque une augmentation jusqu'à la valeur maximal de la contrainte.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a pour but d'apporter une contribution à l'étude de l'effet de l'interaction fluide-structure sur la réponse sismique et dynamique des ouvrages de génie civil, et plus spécifiquement les barrages poids en béton.

L'ouvrage étudié est modélisé en 2D par la méthode des éléments finis en utilisant le code de calcul ANSYS. Les excitations sismiques appliquées au barrage sont enregistrées durant le tremblement de terre de Boumerdes (2003).

En ce qui concerne le calcul numérique :

- L'interaction fluide-structure a pour effet principal d'allonger les périodes propres de vibration de la structure.
- La réponse sismique a montré que les déplacements ainsi que les contraintes et les pressions hydrodynamiques agissant sur la structure peuvent, être amplifiés.
- Les contraintes principales de traction et de compression sont importantes au pied du barrage, donc on peut s'attendre à apparaitre des fissures autour de ces parties qui peuvent provoquer des endommagements au barrage.

En perspective, nous suggérons, la prise en compte de l'effet du contact de frottement à l'interface barrage-réservoir sur la réponse dynamique des barrages-poids en béton.

Références

- ANSYS Theory user's manual. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA, USA (2009).
- A. Pecker. Dynamique des sols. Presses Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1984.
- Bendimerad. A. Z. (2011), Comportement des barrages en BCV et en BCR étude comparative, projet de fin d'étude, département de génie civil, faculté des sciences de l'ingénieur, université Abou bekr belkaid, Tlemcen, Algérie. p42-45.
- Bougacha, S. and Tassoulas, J. L. Seismic response of gravity dams. I: Modeling of sediments. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 117(8): 1826-1837, 1991.
- Bougacha, S. and Tassoulas, J. L. Seismic response of gravity dams. II: Effects of sediments. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 117(8): 1839-1850, 1991.
- B.Tiliouine, A. Seghir (1997). Influence de l'interaction fluide-structure sur le comportement sismique du barrage d'Oued-Fodda. CAM97, Damas, Syrie.
- Chopra, A. K. and Gupta, S. Hydrodynamic and foundation interaction effects in earthquake response of a concrete gravity dam. J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Eng., vol. 578, 1899-1412, 1981.
- Cours Barrage, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, 2006).
- Degoutte. G. (2002), Petits barrages : Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, cemagref édition, 173p.
- D Maity. A novel far-boundary condition for the finite element analysis of infinite reservoir. Applied Mathematics and Computation, 170 :1314–1328, 2005.
- Fenves, G. and Chopra, A. K. Effects of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation interaction of frequency response functions of concrete gravity dams. Earthquake Eng. Struct. Dyn. vol. 13, 13-31, 1985.
- Fenves, G. and Chopra, A. K. Reservoir bottom absorption effects in earthquake response of concrete gravity dams. Journal of Sound and Vibration, 111(3): 545-562, 1985.
- Fluid domains. Applied Mathematics and Computation, 163 :61–69, 2005.
- Foundation inhomogeneity. Front. Archit. Civ. Eng. China, 1(1) :41–50, 2007.
- G. Fenves and A. K. Chopra. Reservoir bottom absorption effects in earthquake response of concrete gravity dams. Journal of Sound and Vibration, 111(3) :545–562, 1985.
- G. Lin, J. DU, and Z. HU. Earthquake analysis of arch and gravity dams including the effects of Gogoi I. and Maity D. Influence of sediment layers on dynamic behavior of aged concrete dams. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 133(4) :400–413, 2007.
- Hall, J. F. and Chopra, A. K. Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn. vol. 10, 333-395, 1982.

J. Dominguez, R. Gallego, and B. Japon. Effects of porous sediments on seismic response of concrete gravity dams. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 123(4) :302–311, 1997.

J. F. Hall and A. K. Chopra. Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 10 :333–395, 1982.

L. Ramdani and A. Seghir. Etude de la reponse sismique des reservoirs de stockage rectangulaires. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(1) :33–52, 2009.

O.C. Zienkiewicz, D.W. Kelly, and P. Bettess. The Sommerfeld (radiation) condition on infinite domains and its modelling in numerical procedures. In *Computing Methods in Applied Sciences and Engineering I*, pages 169–203. Springer Berlin / Heidelberg, Palo Alto, CA, 1971.

Patrick, Le Delliou. *Les barrages : conception et maintenance*, PRESSES UNIVERSITAIRES DE AIRES DE LYON, 2007 86, rue Psteure – 69365 Lyon Codex 07, 2007, 261p.

Rouissat. B. (2009/2010), Cours de barrage, 4ème année génie civil, département de génie civil, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.

S. Bougacha and J. L. Tassoulas. Seismic response of gravity dams. I : Modeling of sediments. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 117(8) :1826–1837, 1991.

Schleiss. A. J. & Pougatsch. H (2011), Les barrages, du projet à la mise en service, Presses polytechniques et universitaire romandes, lausanne, Vol 17.

S.E. Moussaoui and B. Tiliouine. Etude de l'effet de l'interaction dynamique sur le comportement sismique du barrage de l'Oued Fodda. In *Colloque International sur la vulnérabilité*, 11–12 Octobre 2003, Alger, Algérie, 2003.

S. Kőçőkaslan, S.B. Coskun, B. Taskin (2005). Transient analysis of dam-reservoir interaction including the reservoir bottom effects. *Journal of fluid and structure* 20 ,1073-1084.

S. Kucukarslan. An exact truncation boundary condition for incompressible-unbounded infinite. S. Prakash. *Soil dynamics*. McGraw-Hill, 1981.

Westergaard, H.M. Water pressures on dams during earthquake. *Trans. ASCE* 98, 418-433 (1933).

Zienkiewicz, O.C. and Newton, R.E. Coupled vibrations of a structure submerged in a compressible fluid. In *Int. Sym. Finite Element Techniques*, 1st-15th May 1969.

Zienkiewicz, O.C., Kelly, D.W. and Bettess, P. The Sommerfeld (radiation) condition on infinite domains and its modelling in numerical procedures. In *Computing Methods in Applied Sciences and Engineering I*, pages 169-203. Springer Berlin / Heidelberg, Palo Alto, CA, 1971.

<http://www.futura-sciences.com/planete/photos/geologie-plus-grands-barrages-monde-15-photos-1401/geologie-barrage-pine-flat-son-lac-plus-grands-reservoirs-californie-10144/>

<http://www.mementodumaire.net/risques-technologiques/rt-4-rupture-de-barrage/#top>

Résumé:

La prévision de la réponse dynamique d'un barrage-poids en béton constitue un défi important. Ceci dépend de son interaction avec le réservoir d'eau. L'objectif de ce travail est de présenter la réponse dynamique des barrages-poids en béton compte tenu de l'interaction fluide-structure. Le barrage-poids de Oued Fodda, situé dans la Wilaya de Chlef au Nord-Ouest de l'Algérie est investigué dans la présente étude. Un modèle à deux dimensions en utilisant le Code ANSYS est créé pour modéliser le corps du barrage et le réservoir d'eau. Les analyses dynamiques du système barrage-réservoir montrent que la pression hydrodynamique du réservoir augmente les déplacements et les contraintes dans le corps du barrage.

Mots clés: Barrages-poids en béton, interaction fluide-structure, réponse dynamique, méthode des éléments finis, ANSYS

Abstract:

Predicting the dynamic response of a concrete weir is an important challenge. This depends on its interaction with the water tank. The aim of this work is to present the dynamic response of concrete dams to the fluid-structure interaction. The Oued Fodda dam, located in the Wilaya of Chlef in the northwest of Algeria, is investigated in this study. A two-dimensional model using the ANSYS Code is created to model the body of the dam and the water tank. Dynamic analyzes of the dam-reservoir system show that the hydrodynamic pressure of the reservoir increases displacements and stresses in the dam body.

Keywords: Concrete Dams, fluid-structure interaction, dynamic response, finite element method, ANSYS

ملخص:

التنبؤ بالاستجابة الديناميكية لسد خطورة ملموسة تمثل تحديا كبيرا. هذا يعتمد على تفاعلها مع خزان المياه. والهدف من هذا العمل هو تقديم الاستجابة الديناميكية لسدود نظرا للخطورة الملموسة للتفاعل السائل-هيكل. ويجري التحقيق في هذه الدراسة على سد وادي الفضة الواقعة في ولاية الشلف شمال غرب الجزائر. يتم إنشاء نموذج ثنائي الأبعاد لتصميم نظام السد وخزان المياه باستخدام برنامج ANSYS.

التحليل الديناميكي للنظام سد المكنم تبين أن الضغط الهيدروديناميكية لنظام سد خزان يزيد من التشنج وتشدد في الجسم السد

الكلمات المفتاحية:

ANSYS, السدود الجاذبية مصنوعة من الخرسانة المسلحة، تفاعل السائل هيكل، الاستجابة الديناميكية، طريقة العناصر المحدودة.