

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

YATOUDJI FATIHA & ABD ELKEBIR AHLAM

Thème

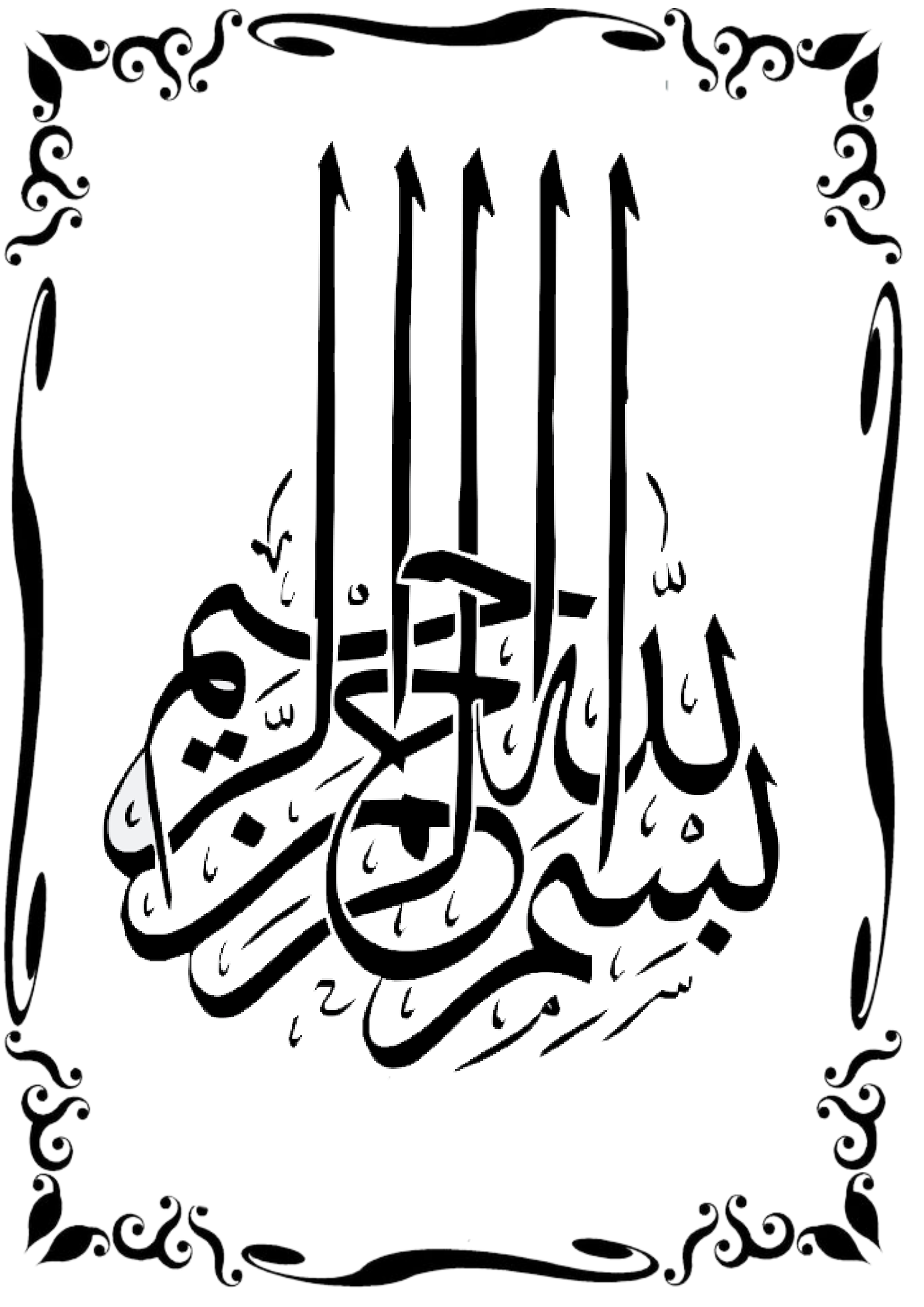
ÉTUDE DU COMPORTEMENT MODAL D'UN BARRAGE- POIDS EN BETON

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité	Université
M. Siline Mohammed	Prof	Président	Université de Msila
M. Ouzandja DJamel	MCA	Encadreur	Université de Msila
M. Hamitouche Ammar	Prof	Examineur	Université de Msila

Année Universitaire : 2022 / 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





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 *contribués 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.



Dédicaces

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce
modeste travail :

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère
A celui qui a fait de moi une femme, cher père
A mon frère et ses enfants Ahmed, Aridj et Nidal.
A mes soeurs et leurs enfants, Al-Moatasem Billah
et Iyad,

Et à mon cher Prince

Et tous les membres de ma famille

À tous mes amis de promotion de 2^{ème} année
master structure en génie civil

Toute personne *qui occupe une place dans mon cœur*

À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la
science et à tous ceux qui utilisent la science pour le
bien et la prospérité de l'humanité.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicaces	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	I
Chapitre I : Généralités sur les barrages.....	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition.....	2
I.3. Historique des barrages.....	3
I.4. Les Différents Types de Barrages.....	4
I.4.1. Barrages en béton.....	4
a. Barrage poids.....	4
b. Barrages-voûtes.....	5
c. Barrages à contreforts ou multi-voûtes.....	7
d. Barrage en BCR.....	8
I.4.2. Barrages en remblais.....	8
A- Barrages en terre homogènes.....	9
B- Les Barrages à masque amont.....	9
C- Les Barrages zonés avec un noyau.....	10
I.4.3. Barrages mobiles.....	11
A-Barrage mobile à aiguille.....	11
B-Barrage mobile à battant.....	12
C- Barrage mobile à gravité.....	13
D- Barrage mobile à clapets.....	13
I.5. Les Exemples de Grands barrages dans le monde.....	13
I.6. L'utilisation des barrages.....	14
I.7. Classification des Barrages.....	14
I.7.1. Matériaux de construction.....	14
I.7.2. Résistant à l'eau.....	14
I.8. Choix du Site du Barrage.....	14
I.9. Avantages et Particularités en Béton.....	15

I.9.1. Barrages poids.....	15
A-Avantage.....	15
B-Particularités	15
I.9.2. Barrages Voûtes.....	16
A-Avantage.....	16
B- Inconvénients	16
I.9.3. Barrages à contrefort ou multi-voûtes	16
A-Avantages	16
B- Inconvénients	16
I.10. Conclusion	17
Chapitre II : Interaction sol-structure	18
II.1. Introduction.....	18
II.2. Etudes intérieur sur l'interaction sol-structure.....	18
II.3. Définition du phénomène d'interaction sol-structure.....	20
II.4. Interaction cinématique et interaction inertielle.....	21
II.5. Formulation du phénomène d'interaction sol-structure	22
II.5.1. Méthode directe (méthode globale).....	22
II.5.2. Méthode indirecte.....	24
II.6. Les composants d'interaction sol-structure.....	26
II.6.1. Force d'interaction inertielle	27
II.6.2. Force d'interaction cinématique.....	27
II.7. Conclusion	27
Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis	28
III.1. Introduction.....	28
III.2. Etat de contraintes-déformations.....	28
III.2.1. Etat de contraintes-déformations dans le cas élastique.....	28
III.2.2. État de contraintes-déformations dans le cas élastoplastique	30
III.3 Application de la méthode des éléments finis	32
III.3.1 Modélisation.....	32
A- Modélisation du système barrage-fondation.....	32
B- Choix de type d'élément	32
C-Conditions aux frontières	32
III.3.2. Analyse dynamique.....	32

A-Formulation générale des équations de mouvement par la méthode des éléments finis :	32
B-Caractéristiques des éléments (matrices élémentaires).....	33
C- Caractéristiques dynamique du système.....	34
III.3.3. Résolution de problème.....	36
A- Méthodes d'intégration directe	36
B- Le cas linéaire	37
III.3.4. Méthode de Newmark.....	37
Chapitre IV : Application numérique	39
IV.1. Introduction	39
IV.2. Présentation de l'ouvrage	39
IV.3. Profil Type du barrage.....	41
IV.4. Modélisation du système barrage (Koyna)-fondation par éléments finis.....	42
IV.4.1 : Génération du maillage	43
A- modèle1 :système du barrage koyna seul	43
B- modèle 2 : système barrage-fondation.....	44
IV.5. Analyse modale.....	44
IV.5.1. Résultats du cas 1 : le modèle du barrage koyna seul.....	45
IV.5.2. Résultats du cas 2 : le modèle du système barrage-fondation.....	48
IV.6. Conclusion	53
Conclusion générale.....	54
Liste des références	55
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1: Le barrage poids de Pine Flat	5
Figure I.2: Barrage poids.....	5
Figure I.3: Barrage voute.....	6
Figure I.4: Barrage Hoover (états –unis).....	6
Figure I.5: barrage multi-voûte.....	7
Figure I.6: le barrage Daniel-Johnsonau Québec,Canada.....	7
Figure I.7: Barrage en BCR.....	8
Figure I.8: Barrage de Tabellout Jijel-Algérie	8
Figure I.9: Barrages en terre homogènes.....	9
Figure I.10: Barrages à masque amont	10
Figure I.11: Barrages zonés avec un noyau.....	11
Figure I.12: Barrage mobile à aiguille	12
Figure I.13: Barrage mobile à battant	12
Figure I.14: Barrage mobile à clapets.....	13
Figure II-1 : Définition du phénomène d'interaction sol-structure (Emilio rosenbluenth 1980)	20
Figure II. 2 : Effets de l'interaction sol-structure	21
Figure II.3: Représentation schématique d'un calcul d'interaction sol-structure méthode globale	23
Figure II. 4 : Schématisation des sous structures.....	24
Figure II. 5 : Théorème de superposition (WOLF).....	25
Figure II. 6 : Décomposition du problème d'interaction sol-structure (KAUSEL).....	26
Figure III.1 : Conditions de déformation plane (exemple d'un barrage en béton).....	29
Figure III.2 : Représentation des contraintes sur un petit élément dans le cas des déformations planes.....	30
Figure III.3 : Comportement plastique uni axial	31
Figure IV.1: Station GPS Barrage de Koyna , Western Maharashtra , Inde.....	40
Figure IV.2: Barrage de Koyna , Western Maharashtra , Inde	41
Figure IV.3: Géométrie du barrage (Koyna)-fondation	41
Figure IV.4 : schéma de l'élément PLANE182.....	42
Figure IV.5: Modèle d'éléments finis du Barrage Koyna seul.....	43
Figure IV.6 : Modèle d'éléments finis du système barrage-fondation.	44
Figure IV.7 : Premier Mode du barrage Koyna seul	46

Figure IV.8 : Deuxième Mode du barrage Koyna seul	46
Figure IV.9 : Troisième Mode du barrage Koyna seul.....	47
Figure IV.10 : Quatrième Mode du barrage Koyna seul.....	47
Figure IV.11 : Cinquième Mode du barrage Koyna seul.....	48
Figure IV.12 : Premier Mode du système barrage-fondation.....	49
Figure IV.13 : Deuxième Mode du système barrage-fondation.....	49
Figure IV.14 : Troisième Mode du système barrage-fondation.....	50
Figure IV.15 : Quatrième Mode du système barrage-fondation.	50
Figure IV.16 : Cinquième Mode du système barrage-fondation.....	51
Figure IV.17 : Les 10 fréquences du barrage vide (sans et avec interaction sol-structure)	52

Liste des tableaux

Tableau IV.1: Propriétés de corps de barrage et sol de fondation.....	42
Tableau IV.2 : Valeurs de fréquences et périodes du barrage de Koyna	45
Tableau IV.3 : Valeurs de fréquences et périodes du système barrage - fondation.....	48
Tableau IV.4 : Le rapport entre les deux fréquences du barrage vide (sans et avec interaction sol-structure).....	51



***Introduction
générale***

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 modal des barrages en vue de l'évaluation de leur performance et de leur sécurité sous l'action des séismes.

Au fil du temps, la technologie des barrages a bien sûr évolué et de grands progrès ont été réalisés concernant, entre autres, la méthode de mise en œuvre et la sécurité. Ainsi, le nombre et la hauteur des ouvrages de soutènement n'ont cessé d'augmenter.

L'étude du comportement modal des barrages est importante pour connaître les caractéristiques dynamiques de la structure.

Un séisme (magnitude onde de surface 6,5) a eu lieu le 11 Décembre, 1967 près du barrage de Koyna dans une région de l'Inde qui a été considérée comme stable et presque non sismique. La relation entre l'augmentation récente du nombre d'occurrences des tremblements de terre dans les environs du barrage de Koyna et le remplissage du réservoir derrière le barrage a suscité une réflexion. La réponse du barrage au mouvement fort enregistré pendant le tremblement de terre Koyna a été analysé par la méthode des éléments finis (ANSYS), y compris les effets dynamiques du réservoir.

Ce qui fait de ce barrage une référence pour l'étude du comportement modal.

Le travail présent à pour objet d'étudier la réponse dynamique des barrages poids en béton compte tenu de l'interaction sol-structure.

La méthode des éléments finis est l'outil le plus puissant actuellement disponible pour l'analyse approfondie des systèmes sol-structure. L'analyse modal ont été réalisées à l'aide du programme ANSYS version 15.

Le présent mémoire se compose de certains chapitres complémentaires les uns aux autres, on commence tout d'abord par des généralités sur les différents types des barrages et on s'attardera sur les barrages en béton. On passe ensuite au phénomène d'interaction sol-structure.

Le troisième chapitre concerne la modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis.

Le dernier chapitre comporte une application numérique, et une présentation des résultats des analyses effectuées du comportement modal du barrage étudié. Finalement, nous terminerons ce travail par une conclusion.



Chapitre I
Généralités sur les
barrages

Chapitre I : Généralités sur les barrages

I.1. Introduction :

A travers les âges et dans toutes les civilisations, l'homme a cherché à capter l'eau par la dérivation et les canaux pour la conserver, l'utiliser ou s'en protéger lors des crues. Avec le tourisme et le développement des infrastructures hydroélectriques, celles qui ont radicalement changé le paysage, depuis le début du XXe siècle, ces deux phénomènes ont souvent évolué ensemble. Pour comprendre à quel point cette relation est née, il convient de présenter ici la séparation des barrages sur le plan technique, social et économique.

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.

Là où la principale raison de construire des barrages est de stocker une grande quantité d'eau afin qu'elle soit disponible en cas de besoin.

I.2. Définition :

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à réguler le débit ou le stockage de l'eau, notamment pour la lutte contre les crues, l'irrigation, l'industrie, l'énergie hydroélectrique, la pisciculture, les stocks d'eau potable, etc.

Les barrages, par définition, sont des ouvrages hydrauliques qui bloquent toute la largeur d'un tronçon de vallée, créant ainsi un bassin artificiel géologiquement fermé. En général, et dans la plupart des cas, la hauteur du barrage dépasse le niveau d'eau atteint par le fleuve lors de crues importantes.

Fondamentalement, les barrages ont deux effets distincts :

- La rétention d'eau résultant de l'existence d'un barrage contient souvent une grande partie des flux d'eau directs ou dérivés, ainsi que des matériaux transportés, de la glace ou de la neige.

Chapitre I : Généralités sur les barrages

- Le barrage élève le niveau du plan d'eau en amont.

Les barrages sont généralement utilisés pour retenir l'eau, tandis que d'autres structures sont utilisées pour empêcher l'écoulement de l'eau dans certaines zones du sol.

Là où il existe de nombreux types de barrages que l'on peut classer en différentes catégories selon les matériaux de construction et selon le mode d'étanchéité, on distingue :

- ❖ Les barrages poids en béton, ou en BCR.
- ❖ Barrages voûtes.
- ❖ Prise de voûte de poids.
- ❖ Un barrage à multiples contreforts ou voûtes.
- ❖ Remplissage des barrages Les barrages doivent être placés dans des bassins géologiquement étanches.

Il s'agit d'un corps spécialement conçu pour chaque type d'ouvrage, reposant sur une fondation étanche ou constituée d'eau dans le sens du courant.

Le barrage en béton est découpé en plusieurs bandes verticales appelées plots. Des ouvrages annexes y sont raccordés, tels que des voies navigables, des prises d'eau, des turbines, des descentes d'eau, etc. 15 m, longueur de pointe inférieure à 500 m et volume d'eau stocké inférieur à 1 million de mètres cubes. Ces paramètres sont relativement importants en raison des procédures administratives complexes souvent associées à la construction.

Le barrage est aussi un ouvrage artificiel qui croise un cours d'eau et sert soit à assurer la régulation, soit à alimenter les villes, soit à produire de l'énergie.

I.3. Historique des barrages :

Au fil du temps, l'homme a cherché à disposer de réserves d'eau non seulement pour subvenir à ses besoins vitaux et économiques, mais aussi pour se protéger des inondations et de l'érosion. Eau potable et irrigation.

Des barrages existaient probablement depuis la préhistoire notamment en Egypte (eau potable, irrigation, bassins piscicoles, piscicultures) mais au Moyen-Age ils se sont fortement développés en Europe pour alimenter les moulins à eau.

Gardez des reliques, des cartes anciennes, de Cassini par exemple, témoignent de nombreux barrages sur de petites rivières réalisés par des paysans locaux ou des moines, pour conserver l'eau et élever des poissons ou pour casser du lin ou du chanvre. En conservant des volumes d'eau et en maintenant des niveaux d'eau élevés en saison sèche, ces barrages parviennent également à parer aux fluctuations estivales des nappes phréatiques (toutes choses égales par ailleurs, c'est le niveau d'eau qui contrôle le taux d'infiltration, loi de d'arcy).

- ❖ Vers 3000 av. J.-C. : à Wadi Al-Qarawiyyin, Égypte.
- ❖ En l'an 560 : l'historien byzantin Procope de Césarée mentionne le barrage voûté à la source dans l'édifice (DARAS).

Chapitre I : Généralités sur les barrages

- ❖ Les Romains l'ont construit notamment en Espagne, dans la région de Mérida.
- ❖ Au Moyen Âge, elle se développe fortement en Europe, notamment pour faire fonctionner des moulins à eau.
- ❖ Dans les années 1667 et 1675, en France, le barrage de Saint-Friol.
- ❖ Au cours du XXe siècle, 800 000 barrages ont été construits, dont 52 000 sont de grands barrages.

Selon la Commission Internationale des Grands Barrages (C.I.G.B), les grands barrages sont ceux dont la hauteur ou la capacité dépasse trois HM3.

A ce jour, le nombre de grands barrages dans le monde est estimé à 50 000, dont 80 % ont été mis en place après 1950, et il existe aussi des millions de petits barrages.

Les barrages mondiaux stockent environ 6 000 milliards de mètres cubes. La technologie de construction de barrages est apparue il y a 5000 ans dans ce qu'on appelle le Croissant fertile avant son expansion dans le bassin méditerranéen et dans le monde.

Les historiens voient que de nombreux centres de cette innovation sont apparus dans différentes parties du monde sans aucun lien entre eux.

I.4. Les Différents Types de Barrages :

Les barrages peuvent être classés en 3 grands types :

- Barrages en béton.
- Barrages en remblais.
- Barrages en mobiles.

I.4.1. Barrages en béton :

Les barrages en béton sont des ouvrages dont les principales fonctions sont de retenir l'eau et de produire de l'électricité. Ils sont également constitués d'un matériau qui supporte mal les contraintes de traction. Les barrages utilisent différentes techniques selon leur emplacement et la nécessité de retenir et de produire de l'électricité. Il existe principalement 4 types de barrages en béton :

- Barrage poids.
- Barrages voûtes.
- Barrages à contreforts ou multi-voûtes.
- Barrages en BCR.

a. Barrage 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. Bien que les barrages voûtes ou à contreforts nécessitent moins de matériaux que les barrages-poids, ces derniers sont encore largement utilisés aujourd'hui.

Là où la technologie des barrages-poids s'est développée jusqu'au début du XXe siècle (1920-1930), les barrages-poids ont été construits à partir d'ouvrages de maçonnerie, et plus tard le béton traditionnel s'est imposé. Depuis 1978, une nouvelle technologie a remplacé le béton traditionnel : le béton compacté au rouleau est un béton granulaire et non liquide.

Chapitre I : Généralités sur les barrages

Il se met en place comme un remblai avec des engins de terrassement, et présente l'avantage majeur d'être beaucoup moins coûteux qu'un béton classique.



Figure I.1: Le barrage poids de Pine Flat

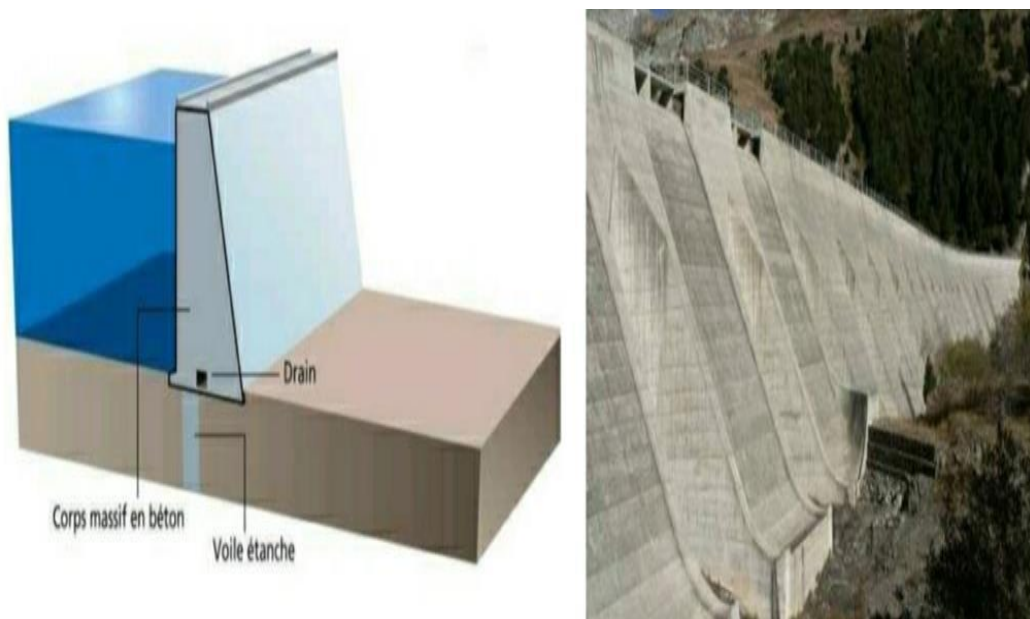


Figure I.2: Barrage poids

b. Barrages-voûtes :

Les barrages-voûtes sont rarement utilisés pour les réservoirs bas, car la force de l'eau est transférée sur les côtés de la vallée au moyen d'un mur en béton voûté horizontalement, et parfois verticalement. Ce sont des barrages construits avec du béton à haute résistance pour assurer qu'ils peuvent résister à la pression de l'eau. La technique du barrage-voûte nécessite une vallée assez étroite et un bon socle rocheux, c'est évidemment une technique très satisfaisante d'un point de vue économique.

Chapitre I : Généralités sur les barrages

Le choix d'un barrage-voûte est donc à réserver à des situations géomorphologiques bien particulières. Cependant, lorsqu'elles sont réunies, c'est une solution qui peut être économiquement viable en regard des quantités de matériaux nécessaires à la réalisation d'un ouvrage poids.

Le registre mondial des barrages indique environ 1200 barrages-voûtes en service dans le monde. Le plus hauteur barrages-voûte de ce type est celui d'Inguri en Géorgie 272 m de hauteur suivi par le barrage italien du Vajont.

Il existe également des barrages à plusieurs arches, comme le barrage de Hongren en Suisse.

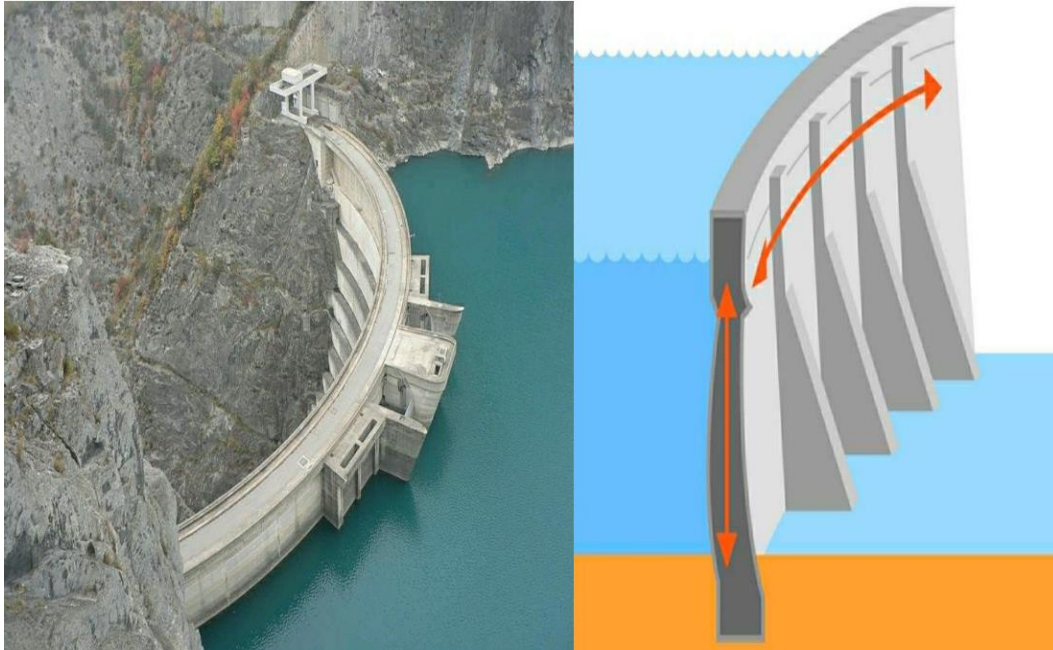


Figure I.3: Barrage voûte.



Figure I.4: Barrage Hoover (états –unis).

C. Barrages à contreforts ou multi-voûtes :

Le mur en béton plat ou à voûtes multiples est centré sur des culées en béton armé encastrées dans la fondation, qui supportent la force de l'eau poussant dans les fondations inférieures et les berges lorsque les culées sont trop éloignées, ou lorsque le matériau local est tellement compacté que l'extraction est quasiment impossible.

La technique du barrage à contreforts permet de construire un barrage avec des économies importantes de matériaux et c'est un barrage lourd qui allège l'intérieur (l'un des exemples les plus importants est le barrage Daniel Johnson en Québec, Canada 12/06/2011).

Le barrage à contreforts est également constitué d'un matériau hydrofuge et est fixé sur ses côtés par une série de contreforts.

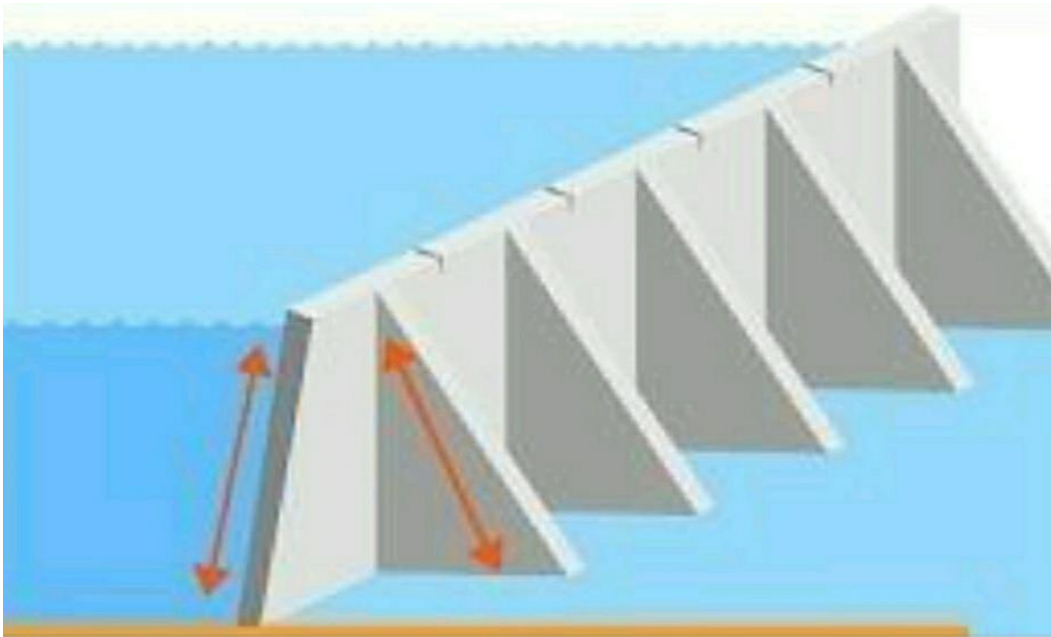


Figure I.5: barrage multi-voûte.

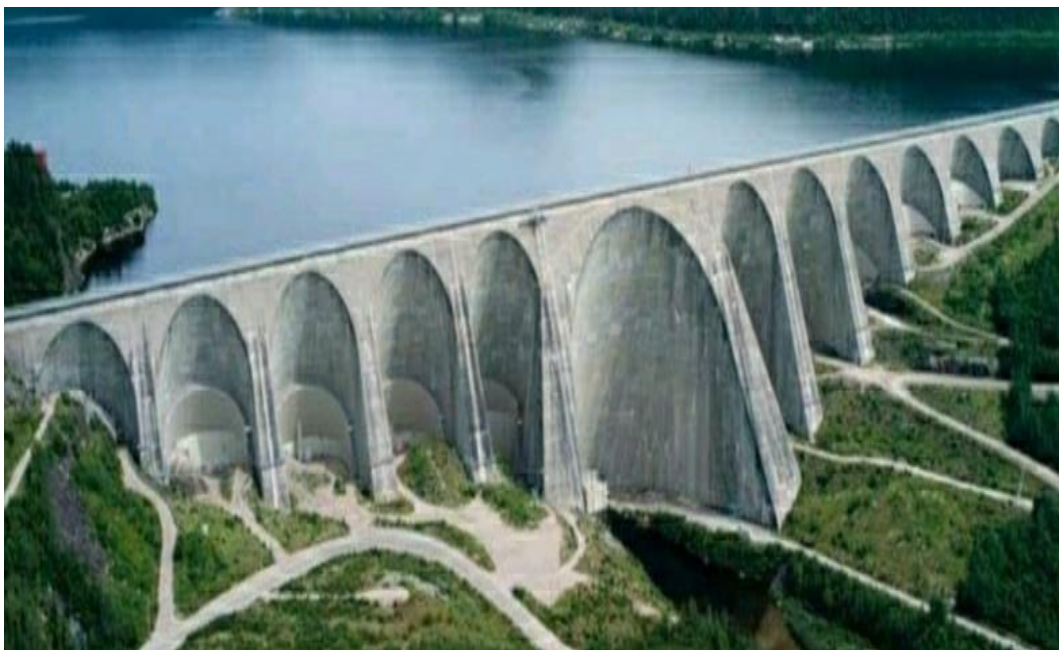


Figure I.6: le barrage Daniel-Johnson au Québec, Canada.

D-Barrage en BCR :

Les plus récents sont en béton comprimé (BCR), le barrage a été construit par couches successives qui ont été posées par des engins de terrassement et compactées avant de passer à la couche suivante, ainsi les barrages sont construits très rapidement.



Figure I.7: Barrage en BCR.

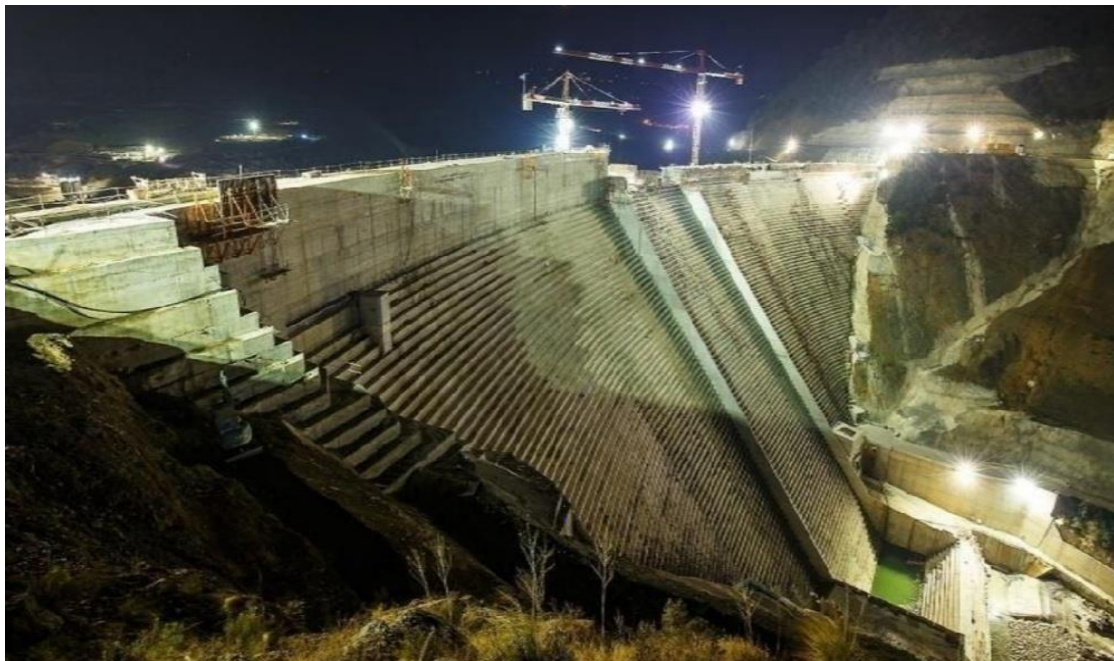


Figure I.8: Barrage de Tabellout Jijel-Algérie.

I.4.2. Barrages en remblais :

Les barrages en terre peuvent être constitués des matériaux de caractéristiques divers, à la différence des barrages en béton ou même en enrochement dont les matériaux constitutifs restent contenus dans des fourchettes beaucoup plus étroites. Tout ingénieur étudiant et projetant un barrage doit adopter la solution la plus économique Résolvant le problème posé.

Chapitre I : Généralités sur les barrages

Une solution, et parfois même la seule solution, est la construction de la digue à partir de matériaux se trouvant dans le site du barrage projeté.

D'une manière générale si l'on dispose sur place et en quantité suffisante de matériaux terreux permettant d'obtenir après compactage des conditions d'étanchéité et de stabilité satisfaisantes. Ainsi le type de barrage le plus facile à réaliser est le barrage homogène.

Où il existe 3 types de barrages :

- Barrages en terre homogène.
- Les barrages à masque amont.
- Les barrages zonés avec un noyau.

A- Barrages en terre homogènes :

Les barrages en terre homogènes sont des barrières de barrage constituées de digues simples, construites entièrement d'un seul matériau, qui est souvent de l'argile. Ce matériau doit avoir des propriétés permettant d'assurer la résistance à l'eau et au sol en général. Le sol est également mis en place par compactage. Néanmoins ce type de barrage est surtout adopté pour la réalisation de retenues collinaires et de petits barrages.

Ce type de barrage est bien adapté aux sites dont la fondation est déformée.

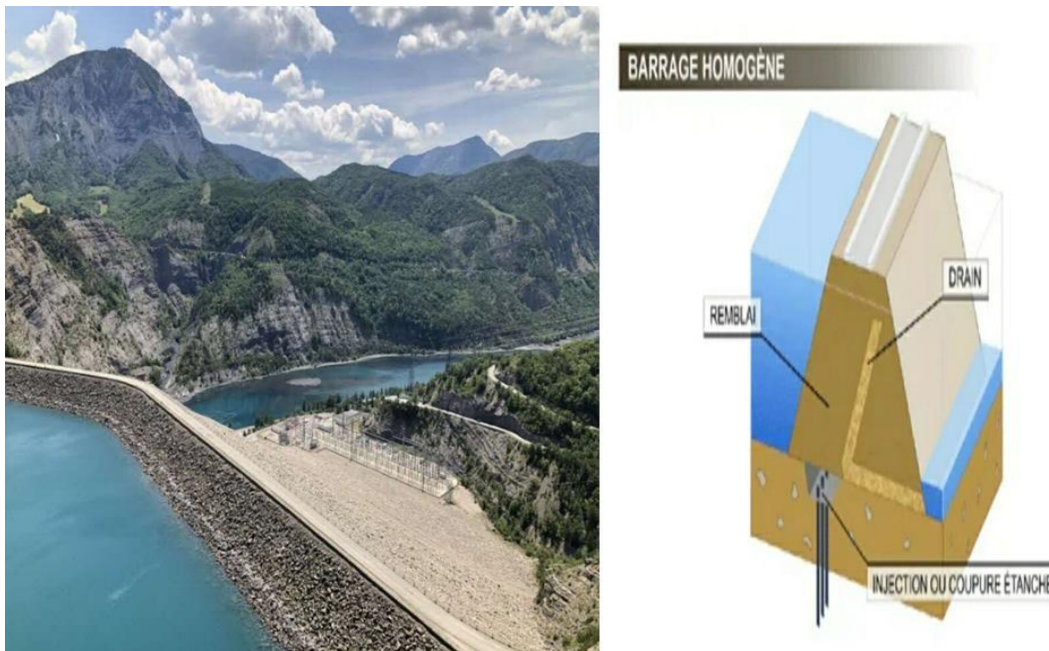


Figure I.9: Barrages en terre homogènes.

B- Les Barrages à masque amont :

Ce sont des barrages en pierre trouvés dans des endroits où le sol n'est pas disponible mais uniquement des roches, puis ils sont utilisés pour fabriquer le corps du barrage tandis que le joint est sécurisé avec un masque en béton. Les barrages étanches étant constitués de remblais plus ou moins perméables pour assurer la stabilité générale, un écran imperméable appelé masque est placé sur le front amont pour rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau dans la retenue.

Chapitre I : Généralités sur les barrages

Le masque qui assure l'étanchéité peut être en béton, ou en géomembrane. La présence de ce masque sur le parement amont présente un double avantage de pouvoir faire des réparations en cas de dégradation du masque et de permettre de faire des vidanges rapides sans risque de glissement.

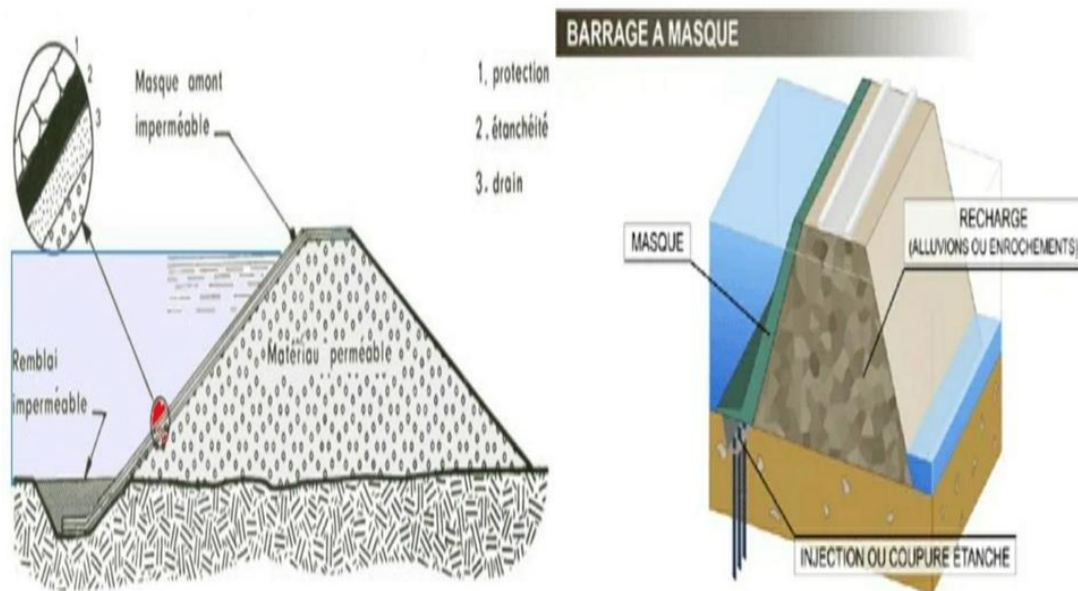


Figure I.10: Barrages à masque amont.

C- Les Barrages zonés avec un noyau :

Les barrages sur mesure sont d'une conception plus moderne et moderne que les simples barrages en terre, constitués de plusieurs types de matériaux agencés de manière à assurer séparément les fonctions de stabilité et d'étanchéité du barrage. S'appelle le zonage. Le noyau imperméable est constitué de terre argileuse, de boue, de terre caillouteuse, ou de tout autre matériau terreux comprenant une grande partie de matériaux fins, ce qui lui confère une faible perméabilité. Les zones encadrant le noyau imperméable sont dans tous les cas comprimés, elles assurent également la résistance et la stabilité du barrage, notamment pour la pente amont en cas de vidange rapide.

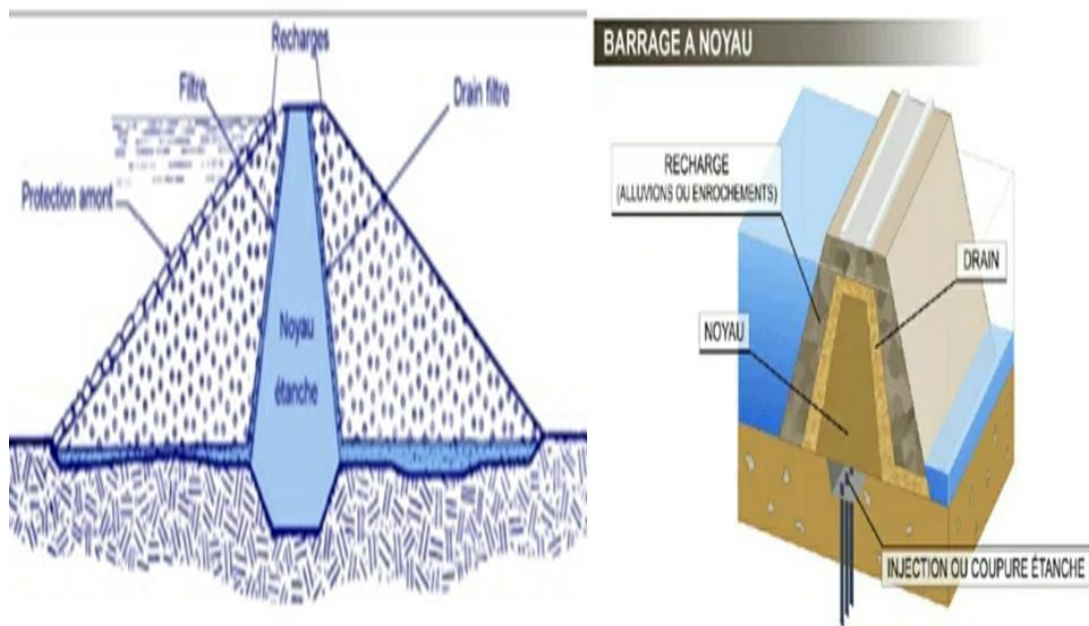


Figure I.11: Barrages zonés avec un noyau.

I.4.3. Barrages mobiles :

Le barrage mobile est celui qui a été construit en direction du lit des rivières, là où la pente est la plus faible, et ces ouvrages ont une hauteur limitée. Afin de rendre les rivières navigables, des barrages mobiles sont utilisés dans l'aménagement des estuaires. La nature des formations rencontrées sur le site, leur résistance, leur épaisseur, leur immersion, leur réfraction et leur perméabilité constituent un ensemble de facteurs souvent décisifs dans le choix du type de barrage.

Il se caractérise par quatre types de barrages

- Barrage mobile à Aiguille.
- Barrage mobile à battant.
- Barrage mobile à gravité
- Barrage mobile à clapets

A-Barrage mobile à aiguille :

Le barrage mobile ou à niveau fixe est construit avec une hauteur limitée, généralement en aval des cours d'eau, et de préférence à un endroit où la pente est plus faible. Ce type de barrage est généralement utilisé dans l'aménagement des estuaires fluviaux, bien que ce type de barrage ait été remplacé par des techniques plus modernes et automatiques. Dans certains barrages encore debout, les aiguilles en bois sont remplacées par des aiguilles en aluminium remplies de polystyrène (pour la flottabilité en cas de chute dans la rivière), qui pèsent beaucoup moins et sont plus faciles à manœuvrer, la partie inférieure de la rivière rincée à permettre l'écoulement des granulats ou en position intermédiaire pour créer un canal de drainage.



Figure I.12: Barrage mobile à aiguille.

B-Barrage mobile à battant :

Ce type de barrage est généralement utilisé pour empêcher l'eau salée de remonter en amont, et la partie fixe correspond à une plate-forme étanche. Il s'agit d'un grand clapet à secteur qui, en position complètement fermée, définit un volet reposant sur la plate-forme, tandis qu'en position complètement relevée, il laisse l'écoulement complètement libre. De plus, une vanne à clapet est montée sur la génératrice supérieure de la vanne sectionnelle qui permet de régler le débit dans le flux d'évacuation d'eau et le niveau d'eau requis en amont du barrage.



Figure I.13: Barrage mobile à battant.

Chapitre I : Généralités sur les barrages

C- Barrage mobile à gravité :

En théorie, la vanne à gravité est très facile à manœuvrer et contient peu d'éléments mécaniques. En position de repos, le mandrin est rempli d'eau et abaisse son poids sur le plateau. En position active, l'air injecté expulse l'eau et permet à la feuille de monter par gravité. La hauteur dépend de la quantité d'air soufflé à l'intérieur.

D- Barrage mobile à clapets :

Le fonctionnement est similaire au joint à gravité ci-dessus, à la différence qu'il est entraîné par deux vérins hydrauliques situés de part et d'autre de la vanne.



Figure I.14: Barrage mobile à clapets.

I.5. Les Exemples de Grands barrages dans le monde :

- États-Unis : Barrage Hoover (1931-1935).
- Égypte : Barrages d'Assouan sur le Nil.
- République Démocratique du Congo : Barrages d'Inga sur le Congo.
- Paraguay : Barrage d'Itaipu à la frontière du Paraná.
- Angola : Barrage de Kabanda sur le fleuve Kwanzaa.
- Chine : Barrage des Trois Gorges.
- Suisse : Barrage de Grande-Dixence.
- Turquie : Barrage Atatürk sur l'Euphrate.
- Québec : barrage de Daniel-Johnson sur Manicouagan.
- Venezuela : Barrage de Guri.
- Chine : Premier Barrage de Jinping (305 m), le plus hauteur du monde.

Chapitre I : Généralités sur les barrages

- Tadjikistan : barrage de Nourek (300 m), le plus hauteur du monde.

I.6. L'utilisation des barrages :

Les barrages peuvent être construits à plusieurs fins :

- Production d'électricité à partir d'énergie renouvelable, à partir de l'eau, avec des centrales hydroélectriques rattachées au barrage ou situées en fond de vallée et alimentées par conduite obligatoire.
- Créer des réserves d'eau pour alimenter les villes en eau potable, car l'eau peut être nécessaire pour répondre aux besoins industriels.
- Irrigation des zones agricoles à fort besoin en eau pendant les périodes de sécheresse.
- Les canaux alimentent en eau, notamment dans le quart nord-est de la France. Les barrages construits à cet effet sont parmi les plus anciens de France (le barrage de Saint-Friol a été comblé en 1675).
- Maintenir un débit minimum suffisant dans les cours d'eau en période d'étiage, pour assurer une qualité environnementale satisfaisante des cours d'eau et permettre des prélèvements par pompage en aval (pour les besoins d'approvisionnement en eau, d'irrigation, etc.).
- Réduire l'impact des crues en retardant l'eau grâce au stockage dans le réservoir qui se remplit pour être restitué après le passage de la crue.

I.7. Classification des Barrages :

Un barrage fluvial permet la régulation du débit d'une rivière, l'irrigation des cultures, une prévention relative des catastrophes naturelles (crues), 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.7.1. Matériaux de construction :

- **Barrages rigides** : béton, béton compacté (BCR), maçonnerie.
- **Barrages souples** : enterrés ou remblayés.

I.7.2. Résistant à l'eau :

- **Barrages à forme stable (barrages voûtes)** : leur forme arquée horizontalement et verticalement permet le transfert de l'écoulement de l'eau vers les flancs de la vallée, et doit donc reposer sur une fondation rocheuse résistante.
- **Barrage à stabilité de poids (barrages poids)** : Un barrage-poids est un barrage dont la masse est suffisante pour résister à la pression exercée par l'eau. Ces digues sont souvent relativement épaisses, et généralement de forme simple.

I.8. Choix du Site du Barrage :

L'objectif à atteindre de notre barrage et de la retenue étant connus, il convient ensuite de rechercher le site plus apte à satisfaire ces objectifs, le plus souvent la décision sur le choix du

Chapitre I : Généralités sur les barrages

site nécessite une connaissance plus précise des caractéristiques de chacun des emplacements présélectionnés.

Chaque site a des caractéristiques techniques propres, et pour faire le choix d'un tel site du barrage on distingue les différents critères suivants :

- Garantir la demande en eau à crée par la retenue, choisir alors un site en conséquence.
- Géologie Éventuel emplacement du barrage et de la retenue.
- Un Resserrement de La gorge liant les deux rives souhaitées, soit vallée étroite d'ou volume du barrage minium.
- Choisissez un site à proximité des zones d'accès existantes, il est facile d'éviter la construction d'autres routes importantes pour la machinerie et la main-d'œuvre.
- Le contexte météorologique et le régime des crues.
- Un site convenant à l'emplacement des ouvrages annexes.
- Pente de la cuvette nom surélevée, celle-ci étant liées à la hauteur affixe pour le barrage, pour satisfaire la capacité acérer.
- On examinera l'implantation des lieux habités a lava, et voies de communication.
- Sismicité de la région.

I.9. Avantages et Particularités du barrage en Béton :

Ils sont dimensionnés de façon à ce que leurs charges s'opposent l'une à l'autre Dans ce qui suite on dressera un bilan de comparaison permettant aux concepteurs à priori défaire le point sur les alternatives de choix primaire des types de barrages.

I.9.1. Barrages poids :

A-Avantage :

- Faibles contraintes dans le béton.
- Faibles contraintes transmises par la fondation au rocher.
- Les variations de températures ne produisent que de faibles variations de contraintes.
- L'évacuateur de crue peut facilement combiner avec le barrage.
- Le gradient des sous-pressions à travers la fondation est faible.

B-Particularités :

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

- Sensibilité aux séismes.

I.9.2. 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 (la surface de la fondation est petite).

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.9.3. Barrages à contrefort ou multi-voûtes :

A-Avantages :

- 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 :

- Sus ceptibilité aux séismes est très forte.
- La résistance à l'accélération est presque non existante.
- Importantes fouilles.
- Les contraintes dues au gradient de température peuvent de venir importantes à la tête du contrefort.
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est localement très élevé.

I.10. Conclusion :

A la fin de ce chapitre est consacré aux différents types de barrages, notamment les barrages souterrains. La surveillance et l'entretien font partie des procédures importantes qui doivent être réalisées pour assurer la sécurité des bâtiments et donc la sécurité des riverains.

Les barrages poids semblent également réservés aux contextes où la main d'œuvre est abondante, malgré leurs bonnes performances.

Là où des barrages symétriques en remblai sur mesure doivent être pris en compte dans des sites difficiles caractérisés par une assise rocheuse aux faibles propriétés mécaniques, des crues importantes ou une exposition aux séismes.

Une étude de la stabilité d'un barrage-poids doit non seulement prendre en compte ses grands passages et sa masse importante qui peuvent parfois être le principal facteur de stabilisation, mais aussi l'effet du traitement des fondations encore en cours d'aménagement.

Les méthodes les plus courantes de traitement des fondations des barrage-poids sont l'injection, l'imperméabilisation des murs et le drainage.

Aussi, ces nouvelles technologies ont un grand impact car elles permettent d'accéder lors des opérations de réhabilitation aux résultats des travaux, alors que sans elles le traitement des fuites est jugé une fois les travaux terminés, ces technologies restent coûteuses car les exigences d'une entreprise spécialisée sont impératives.



Chapitre II

Interaction sol-
structure

Chapitre II : Interaction sol-structure

II.1. Introduction :

L'interaction sol-structure est l'étude du comportement d'une structure soumise à des sollicitations sismiques, elle traduit la modification du mouvement du sol (ou de la structure) lors d'un séisme du fait de la présence de l'autre composant (structure ou sol).

Cette interaction est plus ou moins importante selon la nature du sol, les caractéristiques de l'ouvrage et le type de fondation. Extérieurement, il peut être négligé dans la pratique, mais la nécessité d'étudier la réponse d'analyse sismique d'une structure, en ne la considérant pas isolément mais comme une partie intégrante d'un ensemble comprenant le sol et les structures environnantes, rend indispensables les analyses d'interaction sol-structure.

Lorsque la réponse dynamique de l'ouvrage lui-même provoque une déformation du sol favorisant ce processus dans lequel la réponse du sol est affectée par le mouvement de l'ouvrage et inversement, lorsque la réponse de ce dernier a un effet sur le mouvement du sol, on parle de phénomène d'interaction sol structure (ISS). L'interaction sol-structure peut également, dans certains cas, avoir un léger effet sur la réponse dynamique de nombreuses structures et systèmes de fondations. Dans les études de cas de barrages en béton sous chargement sismique, la méthode des éléments finis est actuellement l'outil le plus puissant pour l'analyse approfondie de la fabrication de systèmes de structure de sol liquide interférant avec les conditions d'ingénierie spécifiques pour toute interface et donc la sélection de variables.

II.2. Etudes intérieur sur l'interaction sol-structure :

L'interaction sol-structure est souvent négligée par les ingénieurs lors de l'analyse et du design d'un barrage. Pourtant, ce phénomène a beaucoup d'influence lors de l'étude du comportement du barrage. Le premier aspect est lié à la sécurité, puisque la répartition des efforts dans le corps du barrage peut être différente si on tient compte de l'interaction sol-structure. De plus, l'utilisation normale peut aussi être affectée par des problèmes de fissurations causées par les tassements différentiels. Finalement, les coûts des constructions choisies sont influencés par la répartition des efforts découlant de l'interaction sol-structure. Pour cette raison, plusieurs recherches sont faites dans ce domaine parmi lesquelles :

Clough et penzien, 2000 : Ont discuté le problème de l'interaction sol-structure traitant le cas des structure multi supports, comme les ponts.

M.kutanis et M.elmas, 2000 : Ils ont abordé une modélisation en éléments finis (2D) del'interaction dynamique sol-structure par la méthode de sous structure en utilisant un programme établi par les auteurs.

Trois types d'analyses ont été faites :

- Une analyse linéaire de l'interaction dynamique sol-structure.
- Une analyse non-linéaire de l'interaction dynamique sol-structure.

Chapitre II : Interaction sol-structure

- Pour la même structure, l'analyse a été faite sans prendre en considération l'effet d'interaction dynamique sol-structure.

Trois enregistrements sismiques ayant trois différentes valeurs de PGA (peak gronde accélération 0,15 g 0,3 g 0,45 g) ont été choisis pour solliciter le modèle. Ainsi que trois types de sol caractérisés par des vitesses de propagation des ondes de cisaillement.

K.antar, 2004 : A démontré l'importance des effets de l'interaction sol-structure.

Il commence par une comparaison entre une structure à base fixe et une autre à base flexible. Par la suite, une étude paramétrique a abouti à des validations et critique de quelques résultats des chercheurs concernant l'interaction inertielle sol-structure. Enfin, des expressions du code américain (BSSC97) ont été validées par l'introduction des spectres du code algérien (RPA99.version 2003).

Il a été proposé de combiner le rapport d'ancrage e/r (e : profondeur d'ancrage, r : rayons équivalents d'une fondation rectangulaire) couramment utilisé avec un autre rapport e/h qui tient compte de la hauteur (h) de la structure. Il a été démontré que l'interaction sol-structure n'affecte que le mode fondamental. L'application du code algérien dans le dimensionnement d'une structure en béton armé a montré que l'interaction sol-structure permet de diminuer le ferrailage et de majorer le joint sismique de 45%.

H.shakibet et A.fuladgar, 2004 : Ont formulé une approche dans le domaine temporel pour l'analyse linéaire en 3D de l'interaction sol-structure d'un bâtiment de forme anti symétrique. Le but était d'évaluer la réponse sismique torsionnelle de la structure. La modélisation de la structure est faite pour un bâtiment à un seul étage en (3D) reposant sur un sol. Le sol est modélisé par des éléments solides, élastiques et linéaires.

Le contact entre la fondation et le sol est modélisé par les éléments d'interfaces plans linéaires d'épaisseur nulle.

Deux composantes latérales du séisme d'El Centro 1940 ont été appliquées Simultanément sur le système suivant les directions X et Y.

M.oudjene et al, 2005 : Ont démontré que dans la gamme des hautes fréquences la modification de l'action sismique n'est pas prise en compte par la forme des différents spectres de réponse ainsi propose. Ensuite, ils ont discuté d'état actuel de ses spectres de calcul et ont suggère que l'allongement de la période fondamentale n'implique pas systématiquement la diminution de l'accélération spectrale.

K.louay et al, 2006 : Ont fait une étude paramétrique de l'influence de l'interaction sol structure sur la fréquence fondamentale des structures sous chargement sismique. L'analyse est effectuée avec une modélisation numérique par élément finis.

Le comportement du sol et de la structure est supposé de type élastique. L'analyse statique des résultants obtenue pour un portique représentant un système à un seul degré de liberté a permis la détermination d'un paramètre adimensionnel, intitulé rigidité relative du système sol-structure noté K_{ss} . Un abaque a été construit, en variant les paramètres N_b , N_θ , N_e (nombre d'ouverture le sens horizontal et transversal et nombre d'étage respectivement).

Chapitre II : Interaction sol-structure

S.grange et ai, 2008 : Ont construit un élément d'interface (3D) modélisant une fondation superficielle de forme circulaire, rectangulaire ou filante reposant sur un massif de sol semi infini et permettant de pondre en compte l'interaction sol-structure en considérant la plasticité du sol et le décollement de la fondation. Cette modélisation est basée sur la méthode des macros élément, cet élément permet de travailler en variables globales (forces et déplacement) et permet ainsi de simplifier le modèle et d'obtenir des temps de calcul très réduit. Il est implémenté dans Fedea Slab, un code d'élément finis développé sous Matlab.

Des comparaisons avec des résultats expérimentaux d'une fondation soumise à des chargements cycliques, ainsi que dynamiques ont montré le bon fonctionnement de macros éléments (3D) d'interaction sol-structure.

Tahar berrabah.a, 2007 : A étudié l'effet du sol environnant tel que décrit par l'effet d'interaction sol-structure sur le comportement dynamique du barrage de Brezina (barrage poids voûte en béton, à El Beyadh à ouest de l'algérien).

II.3. Définition du phénomène d'interaction sol-structure :

Si le mouvement d'un point D (figure II.1) situé à l'interface du système sol-structure diffère du mouvement qui aurait lieu en champ libre (la structure inexistante) alors il ya à interaction sol-structure. Cette définition est très générale, une définition plus précise peut être donnée tel que : l'interface se déplace ou se déforme différemment par rapport à la surface correspondante dans le champ libre, il ya a interaction.

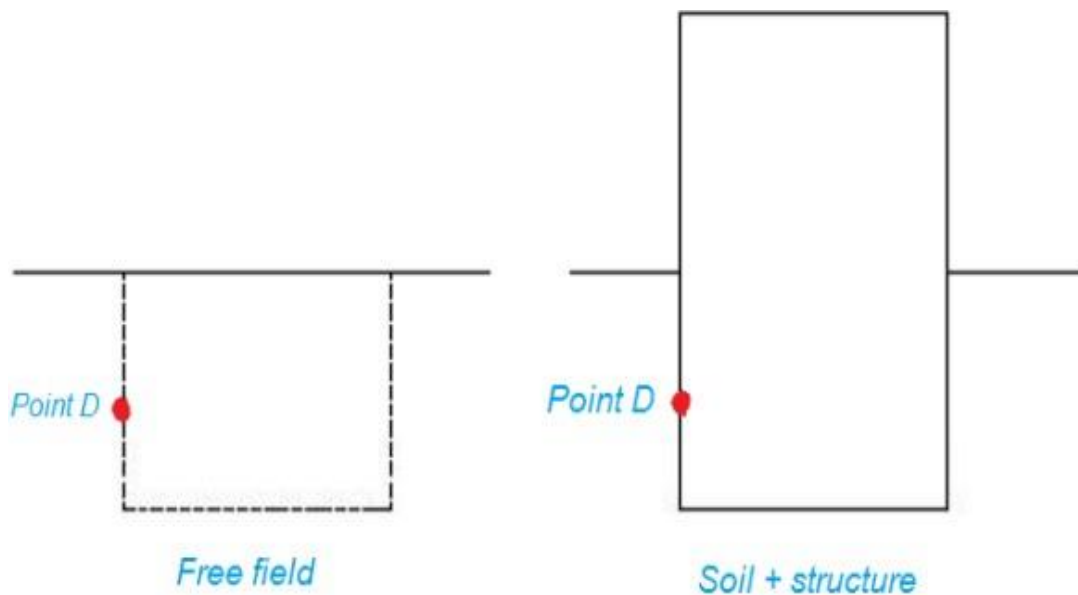


Figure II-1: Définition du phénomène d'interaction sol-structure (Emilio rosenbluenth 1980)

Considérons le cas d'une structure caractérisée par sa masse (m) et sa rigidité (k). Si le sol supportant la fondation rigide, alors la pulsation naturelle du système dépend seulement de la masse et la rigidité de la structure tel que :

$$\omega_0 = \sqrt{K/m} \quad (II.1)$$

Chapitre II : Interaction sol-structure

Par contre le sol constituant la fondation est flexible, elle peut se déplacer en translation ainsi qu'en rotation. La rigidité et l'amortissement du système sol-fondation peuvent être représentés par des ressorts de translation, de rotation et par amortisseurs.

*Aspect fondamental de l'interaction :

La figure II.2 illustre l'aspect fondamental de l'interaction sol-structure, cet aspect est présenté ici dans le cas d'une fondation sur pieux, partiellement enterrée dans le sol, mais les conclusions restent applicables à tout type de fondation.

Si l'on s'intéresse au mouvement de la fondation, les déformations du sol sont transmises à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure, même en l'absence de Superstructure le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différences de rigidité entre la fondation et le sol encaissant : le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci.

Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique. Par ailleurs, le mouvement induit sur la fondation développe des oscillations de la superstructure et donc donne naissance à des forces d'inertie qui sont retransmises à la fondation sous forme de forces et de moments. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction inertielle.

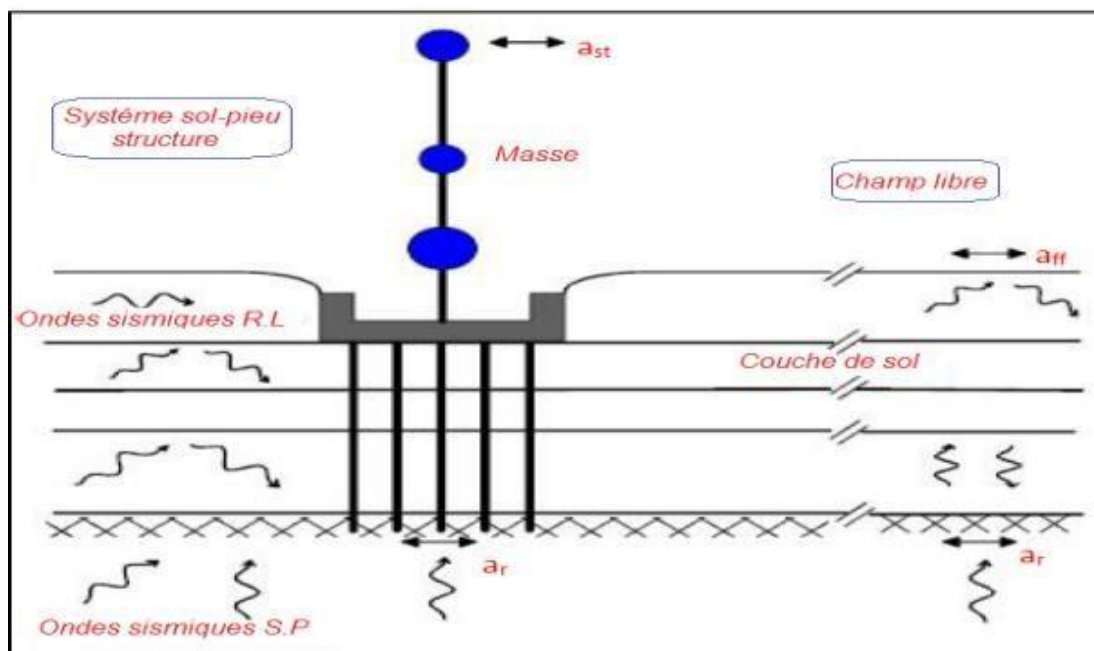


Figure II. 2 : Effets de l'interaction sol-structure.

De toute évidence, le dimensionnement de la fondation doit tenir compte de ces deux composantes de l'interaction. Généralement à tort le terme interaction sol-structure ne désigne dans l'esprit des ingénieurs que la part inertielle, il convient de garder à l'esprit que l'interaction cinématique peut dans certaines configurations être significative, même si parfois elle peut être négligée.

III.4. Interaction cinématique et interaction inertielle :

Chapitre II : Interaction sol-structure

Si on s'intéresse au mouvement de la fondation, du sol transmises à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure, même en l'absence de superstructure le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différent de rigidité entre la fondation et le sol encaissant, le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique.

Par ailleurs, le mouvement induit sur la fondation développe des oscillations de la superstructure et donc donne naissance à des forces d'inertie que sont retransmises à la fondation sous forme de forces et de moments. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction inertielle.

De toute évidence, le dimensionnement de la fondation doit tenir compte de ces deux composantes de l'interaction.

***Fonctions d'impédance :**

Pour une meilleure approximation de la réponse de la structure, on introduit l'effet du sol sur cette dernière, des fonctions reliant les forces et les déplacements à l'interface sol-structure ont été développés, en particulier pour les problèmes de fondation de machines. Ces fonctions sont appelées fonction d'impédance de la fondation. Les fonctions d'impédance sont définies généralement sous une forme complexe comportant une partie réelle caractérisant la rigidité et une partie imaginaire caractérisant l'amortissement du sol.

Ce genre de fonction d'impédance peut être utilisé dans une analyse dans le domaine fréquentiel. Cependant l'analyse d'un système compliqué, nécessitant la mise en œuvre d'un grand nombre de degré de liberté, ne peut être simplifiée que si les fonctions d'impédance sont considérées indépendantes de la fréquence d'excitation. En outre la résolution dans le domaine fréquentiel ne peut plus être envisagée si l'analyse est étendue au domaine non linéaire.

II.5. Formulation du phénomène d'interaction sol-structure :

Parmi les méthodes de prise en compte de l'interaction sol structure, on peut distinguer la méthode directe (ou méthode globale) et la méthode indirecte. Chacune d'elles correspond à une schématisation du modèle sol- structure.

II.5.1. Méthode directe (méthode globale) :

La méthode globale (ou méthode directe) traite le problème d'interaction sol-structure en un tout : le modèle numérique se base sur la discrétisation spatiale de la structure et du sol. L'analyse du système complet s'effectue en une seule étape.

Cette méthode permet d'inclure en principe tout comportement non linéaire du sol ou de la structure et toute hétérogénéité présente dans le sol. Il est aussi possible de traiter avec ce genre de méthode, les conditions de contact à l'interface sol-structure et la condition de radiation et de dissipation d'énergie dans la partie infinie du sol non borné. Les principales techniques utilisées pour traiter cette condition sont : l'utilisation de frontières absorbantes, le couplage éléments finis-éléments de frontière et le couplage éléments finis-éléments infinis ainsi que d'autres techniques. Le problème à résoudre est celui défini par l'équation :

$$[M]\{U\} + [C]\{U\} + [K]\{U\} = \{Q\} \quad (\text{II.2})$$

Où les matrices, $[M]$, $[C]$ et $[K]$ désignent la masse, l'amortissement et la rigidité du système complet sol-structure. Le vecteur $\{Q\}$ comprend les forces d'excitation sismique agissant à la base du modèle. Le vecteur $\{U\}$ contient les déplacements des nœuds du modèle par rapport à la base. Les dérivées temporelles $\{\dot{U}\}$ et $\{\ddot{U}\}$ sont les vitesses et les accélérations.

Si les accélérations sismiques $\ddot{u}_g(t)$ sont connues en profondeur alors le vecteur $\{Q\}$ est tout simplement le produit de la masse totale par le vecteur des accélérations sismiques ramenées aux nœuds du modèle, I est le vecteur de couplage dynamique dont les composantes qui correspondent aux degrés de liberté de même direction que le mouvement sismique sont égales à un et les autres sont nulles.

$$\{Q\} = -[M]I\ddot{u}_g(t) \quad (\text{II.3})$$

La mise en œuvre pratique de telles solutions est illustrée sur la (figure II.3). Un problème important afférent à cette méthode réside dans la mise en œuvre du chargement sismique à appliquer au modèle numérique. Elle nécessite la déconvolution en champ libre du mouvement de contrôle défini à la surface du sol. Le mouvement calculé à la base du modèle est imposé à la base du système sol-structure.

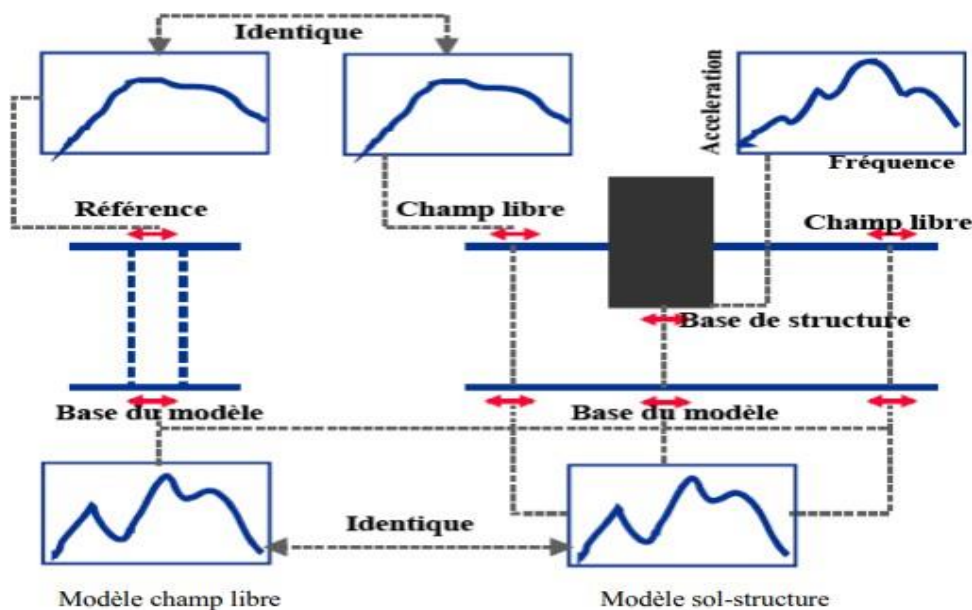


Figure II.3: Représentation schématique d'un calcul d'interaction sol-structure méthode globale.

En théorie, la méthode globale peut être étendue aux cas tridimensionnels et est susceptible d'appréhender les comportements non linéaires dus à la loi de comportement d'un des matériaux (sol le plus souvent) ou aux interfaces sol-structure (décollement ou glissement d'ouvrages sur leur fondation). En pratique, le coût de résolution de problèmes bidimensionnels est nettement prohibitif et on doit se restreindre aux problèmes bidimensionnels. Il faut garder à l'esprit que, si la méthode globale est généralement coûteuse du point de vue ordinateur, elle requiert souvent moins de temps humain que d'autres méthodes approchées exigeant une grande réflexion. Ce temps de réflexion représente également un coût non négligeable.

Chapitre II : Interaction sol-structure

Les méthodes globales ne font intervenir aucune notion de superposition et sont donc théoriquement adaptées aux problèmes non linéaires

Remarque :

Un des avantages principaux de la méthode globale est sa capacité à prendre en compte les hétérogénéités résultant soit des variations de faciès, soit des variations des caractéristiques de sol provenant de non linéarités. Par ailleurs, l'expérience montre qu'elle est généralement mieux adaptée et plus faciles de mise en œuvre pour l'étude d'ouvrages enterrés.

Un des programmes de calcul les plus utilisés dans la pratique pour résoudre les problèmes d'interaction sol-structure par une méthode globale est le programme de FLUSH. Ce programme incorpore une loi de comportement du type viscoélastique linéaire équivalent pour le sol, avec résolution dans le domaine fréquence. Ce programme dispose de frontières absorbantes permettant de réduire de façon significative les dimensions du maillage d'éléments finis.

II.5.2. Méthode indirecte :

Cette méthode s'appuie sur le principe de superstructure. L'idée est de résoudre le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives, ou chacune des étapes étant réputée plus facile à résoudre que le problème global. Pour des raisons évidentes, les infrastructures envisagées sont constituées d'une part par le sol et la structure de l'autre part, comme indiqué dans la (figure II.4). Les équations sont écrites pour chaque sous-système, alors les conditions de compatibilité à l'interface, la continuité des déplacements et des vecteurs de contraintes sont remplies.

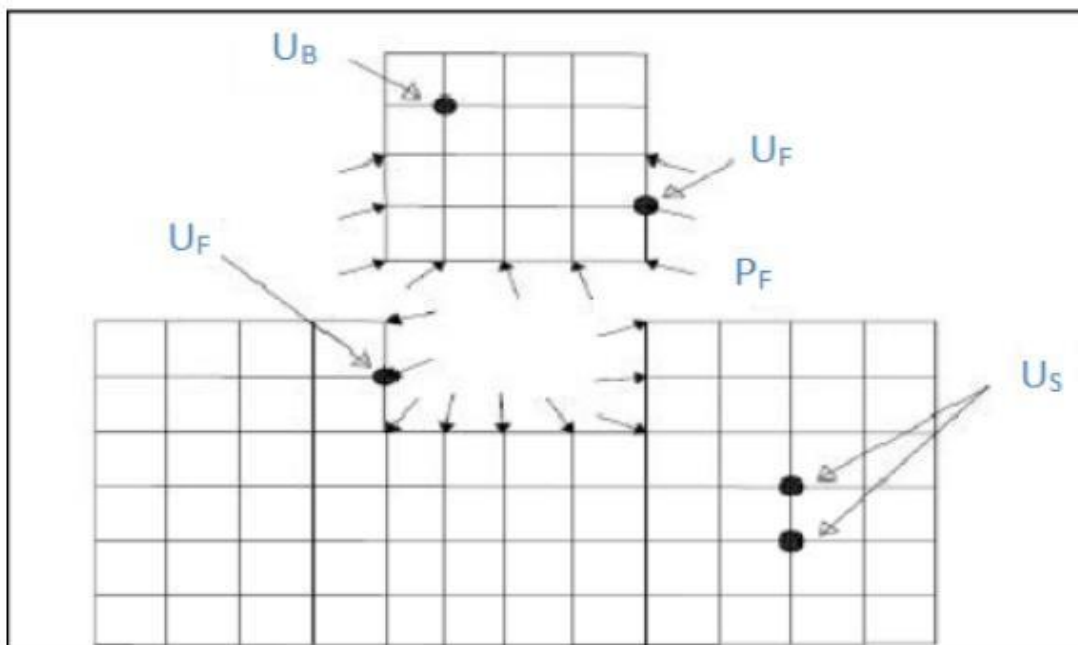


Figure II.4 : Schématisation des sous structures.

Le mouvement du sol qui n'est pas influencés par la présence de structure, sont appelées mouvement de terrain (champ libre). Lorsque les structures sont présence, elles interagissent avec le sol grâce à un processus qui est l'interaction sol-structure. L'interaction

Chapitre II : Interaction sol-structure

sol structure a peu d'effet sur la réponse de certains systèmes mais un effet important sur la réaction des autres.

L'interaction sol-structure a un effet important pour des structures lourdes appuyées sur des sols relativement meubles. Pour les structures légères fondées sur un sol rocheux, l'effet d'interaction sol-structure est généralement faible (Steven L. Kramer 1996).

Pour des raisons qui apparaîtront naturelles dans la suite, le problème est traité ci-dessous dans le domaine fréquentiel. Par ailleurs pour ne pas alourdir la présentation, on omettra les termes d'amortissement dans les équations d'équilibre. Il s'ensuit que les grandeurs, par exemple le déplacement U , s'expriment sous la forme de leur transformée de Fourier.

Ainsi, dans l'hypothèse d'une fondation rigide, il est pertinent de scinder le problème global en trois sous- problème :

- Détermination du mouvement d'une fondation rigide sans masse soumise à la Sollicitation sismique.
- Détermination de la matrice d'impédance de la fondation.
- Calcul de la réponse dynamique de la structure reliée à la matrice d'impédance et sujette à son support au mouvement d'interaction cinématique.

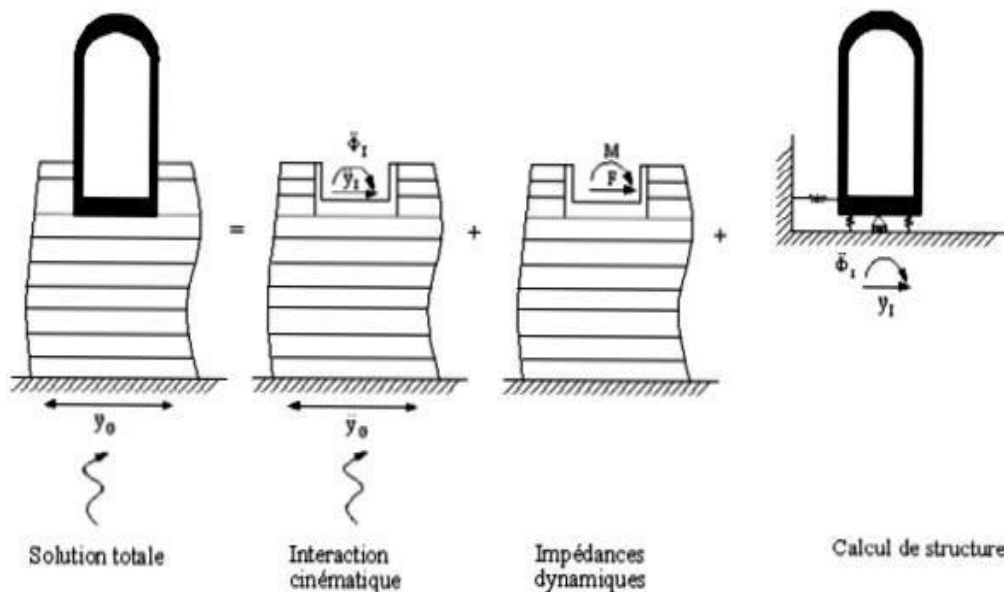


Figure II. 5 :Théorème de superposition (WOLF).

Dans la mesure où la fondation est parfaitement rigide, cette démarche est rigoureusement identique à celle conduisant à la résolution du système globale en étape. Cette décomposition est connue sous le nom de théorème de superposition de Kausel et est illustrée sur la (figure II.5). Son intérêt apparaît clairement s'il est possible de simplifier une des trois étapes du calcul.

L'interaction sol-structure est causée par deux phénomènes : l'incapacité de la fondation pour correspondre à la déformation en champ libre (interaction cinématique) et

Chapitre II : Interaction sol-structure

l'effet de la réponse dynamique du système de structure de base sur le mouvement du sol (Interaction inertielle) (Steven L. Kremer, 1996).

II.6. Les composants d'interaction sol-structure :

Avant d'examiner les différentes méthodes de l'interaction sol-structure, il est utile de formuler de façon générale. Cette formulation est orientée vers un traitement par éléments finis du phénomène d'interaction. En effet la complexité du problème est telle que le recours aux méthodes numérique est pratiquement inévitable. Les équations du mouvement sont obtenues par référence à la (figure II.6) qui schématise un ensemble sol-structure.

L'interaction cinématique peut induit des modes de déformation, comme le basculement et la torsion que ne sont pas présents dans un mouvement en champ libre. L'interaction inertielle se produit lorsque les forces transmises au sol par la réponse dynamique de la structure de produit des mouvements de base qui ne se produirait pas dans une structure à base fixe. L'effet de l'interaction inertielle est généralement plus prononcé que l'effet de l'interaction cinématique (Steven L. Kramer, 1996).

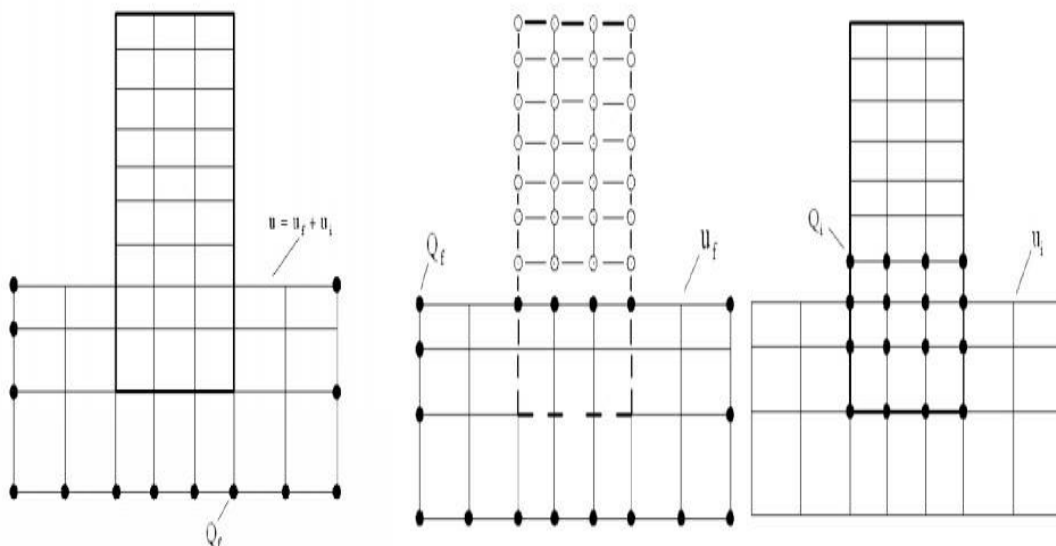


Figure II. 6 : Décomposition du problème d'interaction sol-structure (KAUSEL).

Désignant par M , C , K les matrices masse, amortissement et raideur du système, l'équation du mouvement s'écrit :

$$MU + CU + KU = Q_f \quad (\text{II-4})$$

Comme la source du mouvement (foyer du séisme) n'est généralement pas incluse dans le modèle, le vecteur de charge a des valeurs nulles que sur la frontière extérieure du modèle.

$$Q_i = [M - M_f]U_f + [C - C_f]U_f + [K - K_f]U_f \quad (\text{II.5})$$

II.6.1. Force d'interaction inertielle :

L'équation (II-5) met clairement en évidence le fait qu'il y a interaction dès qu'il y a différence de masse ou de raideur entre le sol et la structure. Supprimons pour simplifier le terme d'amortissement dans cette équation et restreignons le problème à celui d'une structure posée à la surface du sol et soumise à la propagation verticale d'ondes de volume (cisaillement ou compression). Dans ces conditions, en champ libre tous les points de la surface du sol sont animés d'un même mouvement. Si la fondation de l'ouvrage est infiniment rigide, le dernier terme de l'équation (II-5) s'annule, le vecteur de charge Q_i se réduit à :

$$Q_i = [M - M_f]U_f \quad (II.6)$$

Les forces Q_i appliquées à la base de la structure engendrent un mouvement du support, équivalent à un champ de force d'inertie dans la structure. Par la suite l'interaction ne résulte que des forces d'inertie développées dans cette structure. On lui donne le nom d'interaction inertielle.

II.6.2. Force d'interaction cinématique :

A l'opposé considérons une structure enterrée dont la masse est nulle hors du sol et égale (en valeur et répartition) à celle du sol pour la partie en terre. Les forces Q_i ont alors pour expression :

$$Q_i = [K - K_f]U_f \quad (II.7)$$

Elles ne résultent que de la différence de raideur pour la partie en terre, entre le sol et la structure. Même sans différence de masse, il y a interaction on lui donne le nom d'interaction cinématique. Elle résulte de la raideur de la fondation qui l'empêche de suivre les mouvements imposés par le sol. On a vu précédemment qu'elle était rigoureusement nulle pour certains cas, elle peut être faible dans d'autres cas (fondation sur pieux souples) ou très importante (structure raide fortement enterrée dans sol).

Dans le cas le plus général l'interaction résulte d'une interaction inertielle et d'une interaction cinématique.

II.7. Conclusion :

Ce chapitre donne un bref aperçu des éléments d'influence de l'interaction sol-structure, les différentes méthodes utilisées pour prendre en compte ce phénomène sont également présentées, seuls quelques travaux ayant été réalisés dans le passé sont discutés.



Chapitre III

Modélisation du système
barrage-fondation par la
méthode des éléments finis

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

III.1. Introduction

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.

Ce développement s'est accompagné de la mise au point de programmes de calcul capables de résoudre des problèmes d'une grande complexité. Mais pour l'utilisateur, il s'agit souvent de boîtes noires. Ainsi, il est aujourd'hui courant de réaliser, pour des grands projets, des analyses par éléments finis afin de vérifier la stabilité d'un ouvrage en interaction avec son environnement.

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques ou leur inexistence, l'ingénieur a recours aux méthodes qui permettent de simuler le comportement des systèmes. Physiques complexes. La méthode des éléments finis est devenue éventuellement la plus performante des méthodes numériques, vu son grand champ d'application.

La méthode des éléments finis met en œuvre la connaissance de trois disciplines de base :

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

III.2. Etat de contraintes-déformations :

III.2.1. Etat de contraintes-déformations dans le cas élastique :

On considère un matériau isotrope, élastique linéaire et donc la relation contrainte déformation s'écrit :

$$\sigma_{ij} = E.s_{ij} \quad (\text{III.1})$$

Les problèmes d'élasticité plane peuvent être divisés en deux groupes distincts, les problèmes de contraintes planes et les problèmes de déformations planes. Dans le premier cas, la structure a une petite épaisseur par rapport à ses autres dimensions et, les contraintes normales au plan sont négligées, tandis que dans le deuxième cas la structure à une dimension très

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

grande par rapport à ses autres dimensions et la déformation normale au plan de la charge est nulle (le cas des barrages en terre figure (III.1)).

***Relation contrainte-déformation :**

$$\sigma_{ij} = D \cdot s_{ij} \quad (\text{III.2})$$

Avec : D est la matrice d'élasticité, s'exprime par

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & 0 \\ d_2 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix}$$

$$d_1 = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad d_2 = \nu \cdot d_1, \quad d_3 = \frac{1}{2} (d_1 - d_2)$$

E et ν sont respectivement le module d'élasticité et le coefficient de Poisson du matériau.

Et :

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{ii} & \sigma_{ij} \\ \sigma_{ji} & \sigma_{jj} \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

La figure III.2 représente les contraintes principales sur un petit élément dans le cas des déformations planes.

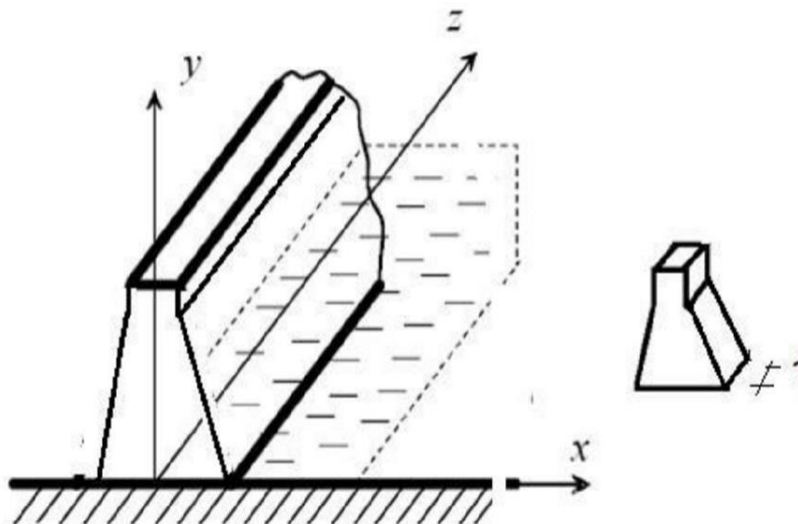


Figure III.1 : Conditions de déformation plane (exemple d'un barrage en béton).

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

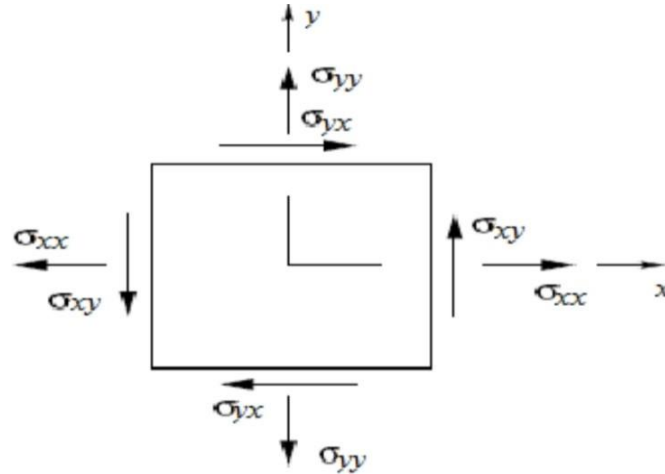


Figure III.2 : Représentation des contraintes sur un petit élément dans le cas des déformations planes.

Tel que, les contraintes normale et tangentielle sont exprimées par :

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2} \quad (\text{III.4})$$

$$r_{max} = \sigma_3 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (\text{III.5})$$

Le tenseur des déformations est :

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ii} & \frac{1}{2} \gamma_{ij} \\ \frac{1}{2} \gamma_{ji} & \varepsilon_{jj} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Avec : $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$

La relation déformations-déplacements :

$$\varepsilon_{ij} = S U_{ij} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$U_{ij} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \text{ et } S = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

III.2.2. État de contraintes-déformations dans le cas élastoplastique :

La déformation totale est décomposée en une partie élastique et une autre plastique :

$$s_{ij} = s_{ij}^e + s_{ij}^p \quad (\text{III.9})$$

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

Pour un comportement élastique on a :

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (\text{III. 10})$$

Le déchargement est toujours élastique linéaire : $d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\varepsilon_{kl}$. Et le chargement, est défini par un tenseur de comportement tangent : $d\sigma_{ij} = \bar{D}_{ijkl} d\varepsilon_{kl}$ (figure III.3)

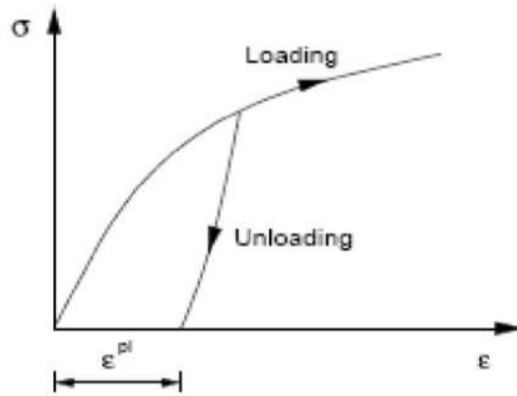


Figure III.3 :Comportement plastique uni axial.

Les déformations plastiques sont définies par :

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda_p \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{III. 11})$$

La surface de charge $f(\sigma_{ij}, \alpha_k)$ représente le critère de plasticité permettant de définir le comportement élastoplastique. α_k est une variable d'écrouissage et $d\lambda_p$ étant le multiplicateur plastique.

La loi de comportement est donnée par :

$$\{d\sigma_{ij}\} = [\mathbb{D}]\{d\varepsilon\} \quad (\text{III.12})$$

Où :

$$[\mathbb{D}] = [D] - \frac{[D] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^t [D]}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^t [D] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} + H} \quad (\text{III.13})$$

Avec : H module d'écrouissage.

Alors la matrice de rigidité tangente prend la forme :

$$[\mathbb{K}] = \int_{V_e} [B]^t [C_t] [B] dV \quad (\text{III.14})$$

$[C_t]$ Prend différentes valeurs selon la nature du comportement :

$[C_t] = [C] \Rightarrow$ Comportement élastique.

$[C_t] = [C] \Rightarrow$ Ecoulement plastique.

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

$[C_t] = [C] \Rightarrow$ Décharge élastique.

III.3 Application de la méthode des éléments finis :

III.3.1 Modélisation :

A- Modélisation du système barrage-fondation :

Le système à étudier est constitué d'un remblai en terre de type basique, supporté par une surface horizontale d'un support souple plat, et ce dernier est limité en profondeur par le socle rocheux horizontal, et une accélération est appliquée à la base de la fondation. Le barrage peut être divisé en deux structures : le barrage et la fondation.

- **Barrage :**

Dans notre cas, le barrage est représenté par un réseau d'éléments finis, et il est considéré comme le matériau constitutif du barrage Il est homogène, élastique et isotrope dans le cas de l'analyse linéaire, et dans le cas de l'analyse non linéaire, il est considéré comme un plastique complètement élastique.

- **Fondation :**

La fondation limitée par une surface horizontale rigide, a été aussi modélisée en élément finis de même type que le barrage et de même type de matériau.

B- Choix de type d'élément :

Un type d'élément est utilisé pour la modélisation du système barrage-fondation :Elément finis quadratique à quatre nœuds.

C-Conditions aux frontières :

Généralement, les barrages sont traités comme un système bidimensionnel dans lequel on considère un comportement planaire, le barrage et le sol de fondation Sont considérés comme deux sous structures du système combiné, représentés par un maillage d'éléments finis bidimensionnel, chaque nœud libre de l'élément fini considéré possède deux degrés de liberté (U_x , U_y).

Pour simplifier le traitement des nœuds des extrémités latérales, dans le cas d'un séisme de direction horizontale, on suppose que ces points sont libres de se déplacer dans le sens horizontal, mais non dans le sens vertical, et dans le cas de séisme vertical on a le contraire.

III.3.2. Analyse dynamique :

A-Formulation générale des équations de mouvement par la méthode des éléments finis :

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

Un solide déformable est en équilibre si le travail virtuel des forces extérieures est inférieur au travail virtuel des forces intérieures, l'expression du principe des travaux virtuels peut être obtenue par application de la formulation variationnelle (intégrale) aux équations de mouvements. En prenant comme fonction poids $\Psi = \mathbf{U}$.

$$W = \int_{\Omega} \delta U_i (\sigma_{ij,j} + f_i - \rho \gamma_i) d\Omega \quad (\text{III.15})$$

Après plusieurs étapes on obtient alors l'expression des travaux virtuels suivante :

$$W = - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \cdot \sigma \cdot d\Omega + \int_{\Gamma} \delta U \cdot \sigma \cdot \mathbf{n} d\Gamma + \int_{\Omega} \delta U \cdot \mathbf{f} \cdot d\Omega - \int_{\Omega} \delta U \cdot \rho \cdot \ddot{\mathbf{U}} \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III.16})$$

Où :

$$W_{\text{int}} = - \int_{\Omega} \varepsilon^T \cdot \sigma \cdot d\Omega \quad : \text{Travail virtuel intérieur.}$$

$$W_s = \int_{\Gamma} \mathbf{U} \cdot \sigma \cdot \mathbf{n} \cdot d\Gamma : \text{Travail virtuel des forces de surface.}$$

$$W_v = \int_{\Omega} \mathbf{U} \cdot \mathbf{f} \cdot d\Omega : \text{Travail virtuel des forces de volume.}$$

$$W_w = - \int_{\Omega} \mathbf{U} \cdot \rho \cdot \mathbf{U} \cdot d\Omega : \text{Travail virtuel des forces d'inertie. Dans}$$

le cas du barrage l'expression devient :

$$W = - \int_{\Omega_s} \varepsilon^T \cdot \sigma \cdot d\Omega + \int_{\Gamma_{\text{am}}} \mathbf{U} \cdot (-\mathbf{p}) \cdot \mathbf{n} d\Gamma + \int_{\Omega_s} \mathbf{U} \cdot \rho \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_g \cdot d\Omega - \int_{\Omega_s} \mathbf{U} \cdot \rho \cdot \mathbf{U} \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III.17})$$

Tel que :

\mathbf{U}_g : Accélération sismique

\mathbf{r} : Vecteur de couplage dynamique qui relie la direction du mouvement avec la direction de chaque degré de liberté.

B-Caractéristiques des éléments (matrices élémentaires) :

En appliquant le principe des travaux virtuels sur un sous domaine Ω et en remplaçant les termes contraints par les produits $D^* \varepsilon$, on a :

- **Matrice de rigidité :**

$$K_e = \int_{\Omega} [\mathbf{B}]^t [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] d\Omega_e \quad (\text{III.18})$$

- **Matrice masse :**

$$M = \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^t \rho \cdot \mathbf{N} d\Omega_e \quad (\text{III.19})$$

C'est l'expression de la matrice masse non condensée (cohérente), qui caractérise l'inertie de la structure. Elle peut être exprimée sous forme condensée (matrice diagonale) si l'on opte pour le concept de la condensation de la masse sur les nœuds.

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

L'Expression explicite est :

$$\mathbf{M}_{jj} = \mathbf{I} \int_{\Omega_e} \mathbf{p} \cdot \mathbf{N}_j \cdot d\Omega_e \quad (\text{Pour le cas de masse concentrée}). \quad (\text{III. 20})$$

I : matrice identité

* Vecteur chargement sismique :

$$F_i = M \cdot I \cdot \ddot{U}_g \quad (\text{III. 21})$$

C- Caractéristiques dynamique du système :

- Matrice de raideurs :

La matrice de raideurs est obtenue par une simple procédure d'assemblage des matrices élémentaires. Le système pouvant être représenté par deux sous-structures liées entre elles par des nœuds communs dits nœuds d'interfaces, on peut alors écrire les matrices de raideurs de chaque partie barrage ou fondation séparément, puis procéder à l'assemblage des deux sous matrices obtenues, afin d'obtenir la matrice de raideurs du système global en utilisant pour cela la méthode des sous-structures.

Les matrices de raideurs pour les deux sous-structures, barrage et fondation, sont données par:

$$K_b = \begin{vmatrix} K_{bb} & K_{bi} & 0 \\ K_{ib} & K_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ et } K_f = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{ii} & K_{if} \\ 0 & K_{fi} & K_{ff} \end{vmatrix} \quad (\text{III.22})$$

i : Indice des nœuds de l'interface barrage-fondation.

b : Indice des nœuds de barrage.

f : Indice des nœuds de la fondation.

Après assemblage des deux sous matrices correspondant à chaque sous structure, et compte tenu des degrés de liberté d'interface, la matrice globale prend la configuration suivante :

$$K = \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bi} & 0 & 0 \\ K_{ib} & K_{ii} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{ii} & K_{if} \\ 0 & 0 & K_{fi} & K_{ff} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Le même principe est utilisé pour la construction de la matrice masse globale. Sauf que dans le cas de la présence de l'eau dans la retenue du barrage, la matrice masse contient des valeurs ajoutées aux nœuds de contacts avec l'eau, ces valeurs sont calculées en fonction de la surface tributaire à chaque nœud.

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

$$[M_b] = \begin{bmatrix} m_{bb} & m_{bi} & 0 \\ m_{ib} & m_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [M_f] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{ii} & m_{if} \\ 0 & m_{fi} & m_{ff} \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Après assemblage de ces deux sous matrices correspondant à chaque sous domaine, la matrice globale prend la configuration suivante :

$$[M] = [M_b] + [M_f] = \begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bi} & 0 & 0 \\ M_{ib} & M_{ii} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{ii} & M_{if} \\ 0 & 0 & M_{fi} & M_{ff} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

• Matrice d'amortissement :

L'amortissement dans une structure ou dans le sol est une réalité physique essentiellement liée à la plastification des matériaux. Selon les phénomènes physiques mis en cause on distingue plusieurs types d'amortissements :

- L'amortissement visqueux pour lequel la force d'amortissement est proportionnelle à la vitesse.
- L'amortissement hystérétique pour lequel la force d'amortissement est proportionnel au déplacement et a un signe opposé à celui de la vitesse.
- L'amortissement de coulomb, qui correspond à un amortissement de frottement ou la force d'amortissement est proportionnelle à la force de réaction normale à la direction de déplacement et a aussi un signe opposé à celui de la vitesse.

En pratique il est généralement impossible de définir la matrice de viscosité nécessaire à la détermination de la matrice d'amortissement C.

L'amortissement de Rayleigh qui exprime la matrice d'amortissement sous forme d'une combinaison linéaire de la matrice masse M et de la matrice de rigidité K est communément utilisé :

$$C = \alpha_R M + \beta_R K \quad (\text{III.26})$$

Sont des coefficients satisfaisants la condition d'orthogonalité de C dans la base modale. Ils peuvent être déterminés à partir de l'analyse modale de la structure en prenant deux pulsations propres de deux modes distincts.

$$\begin{Bmatrix} \alpha_R \\ \beta_R \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_n} \begin{Bmatrix} \omega_1 \cdot \omega_n \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Avec :

ω_1 : Pulsation propre du premier mode.

ω_n : Pulsation propre d'un mode supérieur.

ξ : Taux d'amortissement critique.

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

Les matrices d'amortissement pour les deux sous structures barrage-fondation, sont calculées par la relation :

➤ Barrage :

$$[C_b] = \alpha_{Rb}[M_b] + \beta_{Rb}[K_b] \quad (III.28)$$

$$[C_b] = \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bi} & 0 \\ C_{ib} & C_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.29)$$

➤ Fondation :

$$[C_f] = \alpha_{Rf}[M_f] + \beta_{Rf}[K_f] \quad (III.30)$$

$$[C_f] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{ii} & C_{if} \\ 0 & C_{fi} & C_{ff} \end{bmatrix} \quad (III.31)$$

Alors la matrice d'amortissement globale est obtenue par un assemblage des matrices d'amortissement correspondant à chaque sous structure :

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bi} & 0 & 0 \\ C_{ib} & C_{ii} & C_{if} & 0 \\ 0 & 0 & C_{ii} & C_{if} \\ 0 & 0 & C_{fi} & C_{ff} \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

III.3.3. Résolution de problème :

La méthode de résolution la mieux adaptée, ou la plus efficace, dépend du comportement de l'ouvrage à étudier (linéaire ou non linéaire) et du mode de définition de la sollicitation appliquée (temporelle, fréquentielle). Il convient de réaliser que dans la plupart des applications pratiques, l'obtention d'une solution analytique est inaccessible et que le recours à des méthodes numériques se révèle indispensable.

A- Méthodes d'intégration directe :

Dans ces méthodes, on discrétise le temps en certain nombre de pas (ou intervalles) de taille Δt . On pose une interpolation à l'intérieur de chaque intervalle, ce qui limite la résolution de l'équation du mouvement (initialement continu) à la fin de chaque pas de temps.

Deux grandes familles sont bien connues :

*Méthodes explicites : différences finies centrées.

*Méthodes implicites : Newmark, Wilson- θ , Park.

On se limite à l'exposition des deux méthodes utilisées dans ANSYS pour résoudre notre problème :

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

- ✓ La méthode de différences finies centrées.
- ✓ La méthode de Newmark.

B- Le cas linéaire :

➤ Méthode de différences finies centrées :

i) Conditions initiales:

$$\psi = \frac{p_0 - cu_0 - ku_0}{m} \quad (\text{III.33})$$

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t u_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} u_0 \quad (\text{III.34})$$

$$\tilde{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \quad (\text{III.35})$$

$$a = \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \quad (\text{III.36})$$

$$b = k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \quad (\text{III.37})$$

ii) Pour le temps à l'étape i, calculer :

$$\tilde{p} = p_i - au_{i-1} - bu_i \quad (\text{III.38})$$

$$u_{i+1} = \frac{\tilde{p}_i}{\tilde{k}} \quad (\text{III.39})$$

$$\psi = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad . \quad u_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{2(\Delta t)^2} \quad (\text{III.40})$$

iii) Répétition pour l'incrément de temps suivant : remplacer i par i+1 et répéter les étapes ii.1, ii.2, ii.3.

III.3.4. Méthode de Newmark :

Dans la méthode de Newmark on a deux cas spéciaux :

Méthode d'accélération moyenne : $\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{4}$

Méthode d'accélération linéaire : $\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{6}$

i) Conditions initiales:

$$u_0 = \frac{p_0 - cu_0 - ku_0}{m} \quad (\text{III.41})$$

Choisir Δt

$$\tilde{k} = k + \frac{m}{\beta(\Delta t)^2} + \frac{\gamma c}{\beta\Delta t} \quad (\text{III.42})$$

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

$$a = \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c \quad (\text{III.43})$$

$$b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \quad (\text{III.44})$$

ii) Pour le temps à l'étape i, calculer :

$$\Delta \tilde{p} = \Delta p_i + a \dot{u}_i + b \ddot{u}_i \quad (\text{III.45})$$

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \tilde{p}_i}{k} \quad (\text{III.46})$$

$$\Delta u_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} u_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \dot{u}_i \quad (\text{III.47})$$

$$\Delta u_i = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (\text{III.48})$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i \quad ; \quad \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i \quad ; \quad \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i \quad (\text{III.49})$$

iii) Répétition pour l'incrément de temps suivant : remplacer i par i+1 et répéter les étapes ii.1 à ii.5.

Remarque :

- ✓ La méthode des différences finies centrées est conditionnellement stable et exige l'utilisation d'un pas de temps très petit :

$$\Delta t \leq \frac{T_n}{\pi}, \text{ tel que : } T_n \text{ c'est la période naturelle de système}$$

- ✓ La méthode de Newmark est stable si :

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}} \quad (\text{III.50})$$

3) Si l'excitation est une accélération de sol $\ddot{u}_g(t)$, remplacer p_i par $-m \ddot{u}_g$. Le Calcul de déplacement u_i , vitesse \dot{u}_i et accélération \ddot{u}_i donne la valeur de la réponse de sol.

III.4. Conclusion :

Dans le troisième chapitre, nous avons discuté de l'Étude du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis au début, nous savions la méthode des éléments finis tel qu'une méthode numérique de résolution des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie.

Et alors état de contraintes-déformations qui se divise en deux État de contraintes-déformations dans le cas élastique et La relation déformations déplacements et état de contraintes-déformations dans le cas élastoplastique et puis nous avons mentionné les applications de la méthode des éléments finis qui se divise en modélisation et modélisation du système barrage-fondation et choix de type d'élément et conditions aux frontières et nous avons parlé aussi du l'analyse dynamique et la formulation générale des équations de mouvement par la méthode des éléments finis et nous Avon motionné Caractéristiques des

Chapitre III : Modélisation du système barrage-fondation par la méthode des éléments finis

éléments et nous avons parlé du Matrice de raideurs et Matrice masse et Matrice d'amortissement et enfin, nous concluons ce chapitre par Méthode de différences finies centrées.



Chapitre IV

Application numérique.

Chapitre IV : Application numérique.

IV.1. Introduction :

Ce chapitre consiste à exposer la description du barrage étudié de Koyna, les propriétés des différents matériaux, les différents éléments utilisés dans la modélisation de l'interaction barrage-fondation par le code d'éléments finis ANSYS ainsi que l'application numérique et analyse des résultats concernant les différents rapports du barrage sur la performance sismique du barrages poids en béton.

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 sol- structure.

La prévision de la réponse d'un barrage poids pendant un séisme constitue un défi important Les facteurs tels que les caractéristiques de barrage, les conditions de site, et caractéristiques de chargement sismique affectent fortement les réponses dynamiques des barrages Le comportement non linéaire des matériaux de sol, influencent intensivement les réponses du barrage.

L'objet de ce mémoire est d'exposer l'effet l'interaction sol-structure sur réponse dynamique des barrages poids en béton. A cet effet, deux modèles d'éléments finis à deux dimensions (2D) sont générés à l'aide du logiciel ANSYS. Le premier modèle représente le barrage seul, qui est fixe à sa base (modèle sans ISS). Le deuxième modèle illustre le système couplé barrage-fondation (modèle avec ISS). Le barrage-poids en béton de koyna, situé au sud-ouest de lnde, est choisi dans la présente étude.

Le logiciel ANSYS APDL version 15 est choisi comme code élément finis pour la modélisation du phénomène d'interaction sol- structure appliqué au barrage Koyna.

Cette section présente :

- Une présentation de la géométrie du barrage Koyna.
- Les caractéristiques des matériaux du barrage Koyna, de sol de fondation.
- La modélisation élément finis, par ANSYS APDL version 15, du barrage Koyna tenant en compte du phénomène d'interaction sol-structure.

IV.2. Présentation de l'ouvrage:

Le barrage de Koyna est l'un des plus grands barrages du Maharashtra, en Inde, c'est un barrage en moellons en béton construit sur la rivière Koyna qui prend sa source à Mahabaleshwar, une station de montagne dans les chaînes de sahyadri, il est situé à Koyna Nagar, district de Satara qui est situé dans les Ghâts occidentaux sur la route nationale Entre

Chapitre IV : Application numérique.

Chiplun et Karad, à une quarantaine de kilomètres de la mer d'Oman dans la région sud -ouest de l'Inde, non loin de la ville de Mumbai.

Il est conçu comme un barrage-poids droit d'une hauteur de 103 mètres, d'une longueur de 853 mètres et d'une épaisseur de 14,8 mètres au sommet et de 68,6 mètres à la base du sommet. Construit en tronçons monolithiques de 15,2 mètres de large, avec un déversoir de 91,4 mètres de large situé au centre de l'ouvrage, ce barrage joue également un rôle essentiel dans la maîtrise des crues en saison de mousson.

Comme le barrage de Koyna a été construit principalement en gravats de béton. Pendant la construction, des couches de neuf pouces d'épaisseur de béton nouvellement posé ont été recouvertes et recouvertes d'air avec des couches correspondantes de neuf pouces d'épaisseur de gravats lourds. Le diamètre maximal des décombres variait de quatre à seize pouces. Ces deux couches ont également été vibrées ensemble pour créer une ligne de levage, puis elle a été complétée selon les méthodes utilisées pour les ascenseurs en béton traditionnels.

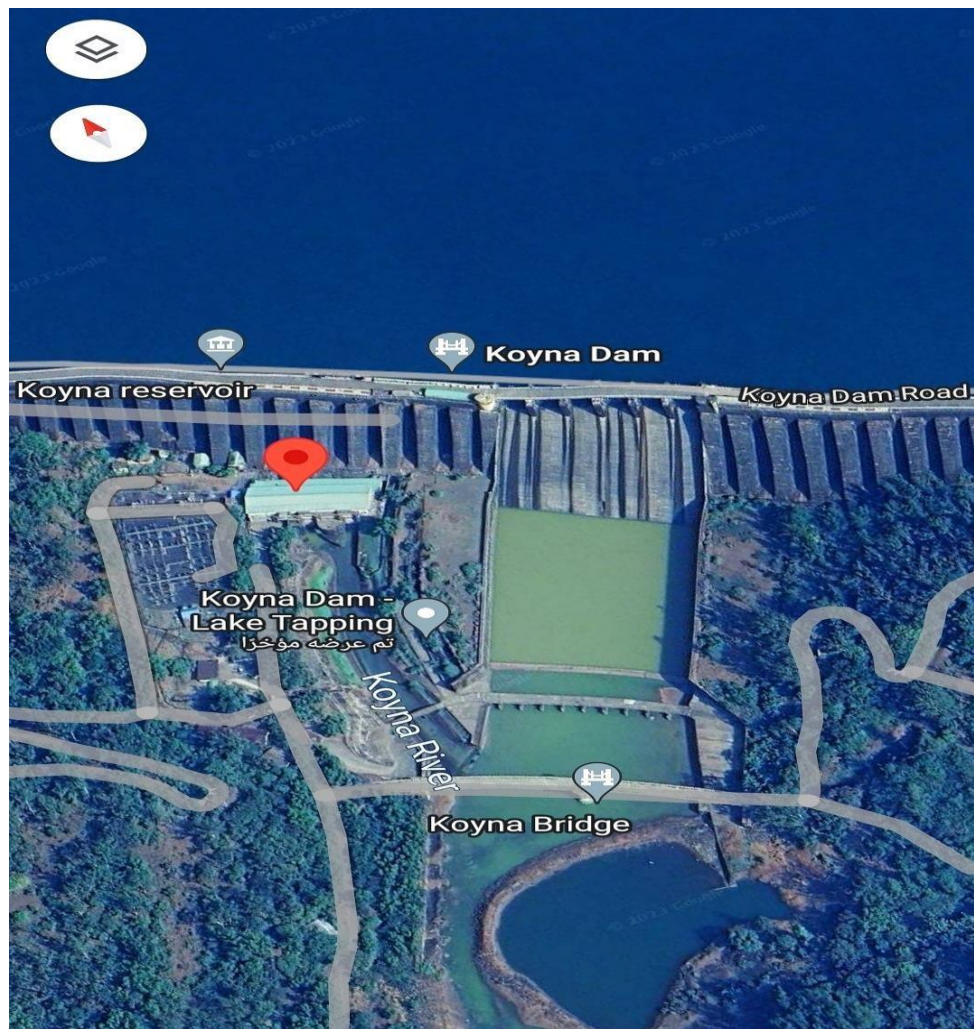


Figure IV.1: Station GPS Barrage de Koyna , Western Maharashtra , Inde.



Figure IV.2: Barrage de Koyna , Westem Maharashtra , Inde.

IV.3. Profil Type du barrage :

Le barrage de KOYNA est un barrage en béton de type poids, les caractéristiques techniques d'un système barrage-fondation sont illustrées à la (Figure IV.3).

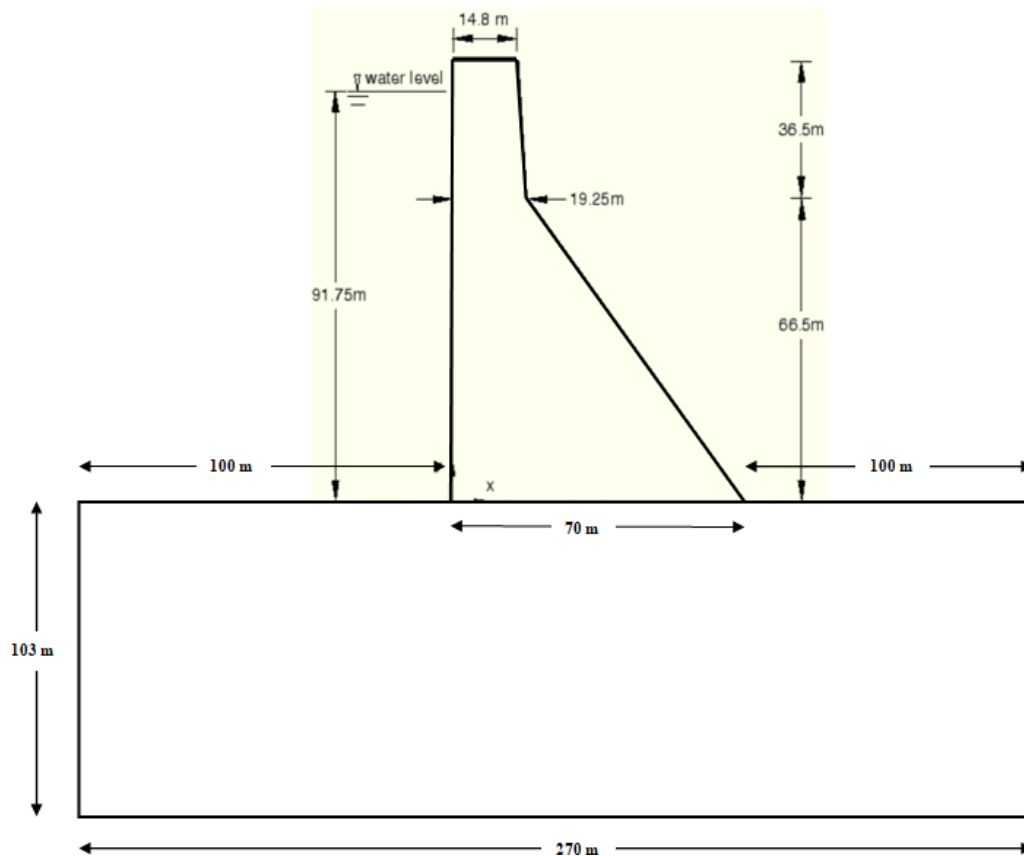


Figure IV.3: Géométrie du barrage (Koyna)-fondation.

Chapitre IV : Application numérique.

Bien que différents mélanges de béton aient été utilisés dans le barrage, la structure a été considérée homogène à des fins d'analyse. Les paramètres d'entrée du modèle comprenaient un pourcentage de cinq pour cent rapport d'amortissement, et les propriétés des matériaux suivantes :

Matériaux	Module de Young (MN)	Coefficiente poisson	Densité Kg/m ³
Corps de Barrage seul (en béton)	31030	0,2	2643
Sol de fondation	16860	0,18	2701

Tableau IV.1: Propriétés de corps de barrage et sol de fondation.

Il est généralement admis que les barrages en béton ont des taux d'amortissement visqueux de 2 % à 5 %, et l'amortissement de l'ensemble du système structurel a été modélisé par l'amortissement Rayleigh, et dans cette étude, un amortissement Rayleigh de 5 % a été appliqué au système barrage-fondation.

IV.4. Modélisation du système barrage (Koyna)-fondation par éléments finis :

Le système d'interaction barrage-fondation est étudié en utilisant deux modèles numériques en deux dimensions (2D). Le premier modèle représente le système barrage koyna seul, qui est fixe à sa base, c'est-à-dire barrage sans interaction sol-structure (Figure IV.5). Le deuxième modèle représente le système couplé barrage-fondation, c'est-à-dire barrage avec interaction sol-structure (Figure IV.6).

Les différents modèles d'éléments finis sont générés à l'aide du logiciel ANSYS.

L'élément choisi pour la discrétisation du corps du barrage ainsi que du sol de fondation est le PLANE182 dont les caractéristiques sont montrées sur la figure IV.4.

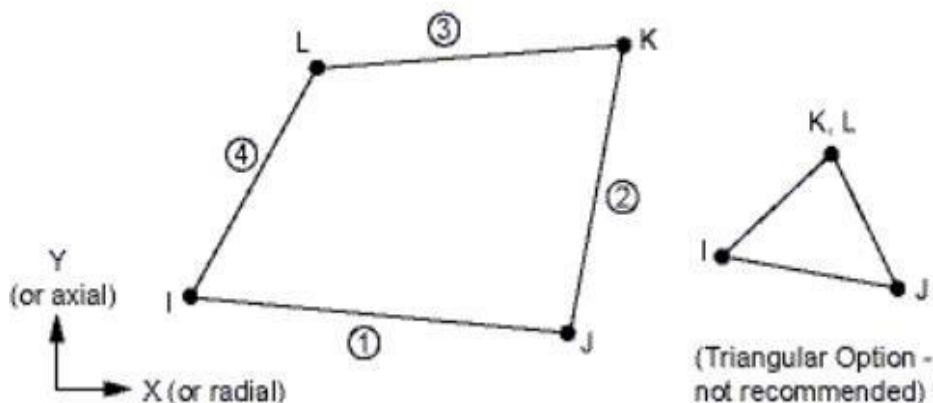


Figure IV.4 : schéma de l'élément PLANE182.

Chapitre IV : Application numérique.

IV.4.1 : Génération du maillage :

L'analyse du comportement dynamique du barrage est faite avec la méthode des éléments finis en utilisant des éléments quadratiques à deux degrés de liberté (UX et UY) (figure IV.5) et (figure IV.6).

A- modèle1 : système du barrage koyna seul.

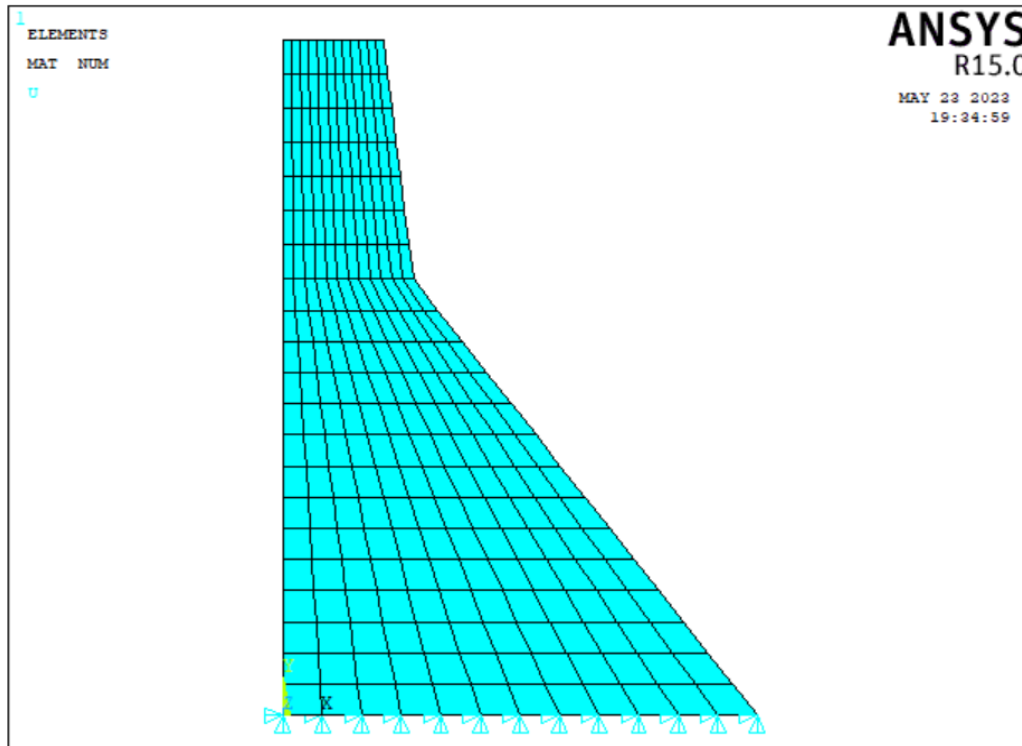


Figure IV.5: Modèle d'éléments finis du Barrage Koyna seul.

La figure IV.5 représente le modèle élément finis du barrage koyna seul c'est à dire sans prise en compte du phénomène d'interaction sol-structure.

B- modèle 2 : système barrage-fondation.

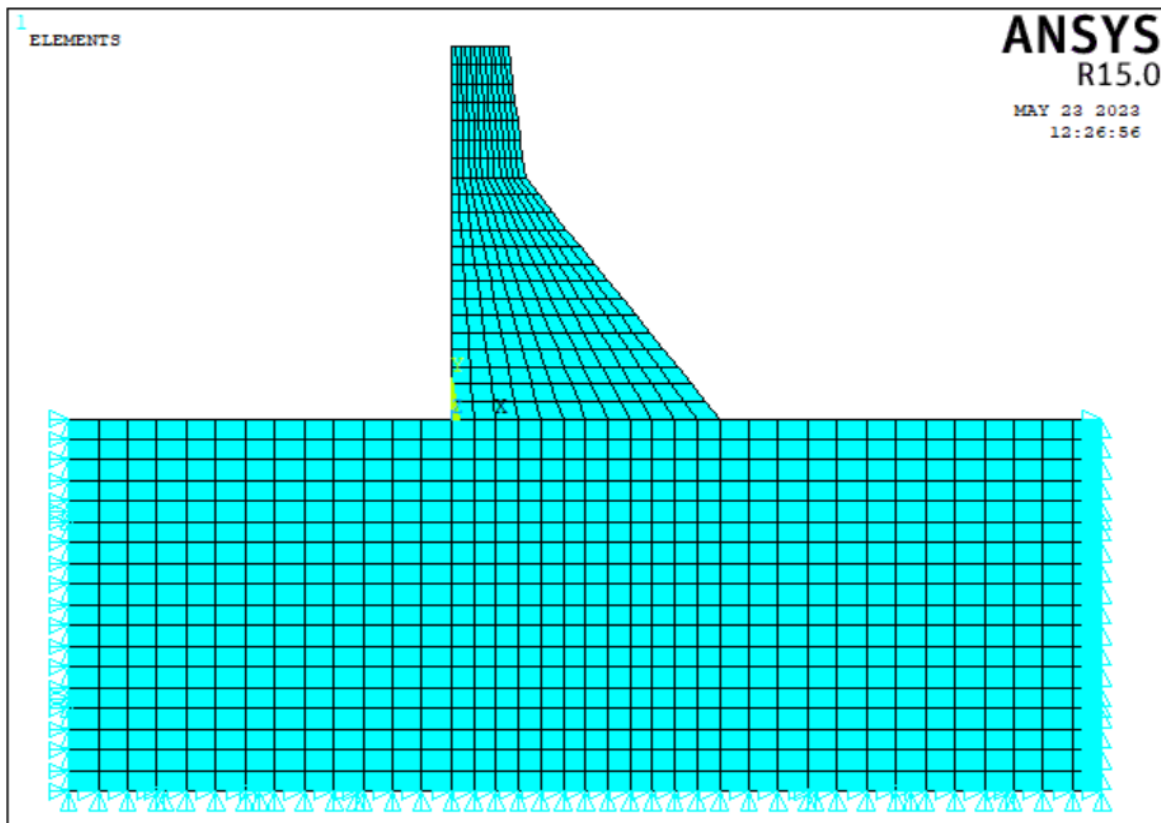


Figure IV.6 : Modèle d'éléments finis du système barrage-fondation.

La figure IV.6 représente le modèle d'élément finis du système barrage-fondation avec sol de fondation c'est à dire tenant en compte du phénomène d'interaction sol-structure.

IV.5. Analyse modale :

L'analyse modale est utilisée pour déterminer les fréquences naturelles.

Les dix fréquences les plus basses sont normales le barrage sans interaction sol-structure, et le barrage-fondation avec interaction sol-structure sont présentées dans les tableaux 2 et 3, respectivement :

➤ Application des conditions limites et résolution :

Nous avons appliqué l'encastrement aux conditions aux limites avant de procéder à la résolution Cette étape consiste à calculer de la période et de la pulsation propre.

La période est donnée par la formule suivante : $T = \frac{1}{f}$

La pulsation est donnée par la formule suivante : $w = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

Avec : * T : la période en seconde.

* f: la fréquence en hertz.

* w : la pulsation.

Chapitre IV : Application numérique.

$$* \pi = 3.1415$$

IV.5.1. Résultats du cas 1 : le modèle du barrage koyna seul.

Mode	Fréquence (Hz)	Période(second)
1	3.0399	0.3290
2	8.1084	0.1233
3	10.865	0.0920
4	16.067	0.0622
5	24.177	0.0414
6	24.807	0.0403
7	34.535	0.0290
8	35.929	0.0278
9	38.802	0.0258
10	42.125	0.0237

Tableau IV.2 : Valeurs de fréquences et périodes du barrage de Koyna .

- Les figures suivantes représentent les cinq modes de déformations du barrage Koynaseul :

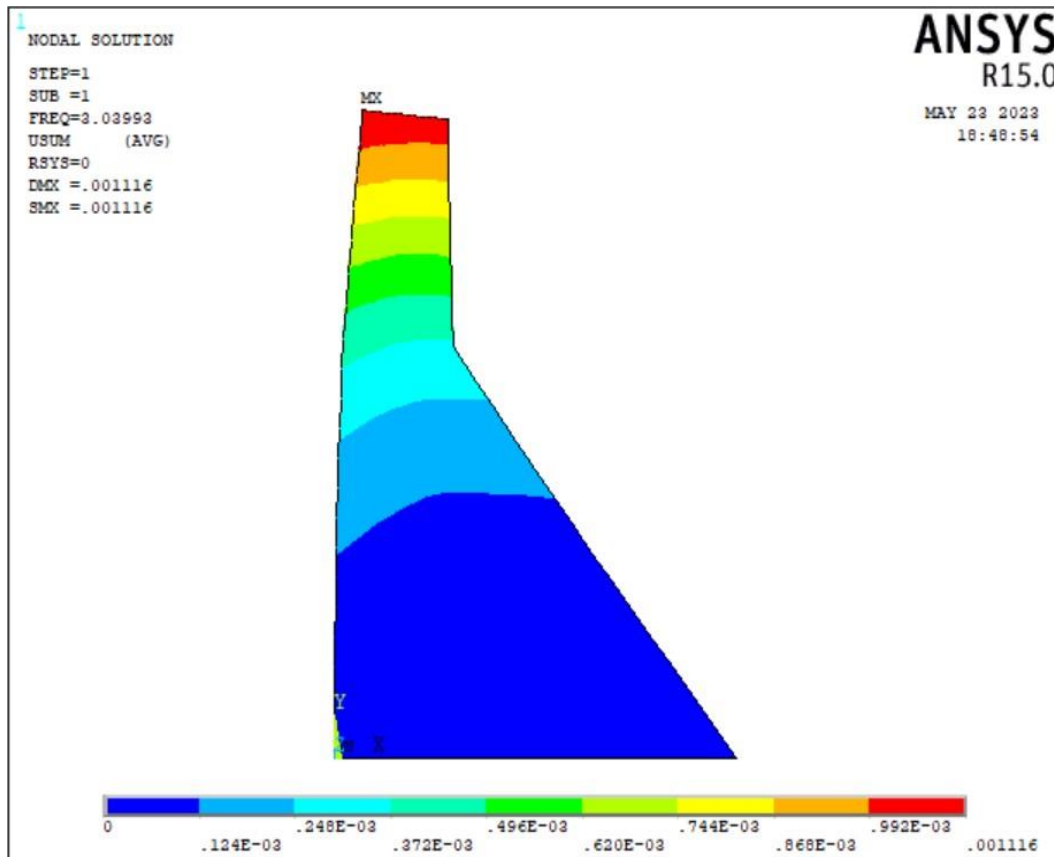


Figure IV.7 : Premier Mode du barrage Koyna seul .

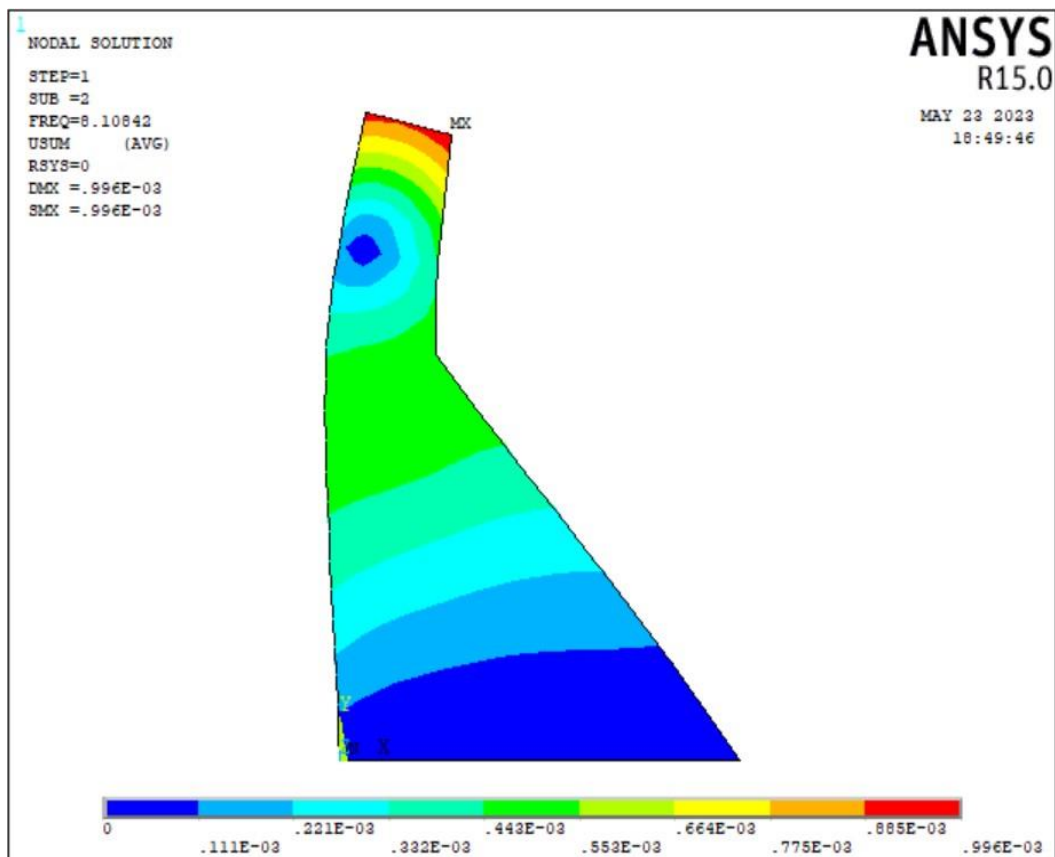


Figure IV.8 : Deuxième Mode du barrage Koynaseul.

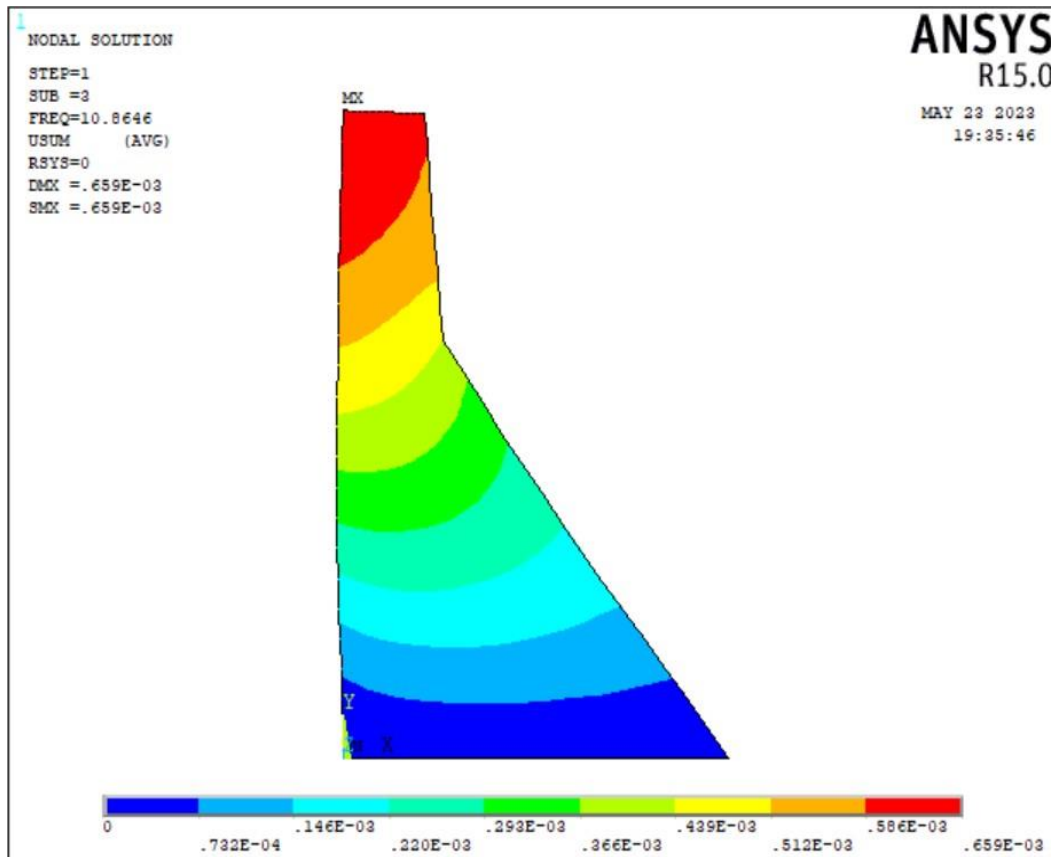


Figure IV.9 : Troisième Mode du barrage Koyna seul.

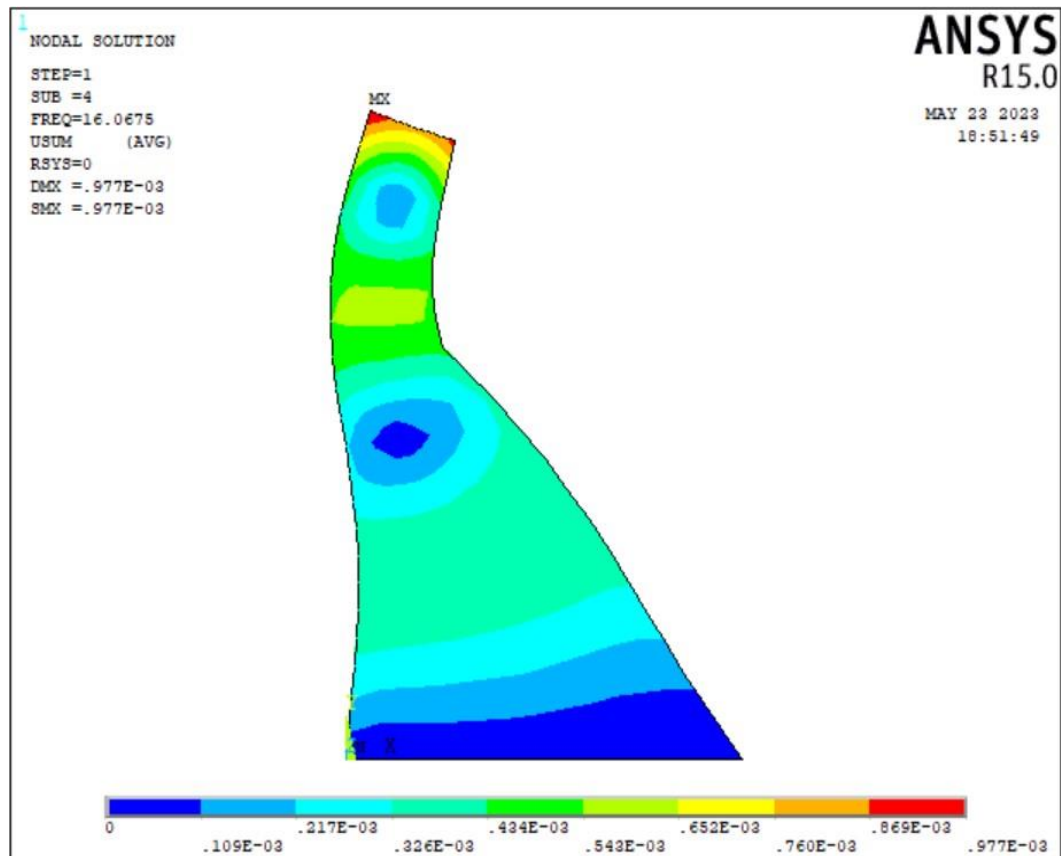


Figure IV.10 : Quatrième Mode du barrage Koyna seul .

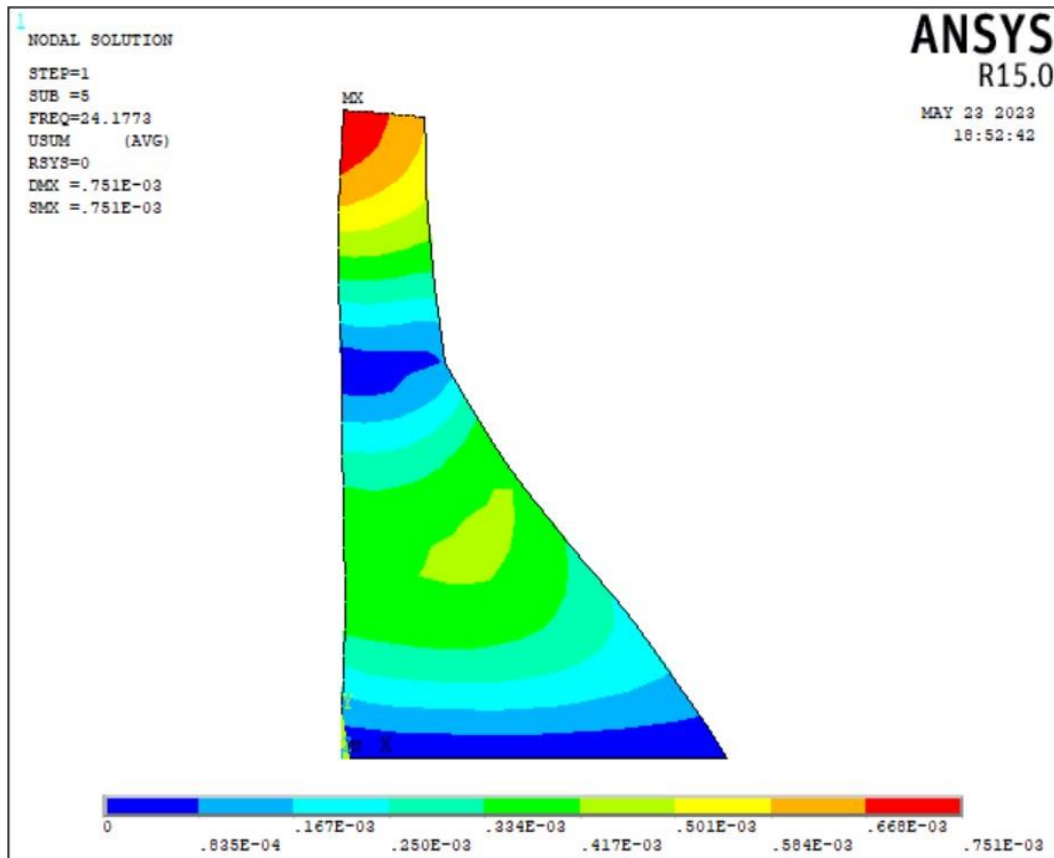


Figure IV.11 : Cinquième Mode du barrage Koynaseul.

IV.5.2. Résultats du cas 2 : le modèle du système barrage-fondation.

Mode	Fréquence (Hz)	Période(second)
1	2.3567	0.4243
2	4.8584	0.2058
3	4.9590	0.2017
4	6.7605	0.1479
5	8.5498	0.1170
6	8.8275	0.1133
7	10.127	0.0987
8	10.827	0.0924
9	12.081	0.0828
10	12.227	0.0818

Tableau IV.3 : Valeurs de fréquences et périodes du système barrage - fondation.

Chapitre IV : Application numérique.

- Les figures suivantes représentent les cinq modes de déformations du système barrage-fondation :

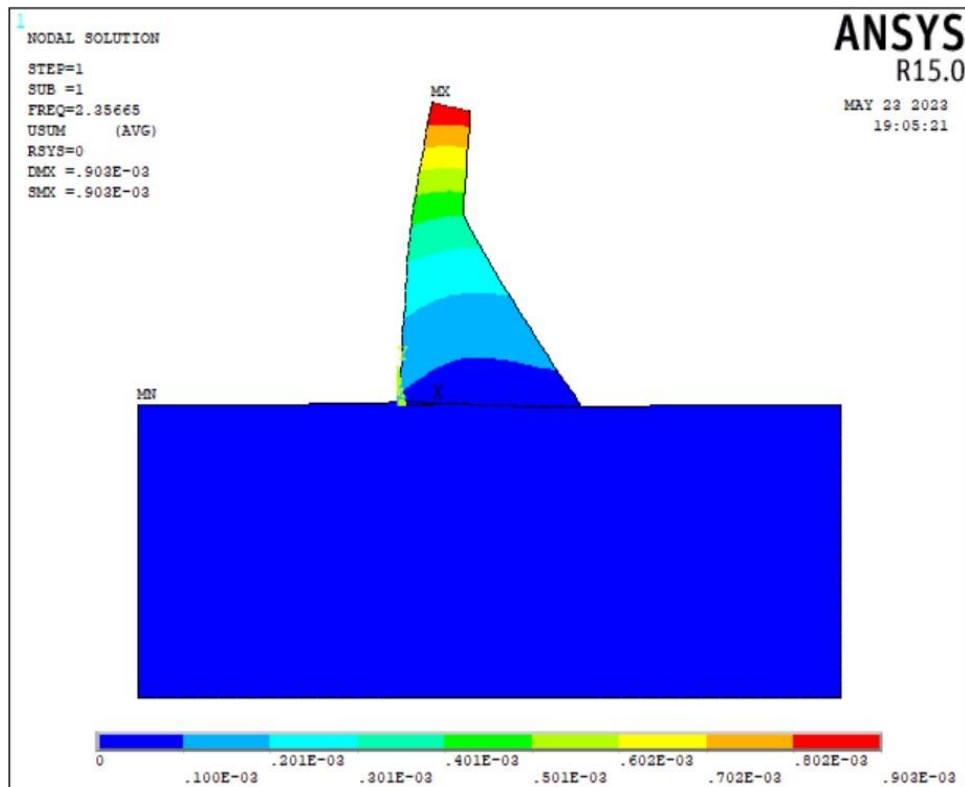


Figure IV.12 : Premier Mode du système barrage-fondation.

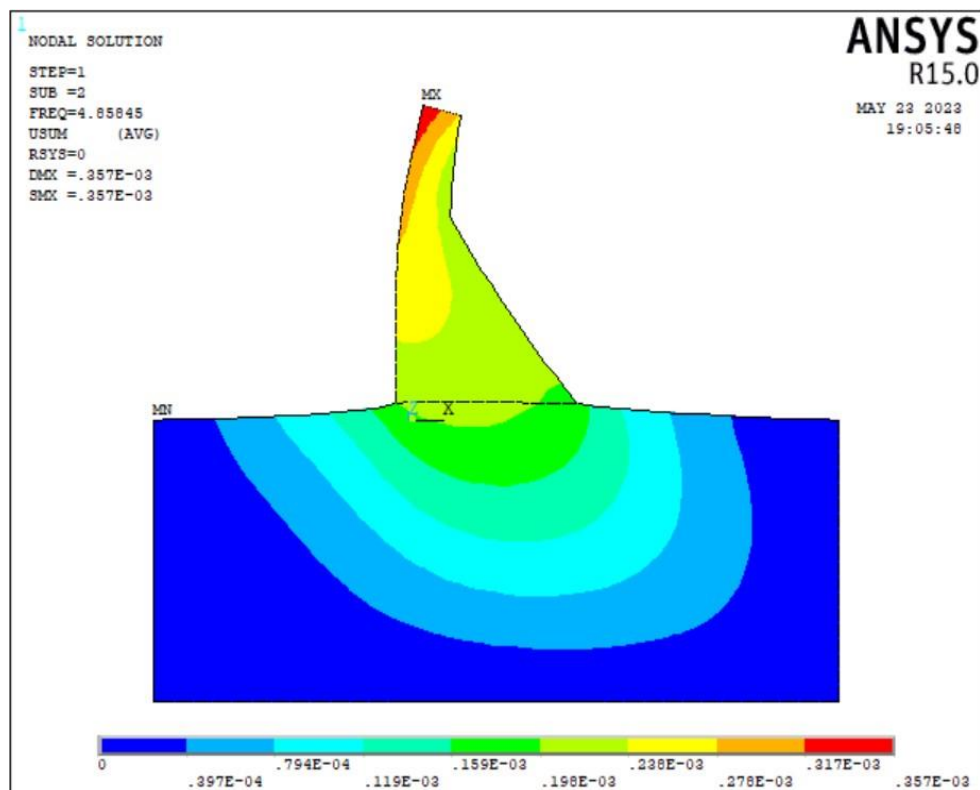


Figure IV.13: Deuxième Mode du système barrage-fondation.

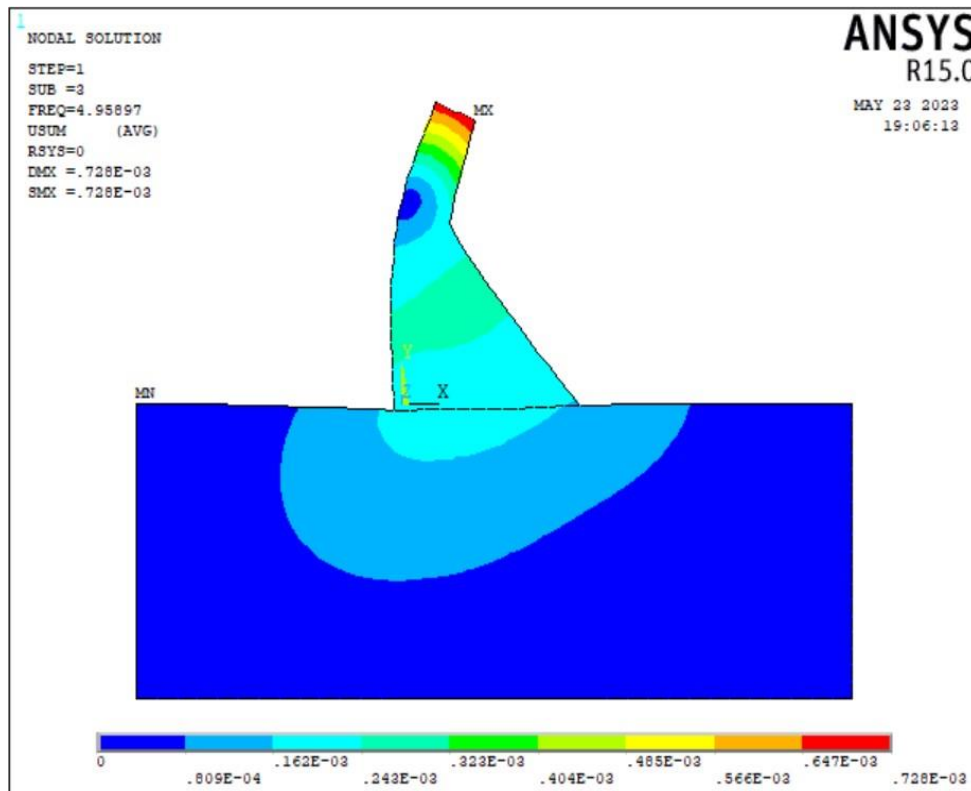


Figure IV.14 : Troisième Mode du système barrage-fondation.

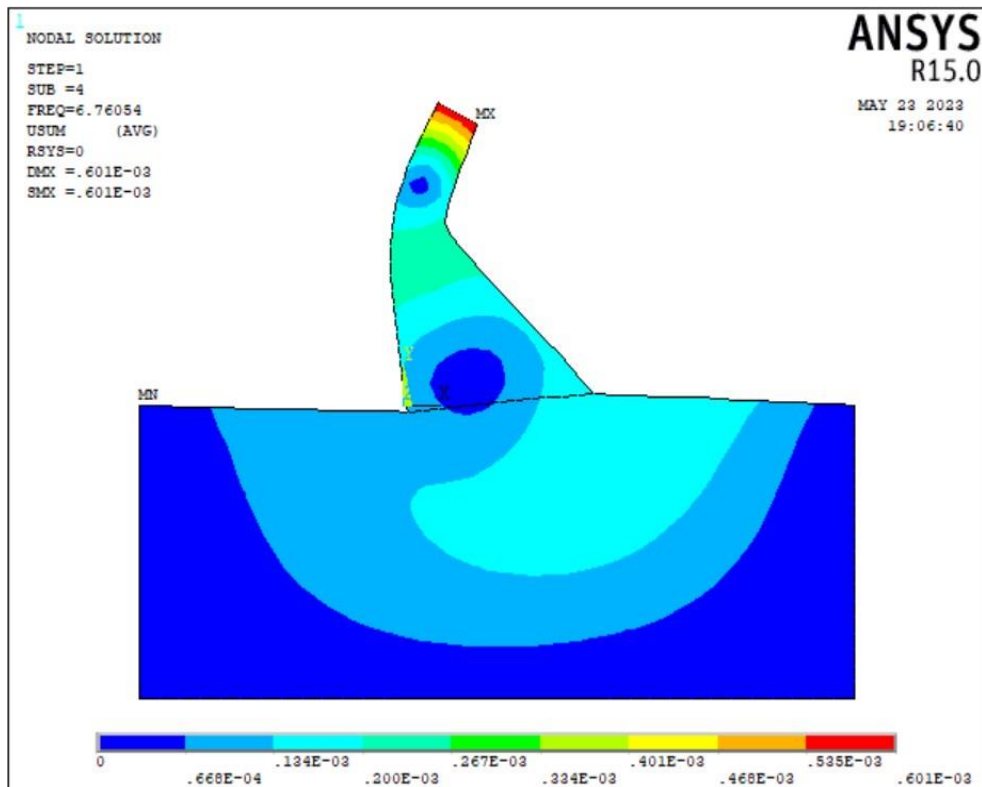


Figure IV.15 : Quatrième Mode du système barrage-fondation.

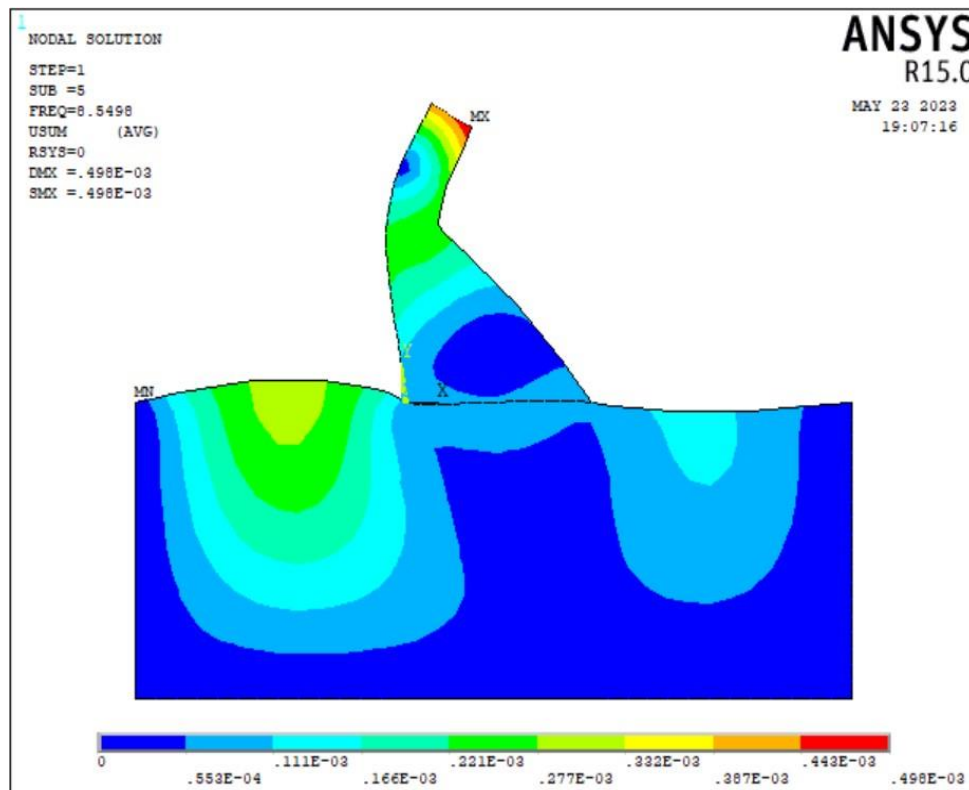


Figure IV.16 : Cinquième Mode du système barrage-fondation.

MODE	Fréquence sans interaction sol structure (Barrage seul)	Fréquence avec interaction sol structure (Barrage-fondation)	Rapport entre les deux fréquences
1	3.0399	2.3567	1.2899
2	8.1084	4.8584	1.6689
3	10.865	4.9590	2.1910
4	16.067	6.7605	2.3766
5	24.177	8.5498	2.8278
6	24.807	8.8275	2.8102
7	34.535	10.127	3.4102
8	35.929	10.827	3.3185
9	38.802	12.081	3.2118
10	42.125	12.227	3.4452

Tableau IV.4 : Le rapport entre les deux fréquences du barrage vide (sans et avec interaction sol-structure).

Chapitre IV : Application numérique.

Le tableau IV.4 résume les 10 premières fréquences du barrage vide avec et sans interaction sol-structure ainsi que le rapport entre les deux fréquences.

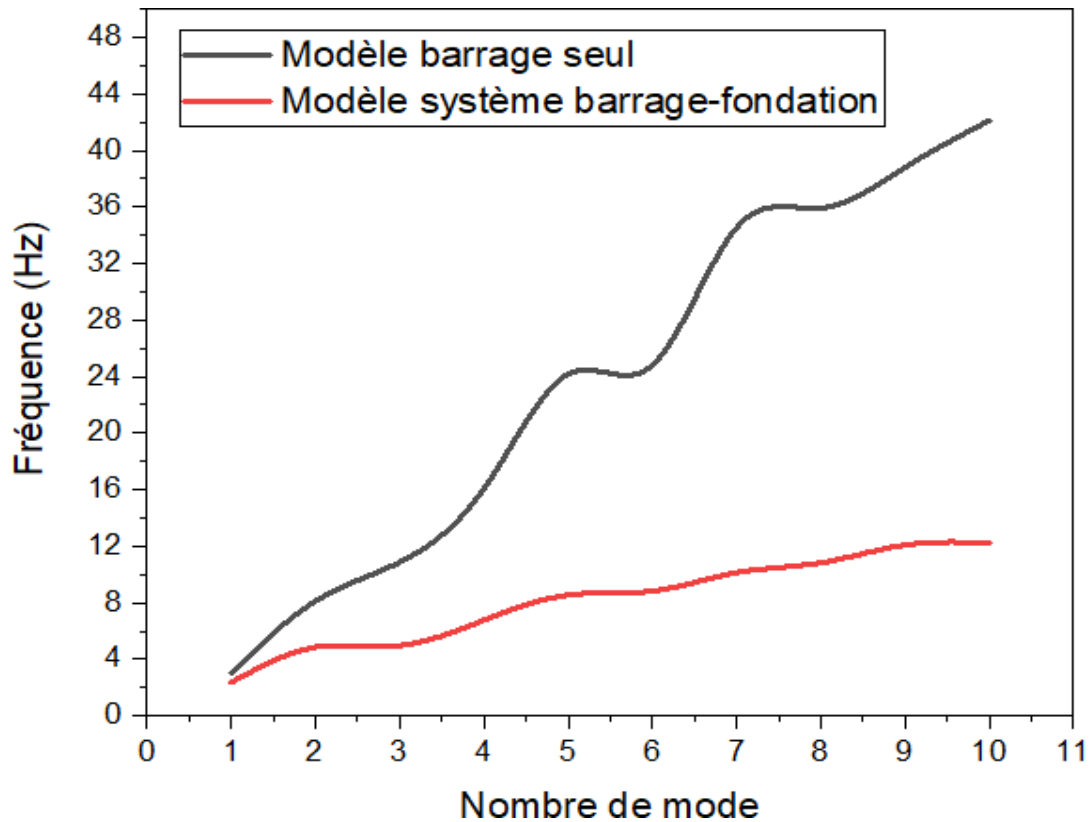


Figure IV.17 : Les 10 fréquences du barrage vide (sans et avec interaction sol-structure).

La figure IV.17 représente les 10 premières fréquences du barrage vide avec interaction et sans interaction sol-structure.

✓ La discussion de l'analyse modale :

L'analyse modale donne les fréquences propres, les périodes, et les rapports ainsi mode propre.

Le barrage koyna a été modélisé par le code élément finis ANSYS version 15. Deux cas d'études ont été mener à savoir le barrage à base fixe (sans interaction sol-structure) et le barrage avec sol (avec interaction sol-structure).

Comme résultats, 10 modes ont été extrait pour chaque cas d'étude. D'après le tableau IV.6, il est clair que la fréquence du barrage vide sans interaction sol-structure est plus grande que celle du barrage vide avec interaction sol-structure.

La fréquence du barrage vide avec sol (interaction sol-structure) augmente par rapport à la fréquence du barrage vide sans interaction jusqu'au trois (03) fois.

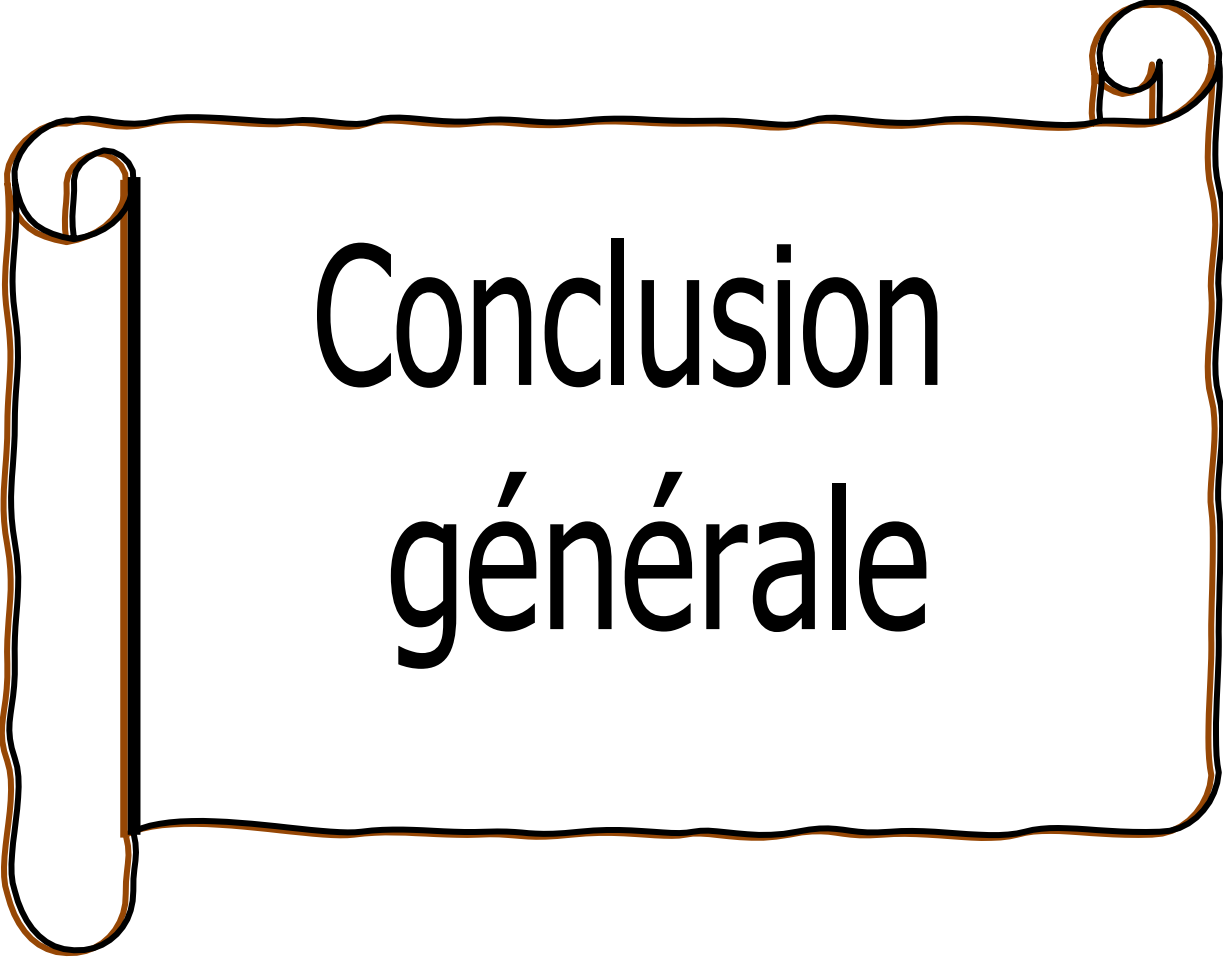
La prise en compte du sol de fondation dans le modèle rend le système plus flexible ce qui diminue la fréquence et par conséquent augmente la période.

Chapitre IV : Application numérique.

On peut conclure que la prise en considération de sol de fondation dans le calcul modal change non seulement les valeurs des fréquences mais aussi le positionnement du mode fondamental

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait l'étude du comportement modal du barrage de Koyna, En tenant compte de l'interaction entre le sol brun. Nous avons créé le modèle du barrage sur code ANSYS, introduit les propriétés matérielles du barrage et nous avons calculé les périodes, les pulsations et les modes propres du barrage de Koyna. En fin, nous avons observé les déformations sur le barrage suivant le mode.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Avant toute étude d'une structure, il est nécessaire de faire l'analyse modale de la structure.

L'importance de l'analyse modale est de déterminer les caractéristiques vibratoires d'une structure (fréquences, périodes, pulsations propres).

Nous avons fait l'étude du comportement modale du barrage de Koyna.

Avec l'analyse modale sur le code ANSYS, un calcul Modal a été mené pour extraire et comparer les périodes et les pulsations qui représentent des caractéristiques vibratoires du barrage.

Les valeurs des pulsations propres du barrage de Koyna calculées par le code ont été rapporté dans le tableau et comparer avec les valeurs de pulsations propres du le barrage de fondation. On remarque que les valeurs de pulsations varient légèrement selon le Code ou selon le chercheur mais elles restent dans le même ordre de grandeur.

Ce travail est l'analyse modale du barrage de Koyna qui a été mis en oeuvre à l'aide du logiciel de calcul ANSYS, ce document peut servir d'un support de base pour toute personne qui s'intéresse à ce domaine de recherche.



Liste des références

Liste des références

- [1] **ANCOLD (1998)**. Guidelines for design of dams for earthquake. Australian National Committee on Large dams, Melbourne.
- [2] A numerical model for time domain analysis of dams including fluid-structure interaction B. Tiliouine A. Seghir Ecole Nationale Polytechnique, Algeria.
- [3] **Antar K. (2004)**, Prise en compte de l'interaction sol-structure dans la réponse des structures en béton armé, Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université des sciences et Technologie Mohamed Boudiaf U.S.T.O.M.B, Oran (Algérie).
- [4] **Emilio Rosenblueth (1980)**, Design of earthquake resistant structures, Design (BNB/PRECIS).
- [5] **Evgeny Barkanov**. Introduction to the finite element method. Institute of Materials and Structures Faculty of Civil Engineering Riga Technical University.
- [6] Fluid-structure models for dynamic studies of dam-water systems B. Tiliouine & A. Seghir Ecole Nationale Polytechnique, Algiers, ALGERIA
- [7] **GIGB (ICOLD) (1986)**. Méthodes de calcul sismique pour barrages, Bulletin 52.
- [8] Lysmer, J., Udaka T., Tsai C. and Seed, H.B. FLUSH: A computer program for approximate 3D analysis of soil-structure interaction problems. Earthquake engineering Research Center report 75-30, University of California, Berkeley, 1975.
- [9] **Mohammed Kadri (2005)**. Effet de la non linéarité géométrique sur le comportement des barrages. Algerian Journal of Technologie.
- [10] **Newmark, N.M. (1965)**. Effects of earthquakes on dams and embankments. Sth Rankine lecture, Géotechnique, vol.15, No.2, 139-160.
- [11] **Ouzandja, D., & Tiliouine, B. (2015)**. Effects of Dam-Foundation Contact Conditions on Seismic Performance of Concrete Gravity Dams. Arabian Journal for Science and Engineering, 40(11), 3047-3056.
- [12] **Ouzandja, D., Benkechida, F., Ouzandja, T., & BELHADED, H.** Study of dynamic soil-structure interaction of concrete gravity dams. In Proceeding of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.
- [13] **Ouzandja, D., Tiliouine, B., & Ouzandja, T. (2017, July)**. Nonlinear seismic response of concrete gravity dams. In International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology" (pp. 13-21). Springer, Cham.

Liste des références

- [14] **Ouzandja, D. (2016).** Effets des conditions de contact à l'interface barrage-fondation sur la performance sismique des barrages-poids en béton (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- [15] **OUZANDJA, D., & TILIOUINE, B.** Formules empiriques de calcul des périodes fondamentales de systèmes sol-structure: validation et étude paramétrique empirical formulas for computation of fundamental periods of sol-structure systems: validation and parametric study.
- [16] **Ouzandja, d., tiliouine, b., & ouzandja, t.** Dynamic behavior analysis of concrete gravity dams analyse du comportement dynamique des barrages-poids en béton.
- [17] Pecker, A. Dynamique des sols. Presses Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1984.
- [18] Pecker, A. Dynamique des ouvrages, dynamique des structures. Polycopie des cours, ENPC, website : <http://www.enpc.fr/fr/formations/école.vite/cours/pecker>, 2004.
- [19] **Robin Feil, Patrick MacGregor, David Stapledon and Graeme Bell (2005).** Geotechnical engineering of dams. AA.B ALKEMAPUBLISHERS Leiden/London/New
- [20] **US Corps of Engineers (1984).** Rationalising the seismic coefficient method. Miscellaneous Paper GL84-13.
- [21] Wang, J. Influence of different boundary conditions on analysis of SSI. In 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), pages 3157-3164, Beijing, China, 2005.
- [22] Wight, L.H. Soil-structure interaction in nuclear power plants: A comparison of methods. Proceeding 6th World Conference on Earthquake Engineering, vol. 4, New Delhi, India, 1977.

Résumé

Les barrages en béton sont considérés comme des systèmes de construction complexes qui jouent un rôle majeur à la fois sur le plan économique et stratégique. En compte tenu de l'interaction sol-structure.

Dans cette étude, nous étudions l'effet de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse dynamique des barrages-poids en béton. A cet effet, deux modèles d'éléments finis à deux dimensions (2D) sont générés à l'aide du logiciel ANSYS. Le premier modèle représente le barrage seul, qui est fixe à sa base (modèle sans ISS). Le deuxième modèle illustre le système barrage-fondation (modèle avec ISS). Le barrage-poids en béton de koyna situé à Maharashtra, dans le sud-ouest de Inde a été choisi comme cas d'étude.

Mots clés : Interaction sol-structure, Barrage-poids en béton, réponse dynamique, logiciel ANSYS.

Abstract

Concrete dams are considered complex construction systems that play a major role both economically and strategically. Taking into account the soil-structure interaction.

In this study, we investigate the effect of soil-structure interaction (ISS) on the dynamic response of concrete gravity dams. For this purpose, two two-dimensional (2D) finite element models are generated using ANSYS software. The first model represents the dam alone, which is fixed at its base (model without ISS). The second model illustrates the dam-foundation system (model with ISS). The concrete gravity dam of koyna located in Maharashtra, in the south-west of India was chosen as a case study.

Keywords: Soil-structure interaction, Concrete gravity dam, dynamic response, ANSYS software.

ملخص

تعتبر السدود الخرسانية أنظمة بناء معقدة تلعب دورًا رئيسيًا اقتصاديًا واستراتيجيًا. مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعل بين التربة والبنية.

في هذه الدراسة، قمنا بدراسة تأثير التفاعل بين بنية التربة (ISS) على الاستجابة الديناميكية لسدود الجاذبية الخرسانية. لهذا الغرض، تم إنشاء نماذج العناصر المحدودة ثنائية الأبعاد (2D) باستخدام برنامج ANSYS. النموذج الأول يمثل السد وحده المثبت في قاعدته (نموذج بدون تفاعل بنية التربة). يوضح النموذج الثاني نظام أساس السد (نموذج مع تفاعل بنية التربة). تم اختيار سد الجاذبية الخرساني koyna الواقع في ولاية ماهاراشترا في جنوب غرب الهند كدراسة حالة.

الكلمات المفتاحية: تفاعل بنية التربة، سد الجاذبية الخرساني، الاستجابة الديناميكية، برنامج ANSYS.

