

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Civil

Option : Structure

Thème :

***Analyse modale des systèmes d'interaction
barrage –réservoir-fondation***

Présenté par :

- ***Chaanbi chaimaa***
- ***Chaiche chaima***

Dirigé par :

Dr. Ouzandja djemal

Année Universitaire : 2022 / 2023

Remerciements

On tient à remercier en premier lieu mon dieu ALLAH qui nous a donné la volonté et le courage pour la réalisation de ce modeste travail. On adresse nos sincères remerciements à notre encadreur Djamel Ouzandja et on le remercie de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé et pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

On tient à exprimer toute nos reconnaissances à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté à nos rencontrer et répondre à nos questions.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux, membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

On tient aussi à remercier monsieur le chef du département de SCIENCE ET TECHNOLOGIE à l'Université de M'sila : Dr Laaid baali ainsi que tout le personnel et les enseignants du département pour leur soutien inestimable.

Afin de n'oublier personne, nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui nous aidée à la réalisation de ce modeste mémoire

Dédicaces

اهداء الى عائلة شعبي

أشكر الله العلي القدير الذي أنعم عليّ بنعمة العقل والدين. القائل في محكم التنزيل "وَفَوْقَ كُلِّ ذِي عِلْمٍ عَلِيمٌ" سورة يوسف آية 76.... صدق الله العظيم.

أهدي تخرجي هذا إلى من علمني العطاء وإلى من أحمل اسمه بكل افتخار وأرجو من الله أن يمد في عمرك لترى ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار "والدي العزيز" وإلى ملاكي وملكة قلبي الى قدوتي في الحياة الى عزيزتي " امي " طيب الله ثراها إلى إخوتي؛ ايمان، نسرين، بثينة الى زوج اختي مفيد الذي كان بمثابة اخ من كان لهم بالغ الأثر في كثير من العقبات والصعاب وإلى من برفقتهم في دروب الحياة السعيدة والحزينة سرت وإلى من كانوا معي على طريق النجاح والخير " صديقاتي العزيزات والى رفيقتي في المذكرة " شيما ش "

وأخيراً، أتقدم بجزيل شكري إلي كل من مدوا لي يد العون والمساعدة زملائي في العمل والأستاذ عيمرنور الدين في إخراج هذه الدراسة علي أكمل وجه

Dédicaces

اهداء الى عائلة شايش

أحمد الله سبحانه وتعالى الذي منَّ علينا بنعمة العقل والدين، وهو القائل في محكم التنزيل:
“فَاذْكُرُونِي أَذْكُرْكُمْ وَاشْكُرُوا لِي وَلَا تَكْفُرُونِ” ، وقد قال رسول الله صلى الله عليه وسلم: “مَنْ صَنَعَ
إِلَيْكُمْ مَعْرُوفًا فَكَافِنُوهُ، فَإِنْ لَمْ تَجِدُوا مَا تُكَافِنُونَهُ فَادْعُوا لَهُ حَتَّى تَرَوْا أَنْكُمْ قَدْ كَافَأْتُمُوهُ” ،

وأيضاً وفاءً وتقديرًا واعترافًا مني بالجميل والفضل الجزيل أهدي تخرجي هذا إلى من
علمني العطاء وإلى من أحمل اسمه بكل افتخار وأرجو من الله أن يمد في عمرك لتتري
ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار “والدي العزيز” وإلى ملاكي في الحياة وإلى معنى
الحب والحنان والتفاني وإلى بسمة الحياة وسر الوجود وإلى من كان دعائها سر نجاحي
أغلى الحبايب “امي الحبيبة” وإلى من له الفضل الكبير في تشجيعي وتحفيزي ومن منة
تعلمت المثابرة والاجتهاد وإلى من بهم أكبر وعليهم أعتمد وإلى من بوجودهم أكتسب قوة
ومحبة لا حدود لها وإلى من عرفت معهم معنى الحياة “إخوتي وأخواتي” وإلى من تحلوا
بالإخاء وتميزوا بالوفاء والعطاء وإلى من برفتهم في دروب الحياة السعيدة والحزينة
سرت وإلى من كانوا معي على طريق النجاح والخير “أصدقائي الأعزاء سوسن وسهام
”والى رفيقتي في المذكرة “شيماء. ش ” ، ودون ان انسى جدي رحمه الله الذي كان له
فضل كبير علي

فبتوفيق من الله، وبدعاء من الام لم يبق سوى خطوات قليلة لإنهاء مسيرتي الدراسية،
شكرًا لكل من مد لي يد العون واسأل الله التوفيق لي ولكم

Résumé :

Le présent travail de cette thèse vise à étudier l'effet de l'interaction du sol -fluide -structure sur la réponse dynamique des barrage poids en béton. Les barrages en béton sont considérés comme des systèmes de construction complexes qui jouent un rôle économique et stratégique majeur pour ce il nous a fallu passer en revue et assimiler les études préliminaires aux projets de barrages afin de présenter les particularités de ces ouvrages dans l'ensemble des structures de génie civil. A cet effet, trois 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 et le troisième modèle montre le système couplé barrage – réservoir –fondation. Le barrage-poids en béton de koyna, situé en Inde dans Koyna Nagar non loin de la ville de Mumbai. Le fluide du réservoir est représenté par une masse ajoutée Les modèles numériques développés devraient conduire à une évaluation fiable et efficace des déformations dynamiques et des contraintes qui se produisent dans les corps de barrage, en tenant compte de l'interaction du sol -structure- fluides.

Mots clés : Barrage, ANSYS, Analyse modale, Comportement modal

ملخص :

يهدف العمل الحالي لهذه الأطروحة إلى دراسة تأثير تفاعل بنية سائل التربة على الاستجابة الديناميكية لسدود الوزن الخرسانية. تعتبر السدود الخرسانية أنظمة بناء معقدة تلعب دورًا اقتصاديًا واستراتيجيًا رئيسيًا لما كان علينا مراجعته واستيعاب الدراسات الأولية لمشاريع السدود من أجل عرض خصوصيات هذه الأعمال في جميع هياكل الهندسة المدنية. لهذا الغرض، يتم إنشاء ثلاثة نماذج ثنائية الأبعاد (ثنائية الأبعاد) للعناصر المحدودة باستخدام برنامج ANSYS. يمثل النموذج الأول السد وحده، والذي تم تثبيته في قاعدته (النموذج بدون تفاعل بنية التربة)، ويوضح النموذج الثاني نظام أساس السد ويظهر النموذج الثالث نظام أساس السد المقترن. سد الجاذبية الخرسانية كوينيا، الواقع في الهند في كوينيا ناچار ليس بعيدًا عن مدينة مومباي. يتم تمثيل سائل الخزان بكتلة مضافة، يجب أن تؤدي النماذج العددية التي تم تطويرها إلى تقييم موثوق وفعال للتشوهات الديناميكية والضغط التي تحدث في أجسام السد، مع مراعاة تفاعل سائل هيكل التربة.

كلمات مفتاحية: سد , ANSYS سلوك مشروط , دراسة مشروطة.

Summary:

The present work of this thesis aims to study the effect of the interaction of soil -fluid - structure on the dynamic response of concrete weight dams. Concrete dams are considered to be complex construction systems that play a major economic and strategic role for what we had to review and assimilate preliminary studies to dam projects in order to present the particularities of these works in all civil engineering structures. For this purpose, three two-dimensional (2D) finite element models are generated using the 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 and the third model shows the coupled dam-foundation system. The koyna concrete gravity dam, located in India in Koyna Nagar not far from the city of Mumbai. The reservoir fluid is represented by an added mass. The numerical models developed should lead to a reliable and efficient evaluation of the dynamic déformations and stresses that occur in the dam bodies, taking into account the interaction of soil-structure-fluids

Keywords: Dam, Ansys, modal analysis, modal behavior

Sommaire

Introduction générale	I
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

I.1 Introduction :	2
I.2 Définitions	2
I.3 Les différents types de barrages :	3
I.3.1 Les Barrages en béton :	3
I.3.1.1 Barrage-poids (gravité) :	3
I.3.1.2 Barrages-voûtes :	4
I.3.1.3 Barrages à contreforts :	5
I.3.2 Les Barrages en remblais :	7
I.3.3 Les Barrages mobiles	8
I.4 Classification des barrages :	9
I.4.1 Les matériaux de construction :	9
I.4.2 La façon à résister à la poussée de l'eau :	9
I.5 Le choix du site et du type de barrage :	9
I.6 Avantages Et Particularités En Béton :	10
I.6.1 Barrages poids	10
I.6.2 Barrages à contrefort	10
I.6.3 Barrages voûtes	11
I.7 Analyse de la stabilité d'un barrage poids	11
I.7.1 Actions agissantes sur les barrages poids :	12
I.7.2 Manifestations des actions :	13
I.7.2.1 Le poids propre P0 :	13
I.7.2.2 Poussée des sédiments déposés au pied amont Q2 :	13
I.7.2.3 Poussée hydrostatique amont Q1 :	14
I.7.2.5 Sous pressions P1	16
I.7.2.6 Poussée de glaces	17
I.7.2.7 Actions accidentelles	17
I.7.3 Amélioration de la sécurité du barrage	18
I.8 Conclusion	19

Chapitre II : interaction sol-structure

II.1 Introduction	20
II.2 Objectif des analyses d'interaction sol-structure:	20
II.3 Généralités	21
II.4 Notion d'interaction sol-structure:	22
II.5 Étude du problème d'interaction sol structure :	22
II.5.1 Formulation d'un problème d'interaction	22
II.5.2 Mouvement du sol en champ libre :	23
II.6 Illustration de l'effet de l'interaction sol structure.....	25
II.6.1 Model analogique simplifie.....	25
II.6.2 Influence de l'interaction sol structure :	26
II.7 Les effets de l'ISS :.....	27
II.8 Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structure.....	28
II.8.1 Interaction cinématique et interaction inertielle	28
II.8.2 L'amortissement radiatif.....	28
II.9 Méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure	29
II.9.1 Méthodes directes (globales) :.....	29
II.9.2 Méthodes de sous-structures :	30
II.9.2.1 Méthodes de frontière.....	30
II.9.2.1.1 Frontière rigide :	32
II.9.2.1.2 Frontière flexible	33
II.9.2.2. Méthodes de volume :	34
II.9.3 Méthodes hybrides :.....	34

Chapitre III : Interaction fluide-structure

III.1 Introduction :	21
III.2 Interaction fluide structure :	21
III.3 Différentes méthodes d'interaction fluide-structure.....	22
III.3.1 La méthode de masse ajoutée de Westergaard:	22
III.3.1.1 Effet d'inertie :.....	23
III.3.1.2 Effet de compressibilité :.....	24
III.3.1.3. Effet de viscosité :.....	25

III.3.2 Détermination de la masse d'eau entraînée :	25
III.4 Solution de westergaard :	26
III.5 Couplage fluide-structure à l'aide de la méthode des.....	27
III .5.1 Système couplé fluide -structure :.....	27
III.5.1.1 Équation du mouvement :	28
III.6 Conclusion :	31

Chapitre IV : Application numérique

IV.1 Introduction :	33
IV.2 Description du site de la structure :	33
IV.3 Caractéristiques du barrage de Koyna :	35
IV.3.1 Géométrie :	35
IV.3.2. Propriétés du matériau béton :	35
IV.4 Analyse modale :	36
IV.5 Intérêt de l'analyse modale :	36
IV.6 Procédure :	36
IV.6.1 Création du modèle	36
IV.6.2 Choix du type et des options d'analyse :	42
IV.6.3 Application des conditions limites et résolutions :	43
IV.6.4. Interprétation des résultats :	45
Conclusion :	53
Conclusion générale	56
Liste des références	58

Liste des figures

Figure I.1. Barrage poids	4
Figure I.2. Barrage poids de la Grande Dixence (Suisse)	4
Figure I.3. Barrage voûte	5
Figure I.4. Barrage voûte de Naret 1(Suisse).....	5
Figure I.5. Barrage à contreforts	6
Figure I.6. Barrage à contreforts d'Ekbatan (Iran)	6
Figure I.7. Barrages en terre homogène	7
Figure I.8. Barrages à noyau	7
Figure I.8. Barrages à masque.....	8
Figure I.9. Barrage de Chatou-France	9
Figure I.10. Les différentes actions agissantes sur barrage poids	12
Figure I.11. Action du poids propre du barrage	13
Figure I.12. Action des sédiments sur le barrage	14
Figure I.13. Action de la poussée hydrostatique	15
Figure I.14. Action de la poussée hydrostatique aval Q3	15
Figure I.15. Diagrammes indicatifs des sous-pressions en fonction de l'injection et de drainage.....	16
Figure I.16. Diagramme de la répartition des sous-pressions.....	17
Figure II.1. Schématisation de l'interaction sol-structure [GAZETAS et MYLONAKIS, 1998].....	21
Figure II.2. Décomposition du problème d'interaction sol-structure	23
Figure II.3. Accélération en champ libre.....	24
Figure II.4. Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS.....	25
Figure II.5. Modèle analogique simplifié d'interaction sol-structure.....	26
Figure II.6. Lecture spectrale montrant les effets de la prise en compte de l'ISS.....	27
Figure II.7. Principe de décomposition de l'interaction sol-structure.....	28
Figure II.8. Schématisation d'un problème d'interaction Sol structure en éléments finis	29
Figure II.10. Théorème de superposition de KAUSE	33
Figure II.11. Méthode des sous-structures : Méthode de volume.....	34
Figure II.12. Méthode Hybride	35
Figure III.1. Barrage-réservoir.....	21
Figure III.2. Domaine de Barrage-réservoir	22
Figure III.3. Pression hydrodynamique sur la face amont du barrage	24

Figure III.4. Modélisation géométrique d'un barrage-poids	25
Figure III.5. Présentation du système barrage-réservoir	28
Figure IV.1. Barrage de Koyna	34
Figure IV.2. Station GPS Barrage de Koyna, Western Maharashtra, Inde	34
Figure IV.3. La géométrie des systèmes interaction barrage-fondation-réservoir	35
Figure IV.4. Géométrie du barrage seul de Koyna sur Ansys avec les points et les lignes ...	37
Figure IV.5. Géométrie du barrage-fondation de Koyna sur Ansys avec les points et les lignes	38
Figure IV.6. Géométrie du barrage-fondation-réservoir de Koyna sur Ansys avec les points et les lignes	38
Figure IV.7. Section du barrage seul de Koyna sur ANSYS	39
Figure IV.8. Maillage du barrage seul.....	39
Figure IV.9. Section du barrage-fondation de Koyna sur ANSYS	40
Figure IV.10. Maillage du barrage-fondation de Koyna	40
Figure IV.11. Section du barrage-fondation-réservoir de Koyna sur Ansys	41
Figure IV.12. Maillage du barrage-fondation-réservoir de Koyna	41
Figure IV.13. Couplage du barrage-fondation-réservoir de Koyna	42
Figure IV.14. Valeurs de fréquences du barrage seul	43
Figure IV.15. Valeurs de fréquences du barrage-fondation.....	43
Figure IV.16. Valeurs de fréquences du barrage-fondation-réservoir.....	43
Figure IV.17. La courbe de fréquences des trois systèmes du barrage	43
Figure IV.18. Déformation 1 du barrage seul	47
Figure IV.19. Déformation 2 du barrage seul	47
Figure IV.20. Déformation 3 du barrage seul	48
Figure IV.21. Déformation 4 du barrage seul	48
Figure IV.22. Déformation 1 du barrage-fondation	49
Figure IV.23. Déformation 2 du barrage-fondation	50
Figure IV.24. Déformation 3 du barrage-fondation	50
Figure IV.25. Déformation 4 du barrage-fondation	50
Figure IV.26. Déformation 1 du barrage-fondation-réservoir	52
Figure IV.27. Déformation 2 du barrage-fondation-réservoir	52
Figure IV.28. Déformation 3 du barrage-fondation-réservoir	53
Figure IV.29. Déformation 4 du barrage-fondation-réservoir	53

Liste des tableaux

Tableau IV.1. Propriétés des matériaux du barrage-poids de koyna.....	35
Tableau IV.2. Valeurs de fréquences, périodes et pulsations propres du barrage seul de Koyna	44
Tableau IV.3. Valeurs de fréquences, périodes et pulsations propres du barrage (koyna) fondation	44
Tableau IV.4. Valeurs de fréquences, périodes et pulsations propres du barrage-fondation- réservoir	45
Tableau IV.5. Les fréquences du trois systèmes	45

Abréviations et notations

BCR : Béton compacté au rouleau.

BCV : Béton conventionnel vibré.

CRN : Côte retenue normale.

CVM : Côte volume mort.

φ : Angle de frottement interne des sédiments

K_0 : Coefficient de la poussée des sédiments.

P_0 : Force due au poids propre du barrage.

P_1 : Force due aux sous pressions.

Q_1 : Force de la charge d'eau en amont.

Q_2 : Force de la charge des sédiments.

Q_3 : Force de la charge d'eau en aval.

[M] : Matrices de masse, amortissement et raideur.

[C] : Matrices d'amortissement.

[K] : Matrices de raideur.

Γ_F : Surface délimitant le fond du réservoir.

Γ_I : Surface d'interaction fluide structure.

Γ_R : Surface de troncature du réservoir.

Γ_S : Surface libre de réservoir.

ρ_w : Masse volumique du fluide

h_w : Niveau d'eau du réservoir

Z : Coté de la partie immergée de la face amont

u_g : Accélération du sol

Δh_i : Epaisseur de la tranche i

h_i : Hauteur de la tranche i

M_s : Matrice de masse de la structure

C_s : Matrice d'amortissement de la structure

K_s : Matrice de rigidité de la structure

M_F : Matrice de masse du fluide

C_F : Matrice d'amortissement du fluide

U : Vecteur des déplacements

\dot{U} : Vecteur des vitesses

\ddot{U} : Vecteur des accélérations

$\{u\}$: Déplacement total de la structure.

$\{u_i\}$: Déplacement au noeud de la structure.

$\{u_f\}$: Le déplacement au noeud de la fondation

Introduction

générale

Introduction générale

Introduction générale

Les barrages représentent des systèmes constructifs complexes à caractères économique et stratégique importants. Ils sont des structures critiques qui servent à permettre la production d'électricité, l'approvisionnement en eau, la prévention des catastrophes naturelles (crues, inondations), l'irrigation, la récréation, la régulation du débit des rivières, et d'autres fins. Ces ouvrages font partie intégrante du système de l'infrastructure de la société.

Le phénomène d'interaction sol-structure-fluide est complexe, il correspond à une perturbation du mouvement incident sous l'effet du mouvement propre de la structure et de fluide, d'où il résulte que le mouvement de l'interface de contact sol – structure n'est pas le mouvement dit de champ libre.

L'interaction est en générale d'autant plus forte que la structure est rigide et le sol déformable, d'autant faible que la structure est souple et que le sol est rigide. Mais dans les deux cas elle peut s'exercer dans un sens favorable ou défavorable, elle peut occasionner des amplifications au niveau de certains degrés de liberté.

L'objectif du présent mémoire est l'effet du phénomène d'interaction sol-fluide structure, sur le comportement d'un barrage-fondation –réservoir,

Le mémoire, est organisé en quatre chapitres, une introduction générale consacrée à la problématique.

- ✚ Le premier chapitre commence par une définition de tous les types de barrage et s'attarde sur les barrages en béton.
- ✚ Le deuxième chapitre présente les différentes méthodes d'interaction sol-structure.
- ✚ Le troisième chapitre définit le phénomène d'interaction fluide-structure.

Dans le dernier chapitre, des simulations ont été réalisées sur les trois systèmes barrage seul (barrage poids de koyna), barrage-fondation, barrage-fondation-réservoir, par le code de calcul ANSYS, les différents résultats obtenus ont été ensuite interprétés. Le mémoire est clôturé par une conclusion qui retrace les grandes lignes du travail effectué et souligne les différents résultats obtenus tant du point de vue formulation et modélisation que du point de vue comportement dynamique des systèmes couplés barrage-fondation-réservoir.

Chapitre I

Généralités Sur Les barrages

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

I.1 Introduction :

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à en réguler le débit et/ou à stocker de l'eau, notamment pour le contrôle des crues, l'irrigation, l'industrie, l'hydroélectricité, la pisciculture, une réserve d'eau potable.

Plusieurs objectifs conduisent à la construction d'un barrage :

Concentrer la pente naturelle d'une rivière dans un site donné, rendant ainsi possible la production d'électricité à partir de l'énergie potentielle de l'eau (énergie hydroélectrique) ; stocker, puis amener l'eau des rivières vers des canaux et des systèmes d'irrigation ; augmenter la profondeur des rivières pour la navigation ; contrôler le débit de l'eau pendant les périodes de sécheresse et de crue ; créer des lacs artificiels destinés aux loisirs. De nombreux barrages cumulent plusieurs de ces fonctions.

La conception d'un barrage doit tenir compte des caractéristiques hydrologiques, topographiques et géologiques du milieu où il sera construit. On doit, par exemple, considérer les apports moyens en eau et leurs fluctuations saisonnières ; les caractéristiques topographiques concernent essentiellement l'adaptation du barrage au relief ; on doit également tenir compte des risques de séisme : des analyses rigoureuses sont effectuées sur les fondations naturelles et la cuvette à remplir, qui doivent être étanches et avoir la résistance nécessaire pour supporter le poids du barrage, ainsi que celui de l'eau. Tout défaut d'étanchéité, à l'intérieur ou sous un barrage, doit être prévenu afin d'éviter des pertes d'eau, mais surtout pour empêcher l'affouillement (érosion) de la structure elle-même.

Les géologues mesurent également la profondeur à laquelle se trouve le sol rocheux de fondation, sous la couche alluviale. La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site déterminant le type de barrage.

I.2 Définitions

Les barrages sont, par définition, des ouvrages hydrauliques qui barrent sur toute la largeur une section d'une vallée et créent ainsi une cuvette artificielle géologiquement étanche. De manière générale et dans la plupart des cas, la hauteur du barrage dépasse le niveau d'eau atteint par les cours d'eau en période de forte crue.

Fondamentalement, les barrages ont deux effets caractéristiques :

- ✚ La retenue d'eau créée par la présence du barrage peut le plus souvent contenir une part importante des apports d'eau directs ou dérivés, de même que des matériaux charriés, de la glace ou de la neige. Le barrage surélève le niveau du plan d'eau à l'amont.

Les barrages sont des ouvrages de génie civil singuliers par bien des points :

- ✚ Ce sont des structures complexes qu'il faut traiter comme des systèmes. Leurs études et réalisation prennent en compte un grand nombre de paramètres et de données. Chaque barrage doit être considéré comme un prototype. Aucune procédure bien définie pour déterminer la meilleure solution n'existe. La démarche est pragmatique,

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

évolutive, systématique et réursive. Elle fait appel à de nombreuses hypothèses qui sont au fur et à mesure perfectionnées et vérifiées.

Le comportement d'un barrage durant son cycle de vie est complexe. Il dépend de plusieurs phénomènes et facteurs plus ou moins bien définis : la modification des caractéristiques des matériaux (vieillessement), la tenue de la fondation (souvent partiellement connue), les conditions météorologiques et thermiques (variables), les effets chimiques de l'eau, les sollicitations sismiques (imprévisibles), les risques hydrologiques et le mode d'exploitation de la retenue. Cette complexité est maîtrisée par la mise en œuvre de modèles appropriés pour l'ouvrage lui-même et pour sa fondation, ainsi que pour les influences que subit l'ouvrage de la part de son environnement.

- ✚ Finalement, les exigences quant à la sécurité des barrages sont extrêmes. Elles sont présentes dans toutes les phases d'un projet : la planification, la conception, la réalisation et l'exploitation. La période d'exploitation est certainement la plus sensible en termes de sécurité des populations. Pour cette raison, quasiment tous les pays du monde ont prescrit des règles institutionnelles pour la surveillance des ouvrages par un contrôle permanent et l'analyse du comportement.

I.3 Les différents types de barrages :

Il existe différents types de barrages, chacun ayant des caractéristiques et des avantages spécifiques. Les principaux types de barrages sont les suivants :

I.3.1 Les Barrages en béton :

Il s'agit d'un barrage construit en béton, qui est un matériau solide et durable. Les barrages en béton peuvent être utilisés pour une variété de fonctions, notamment la régulation des crues, la production d'énergie hydroélectrique et la fourniture d'eau potable.

I.3.1.1 Barrage-poids (gravité) :

Il a, en principe, dans une coupe verticale, une forme triangulaire. Son poids suffit seul à contenir la poussée de l'eau.

Une solution intermédiaire consiste à réaliser un barrage-poids/voûte. Sa stabilité est alors assurée en partie par son poids et en partie par son appui sur les rives.

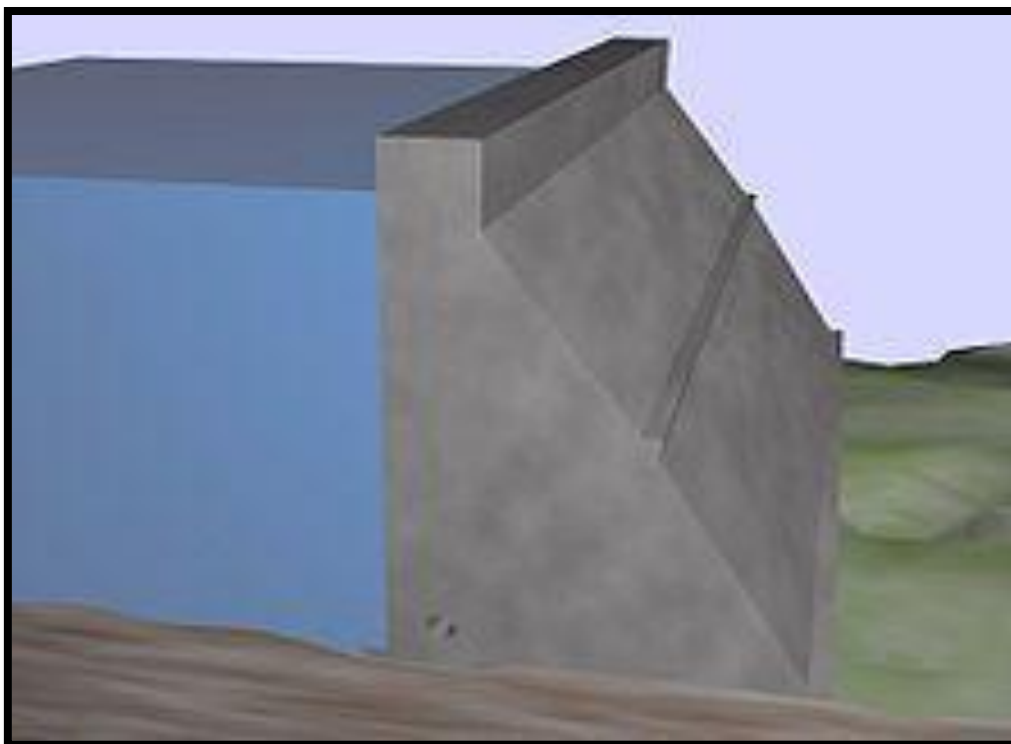


Figure I.1. Barrage poids



Figure I.2. Barrage poids de la Grande Dixence (Suisse)

I.3.1.2 Barrages-voûtes :

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

C'est un ouvrage particulièrement élégant, en raison de la forme arquée du barrage, horizontalement et verticalement, la poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée

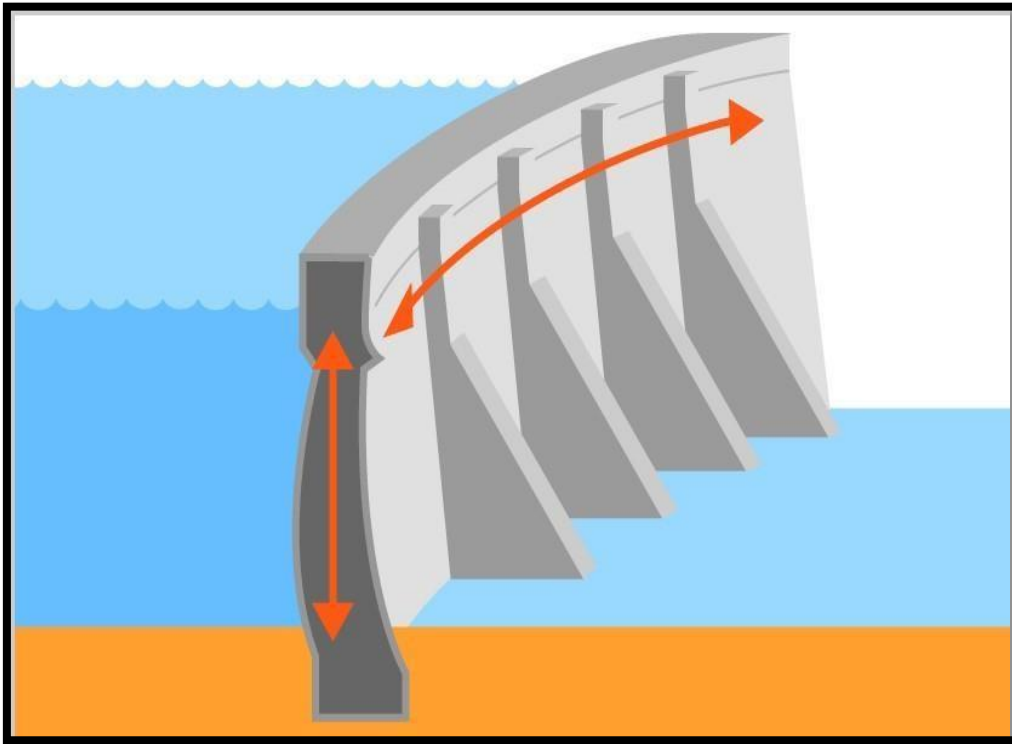


Figure I .3. Barrage voûte



Figure I.4. Barrage voûte de Naret 1(Suisse)

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

I.3.1.3 Barrages à contreforts :

C'est un grand mur en béton qui s'appuie sur des contreforts en laissant des évidements, économisant ainsi du béton. Les contreforts, relativement minces, conduisent les efforts jusqu'aux fondations. Ce type de barrage a été peu utilisé en Suisse (Lucendro, Lessoc, Rossinière, Les Marécottes). Ce mode de construction se subdivise en sous-catégories contreforts à têtes arrondies à masque amont, à voûtes multiples

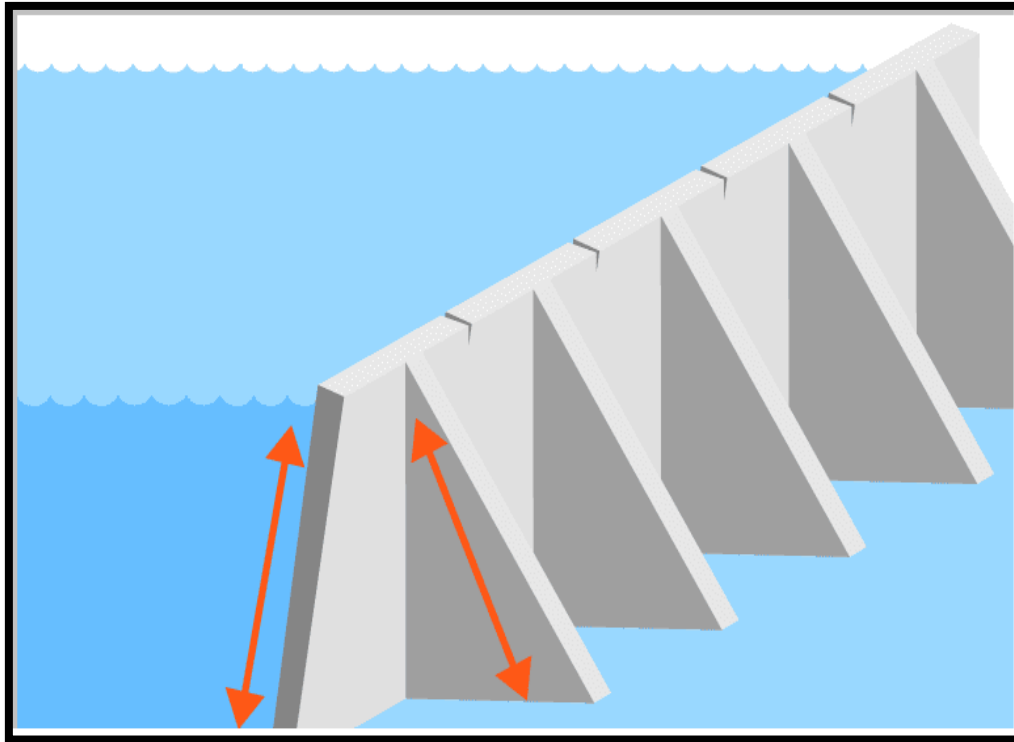


Figure I.5. Barrage à contreforts



Figure I.6. Barrage à contreforts d'Ekbatan (Iran)

I.3.2 Les Barrages en remblais :

✚ Barrages en terre homogène :

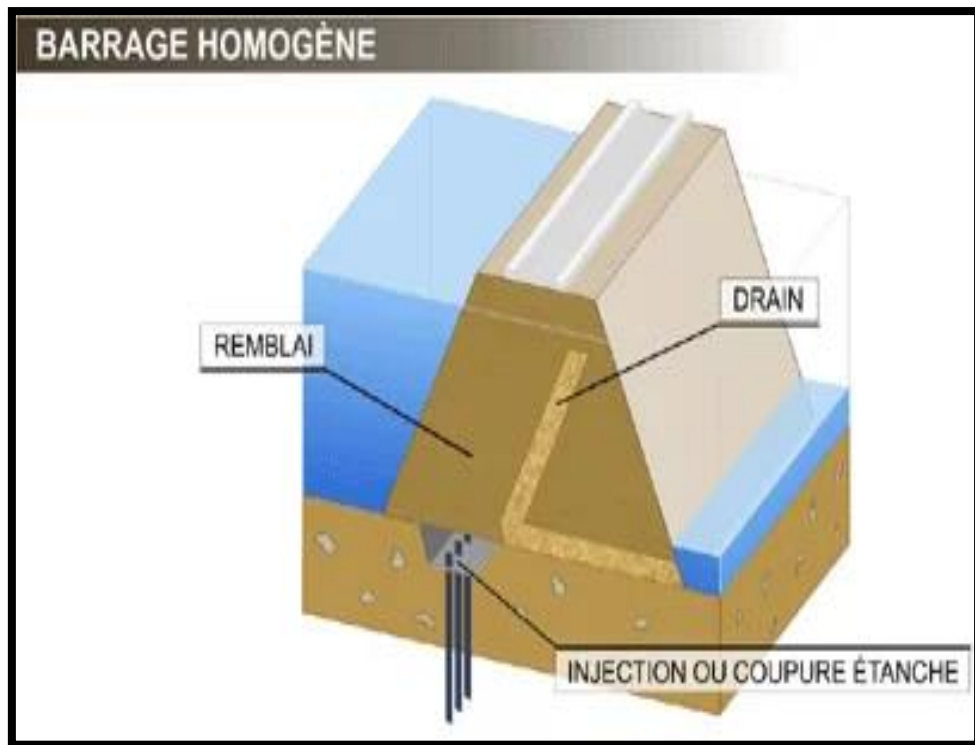


Figure I.7. Barrages en terre homogène

✚ Barrages à noyau :

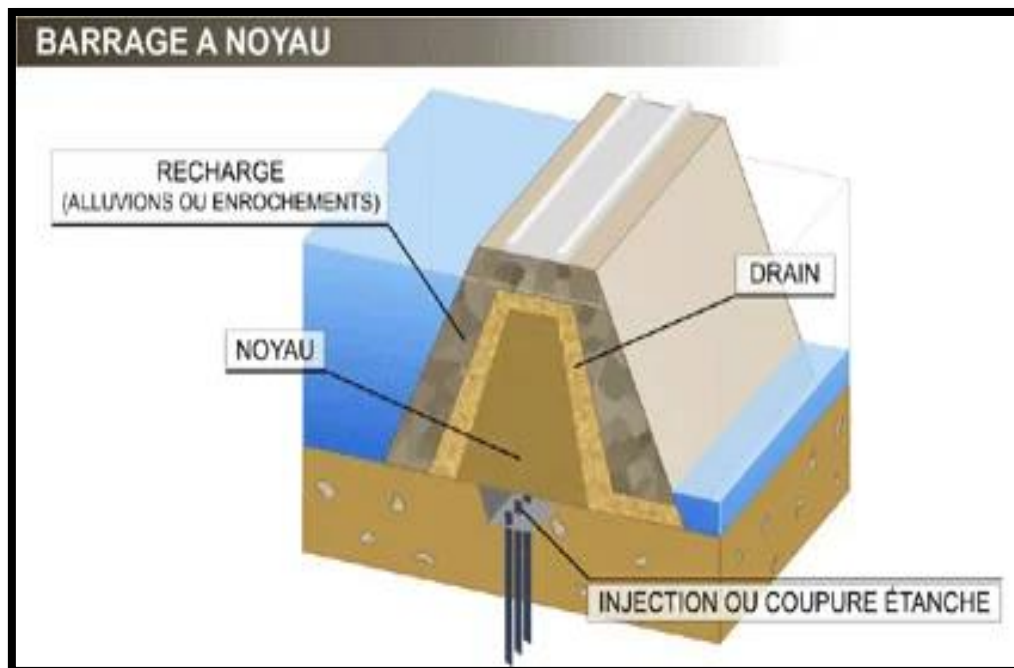


Figure I.8. Barrages à noyau

✚ Barrages à masque :

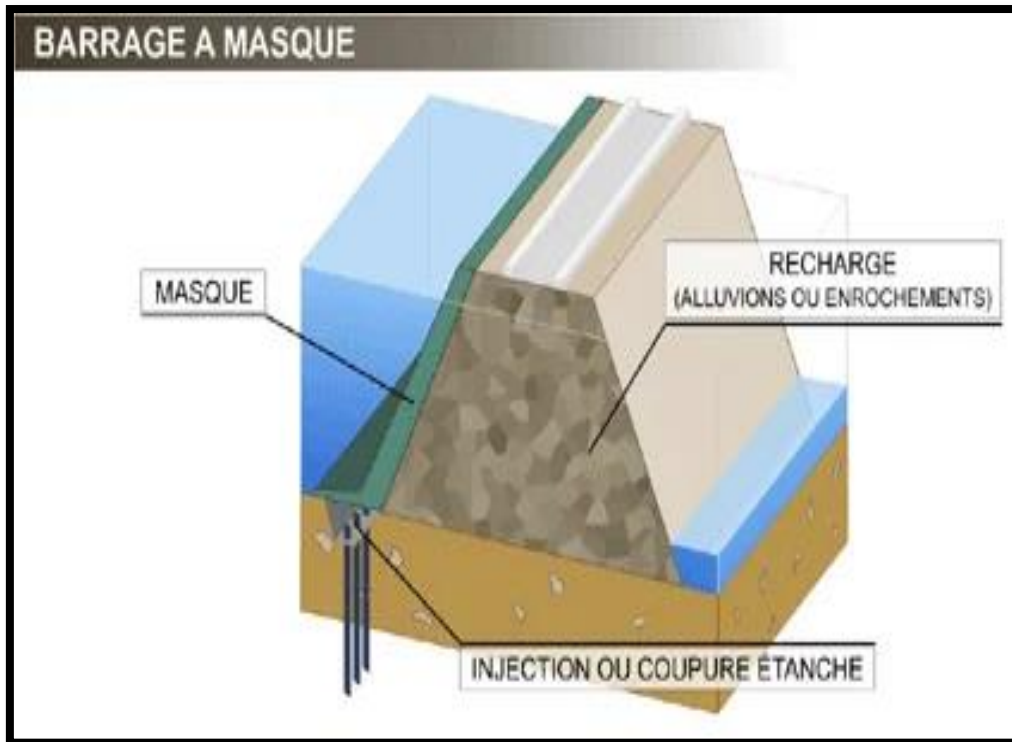


Figure I.8. Barrages à masque

I.3.3 Les Barrages mobiles

Édifié en aval des cours des rivières, où la pente est la plus faible, ces ouvrages ont une hauteur limitée. Afin de rendre les rivières navigables, les barrages mobiles sont utilisés dans l'aménagement des estuaires et des deltas. Selon le type de construction on peut définir différents types de barrages mobiles, les barrages mobiles à aiguilles, les barrages mobiles à effacement, les barrages mobiles à battant, les barrages mobiles à gravité...etc.



Figure I.9. Barrage de Chatou-France

I.4 Classification des barrages :

Un certain nombre de critères permettent la classification des barrages, à savoir les matériaux de construction et la façon de résister à la poussée de l'eau :

I.4.1 Les matériaux de construction :

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

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

- Barrages à stabilité de forme (barrages voûtes) : D'abord, le barrage s'appuie sur une fondation rocheuse résistante. Ensuite, il doit reporter la poussée de l'eau sur les flancs de la vallée, c'est pourquoi il a une forme arquée horizontalement et verticalement.
- Barrage à stabilité de poids (barrages poids) : « un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple (leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangulaire) »

I.5 Le choix du site et du type de barrage :

Chaque barrage est en quelque sorte un prototype, en effet, la conception et le dimensionnement du barrage dépendent essentiellement de la spécificité du site.

Le choix du site et du type d'ouvrage dépend des paramètres suivants :

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

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

I.6 Avantages Et Particularités de barrage En Béton :

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

I.6.1 Barrages poids

Le barrage-poids en béton présente des avantages et des particularités.

a) **Avantage :**

- Faibles contraintes dans le béton,
- Faibles contraintes transmises aux roches,
- Les variations de température ne produisent que des contraintes faibles,
- Evacuateur de crues peut facilement être intégré.
- 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-pressions importantes sous la fondation,
- Sensibilité aux tassements,
- Sensibilité aux séismes.
- Risque de tassement

I.6.2 Barrages à contrefort

a) **Avantage**

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

b) Inconvénients :

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

I.6.3 Barrages voûtes

a) Avantage :

- Le volume du béton est faible,
- La fouille est assez petite,
- La résistance au séisme est haute,
- Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles. (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.7 Analyse de la stabilité d'un barrage poids

Lors de l'analyse de la stabilité d'un barrage-poids, il est important de garder à l'esprit que la grande majorité des ruptures de barrages-poids dans le monde se sont produites lors des crues.

Cela est facilement compréhensible car la poussée de l'eau variant comme le carré de la hauteur d'eau, tout dépassement du niveau de la crue de projet entraîne une diminution de la stabilité de l'ouvrage, diminution qui est proportionnellement d'autant plus forte que le barrage est de faible hauteur.

L'évaluation de la crue de projet et du niveau atteint par l'eau doit être faite avec une grande rigueur et il faut tenir compte de l'imprécision ou des incertitudes sur l'hydrologie en

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

examinant les conséquences d'un dépassement significatif de la crue de projet qui aura été retenue

I.7.1 Actions agissantes sur les barrages poids :

Un barrage doit résister à d'importantes contraintes qui sont essentielles à connaître pour comprendre son fonctionnement. Ces contraintes peuvent affecter sa conception, sa dimension et aussi son comportement et sa stabilité. La figure II-1 montre les différentes forces qui agissent sur un barrage poids.

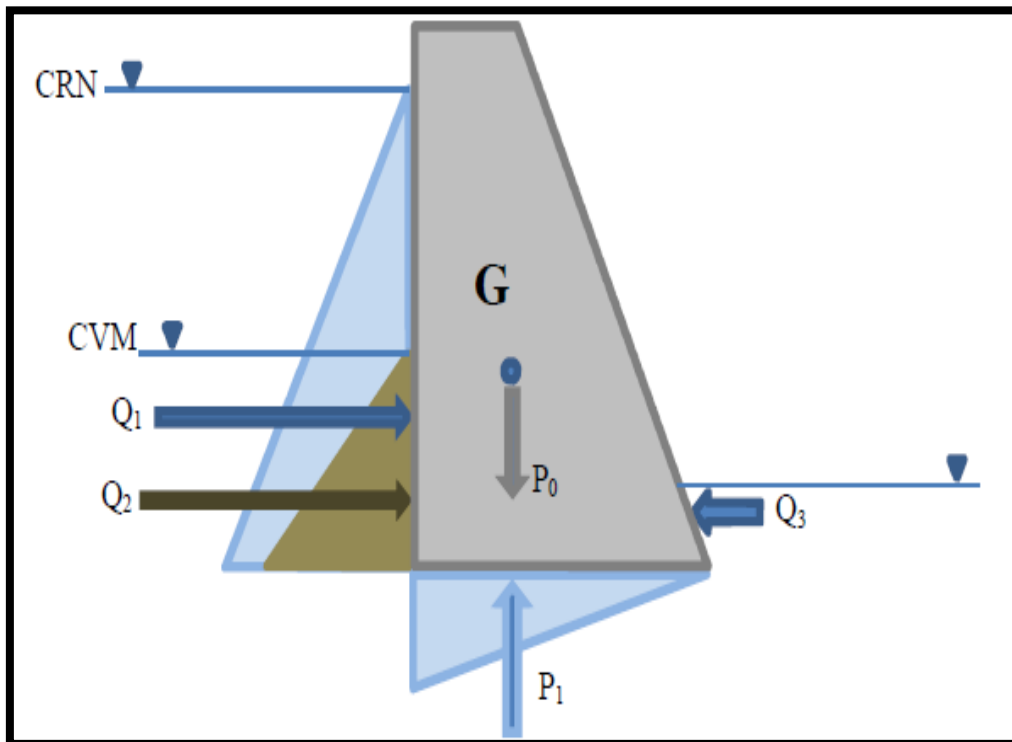


Figure I.10. Les différentes actions agissantes sur barrage poids

On peut classer ces actions en fonction de leurs types :

✚ Actions permanentes :

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

- ❖ Poids propre
- ❖ Poussées des sédiments

✚ Actions variables :

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

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

✚ Actions accidentelles :

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

- ❖ Ces actions sont relatives aux excitations sismiques :
Les séismes

I.7.2 Manifestations des actions :

I.7.2.1 Le poids propre P_0 :

La densité d'un béton conventionnel vibré (BCV) de barrage-poids est généralement de l'ordre de 2,4.

Cependant, d'autres valeurs plus élevées ou moins élevées doivent être prises en compte en fonction de la densité des agrégats et du dosage en liant.

La densité d'un béton compacté au rouleau (BCR) est variable selon la granulométrie des agrégats et le dosage en liant, et peut descendre à 2,3 pour un BCR pauvre en fines.

La masse totale du béton (BCR ou BCV) a une influence considérable sur les fondations et sur la réaction à la poussée hydrostatique.

Les barrages-poids résistent grâce à leurs dimensions et leur masse importante qui peut atteindre plusieurs dizaines de millions de tonnes.

Ils sont dimensionnés pour que leurs charges (poids et pression hydrostatique) soient supportées par la fondation)

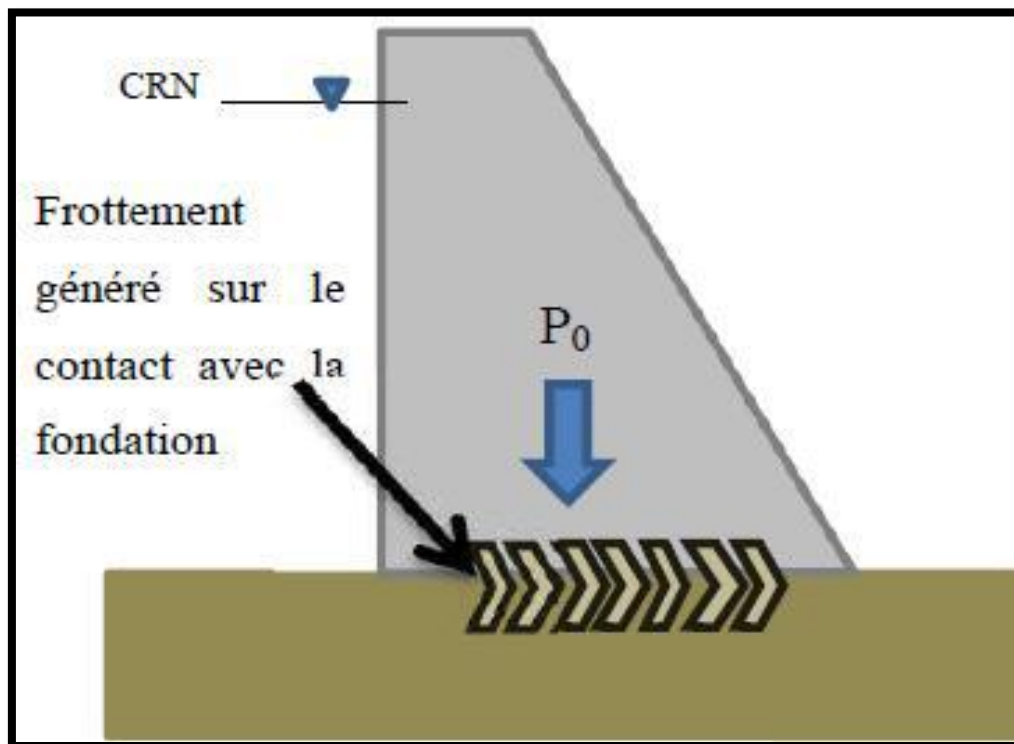


Figure I.11. Action du poids propre du barrage

I.7.2.2 Poussée des sédiments déposés au pied amont Q_2 :

Les sédiments en cours de consolidation exercent une poussée qui est a priori légèrement inclinée sur l'horizontale, Le coefficient de poussée peut être pris égal à

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

Avec : φ : Angle de frottement interne des sédiments.

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

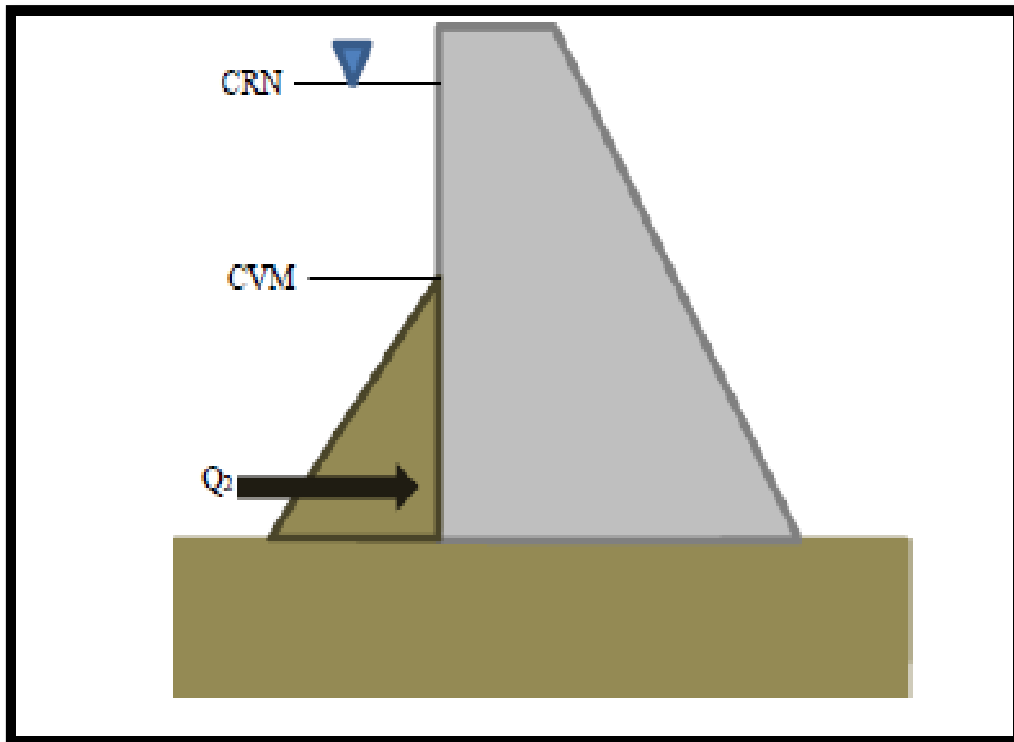


Figure I.12. Action des sédiments sur le barrage

I.7.2.3 Poussée hydrostatique amont Q_1 :

C'est une force horizontale exercée par l'eau sur sa surface immergée. On en tire l'expression de la pression suivante :

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

Avec :

P : est la pression en Pa (Pascal),

ρ : la masse volumique de l'eau en $\text{kg} \cdot \text{m}^3$,

g : est l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$),

H : la hauteur d'eau au-dessus du point considéré en m.

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

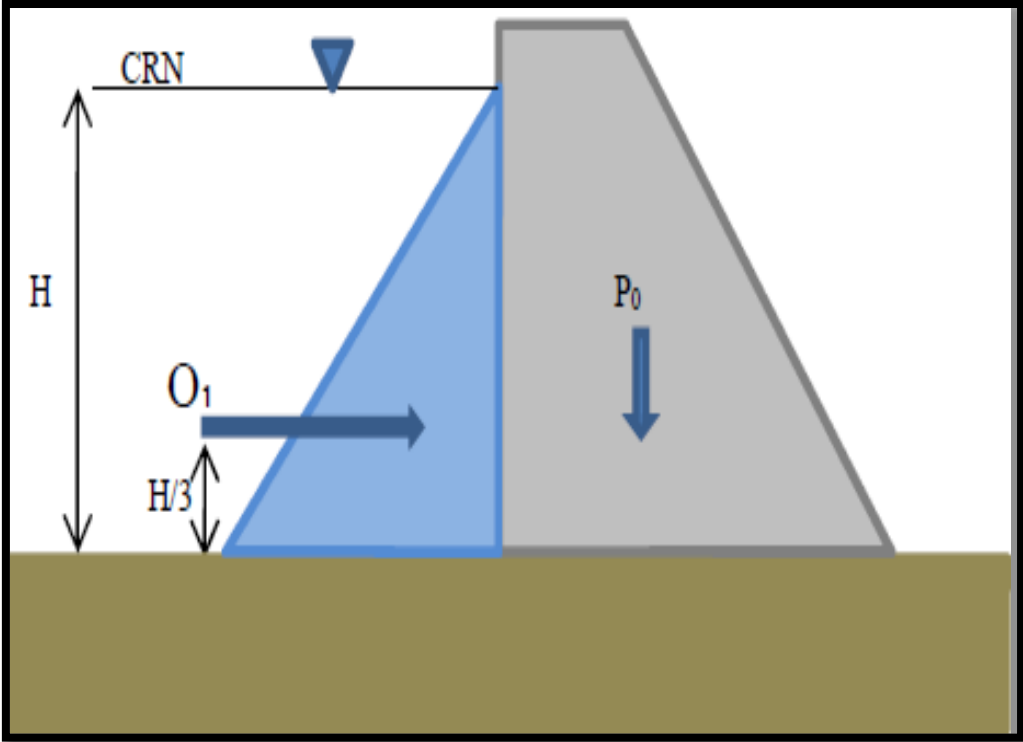


Figure I.13. Action de la poussée hydrostatique

I.7.2.4 Poussée hydrostatique aval Q3 :

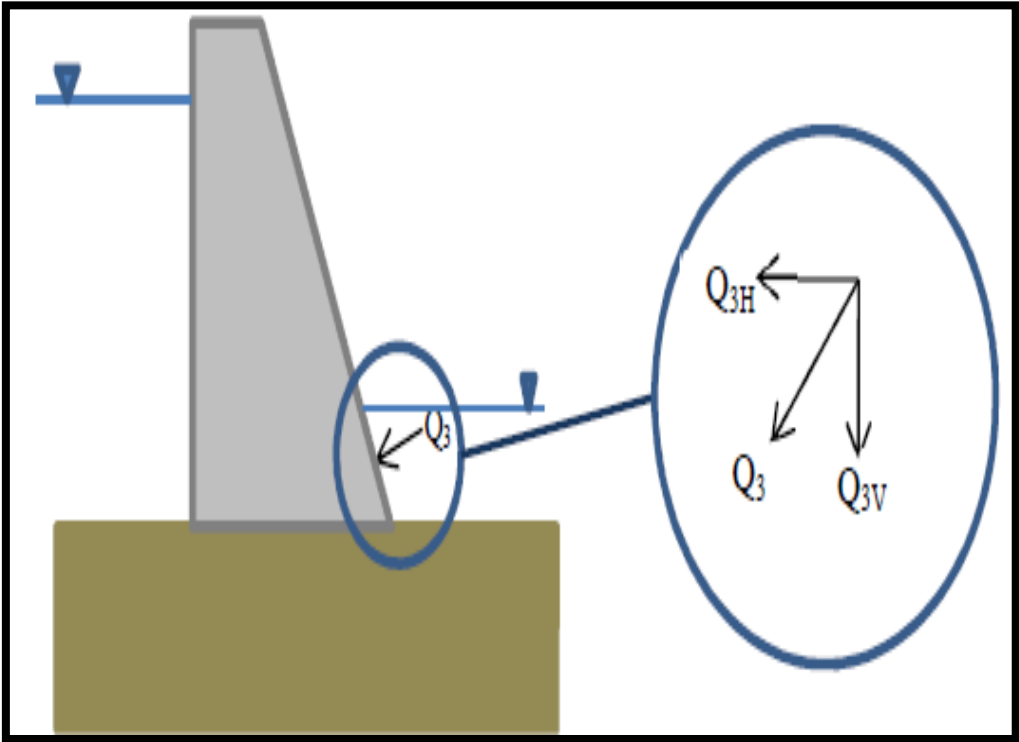


Figure I.14. Action de la poussée hydrostatique aval Q3

Chapitre I : Généralités Sur Les barrages

La poussée hydrostatique aval (Q_3) est obtenue dans chaque situation de projet. Elle est déduite d'un calcul de ligne d'eau dans la rivière en aval du barrage et on tient compte des cas particuliers tels que :

- Des barrages avec évacuateur vanné fixant la ligne d'eau aval en fonction de l'ouverture des vannes ;
- Des aménagements hydroélectriques relâchant un débit très variable ;
- De la présence d'un contre-barrage ou un barrage existant à l'aval ;
- De la présence d'un ressaut chassé en aval. Dans ce dernier cas, la contre-poussée aval n'est pas prise à compte, sauf démonstration contraire. Et il convient de considérer la largeur effective du ressaut au regard de la largeur de la rivière à l'aval

I.7.2.5 Sous pressions P1

En l'absence de drainage, le diagramme des sous-pressions sur un barrage-poids est habituellement considéré comme trapézoïdal, avec la pleine sous-pression (U_m) du plan d'eau en pied amont et une sous-pression (U_v) égale au niveau d'eau en pied aval.

Cependant, si les fissures du rocher ont tendance à se refermer au pied aval, le diagramme des sous-pressions peut être plus favorable que le diagramme trapézoïdal.

Dans ce cas, des drains doivent être forés au pied aval pour éviter tout risque de glissement.

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

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

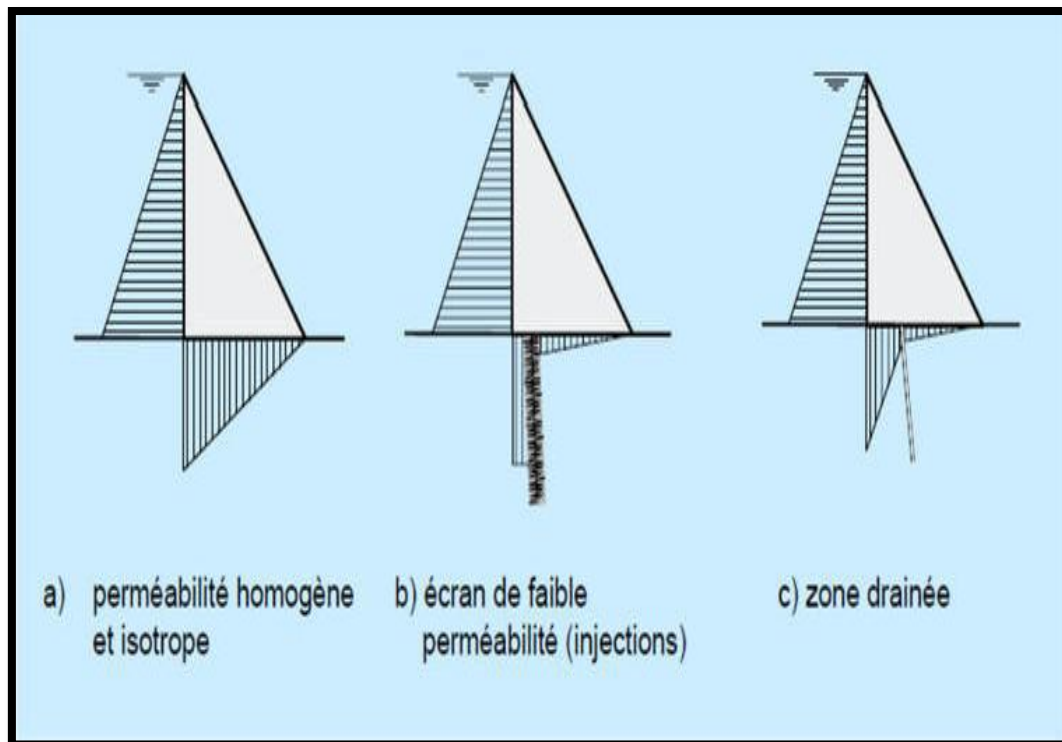


Figure I.15. Diagrammes indicatifs des sous-pressions en fonction de l'injection et de drainage

Avec :

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

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

$$UA - UB = (UA - UC) / 3 \quad (I.4)$$

La considération des sous-pressions, élément du comportement des barrages poids du point de stabilité, diffère d'un pays à l'autre. La figure (I.16) illustre les différents cas de diagrammes considérés pour l'évaluation des sous-pressions tenant compte des voiles d'injection et de drainage.

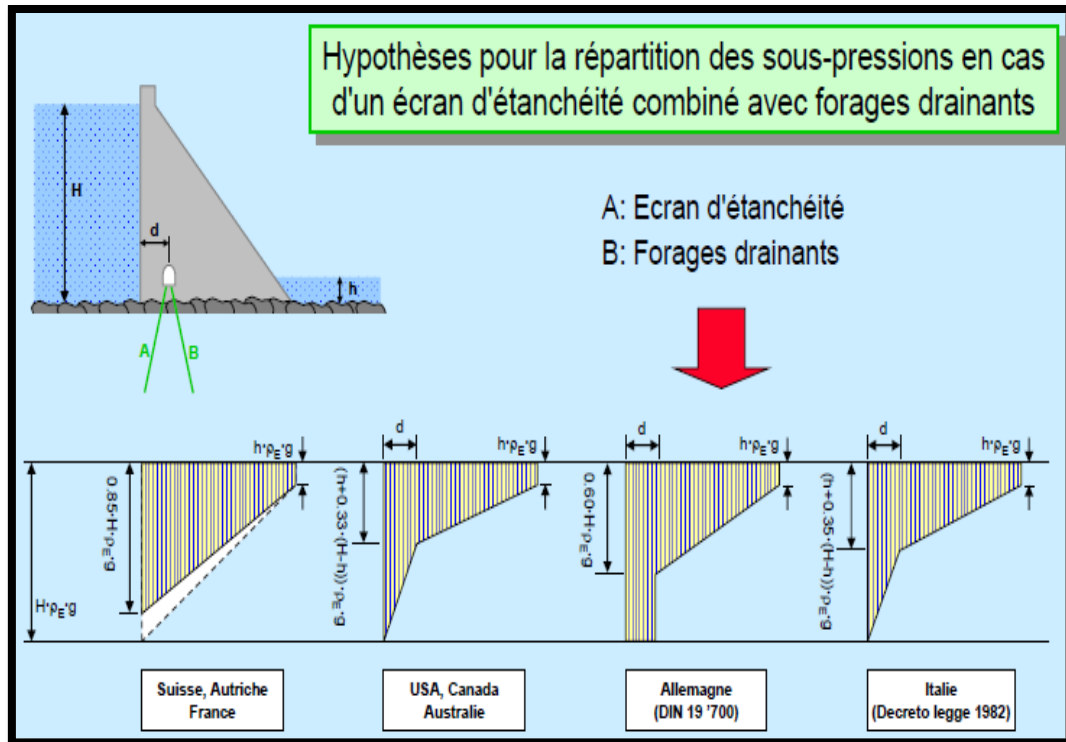


Figure I.16. Diagramme de la répartition des sous-pressions

I.7.2.6 Poussée de glaces

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

I.7.2.7 Actions accidentelles

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

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

Avec :

H : la hauteur du barrage (m) ;

γ_w : le poids volumique en (KN/m³)

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

$$\Delta P = 0,58.a.H^2 \text{ en (Kpa)}$$

(I.6)

I.7.3 Amélioration de la sécurité du barrage

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

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

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter l'historique de barrage, et quelques exemples des différents types des barrages qu'ont été présentés ainsi que les éléments accessoires qui accompagnent cet ouvrage.

Chapitre II

Interaction sol-structure

Chapitre II : interaction sol-structure

II.1 Introduction

L'interaction entre le sol et la structure est essentielle pour comprendre le comportement réaliste des ouvrages en relation avec le sol qui les supporte.

Cette communication présente des éléments pratiques pour mettre en œuvre une démarche d'interaction sol-structure éprouvée.

Les études ont montré la complexité de cette interaction et la nécessité de considérer les propriétés spécifiques du sol ainsi que la géométrie et la rigidité de la structure pour déterminer correctement la pression des terres ainsi que le comportement global du système.

En pratique, les études de soutènement sont souvent traitées par des modèles de calcul qui intègrent de manière plus ou moins poussée les effets d'interaction sol-structure.

L'objectif de l'interaction sol-structure est de corriger les limitations introduites par ce découplage. Sa mise en œuvre en pratique se heurte néanmoins à de nombreuses difficultés principalement liées au caractère faible des représentations utilisées pour décrire la réponse du sol dans le modèle structure. Des propositions de schémas concrets permettant de pallier à ces difficultés sont présentées à travers une série d'exemples concrets.

II.2 Objectif des analyses d'interaction sol-structure:

Les analyses d'interaction sol-structure ont pour objectif principal de déterminer comment le sol et la structure interagissent mécaniquement lors d'un séisme. Les chercheurs] Gazetas et Mylonakis (1998)] ont examiné deux structures, l'une étant encastrée dans un rocher et l'autre reposant sur un massif de sol plus souple.

(La **figure II.1**) illustre les différents éléments à prendre en compte pour ces deux situations, ainsi que le cas général d'une fondation de type radié, encastrée dans le sol et supportée par des pieux traversant plusieurs couches de sol avant de se reposer sur une couche rigide ou rocheuse. Même si les types de fondations peuvent varier, le problème de l'interaction sol-structure reste le même.

Plusieurs types d'ondes sismiques sont soumis à la couche de sol autour de la structure, les voici :

- Des ondes de cisaillement : onde S ;
- Des ondes de dilatation : onde P ;
- Des ondes de surfaces : onde R ou L

Les ondes sismiques sont déterminées par les conditions sismologiques, mais la géométrie, la rigidité et l'amortissement du sol ont un impact sur leur propagation et modifient le mouvement du sol lors d'un séisme. Ce mouvement modifié correspond au mouvement en champ libre, mais sa détermination est complexe.

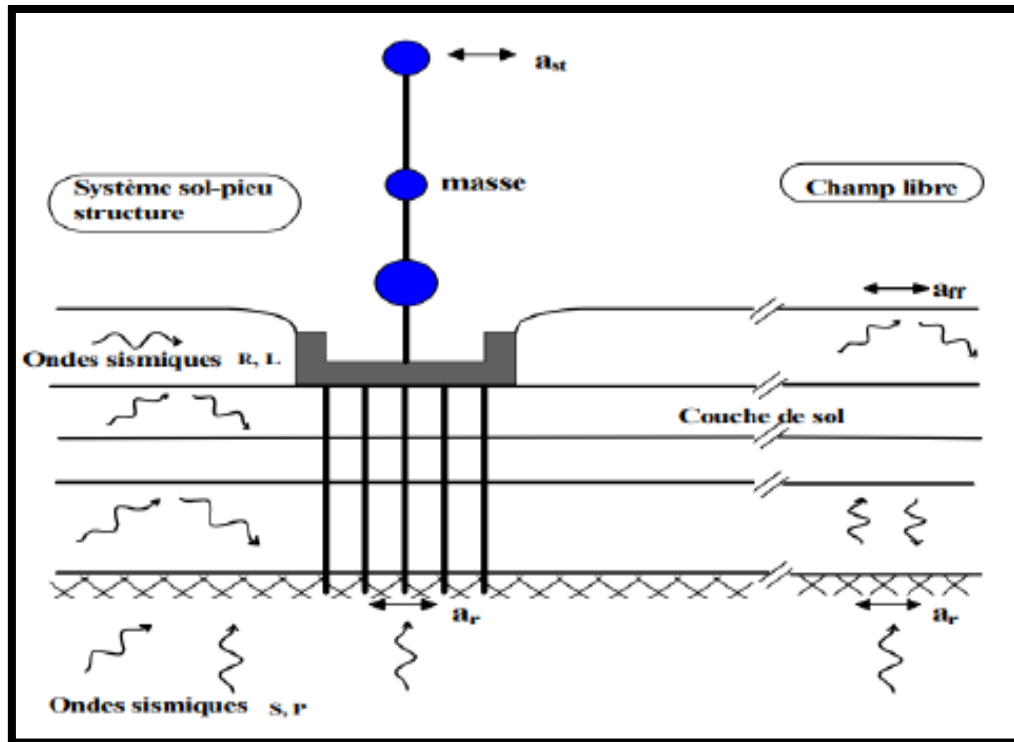


Figure II.1. Schématisation de l'interaction sol-structure [GAZETAS et MYLONAKIS, 1998]

II.3 Généralités

Les contraintes exercées sur une fondation pendant un séisme sont dues à deux phénomènes : les forces d'inertie qui se créent dans la superstructure et les déformations du sol causées par le passage des ondes sismiques, qui sont imposées à la fondation. Ces deux types de chargement sont appelés

- Chargement inertiel.
- Chargement cinématique

L'importance de ces charges dépend à la fois des propriétés de la fondation et de la nature des ondes sismiques. Le terme générique qui englobe ces deux phénomènes est appelé Interaction Sol-Structure (ISS). Toutefois, dans la plupart des cas, les ingénieurs emploient ce terme pour désigner uniquement le chargement inertiel, en ignorant la part due au chargement cinématique. Cette pratique s'explique par :

- L'interaction cinématique est négligeable dans certains cas ;
- La majorité des règlements parasismiques, excepté certains dont l'Eurocode 8, ne le mentionne pas ;
- Les effets de l'interaction cinématique sont plus difficiles à évaluer minutieusement quels effets inertiels.

La réponse d'une structure à une action sismique dépend de nombreux paramètres tels que :

- La nature du mouvement sismique ;

Chapitre II : interaction sol-structure

- Les propriétés dynamiques de l'ouvrage ;
- Les propriétés dynamiques du sol

II.4 Notion d'interaction sol-structure:

L'interaction sol-structure est un phénomène qui modifie la réponse du sol en présence d'une structure. Les vibrations de la superstructure entraînent des forces sur la fondation qui sont transmises au sol, modifiant ainsi sa réponse. Lorsqu'il y a un chargement dynamique, le sol et la superstructure vibrent simultanément et interagissent l'un avec l'autre. Cette interaction est importante à considérer pour évaluer correctement la vulnérabilité des ouvrages situés en zone sismique. Les procédures simples suggérées dans les règlements parasismiques ne sont pas suffisantes pour évaluer l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse de la structure. Les rigidités du sol, de la fondation et des structures sont dépendantes des interactions sols-structures.

Quatre modes d'interaction sont distingués :

- Effets des mouvements de sol sur le comportement des structures ;
- Action des structures sur le sol environnement ;
- Interaction entre structures voisines par l'intermédiaire du sol ;
- Effet du renforcement des sols.

II.5 Étude du problème d'interaction sol structure :

II.5.1 Formulation d'un problème d'interaction

Avant d'examiner les différentes méthodes de prise en compte de l'interaction sol-structure, il est utile de formuler de façon générale le problème. 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 numériques est pratiquement inévitable.

Les équations du mouvement sont obtenues par référence à la (**Figure.II.2**) qui schématise un ensemble sol-structure.

L'équation du mouvement s'écrit :

$$M\ddot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = QF \quad (\text{II.1})$$

M : matrice de masse du système ;

C : matrice d'amortissement du système ;

K : matrice de raideur du système ;

QF : ou F le vecteur de charge appliquée à la frontière extérieure du système ;

u : vecteur de déplacement ;

$\dot{\mathbf{u}}$: vecteur de vitesse ;

$\ddot{\mathbf{u}}$: vecteur d'accélération.

Chapitre II : interaction sol-structure

Comme la source du mouvement (foyer du séisme) n'est généralement pas incluse dans le modèle, le vecteur de charge Q_f n'a de valeur non nulle que sur la frontière extérieure

Du modèle. En absence de structure, l'équation du mouvement du champ libre est analogue de par sa forme à l'équation (II.1); les indices f désignant les matrices masses, amortissement et raideur relative au seul champ libre, cette équation s'écrit :

$$M\ddot{u}_f + C\dot{u}_f + Ku_f = Q_f \quad (\text{II.2})$$

Posant : Le déplacement total pour le problème d'interaction est alors donné par l'équation :

$$u = u_i + u_f \quad (\text{II.3})$$

L'équation définit le déplacement d'interaction u_i qui satisfait l'équation :

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u}_i + Ku_i = Q_i \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$Q_i = [M - M_f]\ddot{u}_f + [C - C_f]\dot{u}_f + [K - K_f]u_f \quad (\text{II.5})$$

Le vecteur de charge Q est déterminé à partir des déplacements en champ libre. Pour les systèmes linéaires on a alors le théorème de superposition illustré sur (Figure II.2) Ci-dessous.

Le problème d'interaction est dissocié, en la somme d'un problème de réponse du sol en champ libre et d'un problème source où les forces appliquées Q_i n'ont des composantes non nulles qu'aux nœuds communs à la structure et sol.

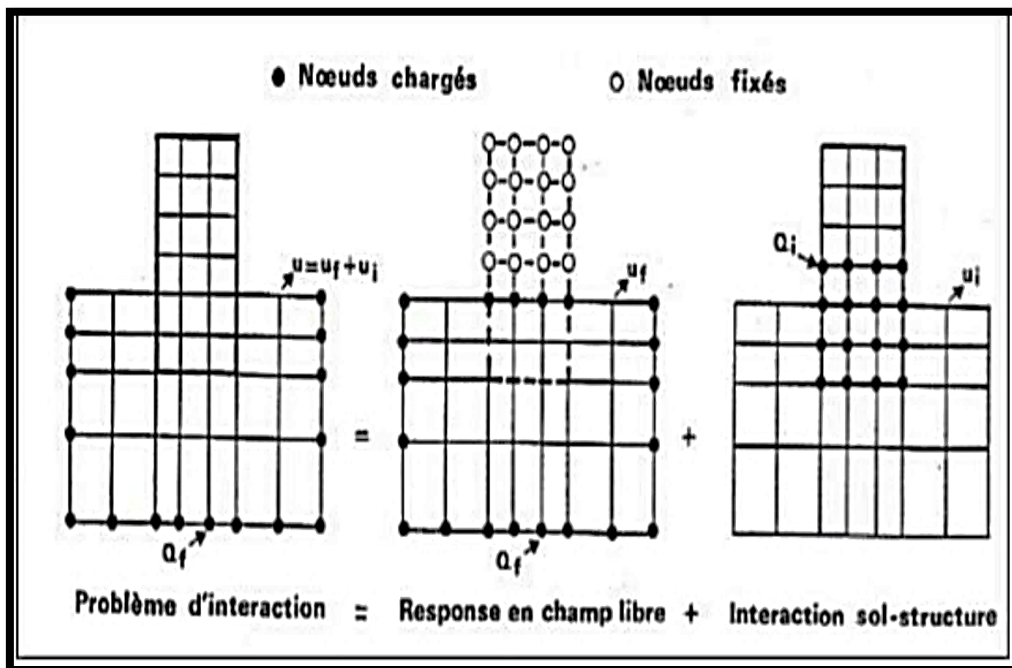


Figure II.2. Décomposition du problème d'interaction sol-structure

II.5.2 Mouvement du sol en champ libre :

Le mouvement sismique est défini par un accélérogramme (**Figure II.3**), ou par un spectre de réponse. dit de champs libres, Ce mouvement est très influencé par les conditions géotechniques locales.

L'étude d'un site doit suivre les principes suivants :

- Définition du mouvement à la surface du sol ;
- Caractéristique fréquentielle du mouvement compatible avec les caractéristiques physiques du site
- Niveau d'accélération réaliste pouvant être transmis par le sol ;
- Variation de l'accélération avec la profondeur dans des limites raisonnables.

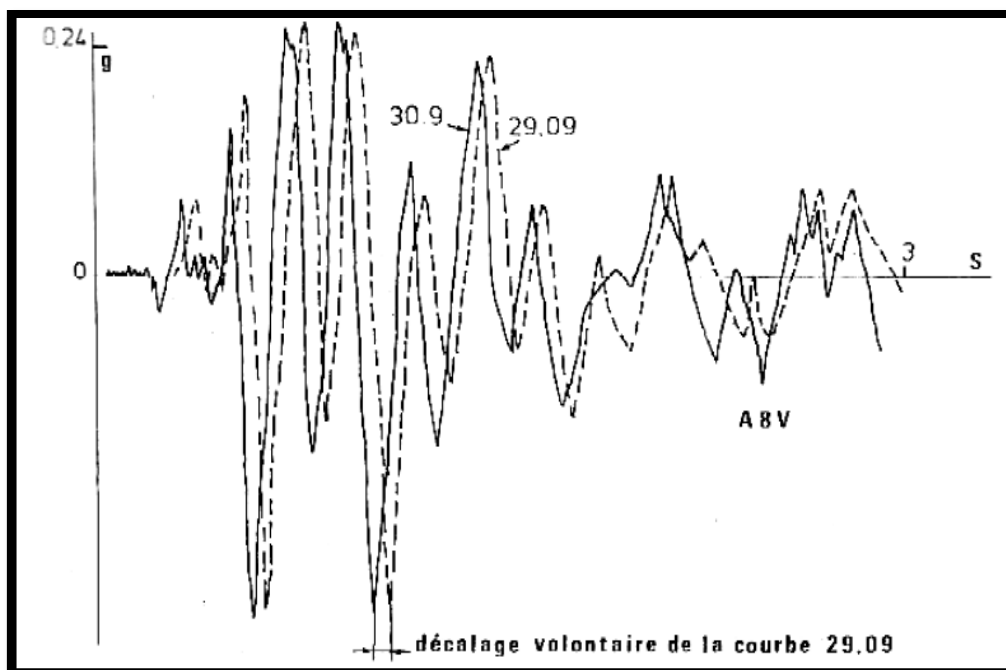


Figure II.3. Accélération en champ libre

On peut utiliser la méthodologie suivante :

- Définition d'un spectre sur un affleurement rocheux représentatif de l'environnement sismotectonique du site.
- Calcul de la réponse du site.
- Ajustement éventuel du spectre de réponse pour compenser la prise en compte d'un seul type d'onde à propagation verticale montre les spectres de réponses calculés à partir des enregistrements en champ libre et dans la structure à un même endroit. L'interaction sol structure est marquée par une atténuation des accélérations spectrales pour les fréquences supérieures

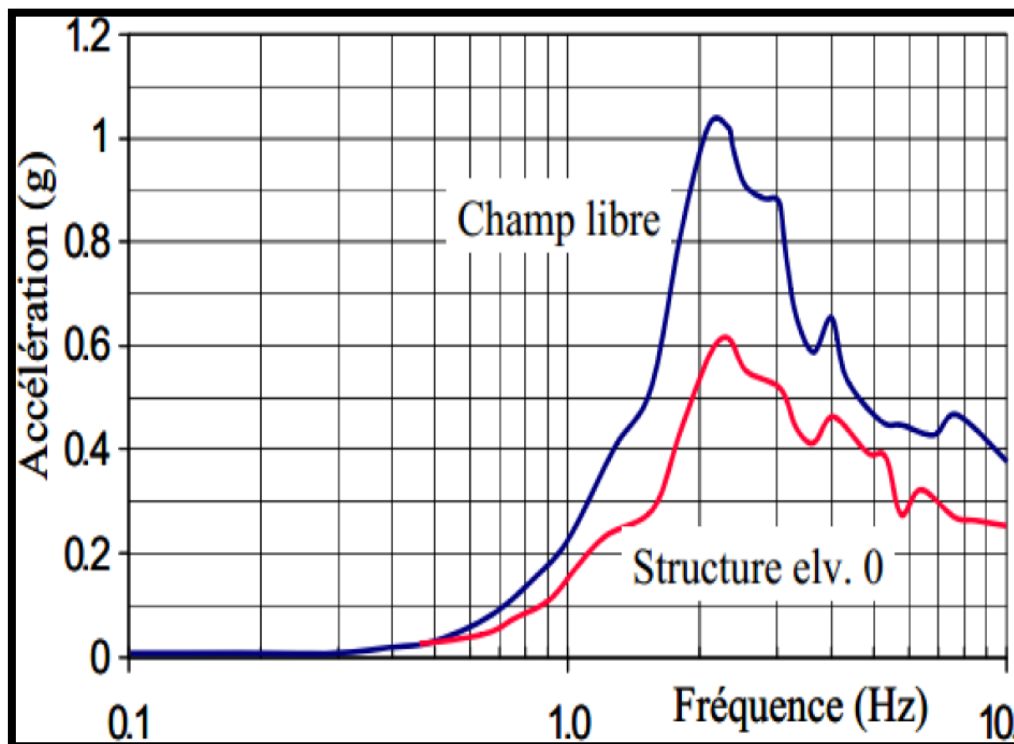


Figure II.4. Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS

La (Figure II.4) Montre les spectres de réponses calculés à partir des enregistrements en champ libre et dans la structure à un même endroit. L'interaction sol structure est marquée par une atténuation des accélérations spectrales pour les fréquences supérieures.

II.6 Illustration de l'effet de l'interaction sol structure

II.6.1 Model analogique simplifié.

Le modèle analogique simplifié de l'interaction sol-structure (figure II.5) est un modèle qui représente l'interaction entre le sol et la structure de manière simplifiée. Ce modèle est basé sur l'hypothèse que la structure est assimilée à une masse m et un ressort, placés à une hauteur h au-dessus de la fondation. La liaison entre la structure et la fondation, est réalisée par une barre rigide.

On admettra pour l'instant que les fonctions d'impédances, c'est à dire les réactions exercées par le sol sur la fondation, peuvent être représentées par un ensemble de ressorts et d'amortisseurs indépendants de la fréquence ; l'amortisseur rend théoriquement compte à la fois de l'amortissement radiatif, c'est dire de la dissipation d'énergie par les ondes s'éloignant de la fondation, et de l'amortissement propre du matériau sol, appelé amortissement matériel. Dans un souci de simplification de la présentation, on supposera que l'amortissement matériel, est négligeable devant l'amortissement radiatif (comportement élastique du sol), ce qui est valide pour un milieu homogène et des sollicitations sismiques d'amplitudes faibles à moyennes.

Le système de la figure II.5 ci-dessous possède 3 degrés de liberté, les voici :

Chapitre II : interaction sol-structure

- Le déplacement horizontal u de la masse m ;
- Le déplacement horizontal u_0 de la fondation ;
- La rotation θ de la fondation autour d'un axe horizontal. Il est soumis à un déplacement horizontal du sol support, harmonique de pulsation W et d'amplitude u_g .

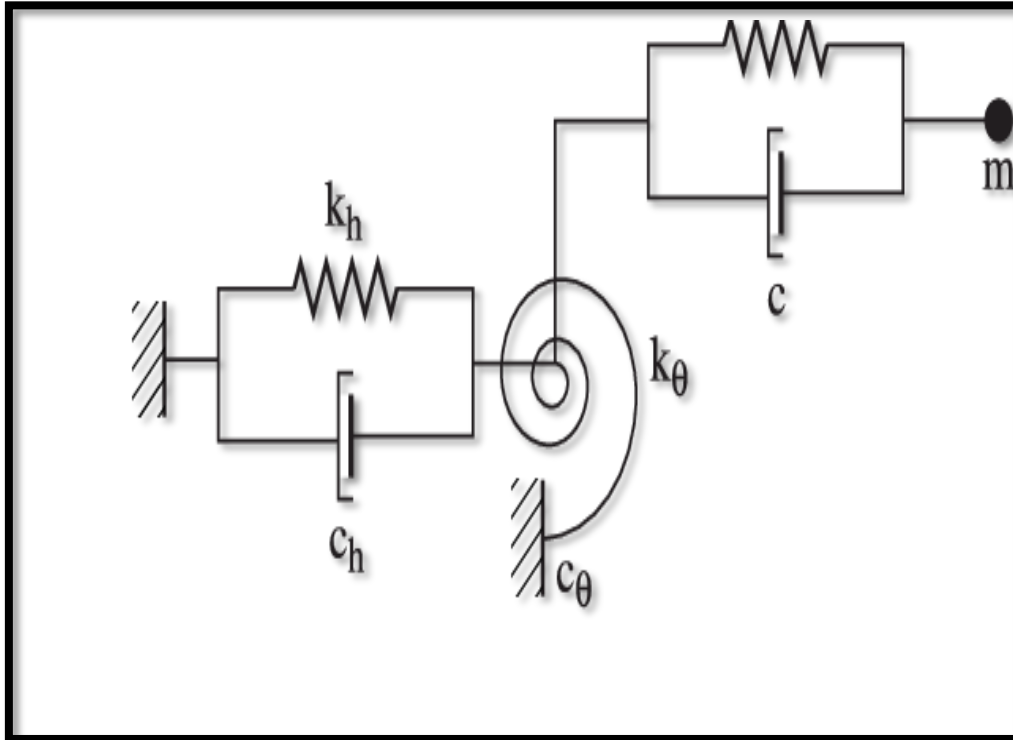


Figure II.5. Modèle analogique simplifié d'interaction sol-structure

II.6.2 Influence de l'interaction sol structure :

L'interaction sol-structure est l'un des aspects les plus importants dans la conception et la construction de tout bâtiment ou infrastructure. Cette interaction se réfère aux forces exercées par le sol sur la structure et vice versa. Les propriétés géotechniques du sol (telles que la résistance, la compressibilité, la perméabilité, la cohésion et l'angle de frottement interne) jouent un rôle crucial dans l'interaction sol-structure.

Exemples de l'influence de l'interaction sol-structure :

1/Capacité portante : La capacité portante du sol détermine la capacité de la fondation à supporter le poids de la structure. Si le sol est faible, cela peut entraîner une défaillance de la fondation et de la structure. Par conséquent, la résistance du sol est un facteur clé dans la conception de la fondation.

2/Tassement : Le tassement est un phénomène naturel qui se produit lorsqu'un bâtiment est construit sur un sol compressible. Si le sol est faible, il peut subir un tassement excessif, entraînant des fissures et des dommages à la structure. La capacité de la structure à supporter les charges imposées dépend donc de la résistance et de la compressibilité du sol.

3/Stabilité : L'interaction sol-structure est également importante pour assurer la stabilité de la structure. Les forces latérales exercées par le sol sur la structure peuvent

Chapitre II : interaction sol-structure

entraîner un renversement ou une inclinaison si elles ne sont pas correctement contrebalancées par la structure elle-même.

4/Drainage : Les propriétés de perméabilité et de porosité du sol sont importantes pour assurer le drainage efficace des eaux souterraines. Si le sol n'est pas suffisamment perméable, il peut entraîner une accumulation d'eau autour de la fondation, augmentant le risque de tassement différentiel et de dommages à la structure.

En somme, l'interaction sol-structure est un facteur crucial dans la conception et la construction de tout bâtiment ou infrastructure. Il est donc important de considérer les propriétés géotechniques du sol lors de la conception des fondations et de la structure pour assurer la sécurité et la durabilité de la construction

II.7 Les effets de l'ISS :

Généralement, l'ISS engendre :

1/Un allongement de la période de vibration du premier mode notamment, qui peut provoquer une variation en plus ou en moins de la valeur de l'accélération selon la zone.

2/Un amortissement non négligeable (amortissement radiatif + amortissement propre au matériau sol).

3/ Une rotation de la fondation qui peut modifier sensiblement le calcul de la déformée modale et donc la répartition des accélérations sur la hauteur du bâtiment.

4/-Le mouvement du sol à la base du bâtiment est supposé identique à celui du champ libre, dans les cas courants cette approximation est considérée comme acceptable.

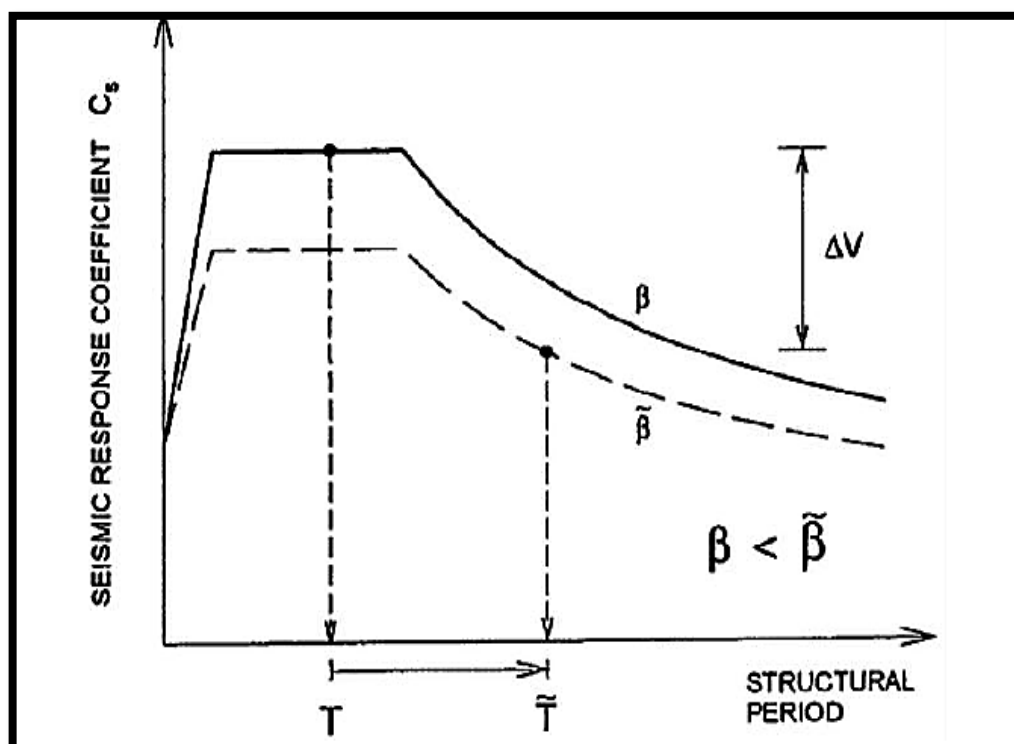


Figure II.6. Lecture spectrale montrant les effets de la prise en compte de l'ISS

Chapitre II : interaction sol-structure

Les effets favorables représentent en moyenne, à une réduction de la réponse de 10 à 12% et, à une aggravation de quelques pourcents lorsqu'ils agissent dans un sens défavorable.

II.8 Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structure.

II.8.1 Interaction cinématique et interaction inertielle

Pour une structure reposant sur un massif de sol plus souple, nous distinguons la notion d'interaction cinématique de celle d'interaction inertielle, comme illustré dans la (Figure II.7)

- ❖ L'interaction cinématique se traduit par la différence entre le mouvement sismique en champ libre et les mouvements de la structure.
- ❖ L'interaction inertielle se réfère à l'interaction entre le sol et la structure due aux charges dynamiques qui leur sont imposées.

L'étude de la réponse dynamique du système sol-structure nécessite une analyse cinématique de l'interaction inertielle. Les modèles physiques et numériques sont utilisés pour étudier l'interaction sol-structure et pour comprendre les effets de l'interaction cinématique et inertielle sur le comportement de la fondation

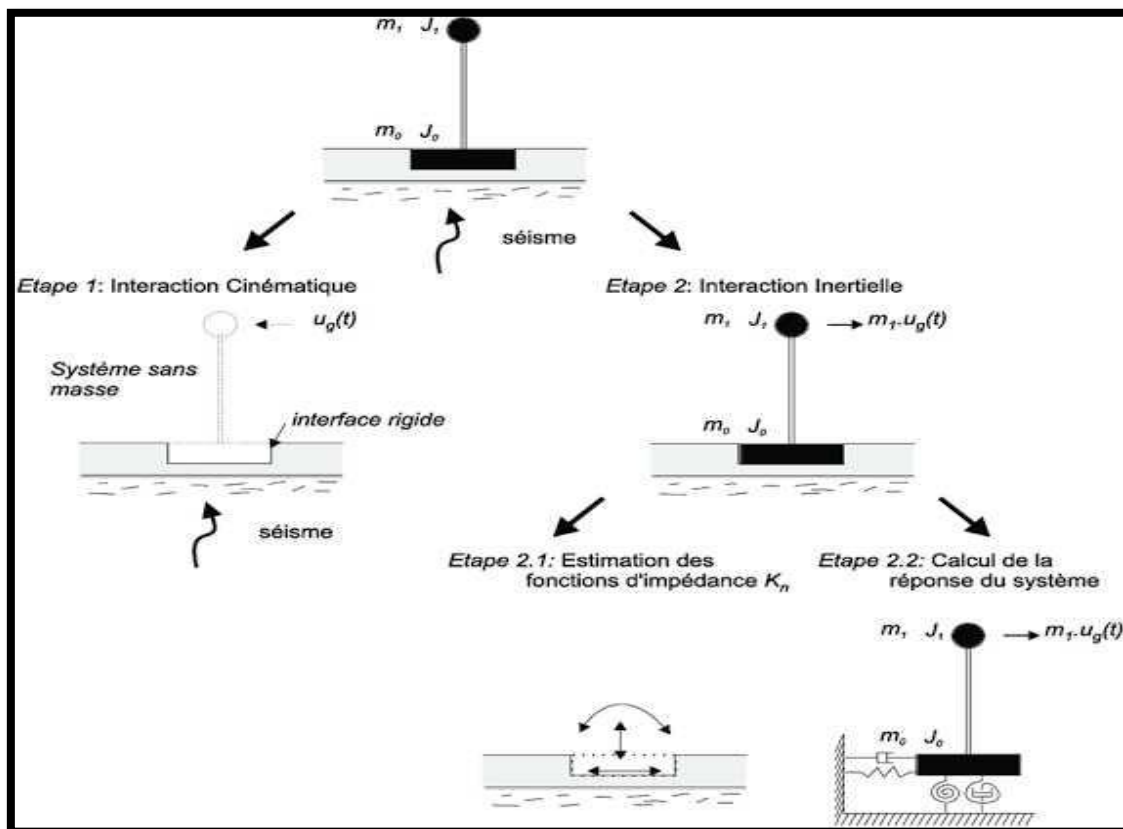


Figure II.7. Principe de décomposition de l'interaction sol-structure

II.8.2 L'amortissement radiatif

Lorsque la structure est soumise à des charges dynamiques, l'énergie produite par le mouvement de la structure est dissipée de deux manières distinctes dans un massif de sol semi-infini. Tout d'abord, il y a un amortissement hystérétique dû aux non-linéarités présentes

Chapitre II : interaction sol-structure

dans le sol et la fondation. Ensuite, il y a une dissipation d'énergie causée par le rayonnement des ondes dans le milieu semi-infini. Cette dissipation d'énergie est appelée l'amortissement radiatif. Il est important de noter que le sol exerce une influence sur la structure, tout comme la structure a un impact sur le sol. Cela signifie que des problèmes d'interactions peuvent survenir entre la structure et le sol. Ces interactions doivent être prises en compte dans l'analyse de la réponse dynamique de la structure afin d'assurer sa stabilité et sa sécurité

II.9 Méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure

En effet, pour prendre en compte l'interaction sol-structure dans une analyse, il existe différentes méthodes qui se différencient par la manière dont elles schématisent le modèle sol-structure. Les trois principales méthodes sont :

- Méthodes directes (globales).
- Méthodes de sous-structure.
- Méthodes hybrides

II.9.1 Méthodes directes (globales) :

Les méthodes directes, également appelées méthodes globales, sont utilisées pour traiter le problème de l'interaction sol-structure dans sa globalité, de manière à obtenir les réponses du sol et de la structure simultanément. Ces méthodes consistent à résoudre directement l'équation du mouvement dans l'ensemble du système sol-structure.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (\text{II.6})$$

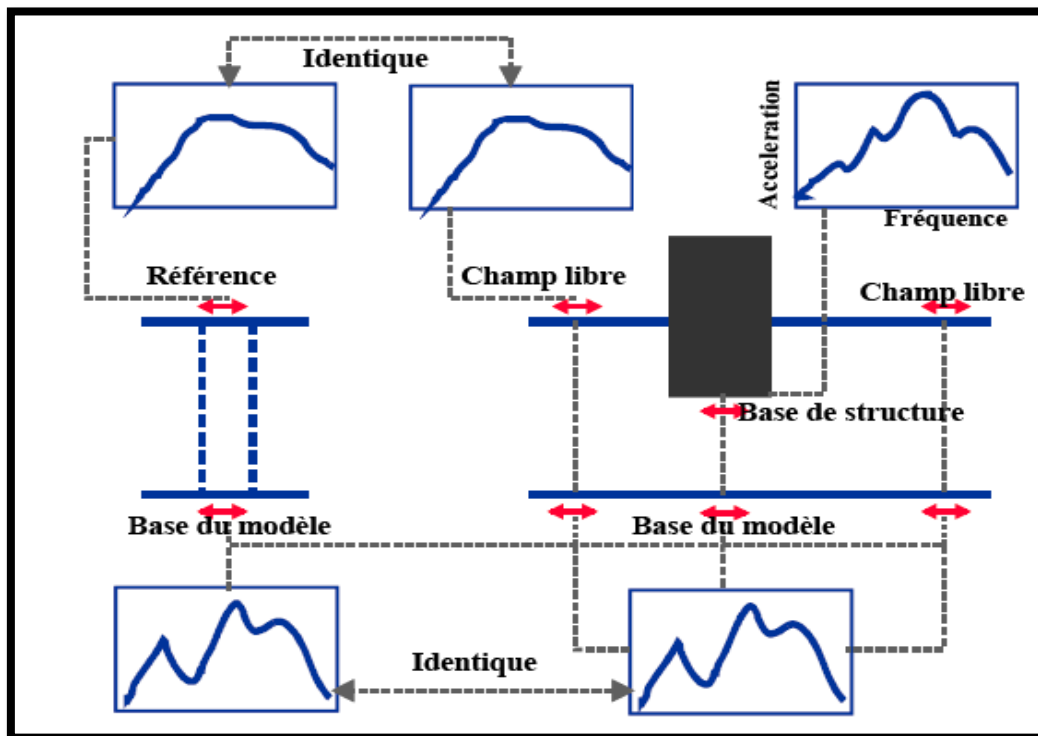


Figure II.8. Schématisation d'un problème d'interaction Sol structure en éléments finis

Chapitre II : interaction sol-structure

La résolution directe du système d'équations pour l'interaction sol-structure est très complexe, ce qui rend l'utilisation de méthodes numériques, telles que les méthodes des éléments finis et des différences finies, pratiquement inévitable (**Figure II.8**). Les méthodes numériques sont utilisées pour résoudre les équations du mouvement dans l'ensemble du système sol-structure. Les méthodes globales, également appelées méthodes directes, sont utilisées pour résoudre le problème de l'interaction sol-structure dans sa globalité, de manière à obtenir les réponses du sol et de la structure simultanément.

La déconvolution du mouvement sismique est une étape importante dans la résolution du problème de l'interaction sol-structure. Cette étape consiste à calculer le mouvement à la base inférieure du modèle, choisie à une profondeur suffisante pour que la présence d'une structure en surface n'affecte pas ce mouvement. Ensuite, le mouvement déconvolu est imposé uniformément à la base du système sol-structure et la réponse est calculée par résolution de l'équation (**II.6**).

❖ Remarque :

L'un des principaux avantages des méthodes globales est leur capacité à tenir compte des hétérogénéités résultant des variations de faciès ou des variations des caractéristiques du sol causées par des non-linéarités. En général, l'expérience montre que ces méthodes sont mieux adaptées et plus faciles à mettre en œuvre pour l'étude des ouvrages enterrés.

II.9.2 Méthodes de sous-structures :

Les méthodes de sous-structure utilisent le principe de superposition (illustré dans la **Figure II.2**). L'idée de base est de diviser le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives, chacune étant plus facile à résoudre, tant du point de vue de la modélisation que du traitement, que le problème global. Ces méthodes ne sont applicables qu'aux problèmes linéaires. Les différentes méthodes de sous-structure se distinguent par la façon dont elles décomposent le modèle global en sous-modèles : les méthodes de frontière et les méthodes de volume.

II.9.2.1 Méthodes de frontière

La méthode de frontière consiste à décomposer le modèle global en sous-modèles, illustrée à la (**Figure II.9**), de sorte que la compatibilité des efforts et des déplacements soit écrite le long de la frontière séparant les deux sous-structures. Les différentes équations d'équilibre sont écrites en négligeant les termes d'amortissement pour alléger la présentation.

❖ Structure :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{ss} & \mathbf{k}_{sb} \\ \mathbf{k}_{bs} & \mathbf{k}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_b \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

❖ Sol :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_f \\ \ddot{\mathbf{u}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{ff} & \mathbf{k}_{fa} \\ \mathbf{k}_{af} & \mathbf{k}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_f \\ \mathbf{u}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{p}_b \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Chapitre II : interaction sol-structure

❖ En absence de structure :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_f^* \\ \dot{\mathbf{u}}_a^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{ff} & \mathbf{k}_{fa} \\ \mathbf{k}_{af} & \mathbf{k}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_f^* \\ \mathbf{u}_a^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Tel que \mathbf{u}^* représente le déplacement *d'interaction cinématique*.

Désignant par :

$$\{\mathbf{u}_i\} = \{\mathbf{u}\} - \{\mathbf{u}^*\}$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_f^i \\ \ddot{\mathbf{u}}_a^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{ff} & \mathbf{k}_{fa} \\ \mathbf{k}_{af} & \mathbf{k}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_a^i \\ \mathbf{u}_a^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{Pb} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Passage dans le domaine fréquentiel on utilise la transformation de Fourier. $\mathbf{U} = \Sigma \mathbf{U}(\omega)e^{i\omega t}$ on obtient :

$$[-\omega^2 [\mathbf{M}] + [\mathbf{K}]] \{\tilde{\mathbf{U}}^i\} = \{-\tilde{\mathbf{P}}\} \quad (\text{II.11})$$

Cette équation peut être condensée, pour chaque fréquence,

$[\mathbf{S}_f]$: La matrice d'impédance du sol,

$[\mathbf{f}]$: degrés de liberté situés sur la frontière de séparation :

$$[\mathbf{S}_f(\omega)] \{\tilde{\mathbf{U}}_f^i(\omega)\} = \{-\tilde{\mathbf{P}}_b(\omega)\} \quad (\text{II.12})$$

Tenant compte de la condition de compatibilité des déplacements à l'interface sol-structure :

$$\{\tilde{\mathbf{U}}_f\} = \{\tilde{\mathbf{U}}_b\} \quad (\text{II.13})$$

Et de la relation :

$$\{\tilde{\mathbf{U}}_f^i\} = \{\tilde{\mathbf{U}}_f\} - \{\tilde{\mathbf{U}}_f^*\} \quad (\text{II.14})$$

La substitution de l'équation (II.12) dans l'équation (II.7) conduit à

$$\left[-\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{m}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} + \mathbf{S}_f \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{U}}_s \\ \tilde{\mathbf{U}}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_f \tilde{\mathbf{U}}_f^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Cette équation décrit le mouvement d'une structure en termes de déplacements absolus lorsqu'elle est soumise à des forces résultant du mouvement du champ libre imposé le long de la frontière, interface avec le sol.

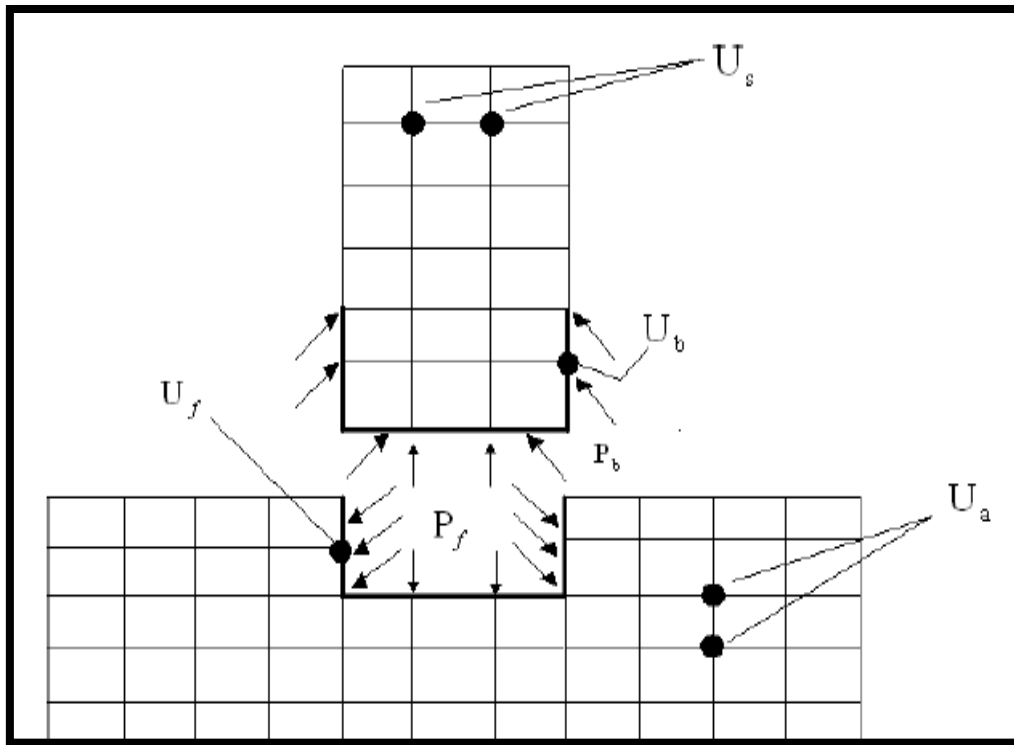


Figure II.9. Méthode des sous-structures : Méthode de frontière

II.9.2.1.1 Frontière rigide :

Si l'on suppose que la fondation est extrêmement rigide, alors les déplacements peuvent être décrits comme un mouvement de corps rigide de la fondation, qui est défini par rapport à un point spécifique de celle-ci, appelé le point mettre ou le noeud mettre. Habituellement, le centre de gravité géométrique de la base de la fondation est considéré comme étant ce point mettre

$$[\tilde{u}_b] = [T][\tilde{u}_0] \quad (\text{II.16})$$

T : est la matrice de transformation

\tilde{u}_0 : Le vecteur des déplacements et rotations du centre de la fondation

De la même manière, les forces nodales \tilde{P}_b sont liées aux forces et moments appliqués au centre de la fondation.

$$[\tilde{P}_b] = [T^T][\tilde{P}_0] \quad (\text{II.17})$$

Avec ces définitions l'équation (II.7) prend la forme

$$\omega^2[M] + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{ss} & \mathbf{k}_{sb} \cdot \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^T \mathbf{k}_{bs} & \mathbf{T}^T (\mathbf{k}_{bb} + \mathbf{S}_f) \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\tilde{u}_s^*] \\ [\tilde{u}_0^*] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{T}^T \mathbf{S}_f^* \tilde{u}_f^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

L'examen de cette dernière équation montre que la matrice $\mathbf{K} = \mathbf{T}^T \mathbf{S}_f \mathbf{T}$ est la matrice d'impédance d'une fondation rigide contenant les raideurs complexes de sol, dépendante de la fréquence ; $\mathbf{T}^T \mathbf{S}_f \tilde{U}_f^*$ est le vecteur contenant les résultantes des forces fictives $\mathbf{S}_f \tilde{u}_f^*$. Le système étant constitué par la structure reliée aux impédances complexes du sol, l'équation

Chapitre II : interaction sol-structure

(2.18) montre que la réponse du système peut être obtenue en appliquant, à son support, un mouvement défini par :

$$K^{-1}T^T S_f \bar{u}^* = T^T \bar{u}_f \quad (\text{II.19})$$

La réponse de la structure est obtenue en résolvant trois étapes successives

- ❖ Détermination du mouvement de la fondation rigide sans masse soumise à la même sollicitation sismique que la structure. ; cette étape représente la solution de l'équation (II.9).
- ❖ La détermination de l'impédance de la fondation rigide ; (équation (II.12))
- ❖ Calcul de la réponse dynamique de la structure reliée à la matrice d'impédance et sujette à son support au mouvement d'interaction cinématique (équation (II.18)).

Si la fondation est parfaitement rigide, la méthode utilisée pour résoudre le système dans une seule étape est identique à celle utilisée pour la décomposition du système en trois étapes, connue sous le nom de théorème de superposition de KAUSEL, comme illustré sur la (Figure II.10). Ce théorème est particulièrement utile si l'une des trois étapes du calcul peut être simplifiée.

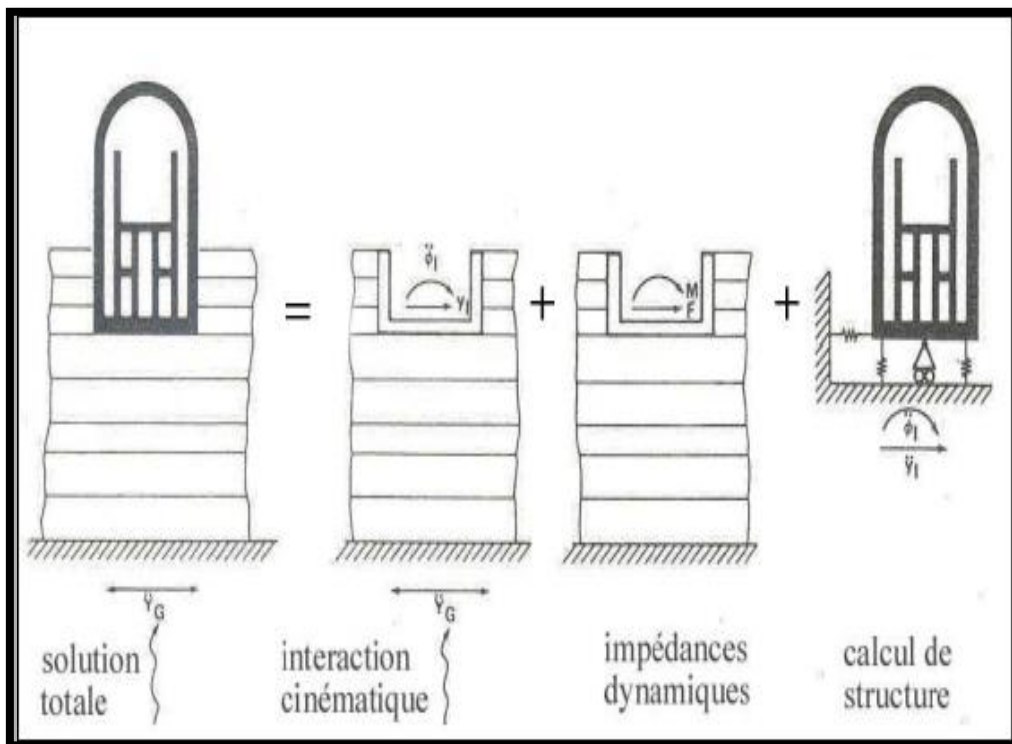


Figure II.10. Théorème de superposition de KAUSEL

II.9.2.1.2 Frontière flexible

En général, la fondation n'est pas parfaitement rigide, ce qui rend le problème à résoudre plus complexe que celui décrit par l'équation (II.15). La structure est reliée aux impédances du sol et est soumise à un système de charges multiples à chacune de ses liaisons avec le sol. En principe, il est nécessaire de résoudre les mêmes trois étapes précédentes :

Chapitre II : interaction sol-structure

- Diffraction du champ libre,
- Impédance,
- Réponse de la structure.

Cependant, chaque étape est plus complexe que dans le cas d'une fondation rigide. En particulier, il n'est plus possible d'utiliser des solutions publiées pour déterminer les impédances.

II.9.2.2. Méthodes de volume :

La méthode de volume permet d'éviter la résolution du problème de diffraction. L'interaction entre le sol et la structure est prise en compte, non seulement à l'interface sol - structure, mais à tous les noeuds de la structure sous la surface du sol, comme cela apparaît par la division en sous-structures définie sur la (Figure II.11) On désigne par $[A]$ la matrice :

$$[A]=[K]-\omega^2 [M] \quad (\text{II.20})$$

Les équations d'équilibre des diverses Sous-structures sont :

- Sol :

$$\begin{bmatrix} a_{ff} & a_{fg} & a_{fb} \\ a_{gf} & a_{gg} & a_{gb} \\ a_{bf} & a_{bg} & a_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f^* \\ U_g^* \\ U_b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Qb \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Par soustraction des équations (II.20) et (II.14), et par condensation aux f degrés de liberté, on obtient

$$\{Qf\} = [Xf]\{[u_f] - [u_f^*]\} \quad (\text{II.22})$$

A la fin, l'équation de mouvement de la structure est donnée par

$$\begin{bmatrix} a_{ss} & a_{si} \\ a_{is} & a_{ii} - a_{ff} + X_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ X_f U_f^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$[Xf]$ Représente la matrice d'impédance du sol.

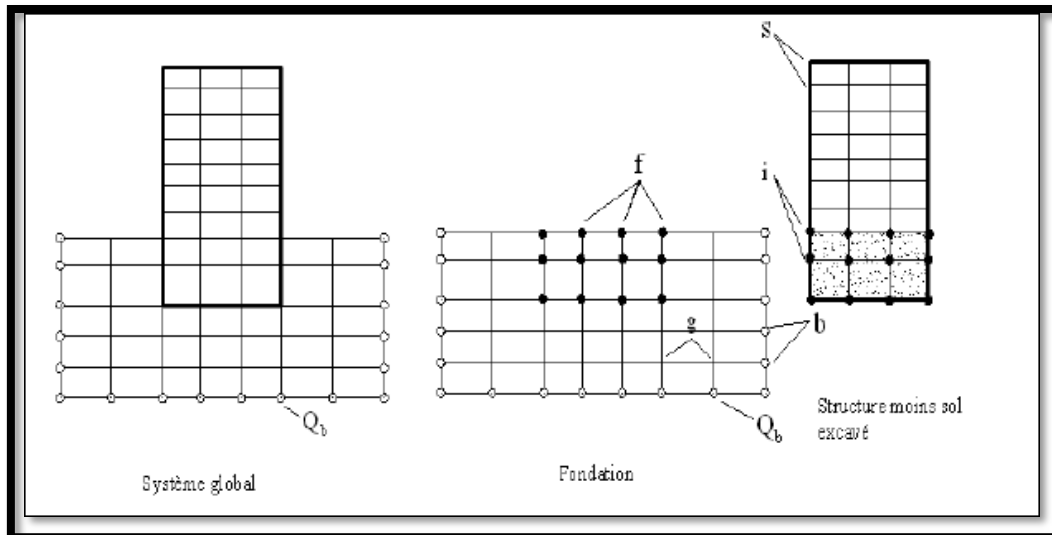


Figure II.11. Méthode des sous-structures : Méthode de volume

II.9.3 Méthodes hybrides :

Sauf si une solution analytique existe ou si une solution similaire a déjà été publiée, résoudre le problème d'impédance dans la méthode des sous-structures peut s'avérer long et coûteux. La résolution de l'équation (II.12) pour un grand nombre de fréquences est nécessaire pour résoudre le problème d'impédance.

Afin de résoudre ce problème de manière plus rapide et moins coûteuse, GUPTA et al. (1980) ont développé une méthode hybride qui consiste à diviser le sol en un champ libre et un champ lointain (Figure II.12). Le champ lointain est représenté par une matrice d'impédance, ce qui étend le concept de sous-structures pour inclure le champ proche dans le modèle de structure. Le défi de cette méthode, comme mentionné par Alain-PECKER (1984), est de déterminer les coefficients de la matrice du champ lointain en obtenant la solution du problème de diffraction du champ incident le long de la frontière séparant le champ proche du champ lointain.

Cependant, GUPTA et al. ont simplifié cette étape en supposant un mouvement uniforme, ce qui est une approximation très grossière qui limite considérablement l'efficacité de la méthode. Malgré cette limitation, la méthode hybride reste une alternative intéressante pour résoudre le problème d'impédance dans certaines situations où la méthode des sous-structures classique est coûteuse et peu pratique, mais il est important de prendre en compte ses limites et de s'assurer qu'elle convient à l'objectif de l'étude.

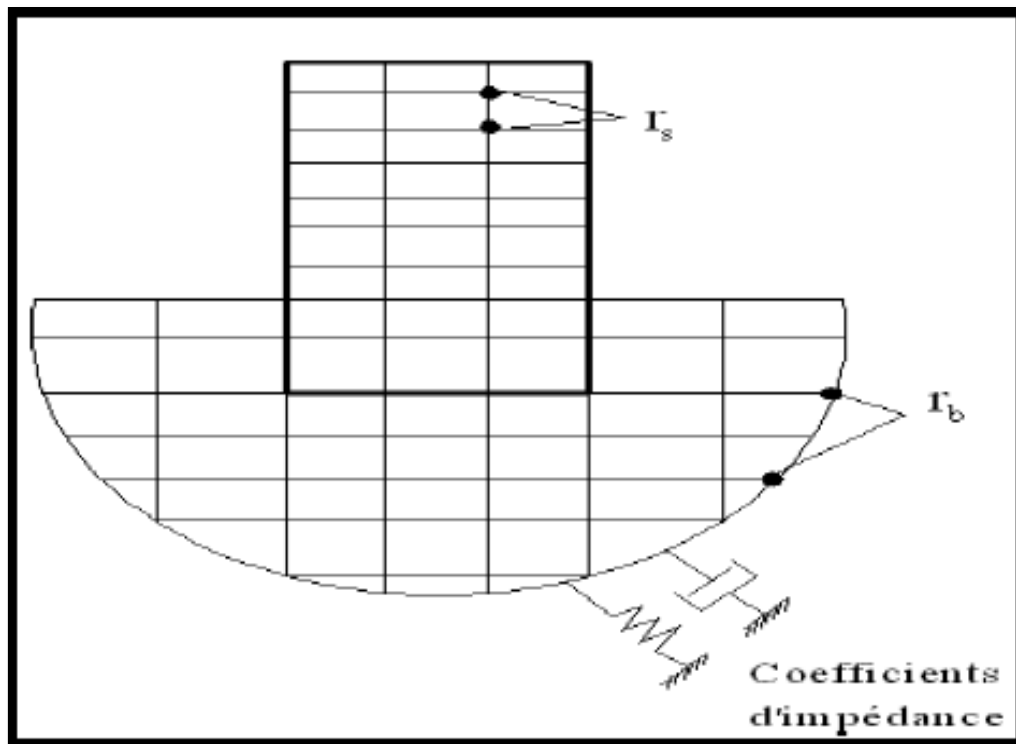


Figure II.12. Méthode Hybride

II.10 Conclusions :

Dans ce chapitre, un aperçu sur les éléments de l'effet de l'interaction sol-structure et les différentes méthodes utilisées pour tenir compte de ce phénomène a été présenté. Les phénomènes physiques dus à l'interaction sol-structure et ses effets ont été exposés, ainsi que les différentes méthodes d'analyse de cette interaction telles que les méthodes directes, les méthodes de sous-structure et les méthodes hybrides.

Chapitre III

Interaction fluide-structure

Chapitre III : Interaction fluide-structure

III.1 Introduction :

L'interaction fluide-structure s'intéresse au comportement d'un système composé de deux entités : une structure en mouvement (rigide ou déformable) et un fluide autour ou à l'intérieur de la structure (coulant ou stationnaire). L'évolution de chacune de ces entités interdépendantes peut révéler un phénomène de couplage. Plus précisément, le mouvement de la structure est affecté par l'écoulement du fluide à travers les forces transmises à l'interface, et inversement, le mouvement de la structure affecte l'écoulement du fluide à travers le déplacement de l'interface impliquant le fluide se déplaçant à travers elle.

Les problèmes d'interaction fluide-structure peuvent survenir dans divers domaines des sciences de l'ingénieur. En particulier, l'importance des phénomènes FSI (interaction fluide structure) pour la réponse dynamique des barrage-poids en béton compte tenu du FSI constitue un domaine de recherche actif. La prédiction du mouvement couplé du système barrage-réservoir et l'évaluation de la pression hydrodynamique exercée sur le parement amont du barrage est une tâche particulièrement complexe.

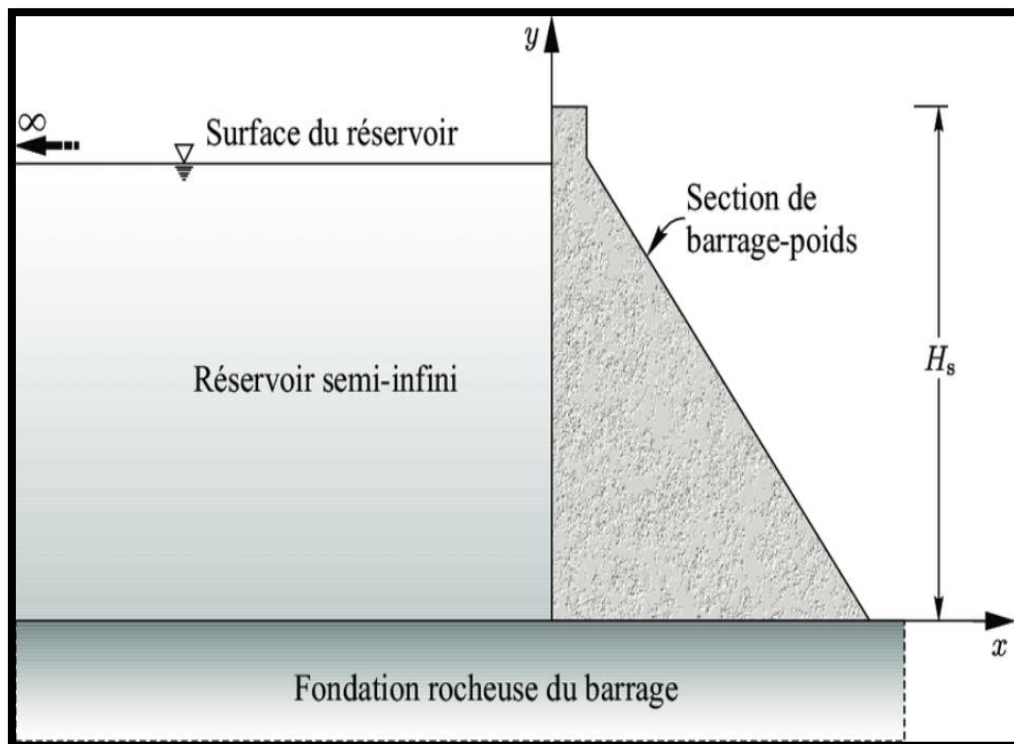


Figure III.1. Barrage-réservoir

III.2 Interaction fluide structure :

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

Chapitre III : Interaction fluide-structure

profondeur constante dans l'hypothèse d'un mouvement horizontal harmonique de l'écran de période T.

Interaction structure rigide-fluide incompressible :

L'hypothèse de Westergaard néglige la compressibilité de l'eau et l'amortissement supplémentaire qui devrait être introduit par la propagation des ondes en amont du réservoir. Cette hypothèse constitue la solution de Westergaard (1933), qui est souvent utilisée dans l'analyse dynamique des barrages et qui reste une bonne approximation de la distribution verticale de la pression hydrodynamique dans les liquides incompressibles.

La solution est basée sur l'hypothèse d'un système bidimensionnel où le barrage rigide, possède une paroi amont verticale en contact avec un réservoir incompressible de profondeur constante et de longueur infinie. Bien que cette méthode soit souvent choisie en modélisation en raison de sa simplicité. Supposons que le fluide est incompressible, parfait et non visqueux, et supposons que l'écoulement tournant. Dans ce cas, la pression s'annule à la surface libre

Dans le cas d'une modélisation en éléments finis, l'effet du fluide non compressible peut être simplement pris en compte par ajout d'une masse équivalente à chaque nœud de contact barrage-fluide du parement amont, donc selon la structure, le fluide peut introduire :

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

III.3.1.1 Effet d'inertie :

Selon WESTERGAARD, l'influence des fluides sur les structures se caractérise par l'ajout de la matrice de masse de la structure à la matrice de masse, pour laquelle il a proposé d'utiliser une parabole pour représenter le volume d'eau.

Les hypothèses sur lesquelles repose cette méthode :

- Le barrage est rigide
- La face amont est un plan vertical
- Le liquide est incompressible
- Le réservoir est étendu à l'infini dans la direction amont.
- Les vibrations sismiques sont supposées harmoniques horizontales de direction perpendiculaire au parement amont du barrage.

Donc Lors de son déplacement vers l'amont provoqué par un séisme, le barrage bute contre l'eau de la retenue. La force d'inertie de l'eau va engendrer une surpression hydrodynamique sur le parement amont du barrage, dont Westergaard a formulé une relation parabolique en fonction de la profondeur, défini par l'expression suivante :

$$p(y) = \frac{7}{8} \times \rho \omega \times \alpha \times \sqrt{H \times y} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

P : Surpression au droit de l'interface amont de barrage.

Chapitre III : Interaction fluide-structure

$\rho\omega$: La masse volumique de l'eau.

H : Le niveau d'eau du réservoir (la profondeur de la retenue).

y : La profondeur considérée.

α : Coefficient d'accélération sismique horizontal au niveau de site.

La force totale appliquée sur une tranche de largeur unité est alors égale à :

$$F = \frac{7}{12} \times \rho\omega \times \alpha \times H^2 \quad (\text{III.2})$$

Elle s'applique en un point situé au $2/5$ de la hauteur en partant du bas. (Poussée de Westergaard.)

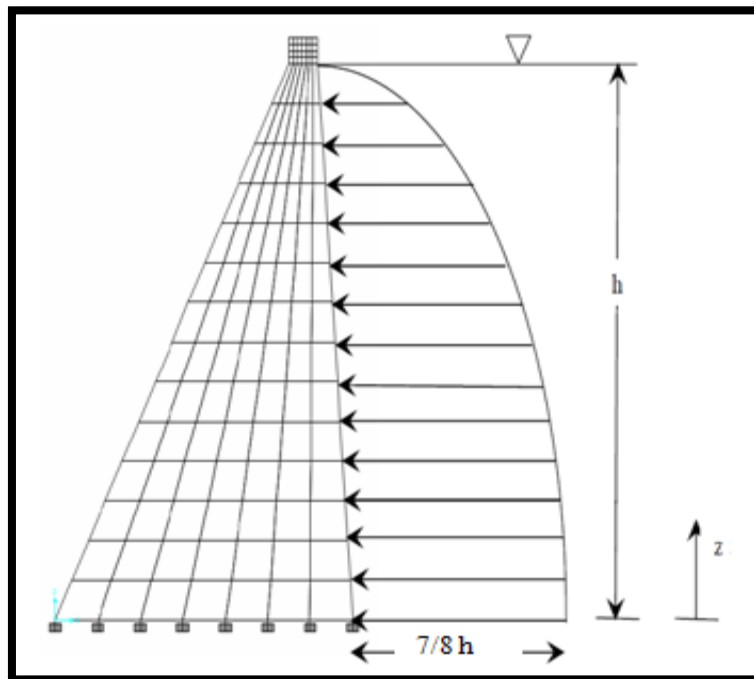


Figure III.3. Pression hydrodynamique sur la face amont du barrage

Le même effet peut être obtenu par un bloc d'eau attaché à la face amont du barrage.

Conformément à la théorie de WESTERGAARD, ce bloc doit avoir une forme parabolique avec une épaisseur à la base égale à $7/8 H$ (figure II.3).

III.3.1.2 Effet de compressibilité :

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

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

Chapitre III : Interaction fluide-structure

III.3.1.3. Effet de viscosité :

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

III.3.2 Détermination de la masse d'eau entraînée :

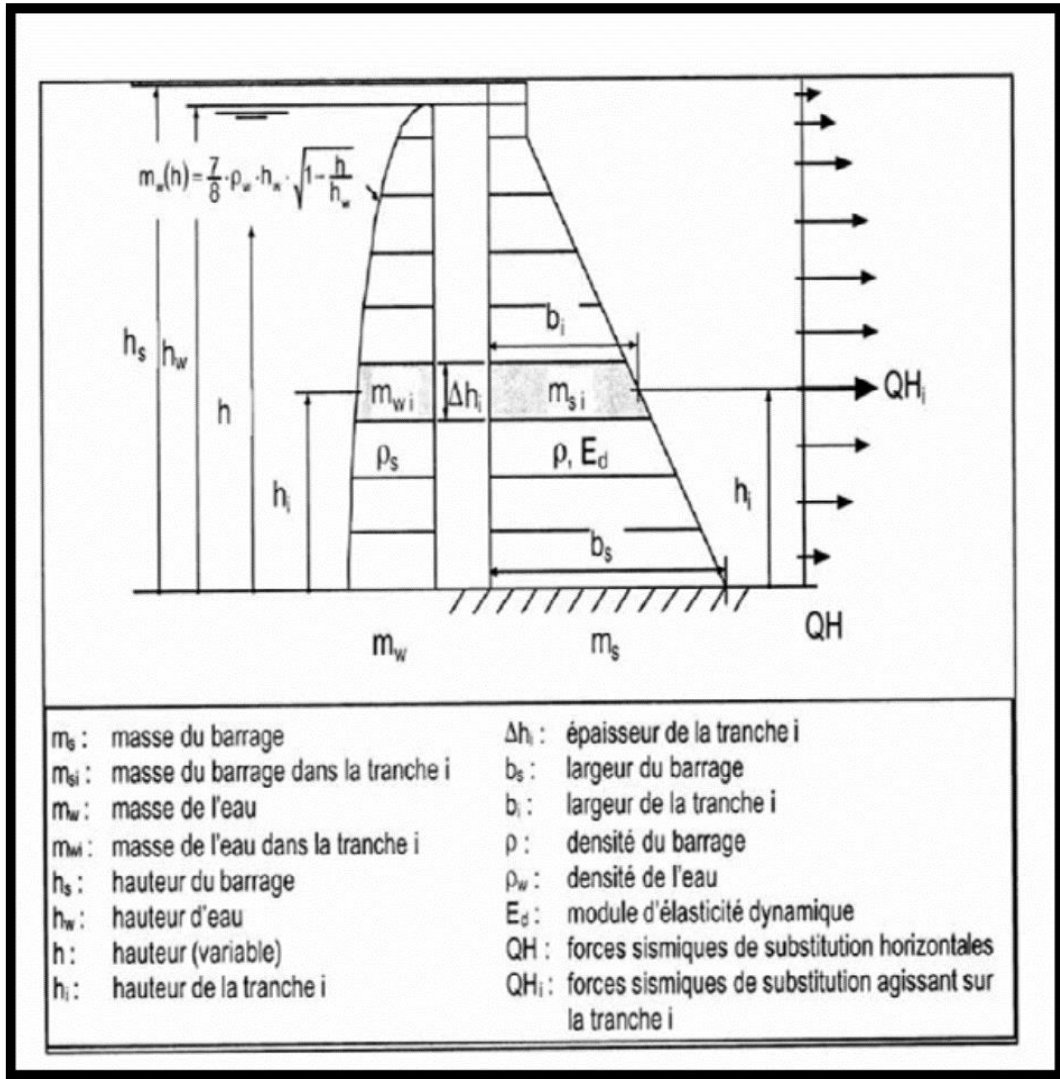


Figure III.4. Modélisation géométrique d'un barrage-poids

L'équation de Westergaard permet de calculer la masse oscillante causée par l'effet hydrodynamique de l'eau sur un barrage doté d'un parement amont approximativement vertical. Cette masse est fonction de la hauteur h et de la manière dont elle oscille avec le barrage :

$$m_w(h) = \frac{7}{8} \rho_w h \sqrt{1 - \frac{h}{h_w}} \quad (\text{III.3})$$

Afin de faciliter la mise en pratique, le barrage est subdivisé en plusieurs tranches horizontales. Le critère de division est déterminé en considérant la forme du barrage, le

Chapitre III : Interaction fluide-structure

niveau d'eau et le degré de précision requis pour le calcul. Les différentes tranches peuvent avoir des épaisseurs variables. Pour représenter la tranche i , on peut écrire :

$$m_w(\mathbf{h}) = \frac{7}{8} \rho_w \mathbf{h} \sqrt{1 - \frac{\mathbf{h}}{h_w}} \Delta \mathbf{h}_i \quad (\text{III.4})$$

Westergaard a proposé une équation approximative conservatrice pour la distribution parabolique de la force hydrostatique sur un barrage rigide.

$$p_w(\mathbf{h}) = \frac{7}{8} \sqrt{h_w(h_w - \mathbf{h})} \rho_w \ddot{u} g \quad (\text{III.5})$$

III.4 Solution de westergaard :

La solution exacte formulée par Westergaard est exprimée sous la forme d'un développement en série de fonctions sinusoidales :

$$C_n = \sqrt{1 - \frac{16 \gamma_w H_1^2}{n^2 g k T^2}} = \left[1 - \frac{1}{n^2} \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Avec } T_0 = \frac{4H}{c} \quad (\text{III.6})$$

$$P(Z) = \frac{8\alpha H^2}{\pi^2} \gamma_w \sum_{1,3,5} \frac{1}{n^2 C_n} \sin\left(\frac{n\pi}{2H} Z\right) \quad (\text{III.7})$$

Avec :

P : Pression sur l'écran.

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

γ_w : Poids volumique de l'eau.

H : Profondeur de l'eau.

K : Module de compressibilité de l'eau.

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

T_0 : Période propre du réservoir.

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

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

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

- La répartition parabolique de WESTERGAARD :

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

- La répartition elliptique de KARMAN :

$$P(Z) = 0.707\alpha \gamma_w \sqrt{Z(2H - Z)} \quad (\text{III.9})$$

- **Remarque :**

Pour l'évaluation de la pression hydrodynamique, M.Hatanaka recommande d'introduire, dans la relation de WESTERGAARD, un coefficient d'amplification C_0 . En cas d'un mouvement du sol de type choc ce coefficient peut atteindre sa valeur maximale estimée à 1,5. On aura :

$$P(Z) = \frac{7}{8} C_0 \alpha \gamma_w \sqrt{HZ} \quad (\text{III-10})$$

III.5 Couplage fluide-structure à l'aide de la méthode des

Éléments finis :

Depuis environ 1970, la méthode des éléments finis a connu une expansion extraordinaire en tant que méthode numérique pour résoudre les équations différentielles qui décrivent les phénomènes physiques en ingénierie. Cette croissance est étroitement liée au développement et à l'amélioration des capacités des micro-ordinateurs. Aujourd'hui, elle est devenue un outil essentiel pour les ingénieurs, utilisé dans divers domaines tels que l'analyse des structures, le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, les écoulements souterrains, la combustion, ainsi que la dispersion des polluants.

Cependant, du fait de la complexité des configurations géométriques variées du réservoir et des conditions aux frontières complexes qui ne peuvent pas toujours être traitées de manière analytique, ainsi que de la nécessité de prédire les dommages potentiels résultant du comportement non linéaire des barrages dans les zones de forte sismicité, il est impératif de déterminer la solution dans le domaine temporel.

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

- La mécanique des structures : et leurs divers domaines tels que l'élasticité, la résistance des matériaux, la dynamique, la plasticité, et bien d'autres encore.
- L'analyse numérique : qui comprend différentes techniques telles que les méthodes d'approximation, la résolution des systèmes linéaires, ... etc.
- L'informatique appliquée : les techniques de développement et de la maintenance de grand logiciel.

III .5.1 Système couplé fluide -structure :

La modélisation par éléments finis est utilisée à la fois pour le barrage et le réservoir. L'élasticité du barrage et la compressibilité du liquide ont été intégrées dans le modèle proposé.

Les interfaces fluides avec les joints solides Γ_I et Γ_F , et la surface libre du réservoir Γ_S ainsi que les joints de troncature du réservoir Γ_T sont illustrés sur la figure III-5 :

Chapitre III : Interaction fluide-structure

L'écriture du système globale couplé s'obtient en regroupant les deux systèmes en un seul comme suite :

$$\begin{bmatrix} M_S & \mathbf{0} \\ \rho Q^T & M_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_S & \mathbf{0} \\ C & C_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_S & -Q \\ \mathbf{0} & K_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_g \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

ρ : Masse volumique du fluide du réservoir

Les vecteurs U et P déterminent respectivement les déplacements nodaux de la structure et les contraintes nodales dans le réservoir.

Les matrices MS, CS et KS représentent les matrices assemblées de masse, d'amortissement et de rigidité de la structure, et les matrices MF, CF et KF sont leurs analogues pour le fluide.

L'amortissement global du barrage est évalué selon un concept d'amortissement de Rayleigh : $CS = \alpha MS + \gamma KS$ avec des constantes α et γ pour des fonctions proportionnelles du taux d'amortissement et des fréquences propres de vibration de la structure.

Le vecteur force $F_S = -MS \ddot{U}_g$ contient les composantes des forces d'entraînement générées par le vecteur des accélérations sismiques appliquées aux nœuds de la structure.

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

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

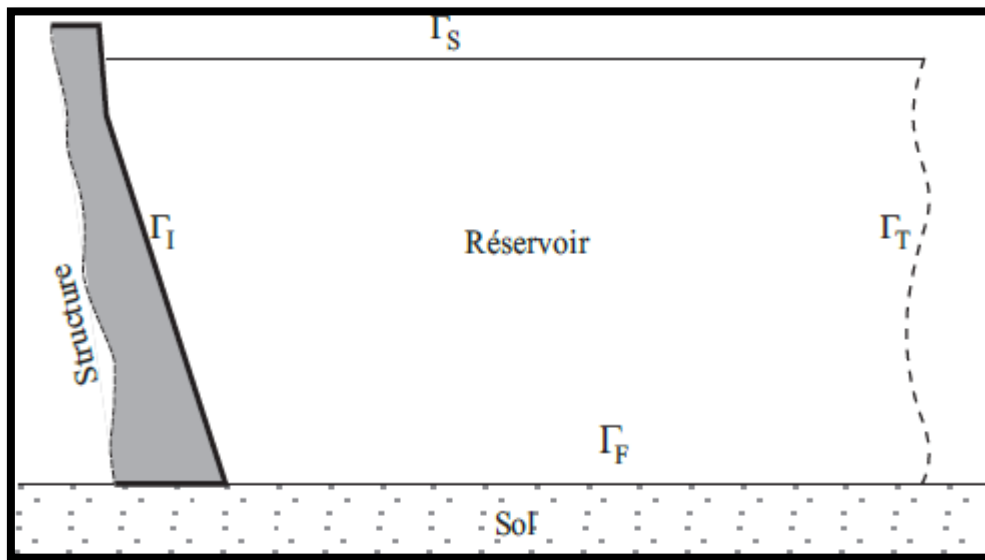


Figure III.5. Présentation du système barrage-réservoir

III.5.1.1 Équation du mouvement :

Le mouvement du système réservoir-barrage est considéré comme bidimensionnel et limité à de faibles amplitudes. Le fluide est supposé qu'est non visqueux et se prolonge à l'infini dès la direction ascendante. Cependant, les effets des vagues externes, la

Chapitre III : Interaction fluide-structure

compressibilité de l'eau, la flexibilité du barrage et le rayonnement atténué sont négligés à la limite ascendante du réservoir.

- **Formulation en pression :**

On sait qu'au sein de l'interaction structure des fluides dans le cas des barrages, la contribution des contraintes dues aux effets visqueux est faible par rapport aux effets induits par les forces d'inertie.

Si les contraintes visqueuses sont négligées, l'équation dynamique s'écrit :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p \quad (\text{III.12})$$

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

$$p = -K \text{Tr} \epsilon = -K \nabla \cdot u \quad (\text{III.13})$$

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

$$\text{Tr} \epsilon = \nabla \cdot u \quad (\text{III.14})$$

Le dérivé de **III-13** par rapport au temps donne :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \nabla \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla u = \nabla \frac{\partial u}{\partial t}$$

La vitesse v peut maintenant être éliminée des équations en prenant la divergence de (III-12) et la dérivée par rapport au temps de (III-15) :

$$\Delta p = -\rho \nabla \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial t} \Delta p = -K \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} \nabla v = 0 \quad (\text{III.16})$$

Ceci donne l'équation scalaire suivante :

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

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

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

Dans le cas d'un fluide incompressible, le changement de volume $\Delta v / v$ reste quasiment nul quelle que soit la pression appliquée, ce qui donne un coefficient de compressibilité infini et donc une propagation d'onde instantanée ($c = \infty$). Alors l'équation (III-16) se réduit à l'équation de Laplace :

$$\Delta p = 0 \quad \text{(III.17)}$$

Bien que cette dernière équation ne décrive pas la diffusion et l'atténuation de la surpression hydrodynamique, elle constitue cependant une bonne approximation pour l'estimation des effets du réservoir sur la réponse sismique des barrages. Ainsi, il est utilisé dans de nombreux travaux traitant des problèmes de réponse sismique avec interaction fluide-structure.

III.5.1.2 Condition aux limites :

En se référant à la Fig. (III-5), la frontière du réservoir se compose de la surface libre (Γ_S), du fond (F), de l'interface avec le barrage (Γ_I), et de la limite de troncature géométrique (Γ_T) en amont. Dans ce qui suit, les conditions aux limites du problème de vibration du réservoir seront abordées.

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

Sur l'interface fluide-structure Γ_I , on suppose que les particules fluides soient parfaitement solidaires avec les particules solides du barrage, par conséquent l'équation d'équilibre s'écrit pour cette limite comme suit :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \quad \text{III-18}$$

où u_n est la projection de l'accélération des particules solides sur n normale à la face supérieure du barrage.

- **Condition à la surface libre :**

L'exigence la plus simple est de prendre une pression hydrostatique nulle à la surface de l'eau, ce qui revient à négliger les fluctuations de la surface libre. Ceci conduit également à un potentiel nul sur la surface.

$$p = 0 \quad \text{III-19}$$

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

- **Condition à la surface en fond de réservoir :**

Chapitre III : Interaction fluide-structure

Le fond du réservoir est composé de couches de sédiments saturés qui peuvent être considérés comme des solides élastiques. Ces couches peuvent avoir une épaisseur très variable d'un barrage à l'autre. Il a été démontré dans plusieurs travaux que ces couches peuvent avoir un effet d'absorption des ondes de pression, dans des matériaux relativement perméables.

Si l'on néglige cet effet d'absorption, et si l'on considère le sol comme non poreux, on retrouve le même cas pour l'interface barrage-réservoir qui est donnée par :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_F \quad \text{III-20}$$

Pour le cas d'un fond horizontal et d'excitation sismique aussi horizontale, le vecteur déplacement u et le vecteur normal n étant perpendiculaires, la condition se réduit simplement à :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{III-21}$$

- **Condition à la limite sur la surface de troncature :**

Le principal effet dynamique dans cette région est dû à la propagation des ondes de pression se déplaçant de l'interface fluide-structure vers le haut du réservoir, s'étendant vraisemblablement suffisamment loin pour être considérées comme infinies et sans source de réflexion vagues. La condition peut alors s'écrire :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{III-22}$$

Où :

C : célérité des ondes de pression dans l'eau

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

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons particulièrement tenté de mettre en évidence le problème d'interaction fluide-structure à l'aide de deux méthodes : la méthode de Westergaard qui est fréquemment utilisée dans l'analyse dynamique des barrages qui est basée sur le concept de masse ajoutée et qui reste une bonne approximation de la distribution verticale de la pression hydrodynamique dans un fluide incompressible et la méthode des éléments finis.

Chapitre IV

Application numérique

Chapitre IV : Application numérique

IV.1 Introduction :

Le phénomène d'interaction sol-fluide-structure se réfère à l'effet combiné de la présence du sol de fondation, du réservoir d'eau et de la structure elle-même sur le comportement des barrages. Pour obtenir une représentation réaliste du comportement du barrage, il est important de prendre en compte ces trois éléments lors de la modélisation. Pour chaque élément, une analyse spécifique doit être effectuée afin d'étudier les conditions normales de vibrations du barrage. Cette analyse permettra d'identifier les fréquences appropriées, les formes de posture et les déformations associées pour comprendre la réponse dynamique du barrage en présence de liquide et/ou de sol.

Pour commencer, il est essentiel de connaître la géométrie du barrage de Koyna, y compris ses dimensions, sa forme et ses caractéristiques structurelles. Des données précises sur la géométrie du barrage sont nécessaires pour effectuer une modélisation précise. Une fois que toutes les données nécessaires sont disponibles, le logiciel Ansys version 15 peut être utilisé pour effectuer la modélisation par éléments finis du barrage de Koyna en tenant compte de l'interaction sol-fluide-structure. Le logiciel Ansys est couramment utilisé pour effectuer des analyses de structures complexes en utilisant la méthode des éléments finis. Dans la modélisation par éléments finis, le barrage serait discrétisé en un maillage constitué d'éléments finis. Chaque élément fini représente une partie discrète de la structure et du sol de fondation, et les équations de comportement appropriées sont appliquées pour simuler l'interaction entre les différents éléments

IV.2 Description du site de la structure :

Le Barrage de Koyna est l'un des plus grands barrages dans Maharashtra, Inde. C'est un barrage en moellons construit sur Rivière Koyna qui monte dans Mahabaleshwar, une station de montagne dans Sahyadri gammes. Il est situé dans Koyna Nagar, Quartier de Satara, niché dans le Ghâts occidentaux sur la route nationale entre Chiplun et Karad, à environ quarante milles à l'intérieur des terres de la mer d'Arabie dans la région sud-ouest de l'Inde.



Figure IV.1. Barrage de Koyna

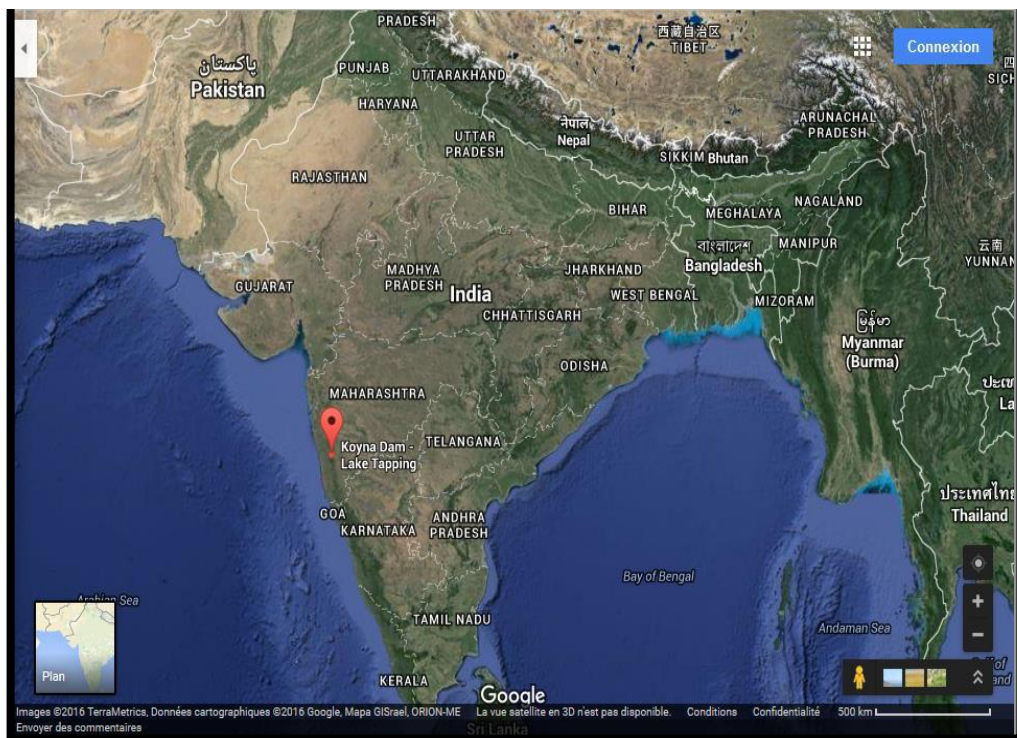


Figure IV.2. Station GPS Barrage de Koyna, Western Maharashtra, Inde

Chapitre IV : Application numérique

IV.3 Caractéristiques du barrage de Koyna :

IV.3.1 Géométrie :

Le barrage de Koyna a une hauteur de 103 m, le niveau d'eau est de 91.75 m. Le déversoir du barrage se trouve au centre de la rivière. Il dispose de 6 portes radiales. Ce barrage joue un rôle vital de contrôle d'inondation dans la saison de la mousson.

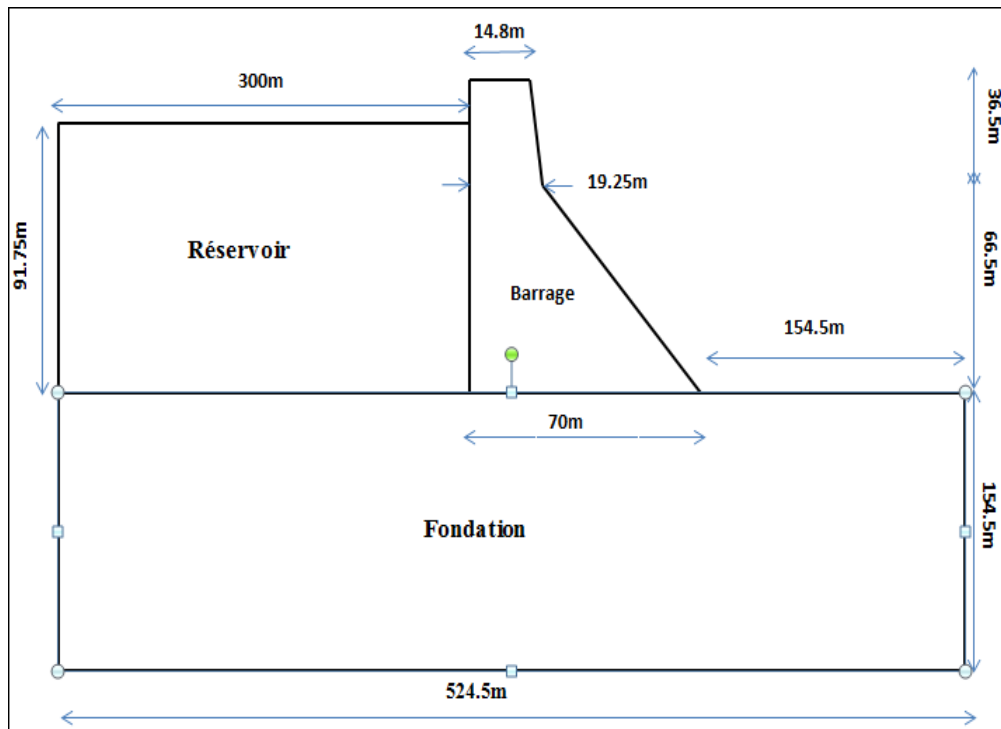


Figure IV.3. La géométrie des systèmes interaction barrage-fondation-réservoir

IV.3.2. Propriétés du matériau béton :

Matériau	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson	Densité (kg/m ³)
Barrage (Béton)	31030	0.20	2643
Barrage Sol de fondation	16860	0.18	2701
Fluide de (Réservoir)	2070	0.49	1000

Tableau IV.1. Propriétés des matériaux du barrage-poids de koyna

Chapitre IV : Application numérique

IV.4 Analyse modale :

L'analyse modale est une technique utilisée pour déterminer les caractéristiques intrinsèques de vibration d'une structure ; à savoir:

- Les fréquences propres
- Les modes propres
- Les facteurs de participation des modes

IV.5 Intérêt de l'analyse modale :

Généralement, les ingénieurs ont besoin de connaître les fréquences naturelles d'une structure dans le cas où elle est exposée à des forces d'excitation. Dans ce cas de figure, la pièce peut résonner et se rompre si les fréquences d'excitation coïncident avec la fréquence naturelle de la structure. Même si une fréquence d'excitation est décalée par rapport à la fréquence naturelle, il est possible qu'elle soit toujours suffisamment proche pour produire des vibrations indésirables. L'analyse modale leur donne aussi une idée sur la réponse qu'aura la structure pour différents types de force dynamique. Elle leur permet aussi de faire des calculs pour d'autre type d'analyse dynamique.

IV.6 Procédure :

Une analyse modale comporte quatre étapes principales :

- Création du modèle
- Choix du type et des options d'analyse
- Application des conditions limites et résolution
- Vérification des résultats

IV.6.1 Création du modèle :

Dans la Création du modèle, il existe quelques étapes qui sont :

- a) **La détermination des points**
 - ❖ **Système Barrage seul :**

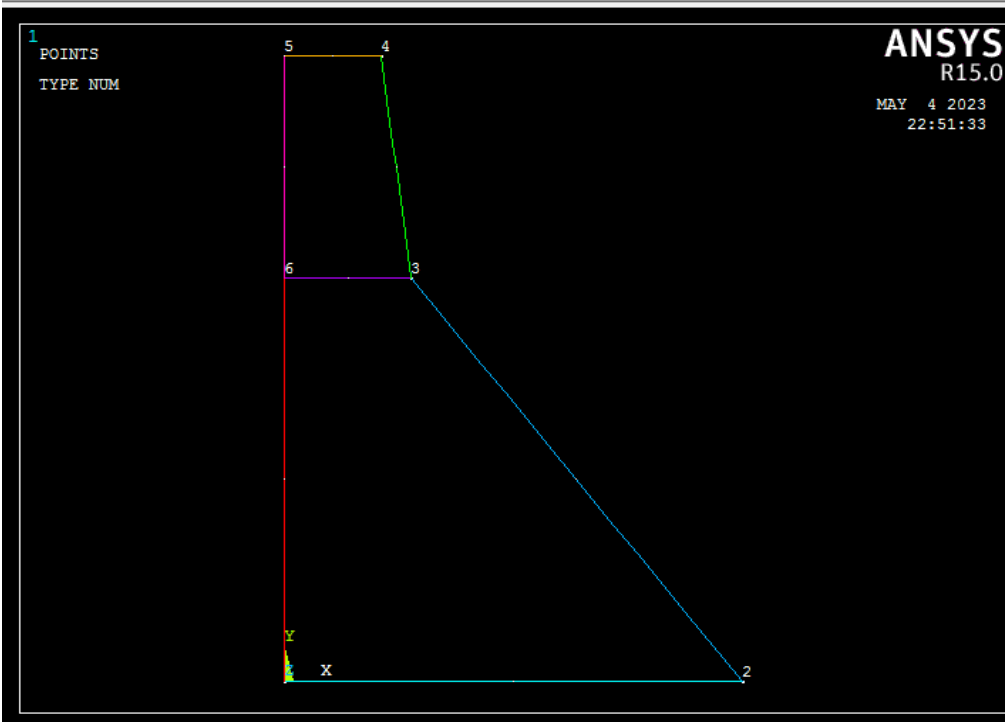


Figure IV.4. Géométrie du barrage seul de Koyna sur Ansys avec les points et les lignes

❖ Système Barrage- Fondation :

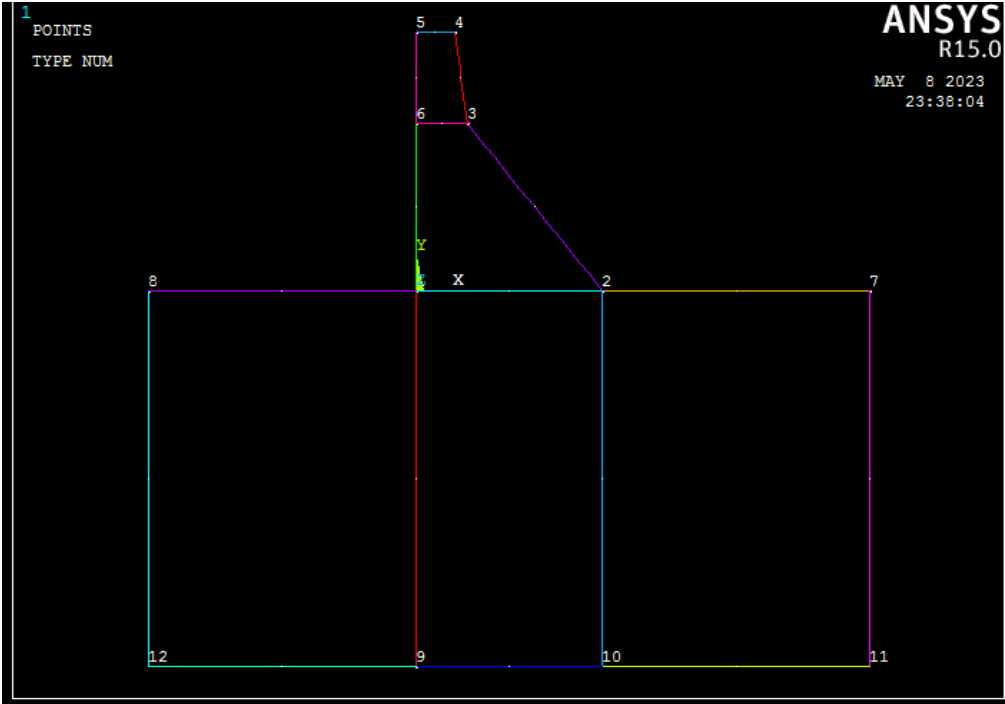


Figure IV.5. Géométrie du barrage-fondation de Koyna sur Ansys avec les points et les lignes

❖ Système Barrage-fondation-réservoir :

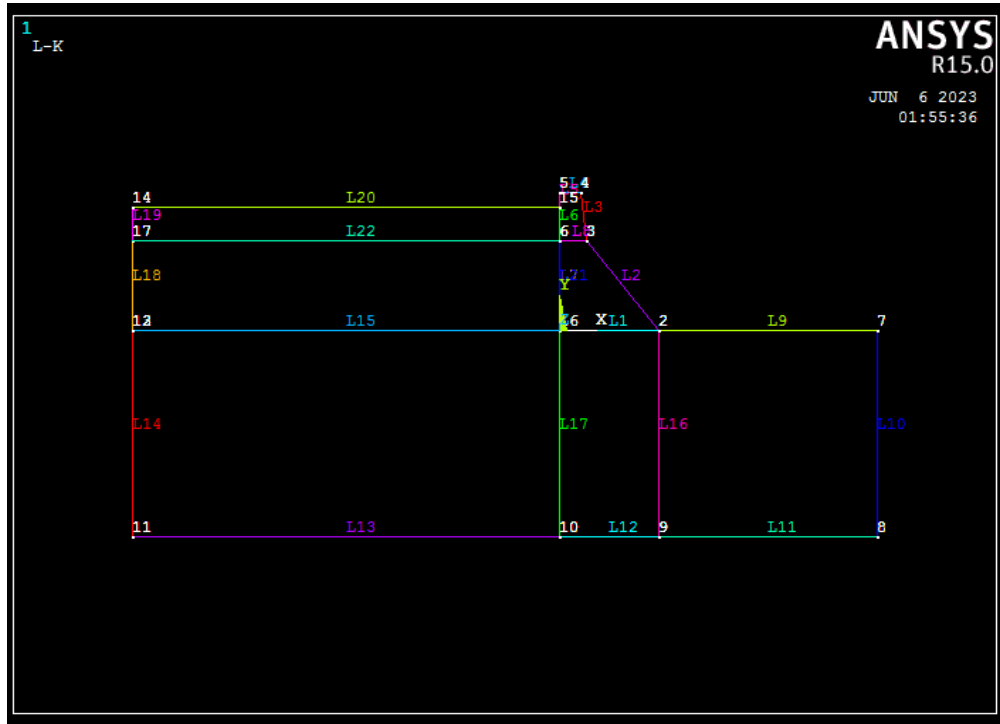


Figure IV.6. Géométrie du barrage-fondation-réservoir de Koyna sur Ansys avec les points et les lignes

b) Faire le maillage :

❖ Système Barrage seul :

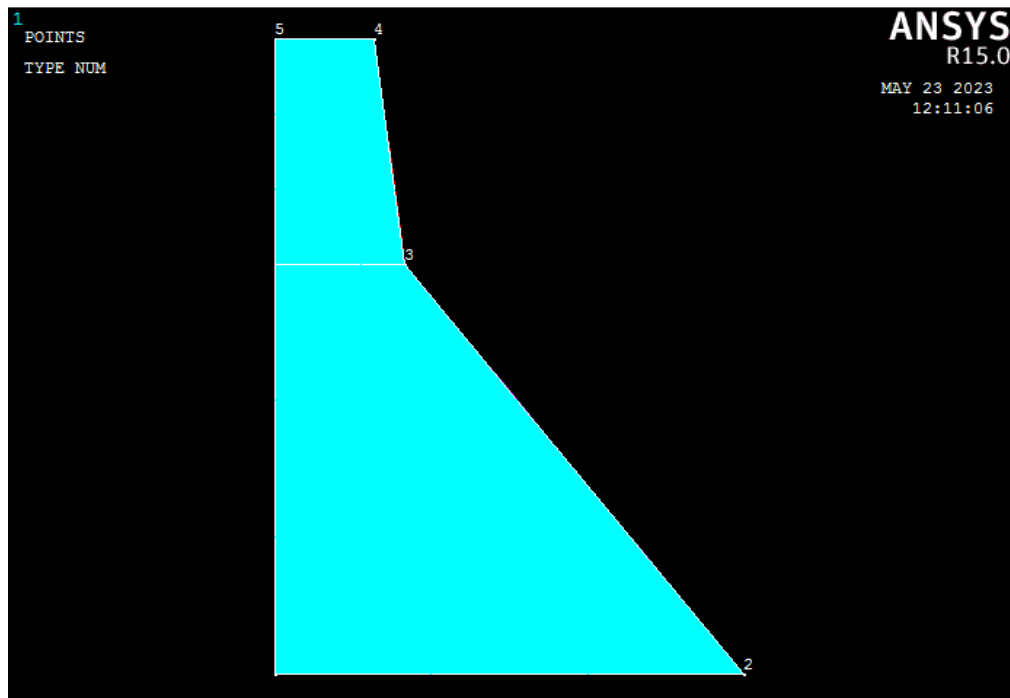


Figure IV.7. Section du barrage seul de Koyna sur ANSYS

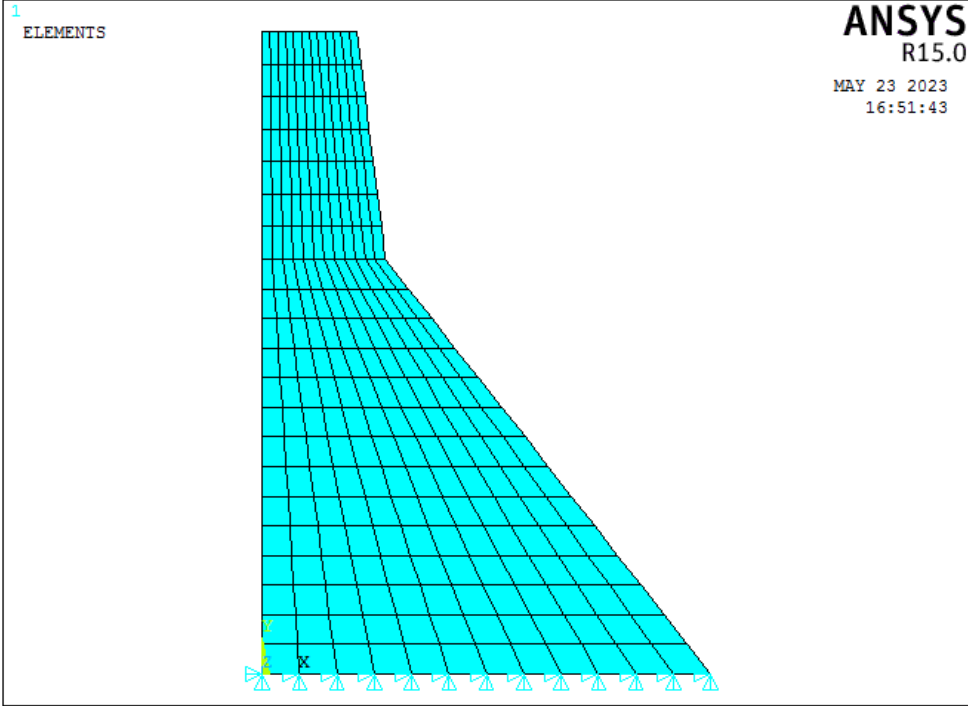


Figure IV.8. Maillage du barrage seul

❖ Système Barrage-Fondation :

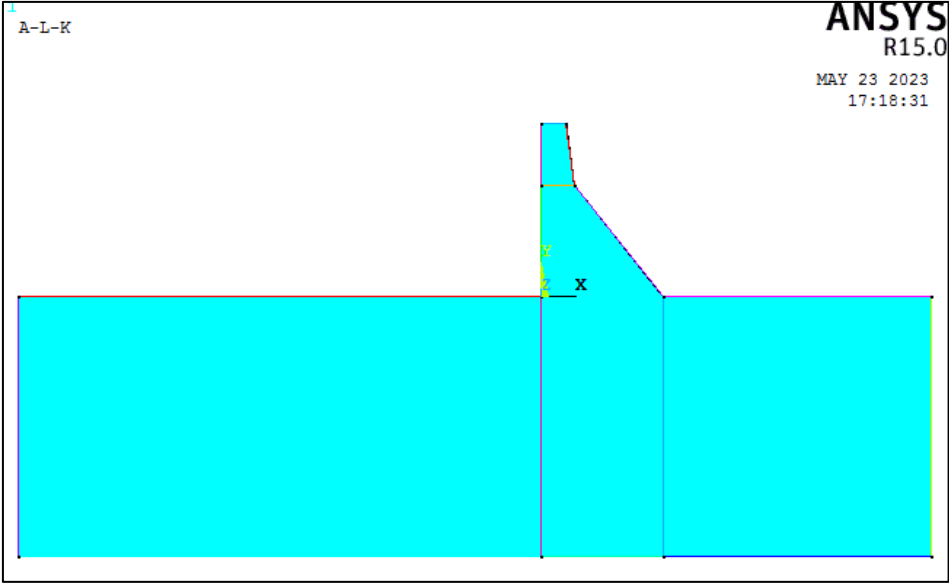


Figure IV.9. Section du barrage-fondation de Koyna sur ANSYS

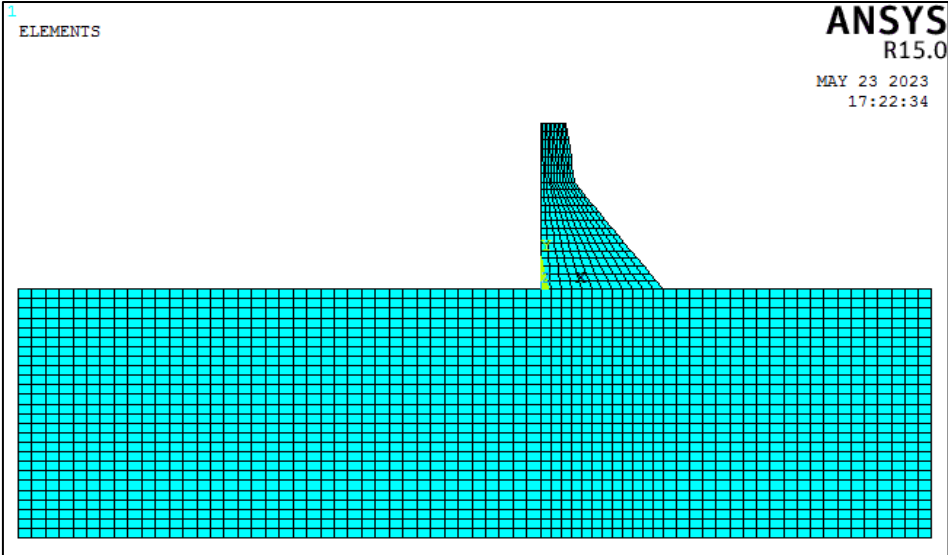


Figure IV.10. Maillage du barrage-fondation de Koyna

❖ Système Barrage-fondation-réservoir :

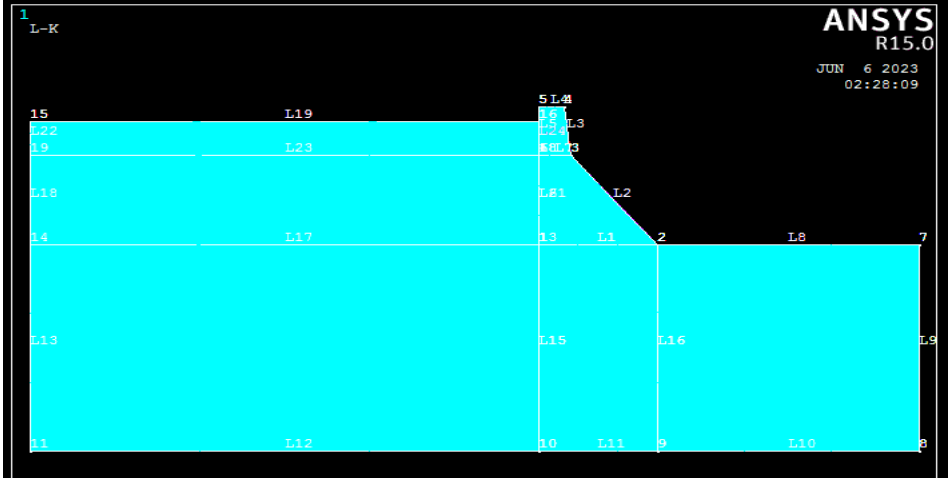


Figure IV.11. Section du barrage-fondation-réservoir de Koyna sur Ansys

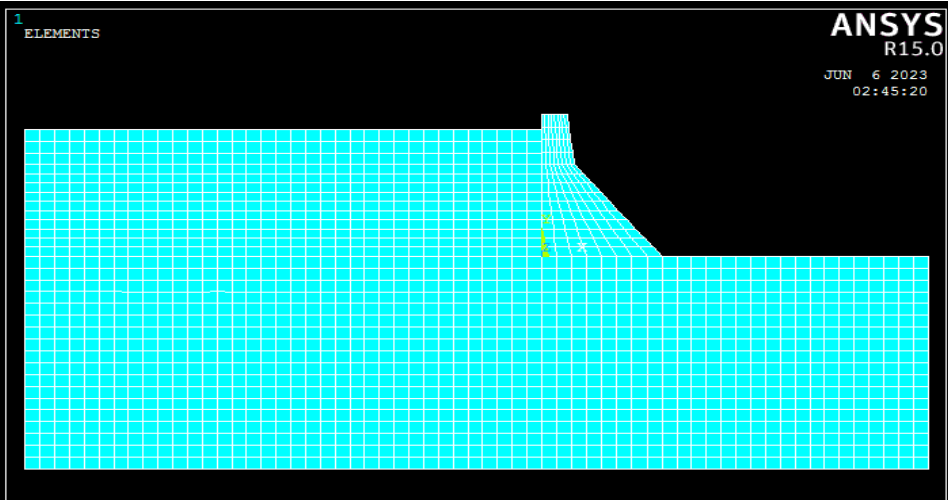


Figure IV.12. Maillage du barrage-fondation-réservoir de Koyna

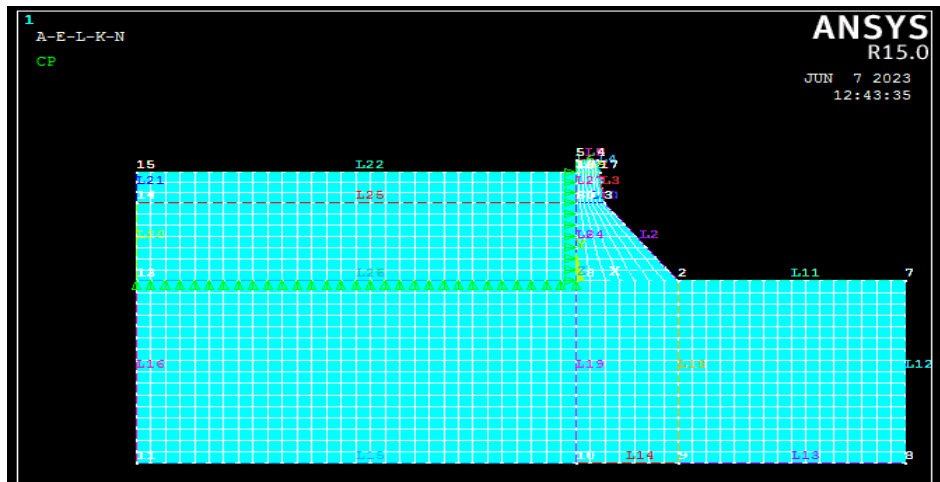


Figure IV.13. Couplage du barrage-fondation-réservoir de Koyna

IV.6.2 Choix du type et des options d'analyse :

Cette étape consiste à définir le type d'analyse et l'option d'analyse.

- Dans notre cas, le type d'analyse est l'analyse modale
- Dans l'option d'analyse, il s'agira de Méthodes d'extraction modale

Dans ANSYS, plusieurs méthodes d'extraction modale sont disponibles :

- Block Lanczos
- Méthode des sous-espaces
- PowerDynamics
- Réduite
- Non symétrique

Dans notre travail nous avons utilisé la méthode : Block Lanczos.

✚ Méthode Block Lanczos :

La méthode Block Lanczos est recommandée pour la plupart des applications.

- Cette méthode est puissante et efficace pour extraire un grand nombre de modes dans le cas de modèles de taille moyenne à des modèles de taille plus grande
- Elle est généralement utilisée pour les modèles solides et/ou coques.
- **Elle est efficace de la même manière avec ou sans point de décalage initial (ce qui permet d'extraire des modes au-dessus d'une fréquence donnée).**
- **Elle permet de gérer correctement les modes de corps rigide.**
- **Les besoins en mémoire sont élevés.**

Après création du modèle de notre système barrage-fondation-réservoir sur le logiciel Ansys, nous avons utilisé la méthode Block Lanczos pour extraire les fréquences.

Chapitre IV : Application numérique

✚ Les valeurs des fréquences propres des systèmes par le code ANSYS :

✓ Système barrage seul :

Available Data Sets:				
Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	3.0399	1	1	1
2	8.1084	1	2	2
3	10.865	1	3	3
4	16.067	1	4	4
5	24.177	1	5	5
6	24.807	1	6	6
7	34.535	1	7	7
8	35.929	1	8	8
9	38.802	1	9	9
10	42.125	1	10	10

Figure IV.14. Valeurs de fréquences du barrage seul

✓ Système barrage-fondation :

Available Data Sets:				
Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	2.2694	1	1	1
2	3.4396	1	2	2
3	3.7729	1	3	3
4	4.4743	1	4	4
5	4.9778	1	5	5
6	5.4569	1	6	6
7	5.9596	1	7	7
8	6.5105	1	8	8
9	7.2979	1	9	9
10	7.7023	1	10	10

Figure IV.15. Valeurs de fréquences du barrage-fondation

✓ Système barrage-fondation-réservoir :

Available Data Sets:				
Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	1.9472	1	1	1
2	3.0385	1	2	2
3	3.0680	1	3	3
4	3.3527	1	4	4
5	3.6538	1	5	5
6	4.1721	1	6	6
7	4.1888	1	7	7
8	4.5432	1	8	8
9	5.0293	1	9	9
10	5.4375	1	10	10

Figure IV.16. Valeurs de fréquences du barrage-fondation-réservoir

IV.6.3 Application des conditions limites et résolutions :

Nous avons appliqué² 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 : $T=1/f$

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

Avec :

– T : la période en seconde

– f : la fréquence en hertz

Chapitre IV : Application numérique

– w : la pulsation

– $\pi = 3,14$

✓ **Système barrage seul :**

Mode	fréquence (f)	Période(T)	Pulsation propres (w)
1	3,0399	0,328958189	19,090572
2	8,1084	0,123328893	50,920752
3	10,865	0,092038656	68,2322
4	16,067	0,062239373	100,90076
5	24,177	0,041361625	151,83156
6	24,807	0,040311202	155,78796
7	34,535	0,028956131	216,8798
8	35,929	0,02783267	225,63412
9	38,802	0,025771867	243,67656
10	42,125	0,023738872	264,545

Tableau IV.2. Valeurs de fréquences, périodes et pulsations propres du barrage seul de Koyna

✓ **Système barrage-fondation :**

Mode	fréquence (f)	Période (T)	Pulsation propres (w)
1	2,2694	0,440645104	14,251832
2	3,4396	0,29073148	21,600688
3	3,7729	0,265048106	23,693812
4	4,4743	0,223498648	28,098604
5	4,9778	0,20089196	31,260584
6	5,4569	0,183254229	34,269332
7	5,9596	0,167796496	37,426288
8	6,5105	0,153598034	40,88594
9	7,2979	0,13702572	45,830812
10	7,7023	0,129831349	48,370444

Tableau IV.3. Valeurs de fréquences, périodes et pulsations propres du barrage (koyna) fondation

Chapitre IV : Application numérique

✓ Système barrage-fondation-réservoir :

Mode	fréquence (f)	Période(T)	Pulsation propres (W)
1	1,9472	0,513557929	12,228416
2	3,0385	0,329109758	19,08178
3	3,068	0,325945241	19,26704
4	3,3527	0,298267068	21,054956
5	3,6538	0,273687668	22,945864
6	4,1721	0,239687448	26,200788
7	4,1888	0,238731856	26,305664
8	4,5432	0,220109174	28,531296
9	5,0293	0,198834828	31,584004
10	5,4375	0,183908046	34,1475

Tableau IV.4. Valeurs de fréquences, périodes et pulsations propres du barrage-fondation-réservoir

IV.6.4. Interprétation des résultats :

Le tableau suivant donne une comparaison entre les valeurs des fréquences du trois systèmes calculés par la méthode d'éléments fini par le code l'ansyse.

<i>Les modes</i>	<i>Les systèmes</i>	Système barrage-seul	Système barrage-fondation	Système barrage-fondation-réservoir
Mode 1		3,0399	2,2694	1,9472
Mode 2		8,1084	3,4396	3,0385
Mode 3		10,865	3,7729	3,068
Mode 4		16,067	4,4743	3,3527
Mode 5		24,177	4,9778	3,6538
Mode 6		24,807	5,4569	4,1721
Mode 7		34,535	5,9596	4,1888
Mode 8		35,929	6,5105	4,5432
Mode 9		38,802	7,2979	5,0293
Mode 10		42,125	7,7023	5,4375

Tableau IV.5. Les fréquences du trois systèmes

Chapitre IV : Application numérique

➤ Remarque :

Dans ce tableau on remarque que les valeurs des fréquences diminuées de système ont un autre.

- ✓ Les fréquences sont élevées dans le barrage seul (sans interaction), parce que le barrage est placé sur une base rigide.
- ✓ Les fréquences diminuent lorsqu'il est appliqué l'interaction sol-structure par rapport au premier système
- ✓ Les fréquences diminuent lorsqu'il est appliqué l'interaction sol-fluide -structure par rapport au deuxième système

✚ La courbe :

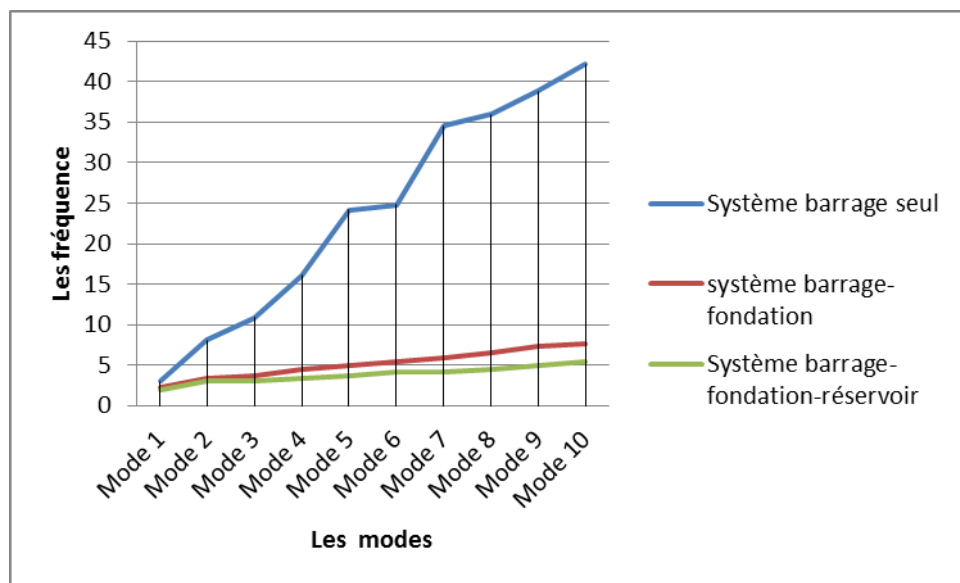


Figure IV.17. La courbe de fréquences des trois systèmes du barrage

Remarque

D'après les résultats présentés dans le tableau et qui réalisée dans les courbes il est clair les fréquences variant d'un système à un autre au cours de présence et l'absence de l'interaction car l'interaction des systèmes diminué les fréquences propres de système cela signifier une augmentation de la réponse dynamique des systèmes.

Chapitre IV : Application numérique

➤ Modes propres :

Déformation des modes fondamentales de système barrage seul :

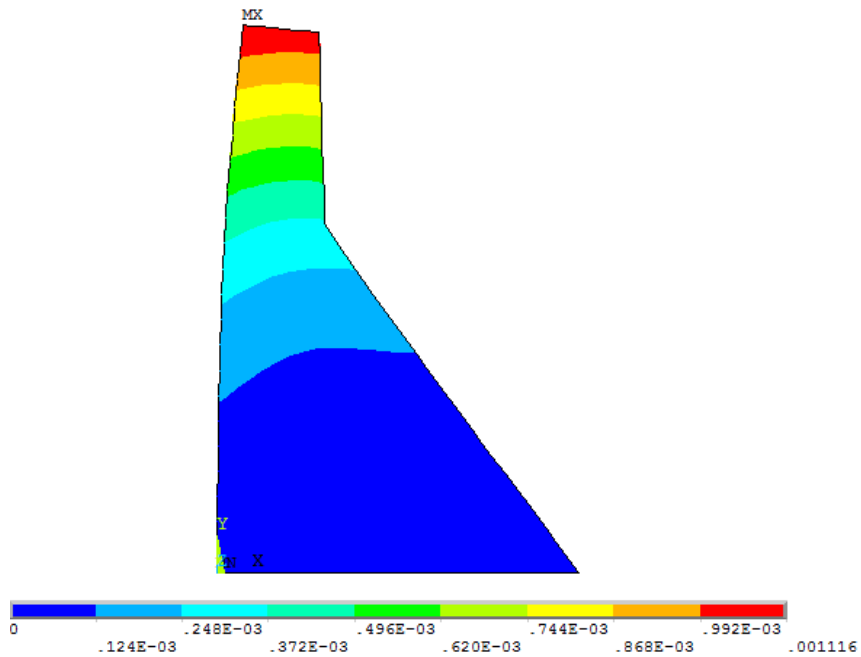


Figure IV.18. Déformation 1 du barrage seul

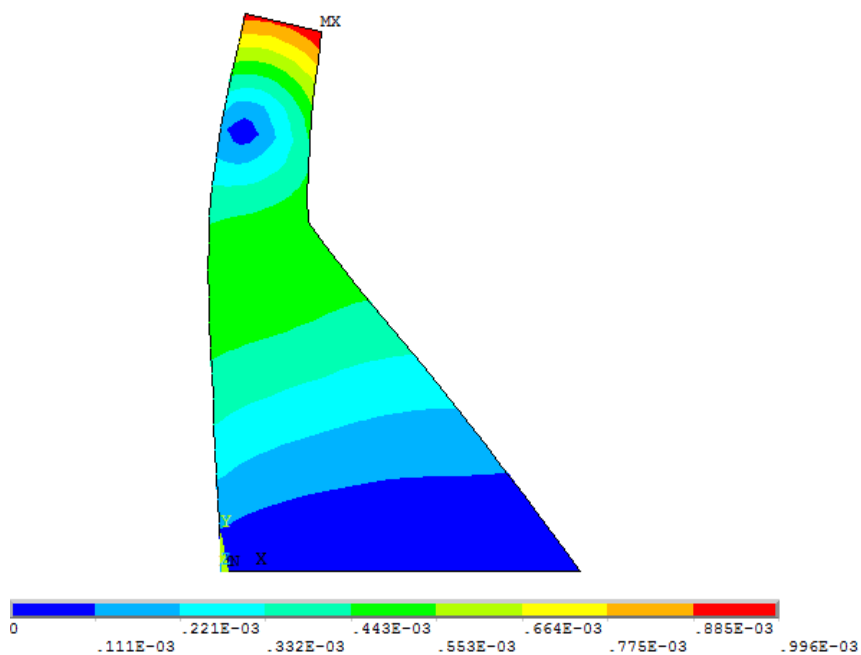


Figure IV.19. Déformation 2 du barrage seul

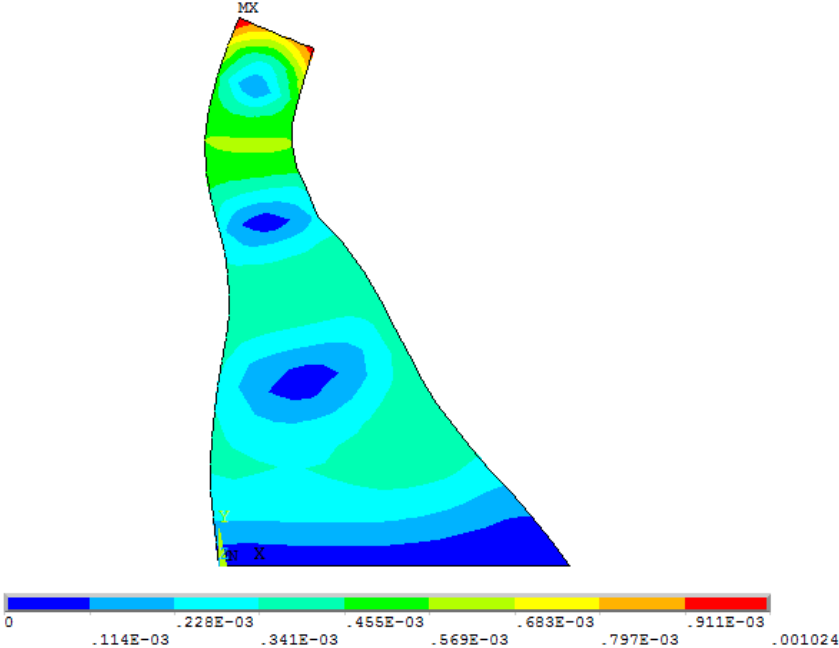


Figure IV.20. Déformation 3 du barrage seul

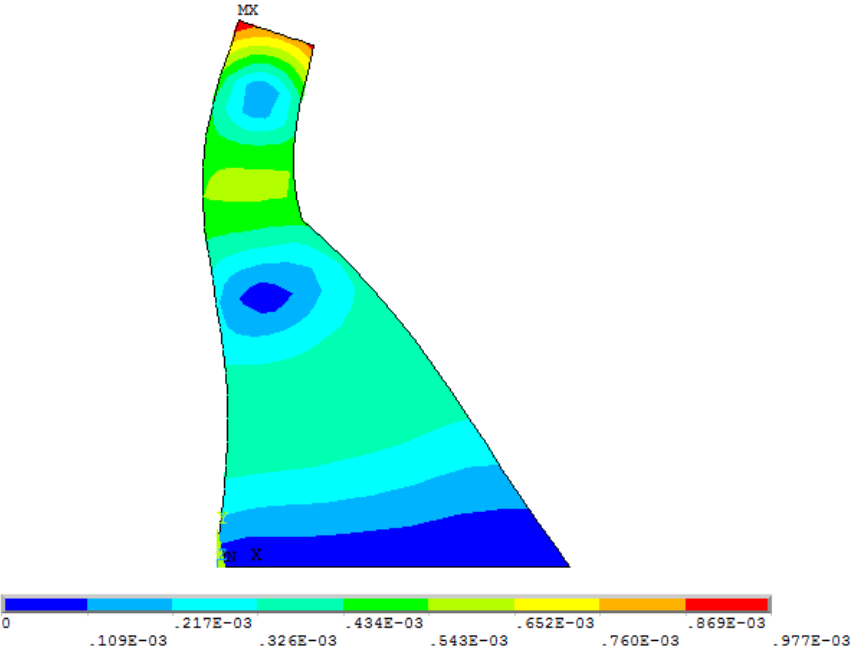


Figure IV.21. Déformation 4 du barrage seul

Déformation des modes fondamentales de système barrage-fondation :

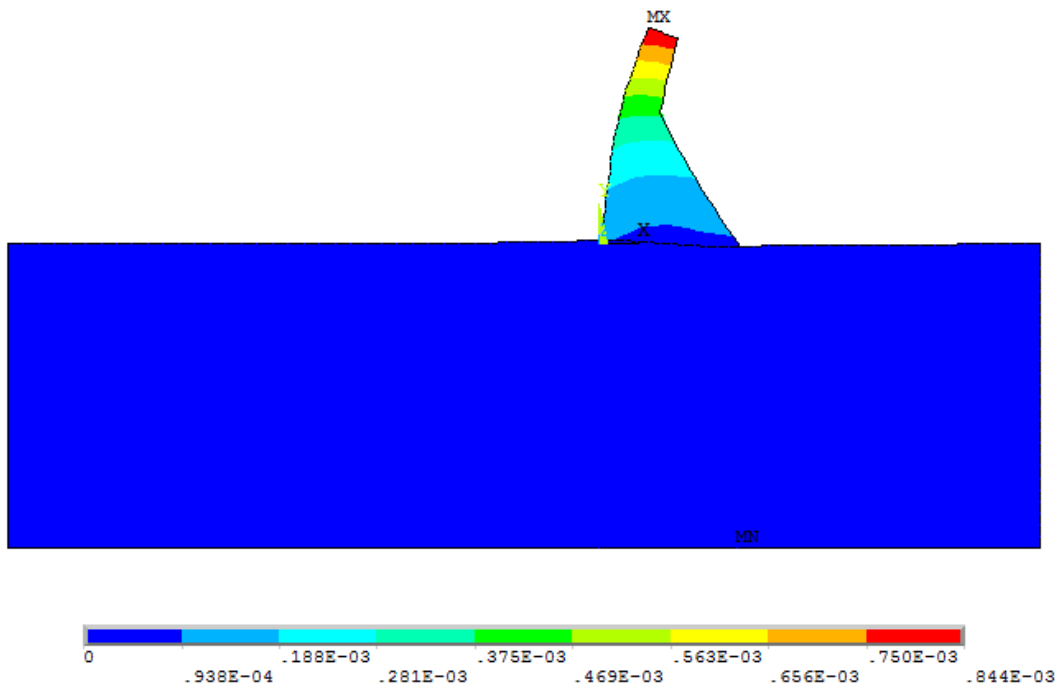


Figure IV.22. Déformation 1 du barrage-fondation

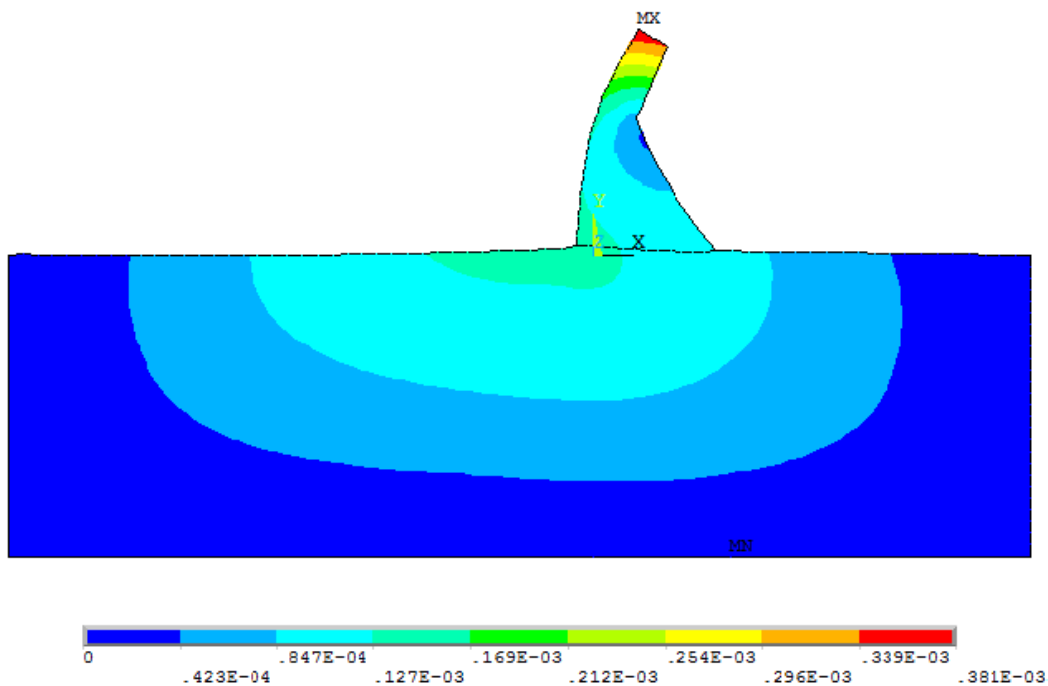


Figure IV.23. Déformation 2 du barrage-fondation

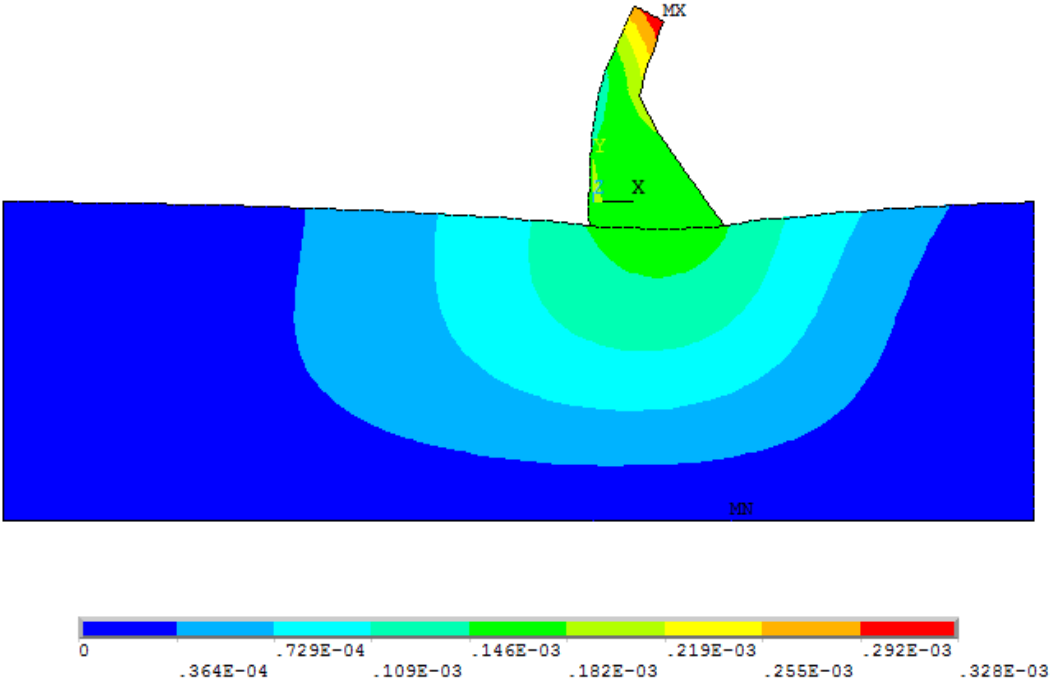


Figure IV.24. Déformation 3 du barrage-fondation

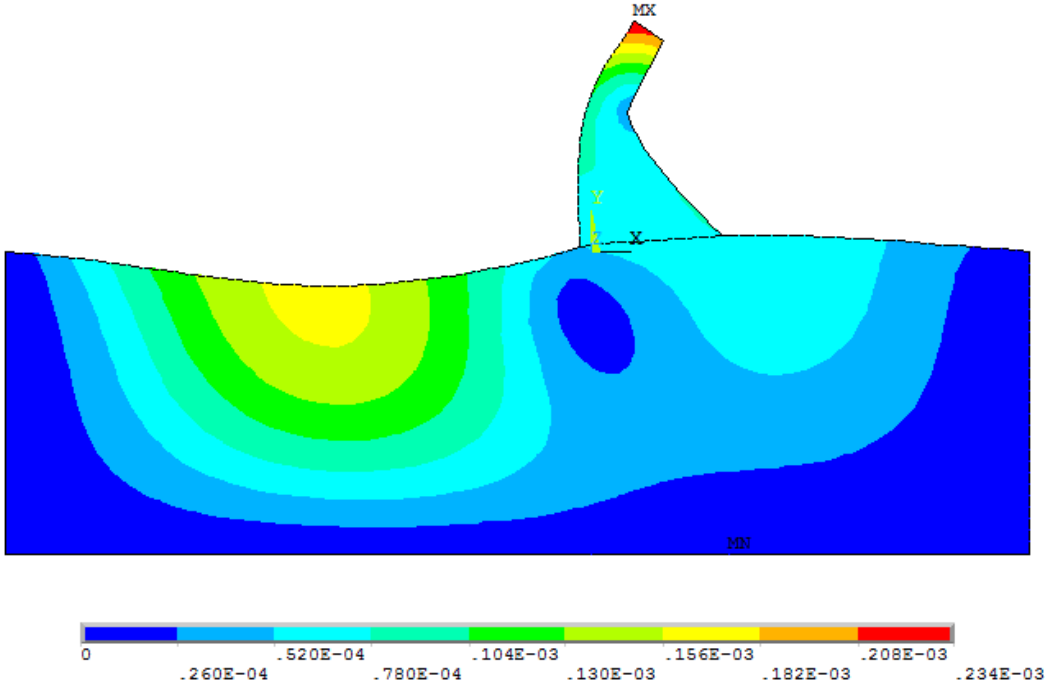


Figure IV.25. Déformation 4 du barrage-fondation

Déformation des modes fondamentales de système barrage-fondation-réservoir :

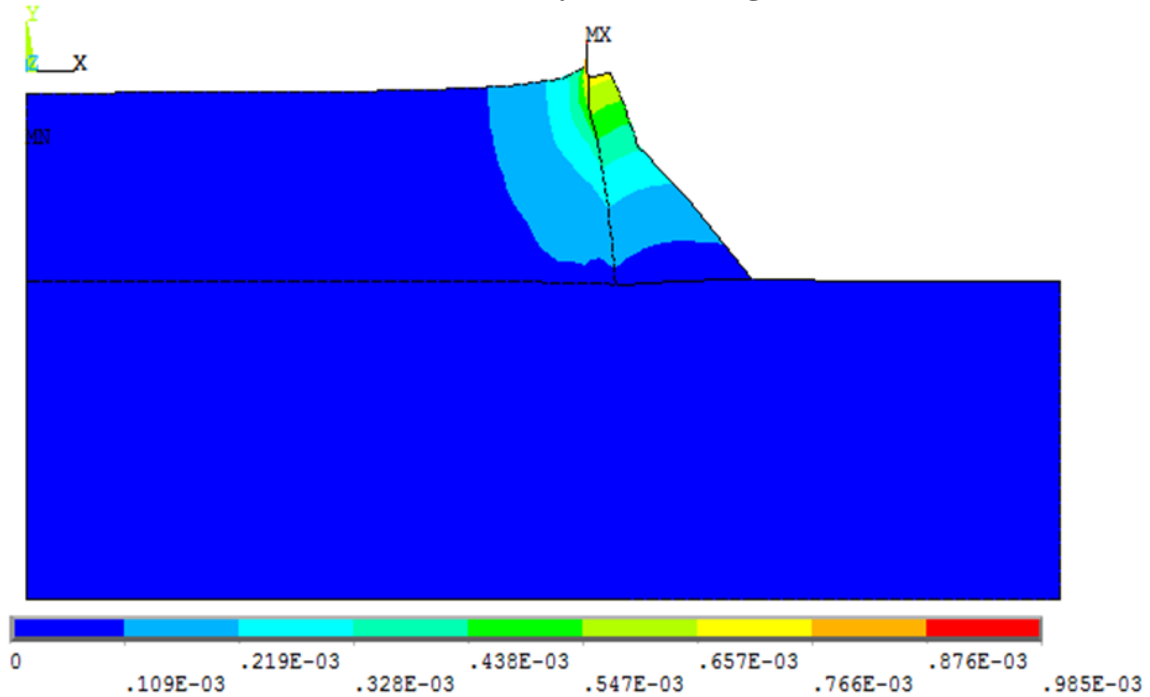


Figure IV.26. Déformation 1 du barrage-fondation-réservoir

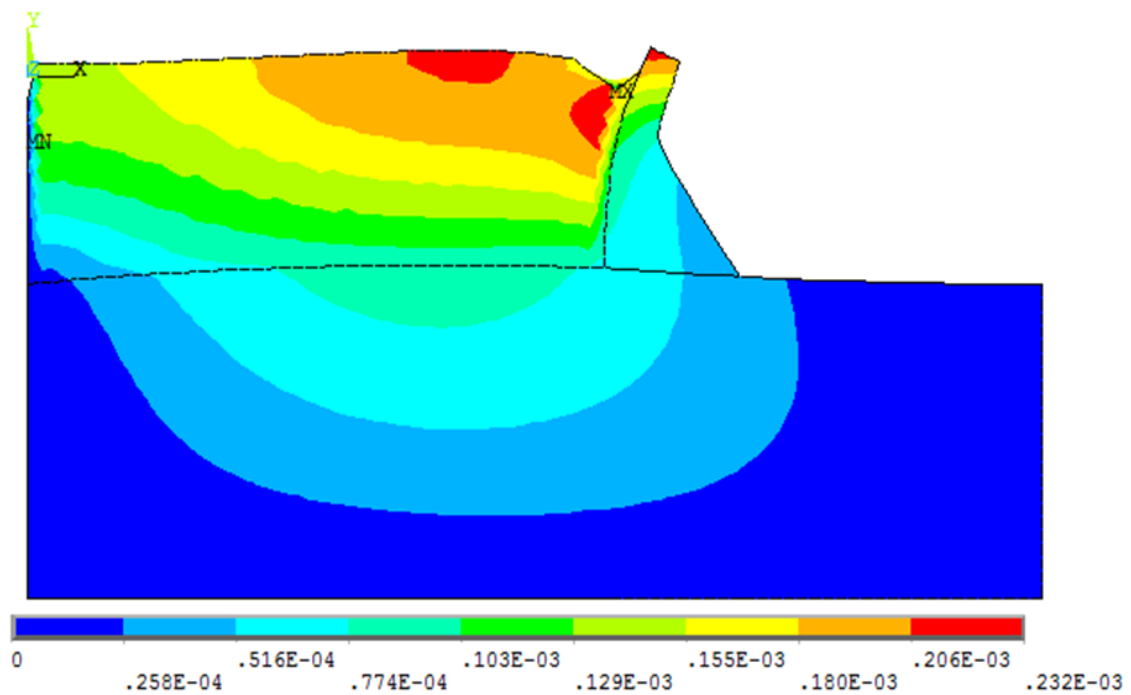


Figure IV.27. Déformation 2 du barrage-fondation-réservoir

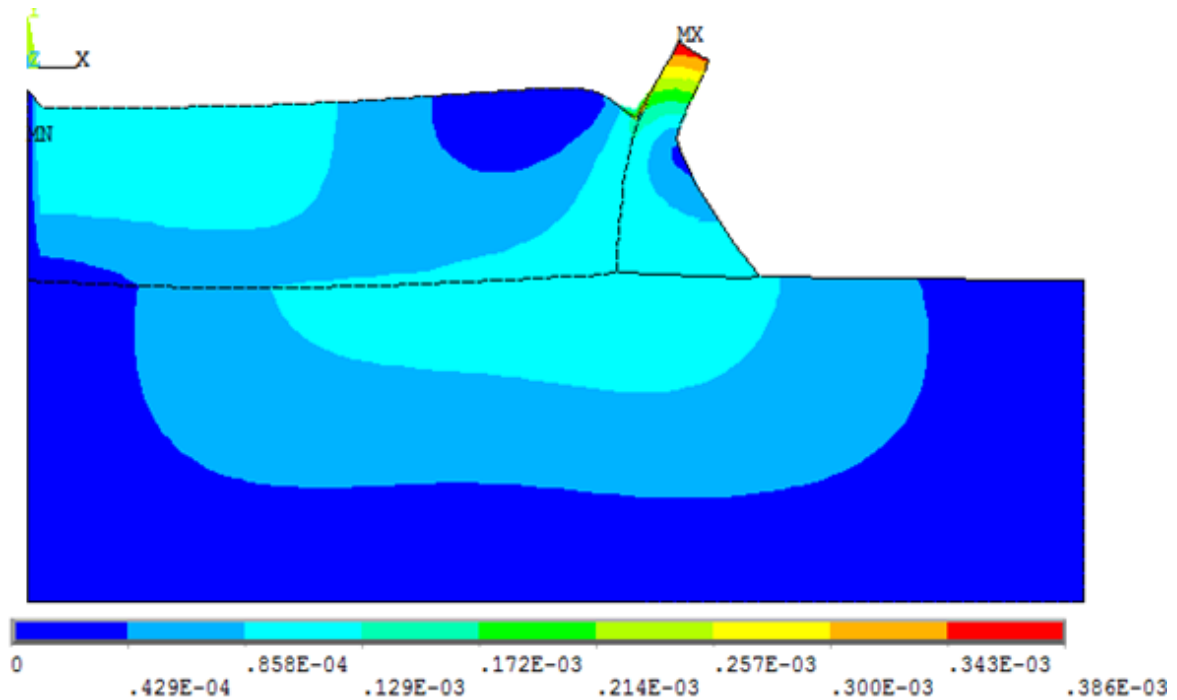


Figure IV.28. Déformation 3 du barrage-fondation-réservoir

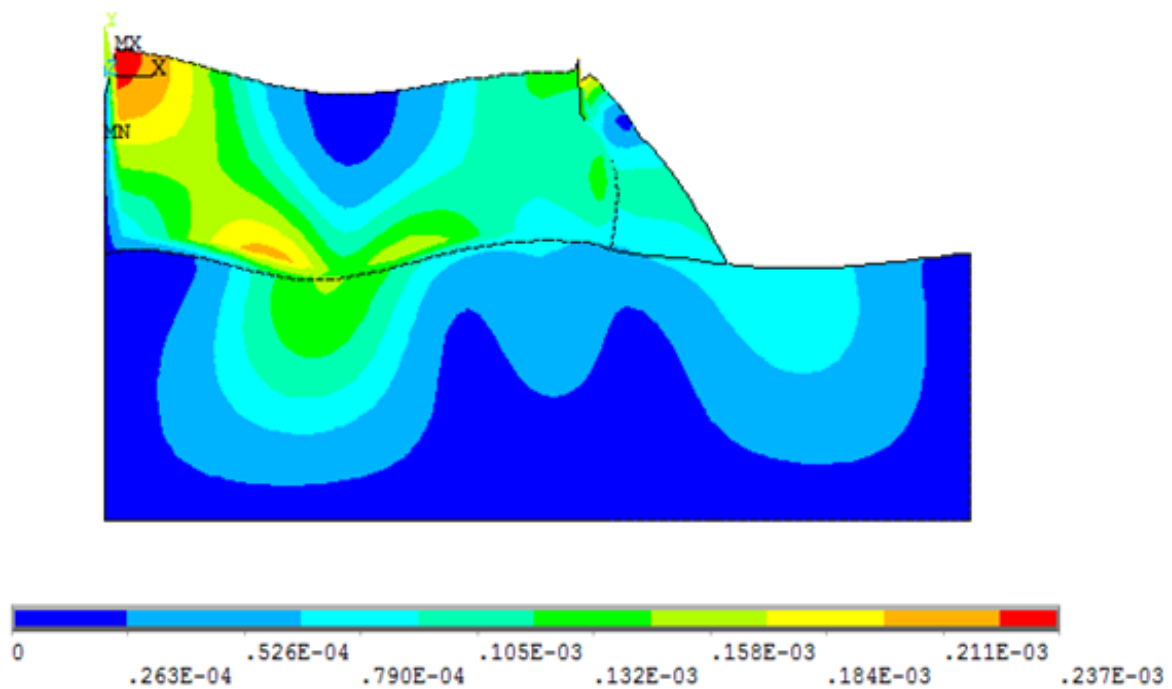


Figure IV.29. Déformation 4 du barrage-fondation-réservoir

IV.7 Conclusion :

Le chapitre étudie le comportement modal du système barrage -réservoir -fondation en utilisant le logiciel ANSYS. Une simulation sur le logiciel ANSYS est alors entreprise. Une analyse modale est alors effectuée à partir de laquelle on calcule les fréquences propres et les modes propres des différentes configurations :

Chapitre IV : Application numérique

- BARRAGE SEULE SANS INTERACTION
- Barrage fondation avec interaction sol structure
- Barrage réservoir fondation avec interaction sol fluide structure

Les résultats sont comparés avec les fréquences trouvées par les trois systèmes et on a constaté une diminution assez conséquente des fréquences propres. Et ça signifie la relation directe de l'interaction et la réponse dynamique

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail présente l'effet du phénomène d'interaction sol-fluide structure, sur le comportement d'un barrage-fondation –réservoir, a été réalisée en utilisant un modèle d'élément finis afin d'évaluer la sécurité de l'ouvrage.

L'étude du comportement dynamique des ouvrages a de tout temps été une préoccupation majeure des ingénieurs par le fait de la sensibilité du sujet. La réponse d'un barrage-fondation –réservoir aux sollicitations dynamique compte tenu des interactions sol-fluide structure qui a fait l'objet par le passé de différentes études continue de susciter l'intérêt des chercheurs.

Le présent travail a porté justement sur une étude numérique de l'analyse modale d'un barrage-fondation-réservoir, basé sur la méthode des éléments finis.

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, pulsations propres...).

Nous avons fait l'étude 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-fondation –réservoir.

Liste des références

Liste des références

Liste des références

- ❖ Schleiss, Anton J., and Henri Pougatsch. Les barrages: du projet à la mise en service.
- ❖ Vol. 17. PPUR Presses polytechniques, 2011.
- ❖ Barrage De Chatou. | Fotocommunity, <https://www.fotocommunity.fr/photo/barragede-chatou-ray-veri/36577703>
- ❖ Bendimerad, A. Z. —Comportement des Barrages en BCV et en BCR Étude Comparative. | université abou bekr belkaid, Tlemcen, 2011.
- ❖ MOULAY ELBOUDKHILI, Abdelhakim. —Etude Parametree de La Stabilité des Barrages Poids. | Université Abou Bekr Belkaid, 2014.
- ❖ . Futura. —Le Barrage Pine Flat Et Son Lac, L'un Des plus Grands Réservoirs De Californie. | Futura, 12 Nov. 2019, <https://www.futurasciences.com/planete/photos/geologie-plus-grands-barrages-monde-19-photos1401/geologie-barrage-pine-flat-son-lac-plus-grands-reservoirs-californie-10144/>.
- ❖ Barrages Hydrauliques. | Echosciences, <https://www.echosciencespaca.fr/articles/barrages-hydrauliques>.
- ❖ Le Delliou, Patrick. Les barrages: conception et maintenance. Presses Universitaires
- ❖ Lyon, 2003.
- ❖ Comité Français des Barrages et Réservoirs. —Technologie Des Barrages. | Accueil, <https://www.barrages-cfbr.eu/Barrages-a-contreforts.html>.
- ❖ SAIDANI, Bilal. —contribution a l'étude de l'effet des sous-pressions et de la pousse des sediments sous la sollicitation sismique dans un barrage poids. | ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-, 2014.
- ❖ Thual, Olivier. Hydraulique pour l'ingénieur généraliste. Éditions Cépaduès, 2018.
- ❖ Abdullah, Qusailah, and Nekbil Souhaib. —Effet Du Contact De Frottement à l'Interface Barrage-Fondation Sur Le Comportement Sismique Des Barrages-Poids En Béton (Étude De Cas : Barrage De Oued Fodda). | UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.
- ❖ Pecker, A. Dynamique des sols. Presses Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1984.
- ❖ Idriss, J.M. and Kennedy, R.P (1980). Analysis for soil-structure interaction effects for Nuclear Power Plants-Report by the Ad Hoc Group soil structure interaction of the committee on Nuclear Structures and Materials of the structural division of ASCE.
- ❖ Messaad, Mokhtar, et al. "Three-dimensional seismic analysis of concrete gravity dams considering foundation flexibility." Mechanics and Mechanical Engineering 25.1 (2021): 88-98.
- ❖ (Nedjai, A. (2018). L'influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments (cas des bâtiments portiques en béton armée) (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).)
- ❖ Wilson, E.L. Three-dimensional static and dynamic analysis of structures. A physical approach with emphasis on earthquake engineering, 3rd Ed (Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA), 2002.

Liste des références

- ❖ Pecker, A. Dynamique des ouvrages, dynamique des structures. Polycopie des cours, ENPC, website : <http://www.enpc.fr/fr/formations/école.vite/cours/pecker>, 2004.
- ❖ 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.
- ❖ 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.
- ❖ Lysmer, J., Raissi, M., Tajirian, F., Vahdani, S. and Ostadan, F. SASSI: A system for analysis of soil-structure interaction. Geotechnical report N°. 81-02, University of California, Berkeley, 1981.
- ❖ Gupta, S., Lin, T.W., Penzien, J. and Yen, C.S. Hybrid modeling of soil-structure interaction. Earthquake Engineering Research Center report 80-9, University of California, Berkeley, 1980.
- ❖ Chopra, A. K. and Gutierrez, J.A. Earthquake analysis of multistory buildings including foundation interaction. Earthquake Engineering Research Center report 73-13, niversity of California, Berkeley, 1973.
- ❖ Westergaard, Harold Malcolm. "Water pressures on dams during earthquakes." Transactions of the American Society of Civil Engineers 98.2 (1933): 418-433. 60. Feltrin, Glauco. Absorbing boundaries for the time-domain analysis of dam-reservoirfoundation systems. Vol. 232. ETH Zurich, 1997.
- ❖ LOUNIS, Guechari. Réponse sismique des tours de prise d'eau. Diss. Université de Béjaia-Abderrahmane Mira, 2010.
- ❖ Aouadj, Linda. COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN BARRAGE EN BETON INTERACTION SOL-FLUIDE-STRUCTURE. Diss. Université de Batna 2, 2009.
- ❖ SEGHIR, Tarek. Modelisation du comportement dynamique du barrage En terre sous charges sismiques. Diss. Université de Batna 1-Hadj Lakhder, 2014. 67. Zienkiewicz, O. C. and Newton, R. E. Coupled vibrations of a structure submerged in a compressible fluid. In Int. Sym. Finite Element Techniques, 1st -15th May 1969.
- ❖ Fenves, G. and Chopra, A. K. Reservoir bottom absorption effects in earthquake response of concrete gravity dams. Journal of Sound and Vibration, 111(3) : 545-562, 1985.
- ❖ Gogoi, I. and Maity, D. Influence of sediment layers on dynamic behavior of aged concrete dams. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 133(4) : 400-413, 2007.
- ❖ Zienkiewicz, O.C., Kelly, D.W. and Bettess, P. The Sommerfeld (radiation) condition on infinite domains and its modelling in numerical procedures. In Computing Methods in Applied Sciences and Engineering I, pages 169-203. Springer Berlin / Heidelberg, Palo Alto, CA, 1971.
- ❖ ANSYS. Theory user's manual. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA, USA (2009).

Liste des références

- ❖ Ouzandja, D. (2017). three-dimensional nonlinear seismic response of OUED FODDA concrete gravity dam considering contact elements at dam-reservoir interaction interface.
- ❖ ANSYS Contact Technology Guide, ANSYS Release 17.1. Documentation, ANSYS, Inc. Simo, J.C. Wriggers P. Taylor R. L. (1985) “A perturbed lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems”. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.50, pp.163-180.
- ❖ OUZANDJA, D., & MESSAAD, M. effect of dynamic fluid-structure interaction phenomenon on earthquake response of concrete gravity dams-case study: OUED FODDA dam effet du phénomène d'interaction dynamique fluide-structure sur la réponse sismique des barrages-poids en béton-étude de.
- ❖ Analyse dynamique des systèmes barrage-réservoir avec couplage éléments finis-éléments infinis Abdelghani Seghir* — Abdelkader Tahakourt
- ❖ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage>
- ❖ Wolf JP. Dynamic soil–structure interaction. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall;