



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil & Travaux Publics

Projet de fin d'étude pour obtenir le diplôme de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Thème :

Étude du phénomène d'interaction sol structure

Soutenu le : 23/06/2025

Réalisé par :

- GHOMARI NOUR EL HOUDA.

Devant le jury compose de :

- | | | |
|------------------------|----------------------|------------|
| • Mme ATTIA Amina | UBB (Ain Temouchent) | Président. |
| • Mme MOUSSI Ouahiba | UBB (Ain Temouchent) | Encadreur. |
| • Mme ABDELBARI Salima | UBB (Ain Temouchent) | Examineur. |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ

الرَّحِيمِ

Remerciements

*« JE REMERCIE EN PREMIER DIEU POUR TOUT. »
JE REMERCIE EN SECOND MES PARENTS, QUI ONT
SACRIFIÉS LEUR VIE POUR NOTRE BIEN. EN FIN,
MES SINCÈRES RECONNAISSANCES ET
GRATITUDES À TOUS MES ENSEIGNANTS, ET EN
PARTICULIER LA DIRECTRICE DE CE MÉMOIRE
DR. MOUSSI OUAHIBA,
POUR SES NOMBREUX CONSEILS, ET SA
DISPONIBILITÉ.
JE REMERCIE ÉGALEMENT LE PRÉSIDENT ET
LES MEMBRES DE JURY D'AVOIR ACCEPTÉ
D'EXAMINER MON TRAVAIL.*

Dédicace

*JE DÉDIE À MES CHERS PARENTS, POUR TOUS LEURS
SACRIFICES, LEUR AMOUR, LEUR SOUTIEN ET LEURS
PRIÈRES TOUT AU LONG DE MES ÉTUDES,*

*À MES CHÈRES SŒURS SOUNDOS, ZINEB ET HAKIMA.
À MES CHERS FRÈRES, SAIDOU, ALI, ZAKI ET IBRAHIM.
À MES CHÈRES PETITES RITADJ, RITTALE, MOHAMED ET
HOUARIA,*

À TOUS MES AMIES NADIA, MERIEM.

À TOUTE MA FAMILLE.

À GOUASMA SOUFIAN ELANNABI

À MON PROFESSEUR KADOUR HAKIM

À PROFESSEUR CHRIET RAHMONA.

*QUE CE TRAVAIL SOIT L'ACCOMPLISSEMENT DE VOS VŒUX
TANT ALLÉGUÉS, ET LE FUT DE VOTRE SOUTIEN
INFAILLIBLE.*

*À DIRECTRICE DE CE MÉMOIRE DR. MOUSSI OUAHIBA :
MERCİ D'ÊTRE TOUJOURS LÀ POUR MOI.*

GHOMARI NOUR EL HOUDA

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse du comportement dynamique du **barrage voûte d'Oued Taht**, situé dans la wilaya de Mascara, où une modélisation numérique a été réalisée à l'aide de la méthode des **éléments finis** via le logiciel **ANSYS** pour analyser l'effet de **l'interaction sol-structure**. Deux hypothèses ont été considérées : la première suppose une base rigide (c.à.d. sans prise en compte de l'interaction sol-structure), tandis que la seconde prend en compte la flexibilité du sol (c.à.d. prendre en compte les effets de l'ISS). Des **analyses modales et transitoires** ont été menées pour évaluer la **réponse dynamique** sous chargements sismiques. Les résultats ont mis en évidence l'importance de considérer la flexibilité du sol pour une estimation plus précise du comportement dynamique et pour garantir la sécurité des barrages voûtes.

***Mots-clés** : interaction sol-structure, barrage voûte, éléments finis, réponse sismique, analyse modales et transitoires, Ansys.*

Abstract

The objectif of this work is to analyze the dynamic behavior of Oued Taht concrete arch dam located in Mascara where a numerical modeling was carried out using the finite element method through **ANSYS** software to analyze the effect of **soil-structure interaction**. Two hypotheses were considered: the first assumes a rigid base, while the second accounts for soil flexibility. **Modal and transient analyses** were performed to evaluate the **dynamic response** under seismic loads. The results highlighted the importance of incorporating soil structure interaction to achieve a more accurate estimation of the dynamic behaviour and to ensure the safety of arch dams.

Keywords: *soil-structure interaction, arch dam, finite element method, seismic response, modal and transient analyses, Ansys.*

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تحليل السلوك الديناميكي لسد وادي تحت القوسي الموجود بولاية معسكر، حيث تم إجراء نمذجة عددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة عبر برنامج لتحليل تأثير التفاعل بين التربة والسد ANSYS تم اعتماد فرضيتين لنمذجة تفاعل التربة الأول يفترض وجود قاعدة صلبة يعني إهمال التفاعلات بين المنشأ والتربة، والثاني يأخذ في الحسبان مرونة التربة. أجريت تحليلات للسلوك المشروط والإنتقالي لتقييم الاستجابة الديناميكية تحت تأثير الإحمال الزلزالية. وقد أظهرت النتائج أهمية إحتساب مرونة التربة من أجل تقدير أدق للسلوك الديناميكي وضمان سلامة السدود القوسية.

الكلمات المفتاحية: التفاعل تربة، بنية سد قوسي، العناصر المحدودة، تحليل السلوك المشروط وإنتقالي، الإستجابة الزلزالية، انسيس.

Tables des matières

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract.....	IV
ملخص	V
Tables des matières	VI
Tables des figures	VIII
Tables des tableaux.....	IX
Introduction Général	02
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'INTERACTION SOL-STRUCTURE	
1.1. Introduction.....	04
1.2. Définition de l'interaction sol-structure	04
1.3. Historique et évolution des études sur l'interaction sol-structure	04
1.4. Les composantes de l'interaction sol-structure	05
1.4.1. Interaction cinématique	05
1.4.2. Interaction inertielle.....	06
1.5. Méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure	07
1.5.1. Méthode globale	08
1.5.2. Méthode De Sous–Structures	09
1.5.3. Méthodes hybrides.....	10
1.6. Tableau comparatif des méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure.....	11
1.7. Conclusion	12
CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES BARRAGES	
1. Introduction.....	14
2. Historique des barrages.....	14
2.1. Quelques exemples de grands barrages dans le monde.....	15
2.2. Quelques exemples de grands barrages dans l'Algérie	15
3. Définition d'un barrage.....	16
3.1. But des barrages	17
3.2. Classification des barrages	17
3.2.1. Selon le matériau de construction.....	17
3.2.2. Selon la structure de l'ouvrage	18
3.2.3. Selon la finalité de l'ouvrage.....	18
3.2.4. Selon la hauteur	19
4. Types de barrages	19
4.1. Barrage poids en béton	19
4.1.1. Définition.....	19
4.1.2. Principe de fonctionnement	20
4.1.3. Conditions d'implantation	20
4.1.4. Types de barrages poids	20
4.2. Barrage voûte.....	22
4.2.1. Définition.....	22
4.2.2. Principe de fonctionnement	22
4.2.3. Conditions d'implantation	22
4.2.4. Types de barrages voûtes.....	22
4.3. Barrage à contreforts.....	24

4.3.1. Définition.....	24
4.3.2. Principe de fonctionnement.....	24
4.3.3. Conditions d’implantation.....	25
4.3.4. Types de barrages à contreforts.....	25
4.4. Barrage en remblai.....	27
4.4.1. Définition.....	27
4.4.2. Principe de fonctionnement.....	27
4.4.3. Conditions d’implantation.....	27
4.4.4. Types de barrages en remblai.....	27
4.5. Barrage mixte.....	27
4.5.1. Définition.....	29
5. Comportement sismique des barrages.....	29
5.1. Cas des barrages en remblai.....	32
5.2. Cas des barrages rigides (béton, voûte).....	32
5.3. Normes et recommandations.....	32
6. Conclusion.....	33

CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU CAS D’ETUDE LE BARRAGE VOÛTE « OUED TAHT »

3.1. Introduction.....	35
3.2. Localisation.....	35
3.2.1. Présentation de la zone d’étude.....	36
3.2.1.1. Caractéristiques générales du barrage Oued TAHT.....	36
3.2.1.2. Les travaux de réalisation du barrage d’Oued Taht.....	37
3.2.1.3. Destination de l’ouvrage.....	37
3.3. Caractéristique du projet.....	37
3.3.1. Caractéristique de sol fondation.....	7
3.3.2. Caractéristique du corps de barrage.....	37
3.3.3. Capacités hydraulique.....	38
3.3.4. Vidange de fond.....	38
3.3.5. Evacuateur de crue.....	38
3.3.6. Les travaux.....	38
3.3.7. Consistance des travaux.....	39
3.4. Conclusion.....	41

CHAPITRE 4 : MODELISATION DE L’INTERACTION SOL STRUCTURE

4.1 Introduction.....	43
4.2 Modèle élément finis du barrage.....	43
4.3 Etude du comportement modale du barrage (analyse modale).....	45
4.4. Etude du comportement transitoire du barrage (analyse transitoire).....	49
4.4.1. Signal sismique (EL CENTRO).....	49
4.4.2. Barrage avec sol de fondation.....	50
4.4.3. Barrage à base encastrée.....	54
4.5. Conclusion.....	60
Conclusion Générale.....	62
Référence et Bibliographie.....	64

Tables des figures

Fig.1.1. Illustration schématique de l'interaction cinématique et interaction inertielle	07
Fig.1.2. Illustration schématique d'une analyse directe de l'interaction sol-structure en utilisant la modélisation par éléments finis	09
Fig.1.3. Illustration schématique de l'approche par sous-structures pour l'analyse de l'interaction sol-structure	10
Fig.2.1. Exemple des Barrages en Algérie	16
Fig.2.2. schéma illustrant le but des barrages	17
Fig.2.3. Barrage de Grand Dixence (Suisse).	21
Fig.2.4. Barrage d'El Mansour Eddahbi (Maroc).....	21
Fig.2.5. Barrage de Tignes (France).	23
Fig.2.6. Visualisation du barrage Ighil Emda, Wilaya de Bejaia, sur image satellitaire Alsat-2A	24
Fig.2.7. Barrage de Daniel-Johnson (Canada).....	26
Fig.2.8. Vue du barrage de Beni Haroun.	26
Fig.2.9. Barrage de Koudiat Acerdoune (Algérie).	28
Fig.2.10. Barrage d'Assouan (Égypte).	29
Fig.2.12. Barrage de Taksebt (Algérie).	31
Fig.3.1. Localisation du site du barrage Oued Taht (Google Maps)	35
Fig.3.2. Barrage en cours d'exécution.....	38
Fig.3.3. Exécution des travaux	39
Fig.3.4. Barrage Oued taht (ANBT [12]).	39
Fig.3.5. Les deux rives du barrage oued Taht avant et après les travaux d'excavation [24].....	40
Fig.4.1. Solid 186 geometry (Ansys help).....	43
Fig.4.2. Modèle du barrage seul encastré.	44
Fig.4.3. Modèle du barrage avec sol de fondation (maillage).	44
Fig. 4.4. Le mode fondamentale du barrage encastré (mode 9)	46
Fig. 4.5. Le mode fondamentale du barrage avec sol (mode 2).....	47
Fig. 4.6. Effets de l'interaction sol structure sur le comportement modal du barrage.....	48
Fig. 4.7. Signal sismique (El Centro composantes (N-S)).....	49
Fig.4.8. nœud 1470.	50
Fig.4.9. Nœud 1470.	50
Fig.4.10. Variation des déplacements du noeud 1470 suivant la direction x	51
Fig.4.11. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction y	51
Fig.4.12. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction z	52
Fig.4.13. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction x.	52
Fig.4.14. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction y.	53
Fig.4.15. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction z.....	53
Fig.4.17. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction Y	54
Fig.4.16. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction X.	54
Fig.4.18. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction Z.....	55
Fig.4.19. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction x	55
Fig.4.20. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction y.	56
Fig.4.21. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction z.....	56

Fig.4.23.Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction y avec et sans interaction sol structure.....	57
Fig.4.22.Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction x avec et sans interaction sol structure.....	57
Fig.4.24.Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction z avec et sans interaction sol structure.....	58

Tables des tableaux

Tableau 1.1. Tableau comparatif des méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure.....	11
Tableau 3.1. Caractéristique mécaniques du corps du barrage et le sol de fondation	37
Tableau 3.2. Angle d'ouverture et Rayon du barrage.....	37
Tableau 3.4. Capacités hydrauliques du barrage	38
Tableau 4.1. Les 10 premières fréquences du barrage encastré à la base.....	45
Tableau 4.2. Les 10 premières fréquences du barrage avec sol de fondation.	46
Tableau 4.3.Comparaison entres les périodes des deux hypothèses.....	47

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction Générale

Les barrages sont parmi les plus impressionnants projets conçus par l'homme au cours de milliers d'années ; ils offrent la possibilité de satisfaire ses besoins fondamentaux en eau, alimentation et énergie. Néanmoins, en cas de rupture, ils peuvent causer un risque majeur et des dommages considérables pour les populations, pour les biens et pour l'environnement. Ces risques peuvent être liés aux conditions de mise en œuvre des matériaux, incertitudes sur l'environnement et incertitude de comportement tel que les effets de l'interaction avec le sol avoisinant.

La conception des ouvrages en zone sismique est généralement menée avec l'hypothèse d'encastrement à la base. Cette hypothèse néglige la flexibilité du sol support et par la suite les effets de l'interaction sol structure (ISS).

L'objectif de notre travail est de faire une étude de l'interaction sol structure sur un barrage voûte en considérant deux hypothèses ; la première est de modéliser le barrage avec une base encastree et la deuxième est de le modéliser en tenant compte de l'interaction sol structure.

Ainsi, notre mémoire comporte, après une introduction générale, quatre chapitres.

Le premier chapitre fait le point sur l'interaction sol structure en général.

Le deuxième chapitre fait un panorama sur les barrages à savoir une définition, types et rôle des barrages.

Le troisième chapitre consiste à présenter notre cas d'étude à savoir : le projet de barrage voûte d'oued Taht (Wilaya de Mascara).

Le quatrième chapitre, est destiné à la modélisation du barrage par le logiciel ANSYS,

Et on a interprété les différents résultats des analyses.

CHAPITRE 01 :
GENERALITES SUR
L'INTERACTION SOL-
STRUCTURE

1.1. Introduction

L'excitation sismique ressentie par la structure est une fonction de la source du séisme, des effets du trajet suivi par le séisme (la variabilité spatiale), des effets du site local et des effets d'Interaction Sol-Structure (ISS).

L'étude de L'ISS est essentielle pour la conception sismique, la stabilité des fondations, et la prévention des dommages structurels. Par exemple, lors d'un séisme, le mouvement du sol peut induire des forces supplémentaires sur la structure, ce qui peut entraîner des déformations, des fissures, voire des effondrements.

L'interaction sol-structure est un pilier fondamental du génie civil, car elle lie directement la performance des ouvrages aux propriétés du sol. Une compréhension approfondie de cette interaction permet de concevoir des structures sûres, durables et économiques, tout en minimisant les risques de défaillance. Elle est donc indispensable pour relever les défis techniques et environnementaux auxquels fait face le génie civil moderne.

Dans les régions sujettes aux séismes, prendre en compte l'interaction sol-structure est essentielle car Les barrages doivent non seulement résister à des forces hydrauliques énormes et à la pression du sol mais aussi être capables de résister aux mouvements du sol.

1.2. Définition de l'interaction sol-structure

L'interaction sol-structure (ISS) désigne l'étude des effets réciproques entre une structure (bâtiment, pont, barrage, etc.) et le sol ou la roche sur lequel elle repose. Elle prend en compte la manière dont les charges appliquées par la structure modifient l'état de contrainte et de déformation du sol, et inversement, comment les déformations du sol influencent le comportement de la structure. Cette interaction est essentielle pour comprendre et prédire les performances des ouvrages, en particulier en termes de stabilité, de déformation et de résistance.

L'interaction sol-structure (ISS) est un phénomène complexe où le comportement d'une structure est influencé par les propriétés du sol sur lequel elle repose, et inversement. Cela est particulièrement critique pour les structures sensibles aux mouvements du sol, comme les barrages, les ponts, et les bâtiments de grande hauteur.

1.3. Historique et évolution des études sur l'interaction sol-structure

L'étude de l'interaction sol-structure (ISS) a évolué avec le temps, suivant les besoins croissants en compréhension du comportement des ouvrages face aux sollicitations dynamiques, notamment sismiques. À ses débuts, les ingénieurs concevaient les structures en

supposant que les fondations reposaient sur un sol rigide. Cette hypothèse simplificatrice s'est révélée insuffisante à mesure que les observations de terrain et les analyses expérimentales ont mis en évidence l'influence réelle du sol sur la réponse des structures.

L'un des grands tournants de cette discipline est venu avec le développement de l'ingénierie sismique dans la seconde moitié du XXe siècle. **Kramer (1996)** a mis en lumière l'importance de l'interaction dynamique sol-structure dans le cadre de l'ingénierie géotechnique sismique, soulignant notamment les effets d'amplification, de dissipation d'énergie et de modification de la période propre des structures [1].

Les travaux de **Gazetas (1991)** ont constitué une avancée majeure dans la modélisation des fondations. En développant des formules analytiques pour les fonctions d'impédance des fondations superficielles et profondes, il a permis de mieux quantifier la déformabilité du sol et son influence sur les vibrations structurelles [2].

Parallèlement, **Wolf (1985)** a apporté une base théorique rigoureuse à la modélisation de l'ISS à travers des formulations mathématiques détaillées, intégrant à la fois les effets dynamiques et les conditions aux limites, ce qui a permis d'améliorer considérablement les outils de calcul [3].

Ces contributions ont jeté les bases des approches actuelles, intégrant les effets d'interaction dans les analyses statiques et dynamiques des structures, en particulier dans les zones à risque sismique. L'ISS est désormais reconnue comme un paramètre essentiel à prendre en compte dès les premières phases de conception des ouvrages complexes.

Avec l'avènement des ordinateurs et des logiciels de simulation dans les années 1970, les méthodes d'analyse de l'ISS sont devenues plus précises et complexes. Aujourd'hui, des logiciels comme ANSYS, PLAXIS, et ABAQUS permettent de modéliser l'ISS avec une grande précision.

1.4. Les composantes de l'interaction sol-structure

1.4.1. Interaction cinématique

Loin de la fondation, dans une région dénommée le champ libre, les couches de sol sont traversées par des ondes sismiques dont la nature peut être complexe. La nature des ondes est

dictées par les caractéristiques de source sismique mais également par la géométrie et les caractéristiques mécaniques des terrains traversés, Si l'on s'intéresse au mouvement de la fondation, les déformations du sol sont transmises à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure, même en l'absence de superstructure. Le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différences de rigidité entre la fondation et le sol encaissant ; le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci.

La différence de rigidité entre la base et le sol influence également le mouvement, car les ondes sismiques arrivantes doivent être réfléchies et diffractées par la fondation. Ainsi, le mouvement global du sol à proximité de la fondation doit être ajusté par rapport au mouvement dans le champ libre.

La définition du champ libre

Le champ libre représente le mouvement de sol en l'absence de la structure. Il sert de référence pour l'analyse sismique. Par exemple, dans le cas d'un séisme, le champ libre représente le mouvement du sol avant que la structure ne soit construite (sol qui ne comprend ni la fondation ni la superstructure)

Par conséquent, ce phénomène d'interaction entre la fondation rigide et le sol (interaction cinématique) altère le mouvement sismique qui arrive à la base et par conséquent génère des accélérations (forces d'inertie) distinctes de celles produites dans la structure intégrée au massif rocheux (base encastrée).

1.4.2. Interaction inertielle

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

Les forces d'inertie sont générées par la structure en réponse aux mouvements du sol. Ces forces peuvent affecter le sol, notamment en provoquant des déformations supplémentaires.

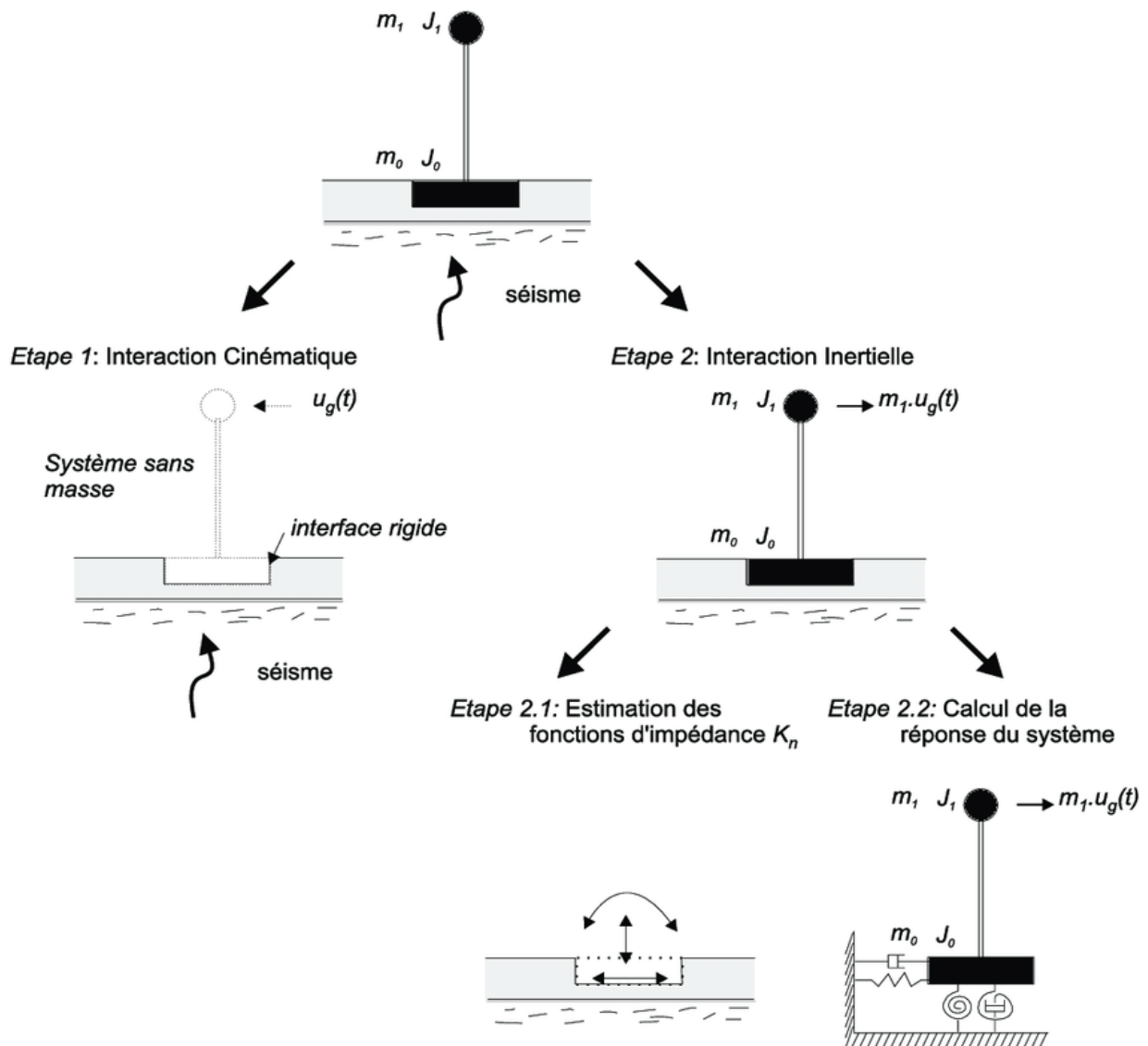


Fig. 1.1. Illustration schématique de l'interaction cinématique et interaction inertielle [2].

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

1.5. Méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure

La dynamique de l'ISS peut être analysée à l'aide de deux méthodes principales : la méthode directe et la méthode de sous-structure.

La méthode directe modélise l'ensemble du système ISS en tant qu'entité unique à l'aide de l'analyse des éléments finis ou de la méthode des éléments de frontière, tandis que la méthode de sous-structure modélise la structure et le sol en tant que sous-structures distinctes.

1.5.1 Méthode globale

La méthode globale est une approche utilisée dans l'analyse de l'interaction sol-structure pour

modéliser le comportement du système sol-structure dans son ensemble, plutôt que de considérer séparément le sol et la structure. Cette méthode tient compte des interactions complexes entre les deux, ce qui permet une analyse plus réaliste et précise. Voici une explication détaillée de cette méthode :

•Principe de la Méthode Globale

La méthode globale consiste à modéliser simultanément le sol et la structure comme un système unique et interactif. Elle prend en compte ;

La déformabilité du sol : Le sol n'est pas considéré comme rigide, mais comme un milieu déformable qui influence le comportement de la structure.

Les interactions dynamiques : Les forces et les déplacements sont transmis entre le sol et la structure, en particulier sous l'effet de charges dynamiques (séismes, vibrations, etc.).

Les effets tridimensionnels : La méthode globale permet de modéliser des géométries complexes en 3D, ce qui est essentiel pour des structures comme les ponts, les barrages ou les bâtiments de grande hauteur.

•Avantages de la Méthode Globale

Précision : Elle capture les interactions réelles entre le sol et la structure, ce qui conduit à des résultats plus fiables.

Flexibilité : Elle peut être appliquée à une grande variété de problèmes, y compris les charges statiques et dynamiques.

Compréhension approfondie : Elle permet d'analyser des phénomènes complexes comme le tassement différentiel, la répartition des contraintes et les modes de vibration.

En résumé, la méthode globale est une approche puissante pour analyser l'interaction sol-structure, mais elle nécessite des outils sophistiqués et une expertise technique.

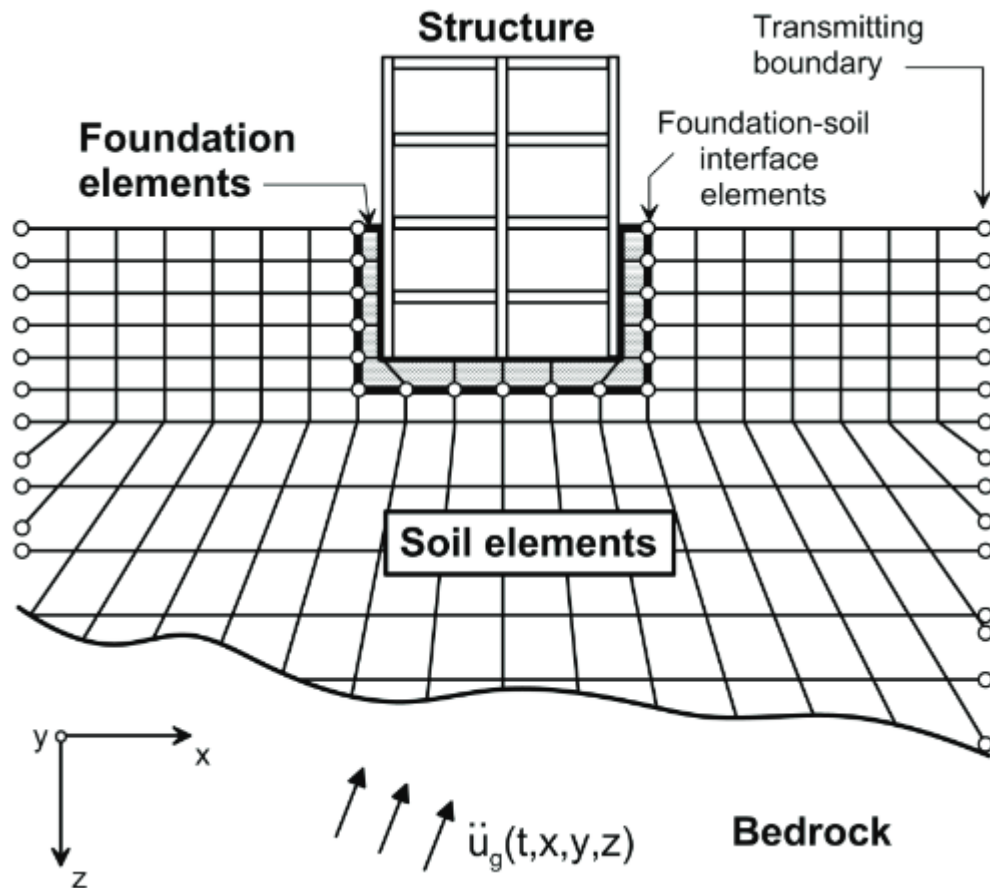


Fig.1.2. Illustration schématique d'une analyse directe de l'interaction sol-structure en utilisant la modélisation par éléments finis [2].

1.5.2. Méthode De Sous – Structures

Cette méthode utilise le principe de superposition ou le problème d'interaction sol structure est analysé en plusieurs étapes successives chacune est facile à résoudre que le problème global.

Le système global est subdivisé en deux sous-structures ; la structure elle-même et le sol support.

La réponse totale Obtenu en superposant les contributions des deux réponses sur l'interface reliant les deux Sous structures.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est applicable aux cas linéaires donc, Elle est inappropriée aux problèmes d'interaction tenant compte du comportement non linéaire des matériaux puisqu'elle est basée sur le principe de superposition.

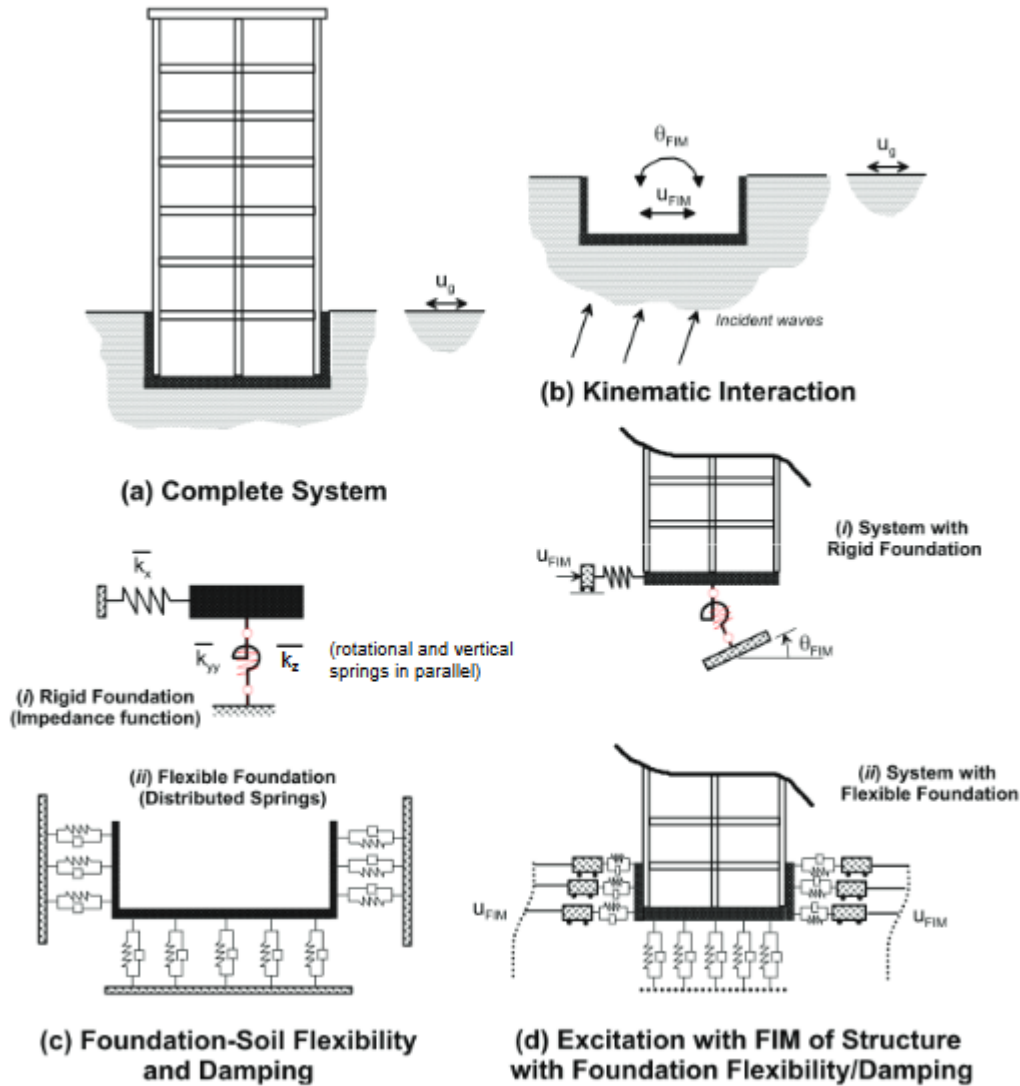


Fig.1.3. Illustration schématique de l'approche par sous-structures pour l'analyse de l'interaction sol-structure [2].

1.5.3. Méthodes hybrides

Les approches hybrides en interaction sol-structure cherchent à fusionner les avantages des méthodes directes et de sous-structures. Elles autorisent la séparation du système en deux sous-domaines distincts : un champ lointain et un champ proche.

1- Le champ lointain est positionné à une distance suffisante de la fondation afin qu'il ne soit pas affecté par l'interaction sol-structure. Ainsi, on peut le considérer comme étant élastique et le modéliser avec des méthodes appropriées aux problèmes linéaires, telles que les impédances dynamiques.

2- Le champ proche, de son côté, inclut toutes les hétérogénéités et non-linéarités du système qui se manifestent près de la fondation. Ce champ proche est incorporé dans le

modèle de la superstructure et peut être géré via une technique directe, comme la méthode des éléments finis.

1.6 Tableau comparatif des méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure

Critère	Méthode de sous-structure	Méthode globale (ou directe)
Principe	Analyse séparée du sol et de la structure, avec couplage a posteriori via conditions aux limites dynamiques.	Modélisation unifiée du sol, fondation et structure dans un seul modèle numérique.
Couplage sol-structure	Faible à modéré, basé sur des impédances équivalentes.	Fort et complet, interaction simulée de manière intégrée.
Prise en compte des non-linéarités	Approximative, généralement limitée au comportement linéaire ou faiblement non linéaire.	Fidèle, avec possibilité de modélisation non linéaire du sol et de la structure.
Complexité de la modélisation	Moyenne à faible.	Élevée, nécessite des outils et compétences avancés.
Coût de calcul	Faible à modéré.	Élevé, surtout pour les grandes structures ou domaines étendus.
Applications typiques	Projets courants de génie civil : bâtiments, réservoirs, passerelles.	Ouvrages critiques : barrages, centrales nucléaires, ponts monumentaux.
Avantages principaux	Rapidité, simplicité, économie de ressources, adaptée aux cas simples.	Précision, prise en compte complète des effets dynamiques et géométriques.
Inconvénients principaux	Moins précis en cas de sol complexe ou non linéaire, découplage artificiel.	Modélisation lourde, données géotechniques nécessaires, temps de calcul long.

Tableau 1.1. Tableau comparatif des méthodes d'analyse de l'interaction sol-structure.

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de faire un panorama sur le phénomène de l'interaction sol-structure. A savoir une définition, comment formuler le problème et quelques méthodes de résolution et de modélisation de ce phénomène.

Il a pour but de poser les bases théoriques nécessaires à la bonne compréhension de l'interaction sol-structure avant de passer à des aspects plus spécifiques liés à l'étude des barrages voûtes dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 02 :
GÉNÉRALITÉS SUR LES
BARRAGES

1. Introduction

Les barrages sont des infrastructures hydrauliques majeures, conçues pour retenir, stocker ou détourner les eaux des rivières et des fleuves. Leur construction répond à des besoins fondamentaux liés à la gestion de l'eau, à la production d'énergie, à la maîtrise des crues et à l'irrigation. En raison de leur importance stratégique, les barrages font l'objet de recherches approfondies dans les domaines du génie civil, de l'hydraulique et de la géotechnique.

Ce chapitre a pour objectif de présenter une vue d'ensemble sur les barrages, en abordant d'abord leur définition et leur utilité dans divers contextes économiques et environnementaux. Il propose ensuite une classification des barrages selon plusieurs critères tels que les matériaux, la forme structurelle et la fonction. Une attention particulière est portée aux types de barrages les plus couramment rencontrés, en mettant en évidence leurs caractéristiques techniques et conditions d'utilisation.

2. Historique des barrages

L'utilisation des barrages remonte à l'Antiquité, lorsque les premières civilisations ont cherché à maîtriser les ressources en eau pour l'agriculture et la gestion des crues. L'un des plus anciens barrages connus est celui de **Sadd el-Kafara** en Égypte, datant d'environ 2800 av. J.-C., construit en maçonnerie pour protéger les zones agricoles du Nil. D'autres civilisations comme les Mésopotamiens, les Romains et les Perses ont ensuite développé des techniques de plus en plus avancées en matière de retenue et de dérivation de l'eau [5].

Au Moyen Âge, les barrages se sont multipliés en Europe pour alimenter les moulins et réguler les rivières. Mais c'est à partir du XIXe siècle, avec l'essor de la révolution industrielle, que leur construction prend une dimension stratégique, notamment pour la production d'électricité. Le XXe siècle marque l'âge d'or des grands barrages, grâce aux progrès en béton armé, en géotechnique et en hydraulique. Des ouvrages emblématiques comme le **barrage Hoover** aux États-Unis (1936) ou **Kariba** en Afrique (1959) illustrent cette période d'expansion.

Aujourd'hui, les barrages sont conçus non seulement pour répondre aux besoins énergétiques et hydrauliques, mais aussi dans une logique de sécurité, de durabilité et de respect de l'environnement. Les avancées en modélisation numérique et en interaction sol-structure permettent une approche plus rigoureuse de leur conception, en particulier en zone sismique.

2.1. Quelques exemples de grands barrages dans le monde

Les grands barrages sont répartis dans le monde entier et illustrent les prouesses techniques réalisées dans des contextes géographiques, géologiques et hydrauliques très variés. Voici quelques exemples emblématiques :

- **Barrage Hoover (États-Unis)** : Construit sur le fleuve Colorado entre 1931 et 1936, ce barrage voûte en béton haut de 221 mètres fut longtemps le plus haut du monde [6].
- **Barrage des Trois Gorges (Chine)** : Situé sur le fleuve Yangtsé, il s'agit du plus grand barrage hydroélectrique du monde en capacité installée. Il mesure 2 335 mètres de long et 181 mètres de haut, et joue un rôle majeur dans la régulation des crues et la production d'énergie [7].
- **Barrage Itaipu (Brésil / Paraguay)** : Ce barrage en béton gravitaire haut de 196 mètres est célèbre pour sa production d'énergie. Il alimente environ 75 % du Paraguay et 15 % du Brésil [8].
- **Barrage d'Assouan (Égypte)** : Construit sur le Nil dans les années 1960, il est vital pour l'irrigation et la régulation du fleuve. Son réservoir, le lac Nasser, est l'un des plus grands au monde [9].
- **Barrage de Vajont (Italie)** : Cet ouvrage voûte haut de 261,6 m, mis en service en 1960, est connu pour la tragédie de 1963 causée par un glissement de terrain dans la retenue. Il constitue un exemple marquant des risques géotechniques liés aux fondations [10].

2.2. Quelques exemples de grands barrages dans l'Algérie

À la fin de l'année 2021, l'Algérie comptait **81 barrages** en exploitation et **5** autres en cours de réalisation, répartis sur l'ensemble du territoire national. Selon les prévisions du secteur hydraulique, ce nombre devrait atteindre **139 barrages** à l'horizon **2030**, dans le cadre d'une stratégie de mobilisation durable des ressources en eau. La tutelle de ces infrastructures relève du (Ministère des Ressources en Eau), tandis que leur gestion technique est assurée par ANBT (l'Agence Nationale des Barrages et Transferts). Quant à la distribution d'eau potable issue de ces retenues, elle est prise en charge par ADE (l'Algérienne des Eaux) [11].

N°	Barrage	Date de la mise en eau	Capacité initiale (Mm ³)	N°	Barrage	Date de la mise en eau	Capacité initiale (Mm ³)
1	Souani	2005	47	30	Keddara	1985	145
2	Boughrara	1999	175	31	Béni Amrane	1988	16
3	Béni Bahdels	1952	63	32	Lekhal	1985	30
4	Mefrouch	1963	15	33	Ksob	1977	30
5	Sidi Abdeli	1988	110	34	Tisedit	2005	167
6	Sarno	1954	22	35	Taksebt	2001	175
7	Ouzert	1986	100	36	Ain Zada	1986	125
8	Bouhanifia	1948	73	37	Ighil Emda	1953	155
9	Fergoug	1970	18	38	Erraguene	1961	200
10	Cheurfas II	1992	82	39	El Agrem	2002	34
11	SM Benaouda	1978	235	40	Béni Hroun	2004	960
12	Bakhada	1963	56	41	H.Grouz	1987	45
13	Dahmouni	1987	41	42	Béni Zid	1993	40
14	Merdja	1984	55	43	Guenitra	1984	125
15	Gargar	1988	450	44	Zardezas	1977	27
16	Sidi Yakoub	1985	280	45	Zit Emba	2001	117
17	Bouguera	1989	13	46	H. Debagh	1987	200
18	Kouidat Rasfa	2004	75	47	Oued Cherf	1995	157
19	Oued Fodda	1932	228	48	Ain Dalia	1987	82
20	Oued Mellouk	2004	127	49	Chafia	1965	171
21	Harreza	1984	70	50	Mexa	1998	47
22	Deurdeur	1984	115	51	K. Medaouar	2004	69
23	Ghrib	1939	280	52	F. El Gueiss	1939	3
24	Boughezoul	1934	55	53	Babar	1995	41
25	Boukourdane	1992	97	54	Foum Gherza	1950	47
26	Meurad	1860	1	55	F. Gazelles	2000	55
27	Bouroumi	1985	188	56	Brezena	2000	122
28	Ladtrat	1989	10	57	Djorf Torba	1969	350
29	Hamiz	1935	21				

Fig.2.1. Exemple des Barrages en Algérie [12].

3. Définition d'un barrage

Un barrage est un ouvrage d'art hydraulique construit en travers d'un cours d'eau afin de retenir ou réguler l'écoulement de l'eau. Il permet la création d'un réservoir utilisé pour l'énergie hydroélectrique, l'alimentation en eau, l'irrigation, la navigation ou la protection contre les crues.

Sur le plan structurel, il doit résister à plusieurs sollicitations : pression de l'eau, poussées sédimentaires, effets sismiques et contraintes thermiques. La conception dépend des caractéristiques géotechniques du site et des objectifs d'exploitation.

Selon l'ICOLD (**I**nternational **C**ommission **O**n **L**arge **D**ams), un **grand barrage** est une structure dont la hauteur dépasse 15 mètres à partir de la fondation.

3.1. But des barrages :

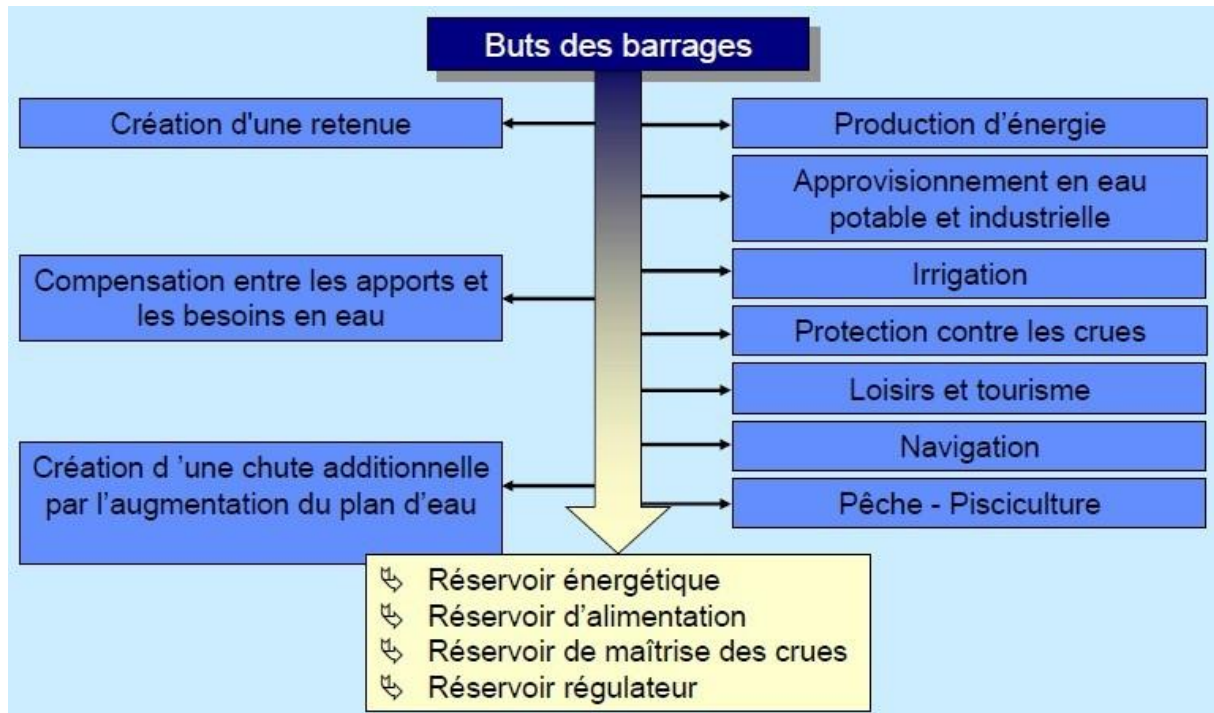


Fig.2.2. Schéma illustrant le but des barrages [13].

3.2. Classification des barrages

Les barrages sont classés selon différents critères techniques, ce qui permet d'optimiser leur conception en fonction du site, du matériau disponible, des objectifs hydrauliques, et des risques encourus.

3.2.1. Selon le matériau de construction

Cette classification repose sur le matériau principal utilisé dans la structure du barrage.

a) Barrages en béton :

Ils sont souvent utilisés dans les vallées étroites avec des fondations rocheuses solides. Ils peuvent être de type poids, voûte ou à contreforts.

- ✓ Exemple : Le barrage de Kariba, en Afrique australe, est un barrage voûte en béton de 128 m de hauteur.

b) Barrages en remblai :

Ils utilisent des matériaux naturels (terre, enrochement) compactés par couches successives. Ils sont adaptés aux terrains vastes avec une large assise.

- ✓ Exemple : Le barrage de Tarbela au Pakistan, en terre et enrochement, est l'un des plus grands de ce type au monde.

3.2.2. Selon la structure de l'ouvrage

La forme structurelle du barrage détermine la façon dont il supporte les efforts.

a) Barrage poids :

Sa masse propre permet de résister à la poussée de l'eau.

- ✓ Exemple : Le barrage de Daniel-Johnson au Canada est un barrage poids voûté imposant.

b) Barrage voûte :

Courbé horizontalement, il transfère la pression de l'eau vers les appuis latéraux.

- ✓ Exemple : Le barrage d'El Atazar en Espagne est un barrage voûte à simple courbure.

c) Barrage à contreforts :

Il se compose d'un mur mince soutenu par des contreforts en béton.

- ✓ Exemple : Le barrage de St. Francis (États-Unis), aujourd'hui disparu, était un barrage à contreforts.

d) Barrage en enrochement avec noyau étanche :

Construit à partir de blocs rocheux et comportant un noyau central imperméable.

- ✓ Exemple : Le barrage de Beni Haroun en Algérie, haut de 118 m, est un bon exemple de ce type.

3.2.3. Selon la finalité de l'ouvrage :

Les barrages sont conçus selon leur fonction principale, bien que beaucoup soient multifonctionnels.

- a) Production hydroélectrique :** Ils convertissent l'énergie hydraulique en électricité.
 - ✓ Exemple : Le barrage de Guri au Venezuela génère plus de 10 000 MW.
- b) Irrigation :** Ils permettent de stocker l'eau pour l'agriculture.
 - ✓ Exemple : Le barrage de Dez en Iran est essentiel à l'irrigation de vastes zones agricoles.
- c) Approvisionnement en eau potable :** Ils garantissent un débit régulier pour les usages domestiques.
 - ✓ Exemple : Le barrage de Taksebt en Algérie alimente en eau potable plusieurs wilayas.
- d) Contrôle des crues :** Ils régulent le débit fluvial en période de fortes précipitations.
 - ✓ Exemple : Le barrage de Nam Theun 2 au Laos joue un rôle majeur dans la protection contre les crues.

3.2.4. Selon la hauteur :

Selon la Commission Internationale des Grands Barrages (ICOLD), un barrage est classé comme « grand » s'il dépasse 15 mètres à partir de sa fondation.

- a) Petit barrage :** Hauteur < 15 m, souvent utilisé pour des retenues locales ou agricoles.
- b) Grand barrage :** Hauteur \geq 15 m, soumis à des règles de sécurité strictes.
 - ✓ Exemple : Le barrage de Ghrib en Algérie est un grand barrage en béton poids de 43 m de hauteur.

4. Types de barrages :

4.1. Barrage poids en béton :

4.1.1. Définition :

Un barrage poids en béton est une structure massive reposant sur le principe de l'équilibre statique, conçue pour résister à la poussée de l'eau uniquement par son propre poids. Ce type d'ouvrage utilise la gravité pour transmettre les charges verticalement à la fondation. Il est dimensionné pour garantir une sécurité suffisante contre le glissement, le basculement et l'écrasement, en tenant compte des sollicitations hydrauliques, sismiques et thermiques [14].

4.1.2. Principe de fonctionnement :

La stabilité du barrage est assurée par le poids propre de la structure, qui contrebalance les efforts horizontaux exercés par la retenue d'eau. La pression hydrostatique, les charges sédimentaires et les poussées dynamiques sont absorbées et transférées vers le sol sans nécessiter de forme arquée ni d'ancrage latéral [15].

4.1.3. Conditions d'implantation :

Les barrages poids sont généralement construits dans des vallées étroites à fond large et sur des fondations rocheuses saines, capables de supporter de fortes charges verticales. Une bonne imperméabilité du sol est également requise pour limiter les infiltrations [15].

4.1.4. Types de barrages poids :

- ✓ **Barrage poids en béton cyclopéen** : intègre des blocs de pierre noyés dans du béton.
- ✓ **Barrage poids en béton compacté au rouleau (BCR)** : méthode moderne utilisant du béton à faible teneur en ciment, compacté par couches successives.

Ces variantes permettent d'optimiser les coûts et les délais de construction tout en maintenant la stabilité structurelle [15].

• Avantages

- ✓ Conception simple et robuste.
- ✓ Grande stabilité, même en cas de séisme.
- ✓ Peu d'entretien sur le long terme.
- ✓ Bonne durée de vie.

• Inconvénients

- Volumes importants de béton → coût élevé.
- Poids important → exige une fondation très résistante.
- Temps de construction plus long comparé à d'autres types [15].

• Exemples concrets

- ✓ Barrage de Grand Dixence (Suisse) : 285 m de haut, le plus haut barrage poids en béton d'Europe, montré dans la **fig.2.3**.

- ✓ Barrage d'El Mansour Eddahbi (Maroc) : exemple typique en zone aride pour irrigation et énergie, montré dans la **fig.2.4**.



Fig.2.3. Barrage de Grand Dixence (Suisse).



Fig.2.4. Barrage d'El Mansour Eddahbi (Maroc).

4.2. Barrage voûte

4.2.1. Définition

Un barrage voûte est un ouvrage hydraulique courbé en plan, construit généralement en béton, qui transmet la pression de l'eau vers les rives par un effet de voûte. La structure travaille principalement en compression, permettant une répartition efficace des charges vers les appuis latéraux. Cette géométrie mince et arquée repose sur le principe de la mécanique des arcs, optimisant l'utilisation du matériau et réduisant le volume de béton nécessaire [16].

4.2.2. Principe de fonctionnement

La poussée hydrostatique exercée par l'eau est transférée par la courbure du barrage vers les appuis rocheux latéraux. La forme arquée transforme les efforts horizontaux en efforts de compression le long de la voûte, permettant de réduire l'épaisseur de la structure sans compromettre sa stabilité. Le barrage voûte fonctionne donc grâce à une interaction étroite entre la géométrie de l'ouvrage et la résistance des rives [16].

4.2.3. Conditions d'implantation

Ce type de barrage nécessite une vallée étroite, en forme de V ou de gorge, avec des parois latérales rocheuses solides et bien ancrées capables de reprendre les efforts de compression. La qualité géologique des appuis latéraux est cruciale pour garantir la stabilité structurelle [16].

4.2.4. Types de barrages voûtes

- ✓ **Barrage voûte simple** : une seule courbure, généralement en plan horizontal.
- ✓ **Barrage voûte à double courbure** : courbé à la fois en plan et en élévation (plus performant mais plus complexe à construire).
- ✓ **Barrage voûte multiple** : composé de plusieurs segments arqués reliés entre eux.

• Avantages

- ✓ Moindre volume de béton → économie de matériaux.
- ✓ Excellente stabilité grâce à la géométrie en arc.
- ✓ Bonne adaptation aux zones montagneuses et sismiques.

- **Inconvénients**

- ✓ Construction complexe nécessitant un coffrage spécifique.
- ✓ Nécessite un site très spécifique (vallée étroite et rives rocheuses).
- ✓ Sensible à l'hétérogénéité des appuis latéraux [16].

- **Exemples concrets**

- ✓ **Barrage de Tignes** (France) : barrage voûte de 180 m dans les Alpes, montré dans la **fig.2.5**.
- ✓ **Barrage d'Ighil Emda** (Algérie) : barrage voûte utilisé pour l'irrigation, montré dans la **fig.2.6**.



Fig.2.5. Barrage de Tignes (France).



Fig.2.6. Visualisation du barrage Ighil Emda, Wilaya de Bejaia, sur image satellitaire Alsat-2A.

4.3. Barrage à contreforts :

4.3.1. Définition

Un barrage à contreforts est une structure composée d'un parement (ou voile) amont incliné, appuyé en aval sur une série de contreforts verticaux ou inclinés, qui transmettent les charges à la fondation. Contrairement aux barrages pleins, ce type d'ouvrage est creux entre les contreforts, ce qui permet d'économiser du matériau tout en assurant une bonne résistance aux efforts hydrostatiques [17].

4.3.2. Principe de fonctionnement

L'eau exerce une pression sur le parement amont, qui la transfère aux contreforts. Ceux-ci transmettent ensuite les charges verticales à la fondation. L'efficacité du système réside dans la répartition des efforts sur plusieurs points d'appui. La structure fonctionne principalement en compression au niveau des contreforts, et en flexion dans le voile [17].

4.3.3. Conditions d'implantation

- ✓ Terrains de fondation solides, généralement rocheux ou très compacts.
- ✓ Vallée de largeur moyenne à grande.
- ✓ Disponibilité de main-d'œuvre spécialisée en coffrage et ferrailage, en raison de la complexité de la géométrie.

4.3.4. Types de barrages à contreforts

- ✓ **Barrage à contreforts massifs** (à la manière d'un barrage poids segmenté).
- ✓ **Barrage à voiles minces et contreforts ajourés** (type Ambursen).
- ✓ **Barrage à murs de tête multiples** (plusieurs voiles verticaux).

- **Avantages**

- ✓ Économie de matériaux (notamment de béton).
- ✓ Moins de poussée exercée sur les rives comparées aux barrages voûtes.
- ✓ Possibilité de grandes hauteurs sans augmentation significative du poids.

- **Inconvénients**

- ✓ Conception et construction complexes.
- ✓ Entretien plus difficile à cause de l'accessibilité limitée aux contreforts.
- ✓ Vulnérabilité accrue en cas de déformation différentielle de la fondation [18].

- **Exemples concrets**

- ✓ **Barrage de Daniel-Johnson** (Canada) : barrage à contreforts multiples, de 214 m de haut, montré dans la **fig. 2.7**.
- ✓ **Barrage de Beni Haroun** (Algérie) : contient des éléments en contreforts dans ses structures auxiliaires, montré dans la **fig.2.8**.



Fig.2.7. Barrage de Daniel-Johnson (Canada).



Fig.2.8. Vue du barrage de Beni Haroun.

4.4. Barrage en remblai :

4.4.1. Définition

Un barrage en remblai est une structure massive constituée de matériaux naturels compactés, tels que des sols (terre) ou des roches, formant une masse résistante à la poussée de l'eau par son propre poids. On distingue principalement deux types : les **barrages en terre** et les **barrages en enrochements**, selon le matériau dominant utilisé. Ces ouvrages sont souvent étanchés au moyen d'un noyau argileux, d'un écran bitumineux ou d'un parement en béton [18].

4.4.2. Principe de fonctionnement

La masse du remblai oppose une résistance gravitaire à la poussée hydrostatique. L'étanchéité est assurée par un élément imperméable central ou en amont. Le barrage doit être suffisamment large à sa base pour garantir la stabilité. Le compactage rigoureux des matériaux assure la cohésion et la résistance à l'érosion. En cas de séisme ou de crue, sa résilience dépend fortement du drainage interne et de la perméabilité maîtrisée [18].

4.4.3. Conditions d'implantation

- ✓ Adapté aux sites larges, avec des fondations de portance modérée à bonne.
- ✓ Convient aux zones sismiques grâce à sa grande flexibilité.
- ✓ Utilisation optimale quand des matériaux locaux (terre ou roche) sont disponibles en abondance.

4.4.4. Types de barrages en remblai

- ✓ **Barrage en terre homogène** : matériau uniforme avec faible perméabilité.
- ✓ **Barrage en terre zoné** : noyau central imperméable avec épauls drainantes.
- ✓ **Barrage en enrochements** : constitué de gros blocs de roche avec parement étanche (béton, asphalte ou géomembrane).
- ✓ **Barrage mixte** : combinant des zones en terre et en enrochements.

• Avantages

- ✓ Utilisation de matériaux locaux → réduction des coûts.
- ✓ Très bonne adaptation aux fondations hétérogènes.

- ✓ Résilience face aux mouvements sismiques (flexibilité naturelle).
- ✓ Facilité de construction progressive (phases multiples).

- **Inconvénients**
 - ✓ Grand emprise au sol (base très large).
 - ✓ Sensibilité à l'érosion interne (risque de renard hydraulique si drainage insuffisant).
 - ✓ Entretien rigoureux nécessaire pour surveiller les infiltrations et les tassements [18].

- **Exemples concrets**
 - ✓ **Barrage de Koudiat Acerdoune** (Algérie) : en remblai zoné, hauteur de 121 m, montré dans la **fig.2.9**.
 - ✓ **Barrage d'Assouan** (Égypte) : barrage en remblai massif avec écran d'étanchéité, montre dans la **fig.2.10**.



Fig.2.9. Barrage de Koudiat Acerdoune (Algérie).



Fig.2.10. Barrage d'Assouan (Égypte).

4.5. Barrage mixte :

4.5.1. Définition

Un barrage mixte est un ouvrage hydraulique combinant deux ou plusieurs types de structures de barrages (par exemple : voûte-barrage, béton-remblai, ou poids-voûte) afin de s'adapter à des conditions topographiques, géologiques ou hydrauliques spécifiques. Cette combinaison permet d'optimiser les performances techniques et économiques du barrage selon la configuration du site. Le choix du type de mixage dépend de la morphologie de la vallée, de la qualité des fondations et des contraintes structurelles [19].

4.5.2. Principe de fonctionnement

Chaque section du barrage remplit une fonction complémentaire :

- ✓ La partie en béton (voûte ou poids) assure la retenue principale de l'eau dans les zones les plus profondes ou exposées à de fortes pressions hydrostatiques.
- ✓ Les parties en remblai, situées aux abords, assurent la continuité du barrage dans les zones moins sollicitées, où les conditions du terrain sont moins favorables aux

structures en béton.

La transition entre les matériaux hétérogènes (béton et sol compacté) nécessite des traitements spécifiques pour garantir l'étanchéité et la stabilité globale de l'ouvrage [19].

4.5.3. Conditions d'implantation

- ✓ Vallées avec géométries irrégulières, larges ou asymétriques.
- ✓ Sites combinant des zones rocheuses adaptées au béton et des zones meubles favorables au remblai.
- ✓ Projets nécessitant un compromis entre performance structurelle et contraintes économiques ou géotechniques.
- ✓ Cas où une structure unique serait techniquement difficile ou économiquement peu viable.

4.5.4. Types de barrages mixtes

- ✓ Voûte avec ailes en remblai
- ✓ Poids central avec ailes en remblai
- ✓ Barrages béton-terre zoné
- ✓ Structures composites à gradins (zones successives en béton, en enrochements, etc.)

• Avantages

- ✓ Adaptabilité maximale à la topographie du site.
- ✓ Optimisation des coûts par usage localisé du béton.
- ✓ Réduction de l'empreinte environnementale comparée à un barrage béton complet.
- ✓ Résilience accrue dans certains cas face aux sollicitations sismiques grâce à la flexibilité des parties en remblai.

• Inconvénients

- ✓ Conception complexe (interfaces entre matériaux hétérogènes).
- ✓ Exécution plus technique (traitement des jonctions, gestion des filtrations).
- ✓ Surveillance accrue nécessaire sur les zones de transition [19].

- Exemples concrets
- ✓ **Barrage de Keban (Turquie)** : voûte-barrage avec ailes en remblai, voir la **fig.2.11**.
- ✓ **Barrage de Taksebt (Algérie)** : combinaison de noyau en béton et ailes en remblai zoné, voir la **fig.2.12**.



fig.2.11.Barrage de Keban (Turquie).



fig.2.12.Barrage de Taksebt (Algérie).

5. Comportement sismique des barrages

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques stratégiques soumis à des sollicitations sismiques importantes, surtout dans les zones à forte activité tectonique. Leur comportement sous séisme dépend de nombreux facteurs : typologie de la structure, interaction sol-structure, caractéristiques sismiques du site, ainsi que la dynamique de l'eau retenue dans le réservoir.

Sous l'effet d'un séisme, les barrages subissent une réponse vibratoire complexe liée à la transmission des ondes sismiques depuis le sol, à la pression hydrodynamique du réservoir, et aux déformations induites par les sollicitations dynamiques. Les barrages en béton rigide (voûte, poids) réagissent différemment des barrages en remblai plus déformables [20].

5.1. Cas des barrages en remblai

Les barrages en remblai présentent un comportement fortement non linéaire lors des secousses sismiques. Ils sont sensibles à la liquéfaction, aux tassements différenciés, ainsi qu'aux glissements de talus. Leur stabilité dépend de la nature des matériaux utilisés, du degré de compactage, et du système de drainage. Les méthodes d'analyse doivent intégrer ces phénomènes pour prévenir tout risque de rupture [21].

5.2. Cas des barrages rigides (béton, voûte)

Les barrages rigides comme les barrages voûtes ou poids en béton réagissent aux séismes principalement par des déformations vibratoires et des concentrations de contraintes. Des fissurations peuvent apparaître, notamment dans les zones de liaison avec les appuis rocheux. Une bonne conception inclut des joints de dilatation, des renforcements locaux et une vérification des modes propres de vibration [22].

5.3. Normes et recommandations

Plusieurs institutions internationales ont établi des directives spécifiques pour la conception sismique des barrages. L'ICOLD recommande une analyse dynamique complète pour les grands barrages situés en zones sismiques. Aux États-Unis, la FEMA (**Federal Emergency Management Agency**) et l'USACE (**U.S. Army Corps of Engineers**) ont émis des lignes directrices strictes, tandis qu'en Algérie, RPA (**le Règlement Parasismique Algérien**) impose des critères de conception selon la classification sismique du site [23].

6. Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents types de barrages (poids, voûte, remblai), leur classification selon divers critères, ainsi que leur comportement face aux séismes. Des exemples concrets, en Algérie et dans le monde, ont illustré ces notions. Le barrage voûte Oued Taht est pris comme cas d'étude pour le présent mémoire afin d'étudier les effets de l'interaction sol structure.

*CHAPITRE 03 :
DESCRIPTION DU CAS
D'ÉTUDE LE BARRAGE
VOUTE « OUED TAHT »*

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le cas d'étude « le barrage Oued Taht, implanté à Mascara », ce barrage ainsi que le sol de fondation support vont être présenté en détail.

Le barrage voûte « Oued Taht » représente un ouvrage d'art majeur dans le domaine de la gestion des ressources en eau et de la production d'énergie renouvelable. Situé dans une région stratégique, ce barrage a été conçu pour répondre à des besoins multiples, allant de la régulation des crues à l'alimentation en eau potable, en passant par l'irrigation des terres agricoles et la production d'électricité. Sa construction s'inscrit dans une vision globale de développement durable, visant à optimiser l'utilisation des ressources naturelles tout en minimisant les impacts environnementaux et sociaux.

Ce chapitre a pour objectif de présenter une description détaillée du barrage « Oued Taht », en mettant en lumière ses caractéristiques techniques, son contexte géographique et géologique.

Les données techniques présentées dans ce chapitre sont tirées d'une fiche technique du projet fondée par le groupement d'entreprise **SEROR HYDRO TECHNIQUE**.

3.2. Localisation

Le barrage d'OuedTaht est un barrage voûte en béton, situé dans la commune d'Aïn Farrah (daïra d'Oued El Abtal) au sud de la wilaya de Mascara, est une infrastructure hydraulique récente, conçue pour répondre aux besoins croissants en eau potable et en irrigation agricole dans la région.



Figure 3.1. Localisation du site du barrage Oued Taht (Google Maps)

La réalisation de barrage de l'OUED TAHT vient relever le besoin d'alimentation en eau potable des communes d'AIN FERRAH et Oued el ABTAL, ainsi que l'irrigation du périmètre de KECHOUT.

3.2.1. Présentation de la zone d'étude :

3.2.1.1. Caractéristiques générales du barrage Oued Taht

Bassin versant du barrage :

- Surface totale du bassin versant... : 83,38 Km²
- Précipitation moyenne annuelle : 397 mm/an.
- Evaporation moyenne annuelle..... : 1 843 mm/an.

Limite du sous bassin versant oued Taht :

- Apport moyen annuel.....: 15 Hm³/an
- Apport solide moyen annuel..... : 98 200 m³/an

Digue :(en enrochements avec noyau en argile).

- Côte de la crête..... : 399,50 m
- Hauteur maximale du fond de l'oued : 39,50 m
- Longueur en crête.....: 127 m
- Largeur de la crête : 6 m
- Talus amont : 1V/2H
- Talus aval : 1V/2H

Volume des remblais :

- Enrochements (recharges)..... : 181 000 m³
- Argile (noyau)..... : 36 000 m³
- Filtre fin : 22 000 m³
- Filtre gros : 18 500 m³
- Rip-Rap : 7500 m³

Retenue :

- Côte de la retenue normale..... : 392,00 m
- Côte des plus hautes eaux : 397,20 m
- Côte du volume mort..... : 384,00 m
- Volume utile..... : 7 Hm³

CHAPITRE 3 : Description du cas d'étude le barrage voute « oued taht »

- Volume annuel régularisé : 8,5 Hm³

Crues :

- Vingtennale (Q 5%);..... : 200 m³/s
- Millénaire (Q 0,1%)..... : 404 m³/s
- Dixmillénaire (Q 0,01%)..... : 523 m³/s

3.2.1.2. Les travaux de réalisation du barrage d'Oued Taht :

Les travaux de réalisation du barrage d'Oued Taht, commune d'AïnFerah, à 75 km au sud-est du chef-lieu de wilaya, qui devront être achevés en juin 2016.

Année de mis en eau : 22 Octobre 2017

Réception provisoire : 30 Avril 2019

3.2.1.3. Destination de l'ouvrage

L'ouvrage aura pour objet la mobilisation d'une ressource en eau qui sera destinée principalement pour l'alimentation en eau potable des communes limitrophes (Ain Ferrah, Oued ElAbtal et Djillali Ben Amar).

3.3. Caractéristique du projet :

3.3.1. Caractéristique de sol fondation :

Matériau	Module de Young E(N/m²)	Coefficient de poisson	Densité (Kg/m²)
Corps du barrage	28.5e+09	0.3	2500
Sol de fondation	6.22 e+09	0.25	2100

Tableau 3.1. Caractéristique mécaniques du corps du barrage et le sol de fondation.

3.3.2. Caractéristique du corps de barrage :

Le barrage oued taht est un barrage voute, l'angle d'ouverture ainsi que le rayon sont présentés dans le tableau suivant.

Angle d'ouverture	Rayon centrée
60°	73m

Tableau 3.2. Angle d'ouverture et Rayon du barrage

CHAPITRE 3 : Description du cas d'étude le barrage voute « oued taht »

Les dimensions géométriques du barrage résumées dans le tableau 3.3.

Hauteur maximale (au-dessus de terrain naturel)	Hauteur maximale (au-dessus de fondation)	Longueur de crête	Cote de crête	Surface occupée
36m	44m	155m	7m	767km ²

Tableau 3.3. Dimensions géométrique du barrage

3.3.3. Capacités hydraulique

Les capacités hydrauliques du barrage sont sur le tableau 3.4.

Capacité du réservoir de barrage		Prédication moyenne annuelle	Apport moyen annuel
Volume utile	volume mort	353 mm	16 Hm ³
5Hm ³	2Hm ³		

Tableau 3.4. Capacités hydrauliques du barrage

3.3.4. Vidange de fond

La structure se dispose de :

-2 vannes de control de débit de dimensions (2,8*2) m

-2 vannes de garde de dimensions (3*2) m

Avec un débit maximal de : (2*100m³/s)

3.3.5. Evacuateur de crue

Ce projet se situe sur un crue de T=1000 ans, un débit de pointe qui atteint les 1600 m. /s, et un évacuateur de type seuil libre.

3.3.6. Les travaux

Le projet est mis en pied par le groupement d'entreprise **SEROR HYDRO TECHNIQUE** .le délai estime de ce projet est de 24 mois avec montant de **2.534.579.8501,35DA/**



Fig.3.2. Barrage en cours d'exécution



Figure 3.3. Exécution des travaux



Figure 3.4. Barrage Oued taht (ANBT [12]).

3.3.7. Consistance des travaux :

Excavation effectuée dans le projet est de 25000 m³ (23000 m³ Roche +2000 m³ Meuble) avec un volume de béton de 36000 m³, aussi l'affectation d'un forage et injection sur un volume 27000 ml.

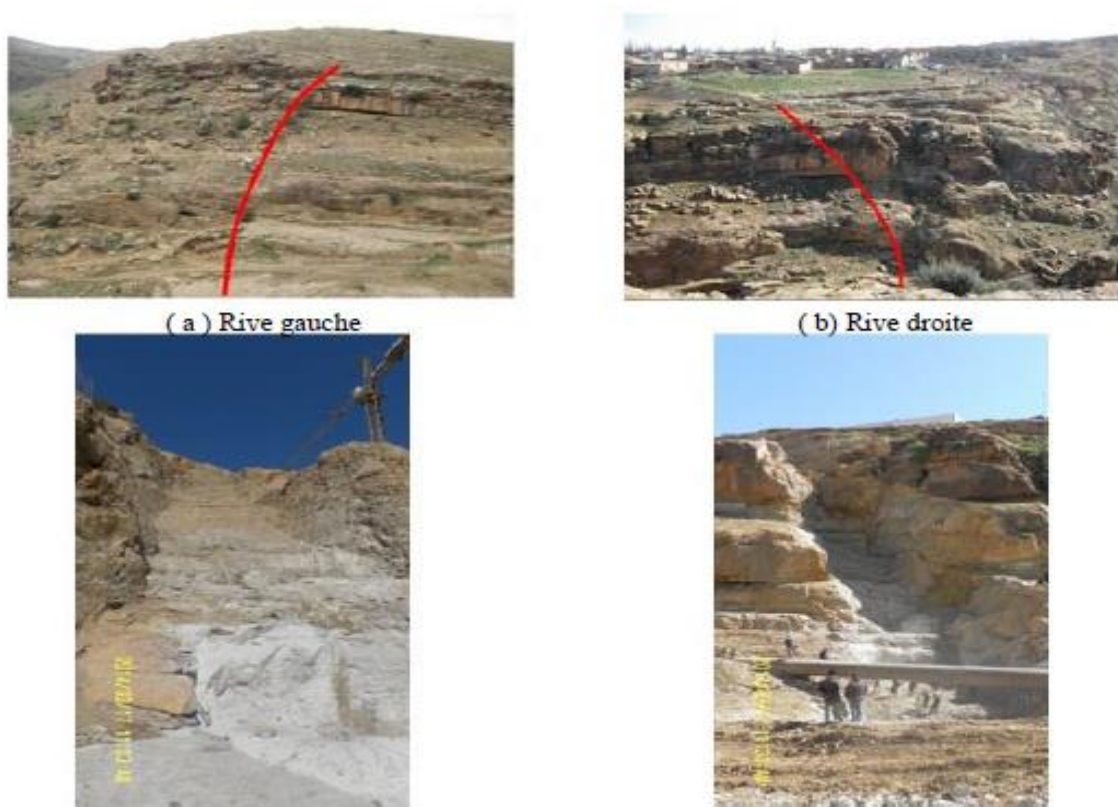


Figure 3.5. Les deux rives du barrage oued Taht avant et après les travaux d'excavation [24]

3.4. Conclusion :

Ce chapitre résume toutes les caractéristiques du barrage Oued taht ainsi que le sol de fondation, ces données sont nécessaire pour la modélisation Ansys du barrage. Ansys est que le code élément finis utilisé pour la modélisation d'interaction sol structure.

CHAPITRE 04 :
MODELISATION DE
L'INTERACTION SOL
STRUCTURE

4.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est La modélisation du barrage OUED TAHT dans son état vide utilisant le logiciel ANSYS .Deux analyses vont être présentées :

- ❖ Analyse modale
- ❖ Analyse transitoire

Et deux hypothèses vont être considérées :

- ❖ Barrage à base fixe (encastré) sans interaction sol structure.
- ❖ Barrage avec sol de fondation en prenant en considération interaction sol structure.

4.2. Modèle élément finis du barrage

L'élément choisis pour le maillage du barrage est **solide 186** qui existe dans la bibliothèque d'ANSYS version 2017.

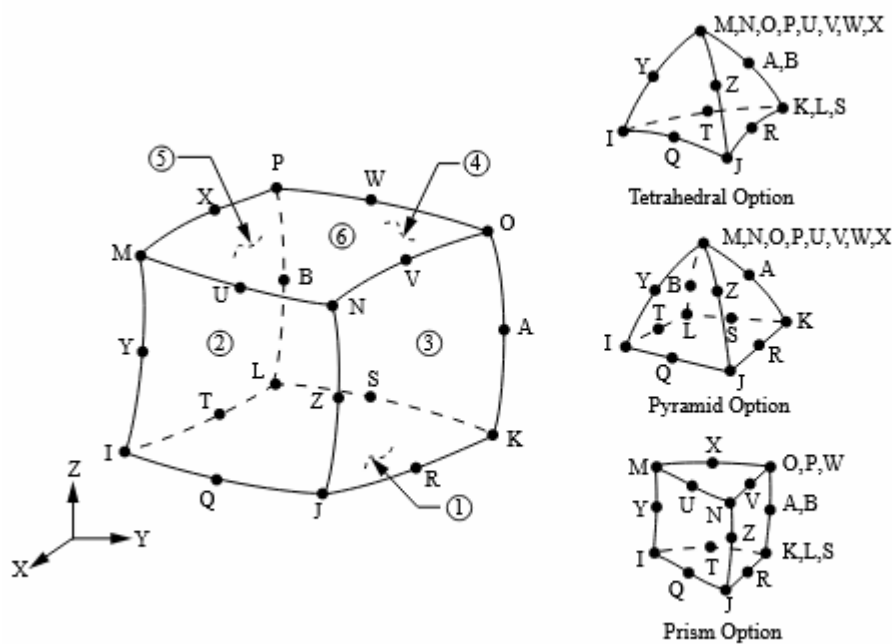


Fig.4.1. Solid 186 geometry (Ansys help)

Cet élément est utilisé aussi pour le maillage du sol de fondation.

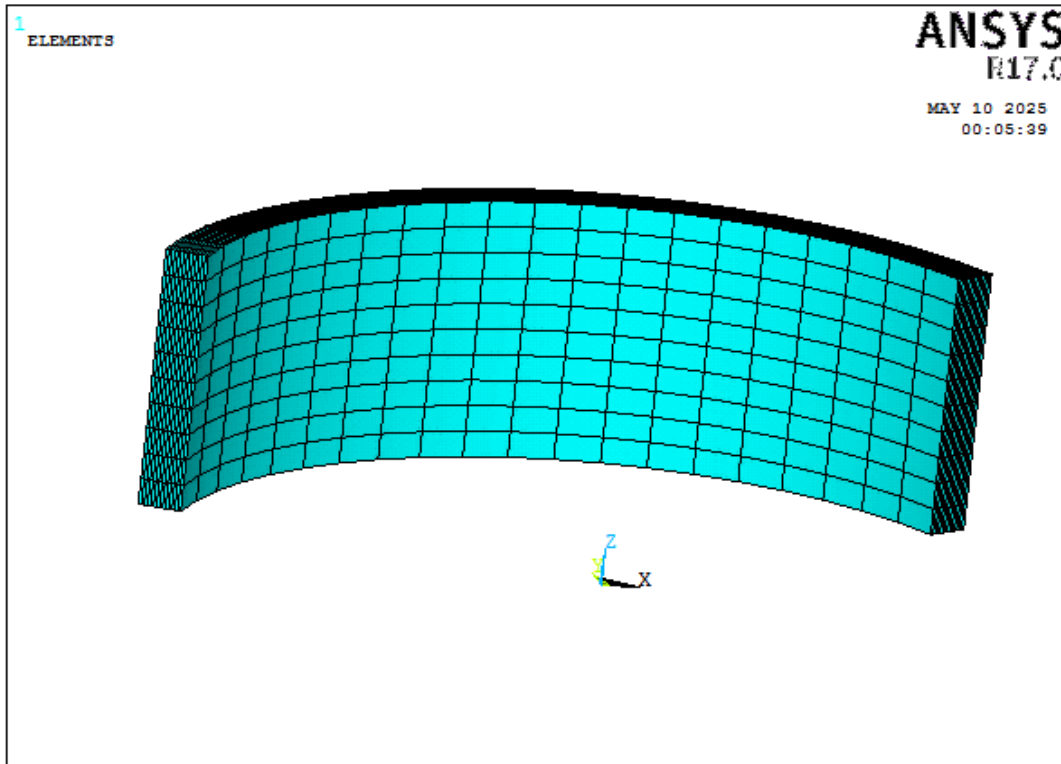


Fig.4.2. Modèle du barrage seul encastré.

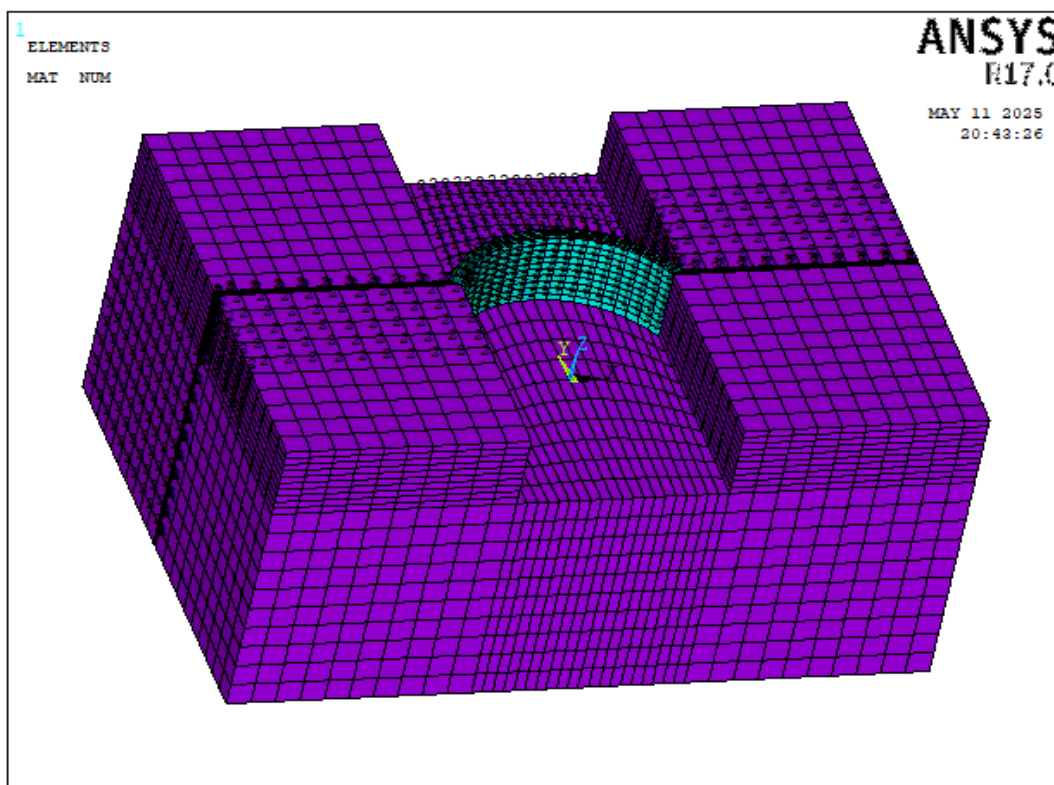


Fig.4.3. Modèle du barrage avec sol de fondation (maillage).

Les figures 4.2 et 4.3 représentent successivement le barrage avec encastrement à la base (sans prise en considération l'interaction sol structure) et le barrage avec sol pour prendre en considération les effets de l'interaction sol structure.

Les dimensions du sol entourant le barrage sont comme suit :

Suivant x : 140 m à partir des extrémités du corps du barrage.

Suivant y : 140 m du côté amont et aval du barrage.

Suivant z : -140 m au-dessous du barrage.

4.3. Etude du comportement modale du barrage : (analyse modale)

Pour étudier le comportement modal du barrage c'est-à-dire calculer les périodes et les fréquences propres de ce dernier toujours en supposant deux cas d'études :

- barrage seul avec une base encastree.

- barrage avec sol de fondation.

Les 10 premiers modes sont présentés avec les fréquences propres et les périodes propres du barrage seul encastree et barrage avec sol de fondation dans les tableaux 4.1 et 4.2 respectivement.

Le nombre des modes est pris de telle façon que la somme des masses entraînées par ces modes atteints les 90% de la masse totale.

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	MASS FRACTION	TOTAL MASS
1	5.69263	0.17567	4654.6	0.773265	0.216654E+08	0.257101	0.181536
2	6.05076	0.16527	-10.076	0.001674	101.519	0.257102	0.850638E-06
3	7.84399	0.12749	-12.346	0.002051	152.413	0.257104	0.127708E-05
4	9.73046	0.10277	-3765.5	0.625563	0.141792E+08	0.425367	0.118809
5	13.3503	0.74905E-01	01 1.2480	0.000207	1.55741	0.425367	0.130497E-07
6	13.6314	0.73360E-01	01 8.8518	0.001471	78.3543	0.425368	0.656538E-06
7	14.4466	0.69220E-01	01 -2896.0	0.481117	0.838707E+07	0.524897	0.702760E-01
8	16.1409	0.61954E-01	01 -1.5555	0.000258	2.41949	0.524897	0.202731E-07
9	16.5755	0.60330E-01	01 6019.4	1.000000	0.362334E+08	0.954876	0.303603
10	18.0795	0.55311E-01	01 -1950.0	0.323952	0.380251E+07	1.00000	0.318616E-01

Tableau 4.1. Les 10 premières fréquences du barrage encastree à la base.

mode	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	MASS FRACTION	TOTAL MASS
1	3.53872	0.28259	1314.7	0.009576	0.172835E+07	0.720250E-04	0.462551E-04
2	3.55459	0.28133	0.13729E+06	1.000000	0.188473E+11	0.785493	0.504405
3	3.69737	0.27046	-407.32	0.002967	165906.	0.785500	0.444009E-05
4	3.93454	0.25416	-130.65	0.000952	17069.4	0.785501	0.456821E-06
5	4.18652	0.23886	-8023.7	0.058445	0.643797E+08	0.788184	0.172297E-02
6	4.30030	0.23254	-51.910	0.000378	2694.65	0.788184	0.721160E-07
7	4.38375	0.22811	24978.	0.181940	0.623887E+09	0.814183	0.166969E-01
8	4.44706	0.22487	-36.613	0.000267	1340.55	0.814183	0.358766E-07
9	4.71304	0.21218	-6647.0	0.048417	0.441825E+08	0.816024	0.118244E-02
10	4.76950	0.20967	-1.9316	0.000014	3.73123	0.816024	0.998575E-10

Tableau 4.2. Les 10 premières fréquences du barrage avec sol de fondation.

Les figures 4.4 et 4.5 montrent le positionnement du mode fondamentale des deux hypothèses considérées (barrage encastré sans interaction sol structure et barrage avec sol de fondation).

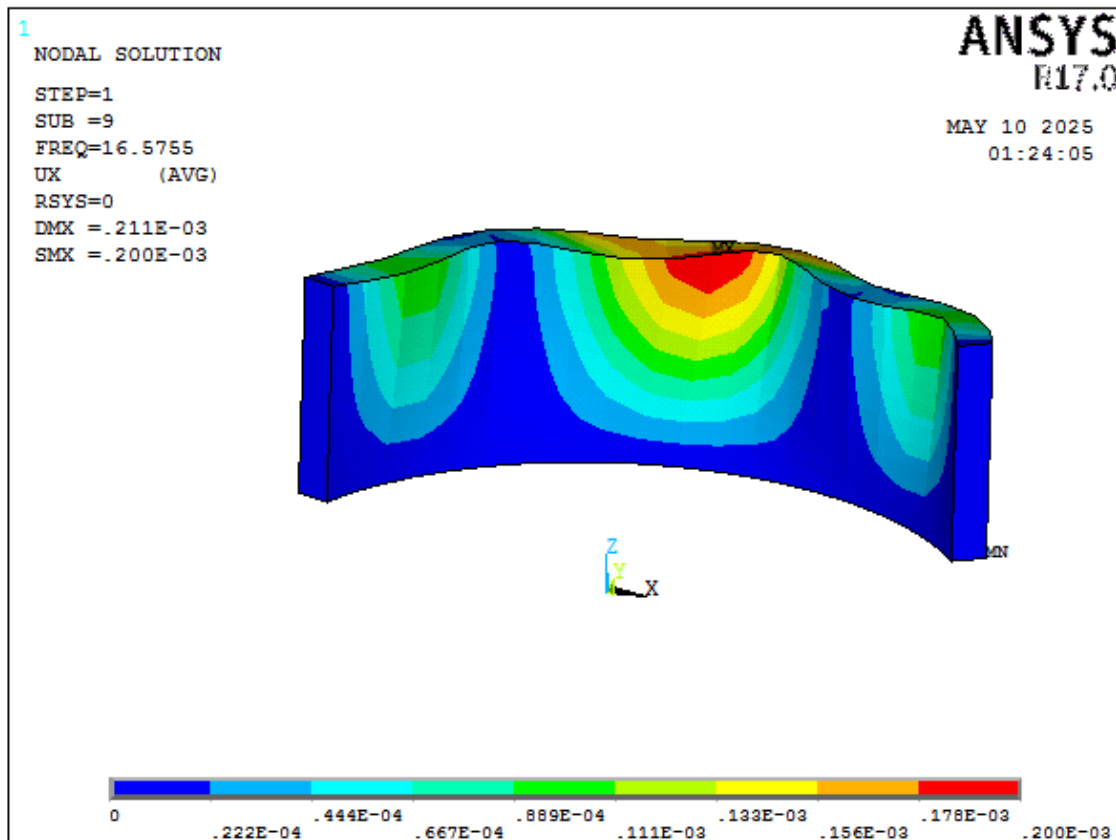


Fig. 4.4. Le mode fondamentale du barrage encastré (mode 9)

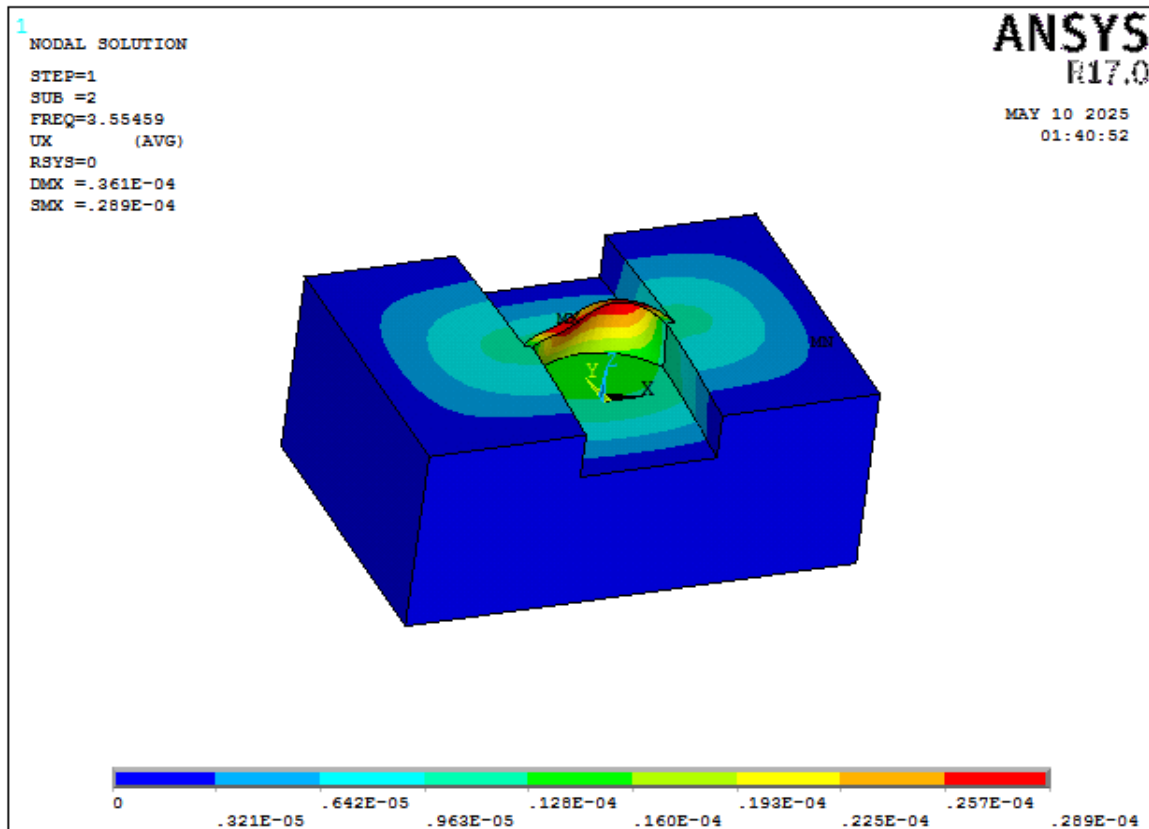


Fig. 4.5. Le mode fondamentale du barrage avec sol (mode 2)

Le tableau suivant donne une comparaison entre les périodes des deux hypothèses étudiées à savoir le barrage seul à base encastree et le barrage avec sol de fondation :

Mode	Périodes du barrage seul encastree (s)	Périodes du barrage avec sol (s)
1	0.17567	0.28259
2	0.16527	0.28133
3	0.12749	0.27046
4	0.10277	0.25416
5	0.74905E-01	0.23886
6	0.73360E-01	0.23254
7	0.69220E-01	0.22811
8	0.61954E-01	0.22487
9	0.60330E-01	0.21218
10	0.55311E-01	0.20967

Tableau 4.3. Comparaison entre les périodes des deux hypothèses.

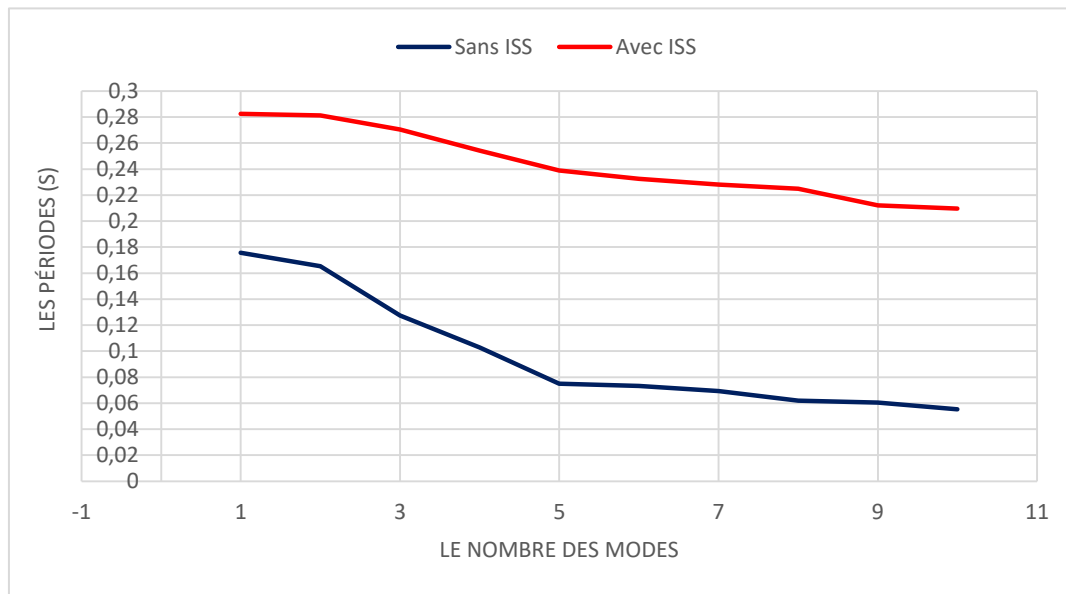


Fig. 4.6. Effets de l'interaction sol structure sur le comportement modal du barrage.

D'après les **tableaux et la figure 4.6**, on remarque que :

- ✚ Le barrage à base encasté (sans prise en compte des effets de l'interaction sol structure) présente des fréquences plus élevées que le barrage avec sol (avec considération de l'interaction sol structure). Cela signifie qu'il est plus rigide car aucune déformabilité de la fondation n'est considérée.
- ✚ Les périodes propres augmentent lorsque le sol de fondation est pris en compte avec sa masse ceci signifie que L'ajout du sol de fondation introduit une flexibilité supplémentaire, ce qui diminue les fréquences et augmente les périodes propres.

D'après les figures **4.4 et 4.5** on constate que la modélisation du sol de fondation pour prendre en considération les effets de l'interaction sol structure non seulement augmente la masse totale de la structure (barrage avec sol de fondation) ce qui engendre une diminution des fréquences propres et par conséquent une augmentation des périodes propres mais aussi modifie le positionnement du mode fondamentale qui est le mode qui entraîne le maximum de masse.

❖ **Conclusion générale de l'analyse :**

Sans ISS (encastré)	Avec ISS (sol de fondation)
Structure plus rigide	Structure plus souple et flexible
Fréquence plus élevées	Fréquence plus faible
Périodes plus courte	Périodes plus longues
Mode fondamental plus élevée (mode9)	Mode fondamental plus bas (mode 2)

L'interaction sol-structure a un impact significatif sur le comportement dynamique du barrage. Il est donc essentiel de la prendre en compte dans toute étude sismique ou vibratoire sérieuse.

4.4. Etude du comportement transitoire du barrage :(analyse transitoire)

4.4.1. Signal sismique (EL CENTRO) :

Pour faire un analyse transitoire on applique un signal sismique "El Centro" la composante (North-South), comme il est montré dans la figure suivante :

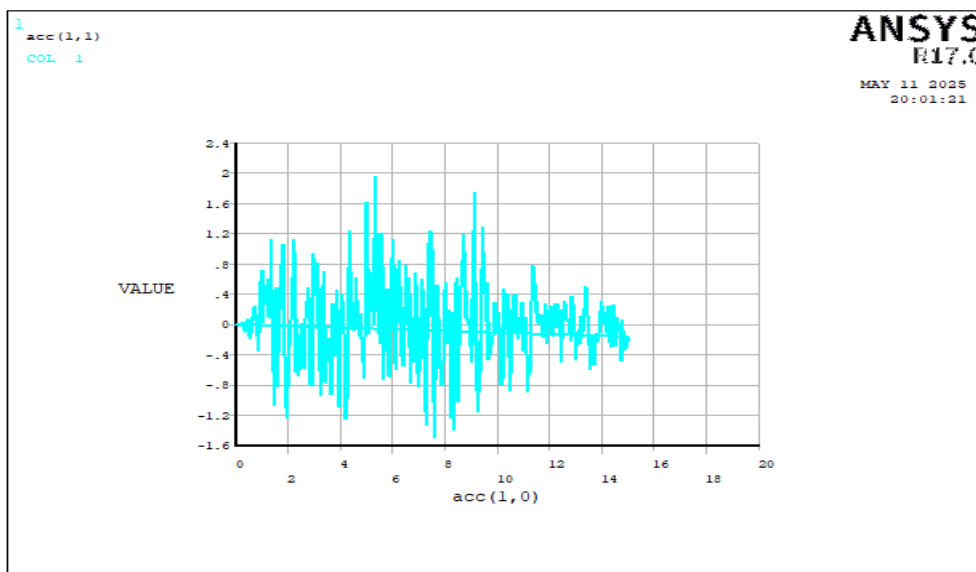


Fig. 4.7. Signal sismique (El Centrocomposantes (N-S)).

- Nom complet : Imperial Valley Earthquake - El Centro Recording
- Date: 18 mai 1940
- Lieu : El Centro, Californie, États-Unis
- Composantes disponibles : généralement les trois composantes (N-S, E-O et verticale)
- Durée: Environ 50 secondes d'enregistrement

- Station d'enregistrement : Array Station 9, El Centro
- Composante la plus utilisée : N-S (North-South), car c'est la plus intense
- Accélération maximale (PGA) : Environ 0.35 g pour la composante N-S

Cet accélérogramme est considéré comme une référence historique dans le domaine du génie sismique, notamment parce que c'était l'un des premiers enregistrements forts d'un séisme utilisé pour le dimensionnement sismique des structures [25].

4.4.2. Barrage avec sol de fondation :

Dans le **modèle du barrage**, les déplacements du **nœud (node) 1470** qui appartient au corps du barrage (la crête) sont montrés dans les fig. 4.8, fig. 4.9.

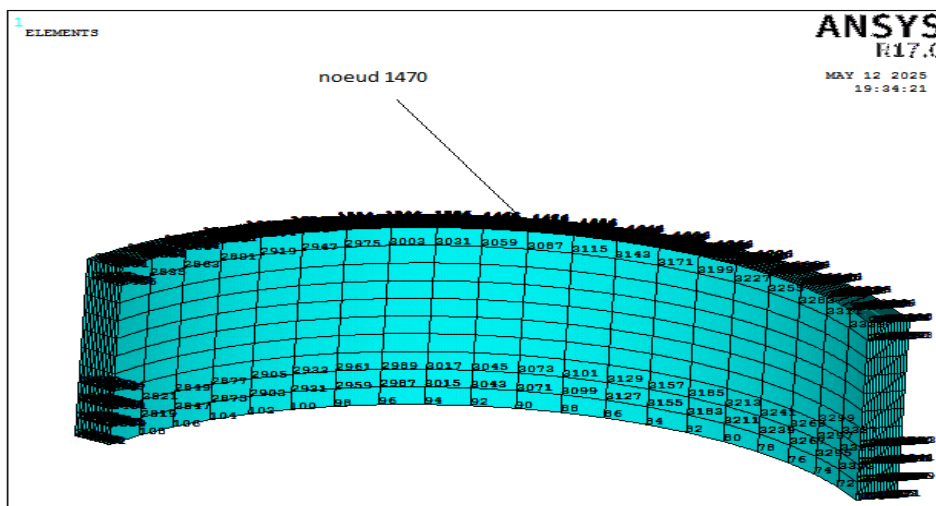


Fig.4.8. nœud 1470.

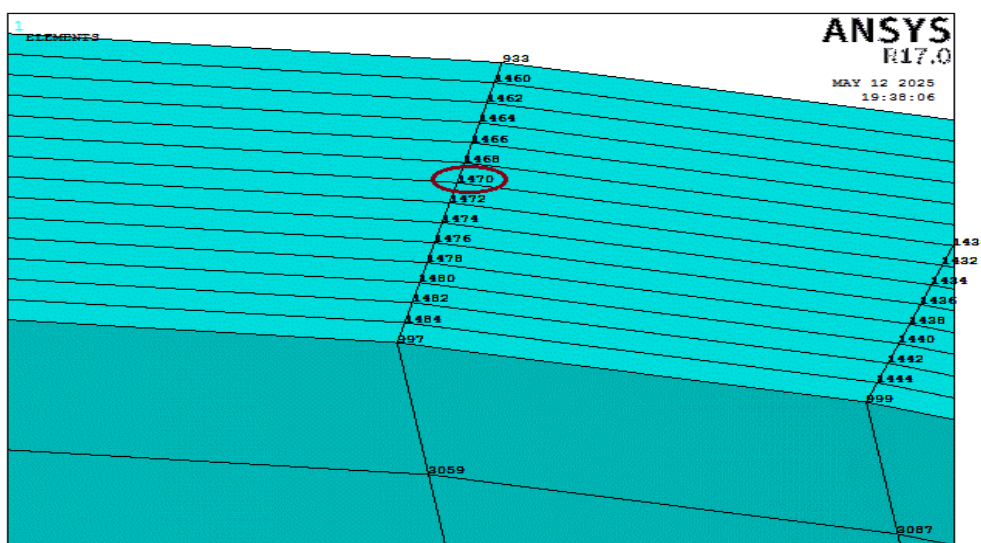


Fig.4.9. Nœud 1470.

Les déplacements suivant x, y,z du nœud 1470 sont montrés dans les figures 4.10, 4.11 et 4.12 Suivantes.

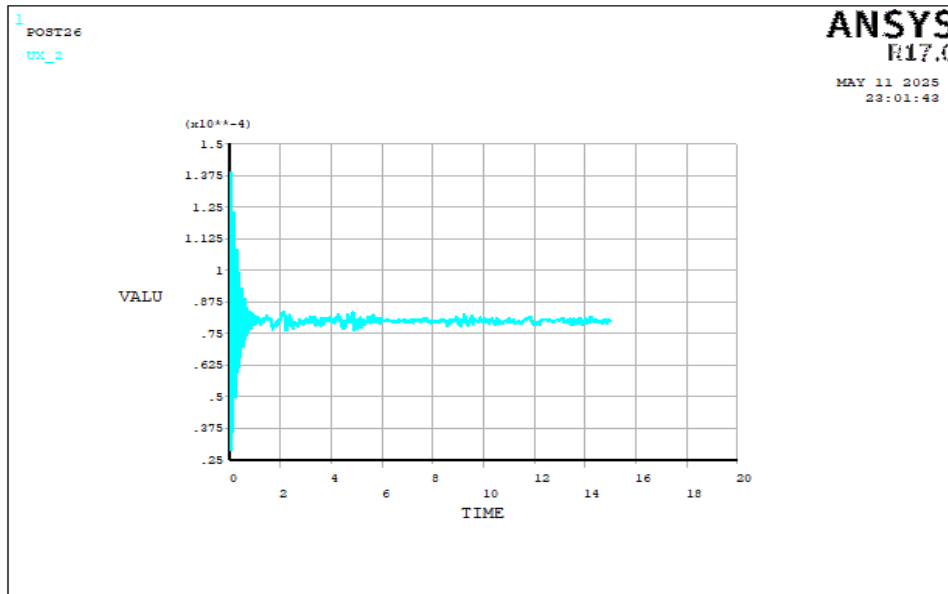


Fig.4.10. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction x.

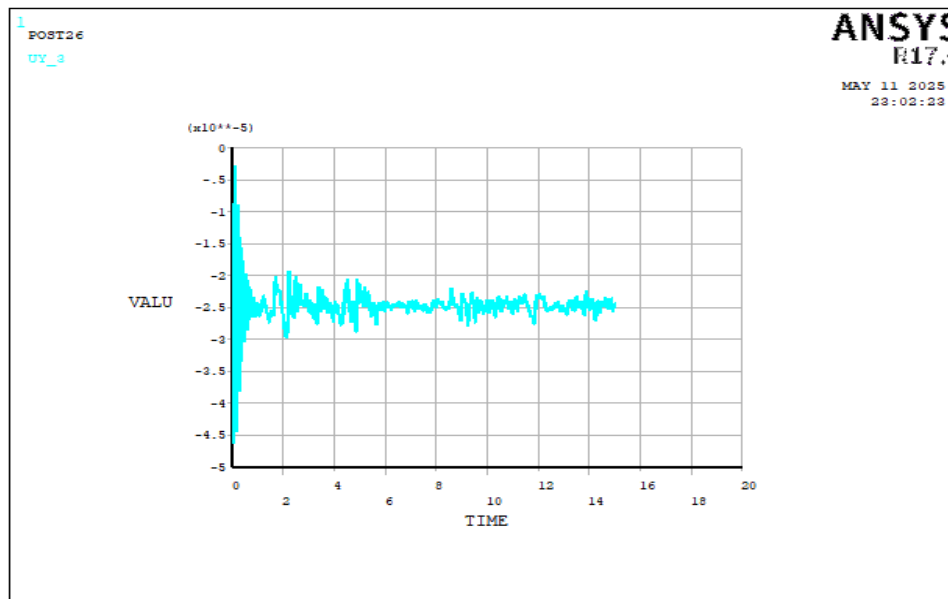


Fig.4.11. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction y.

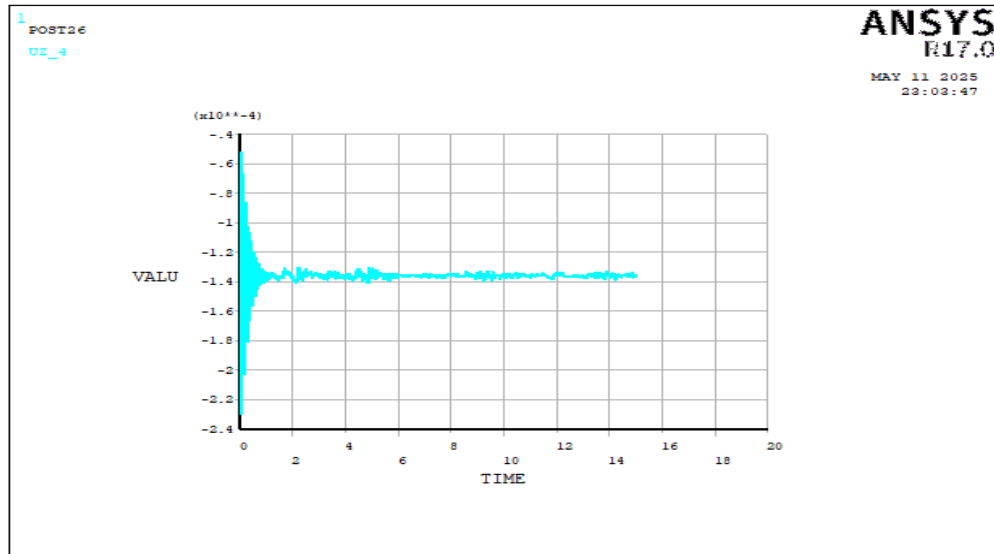


Fig.4.12. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction z.

Les contraintes suivant x, y, z du nœud 1470 sont montrés dans les figures 4.13, 4.14 et 4.15.

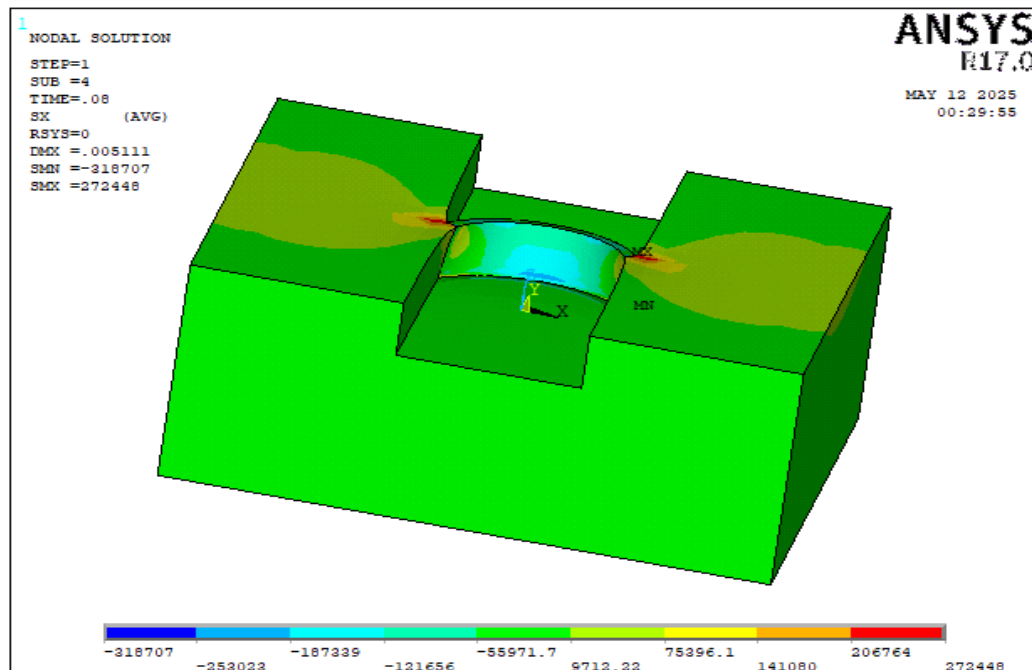


Fig.4.13. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction x.

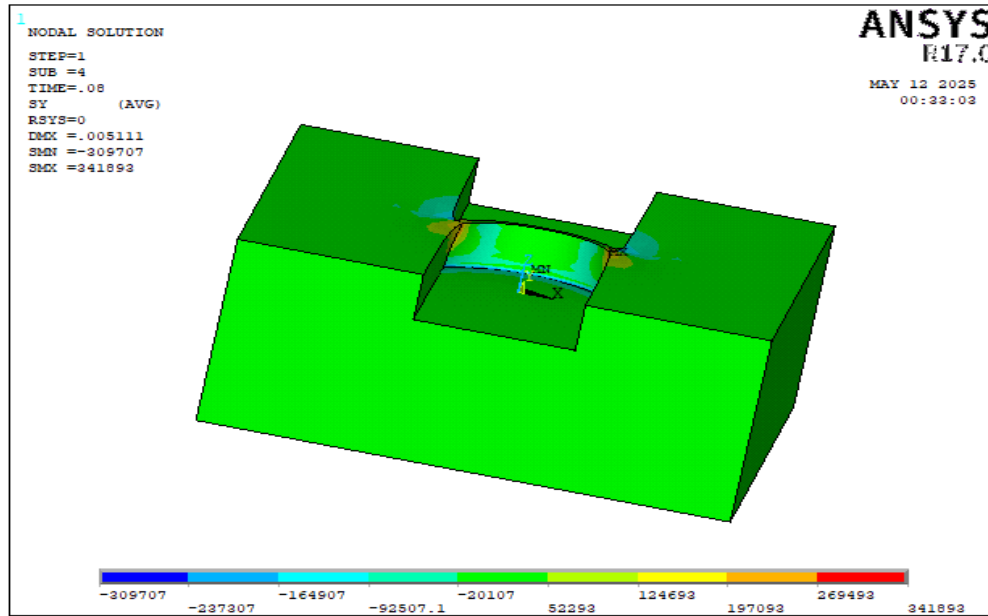


Fig.4.14. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction y.

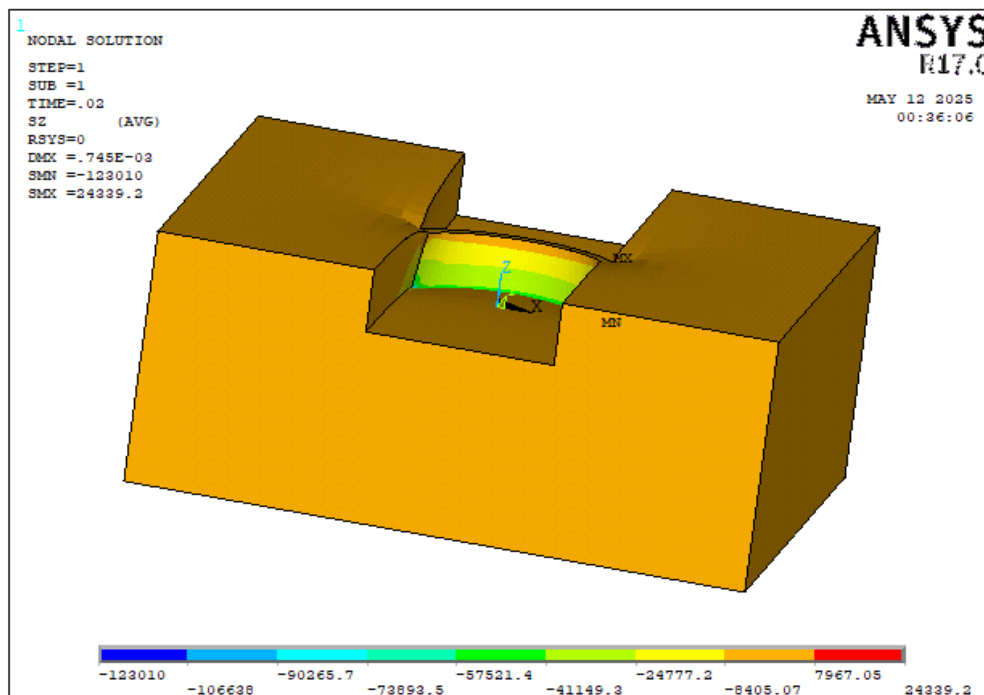


Fig.4.15. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction z.

4.4.3. Barrage à base encastrée :

Les déplacements selon les directions x, y et z du nœud 1470 sont illustrés dans les figures 4.16, 4.17 et 4.18 respectivement.

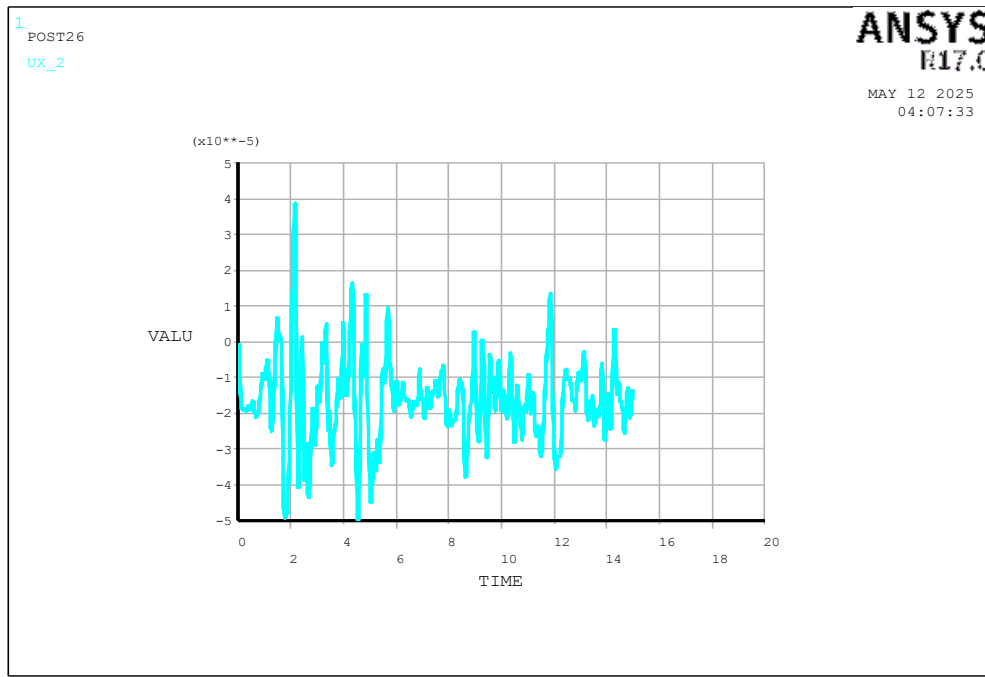


Fig.4.16. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction X.

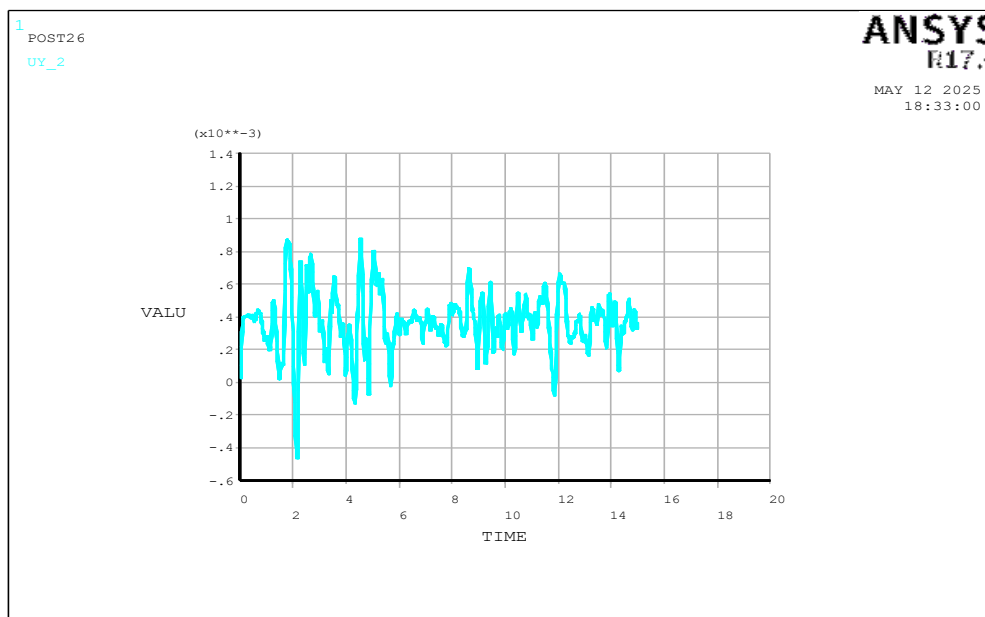


Fig.4.17. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction Y.

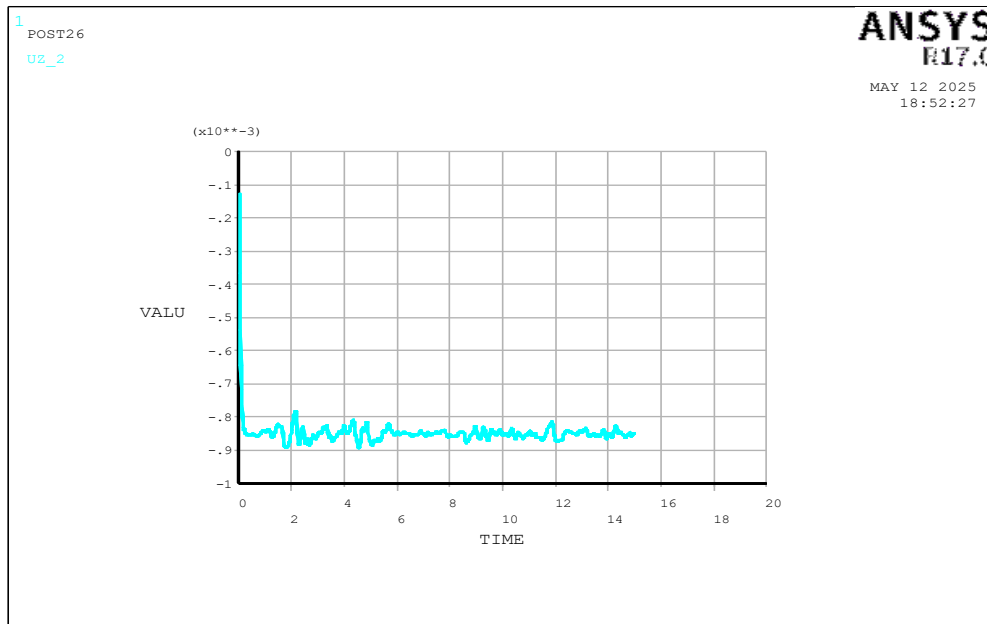


Fig.4.18. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction Z.

Les contraintes suivant x, y, z du nœud 1470 montre au figures 4.19, 4.20 et 4.21.

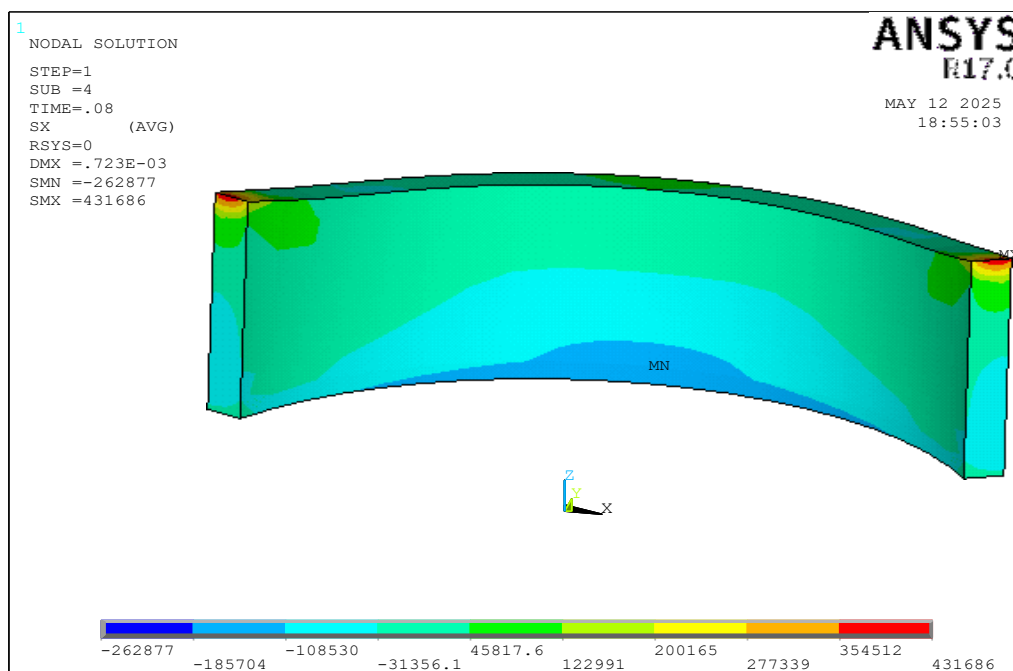


Fig.4.19. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction x.

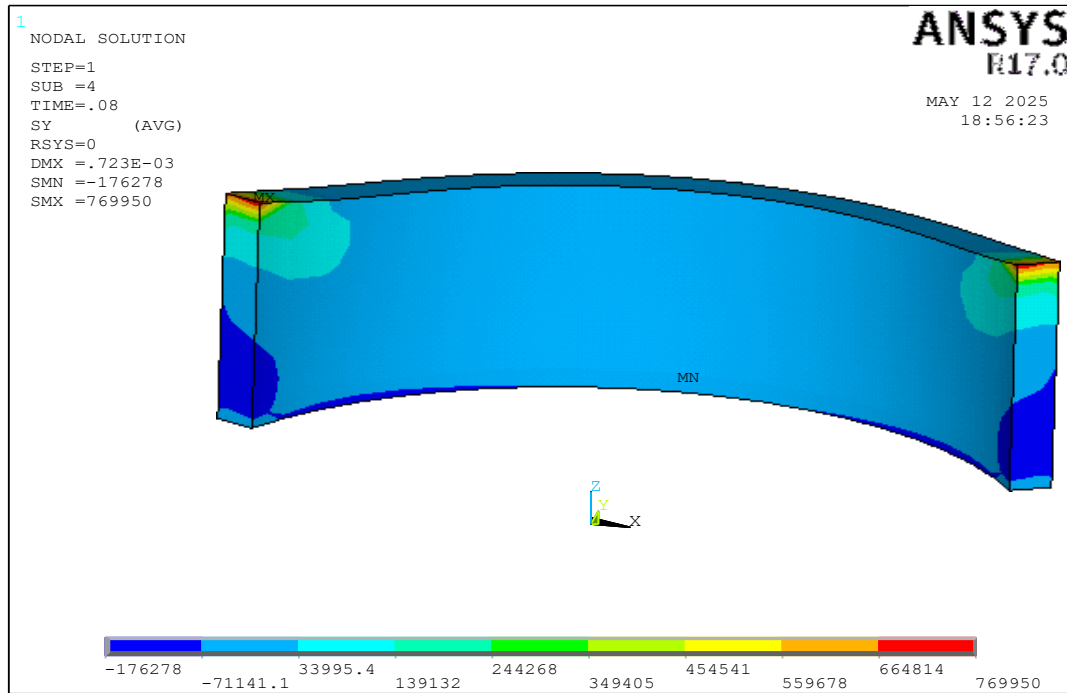


Fig.4.20. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction y.

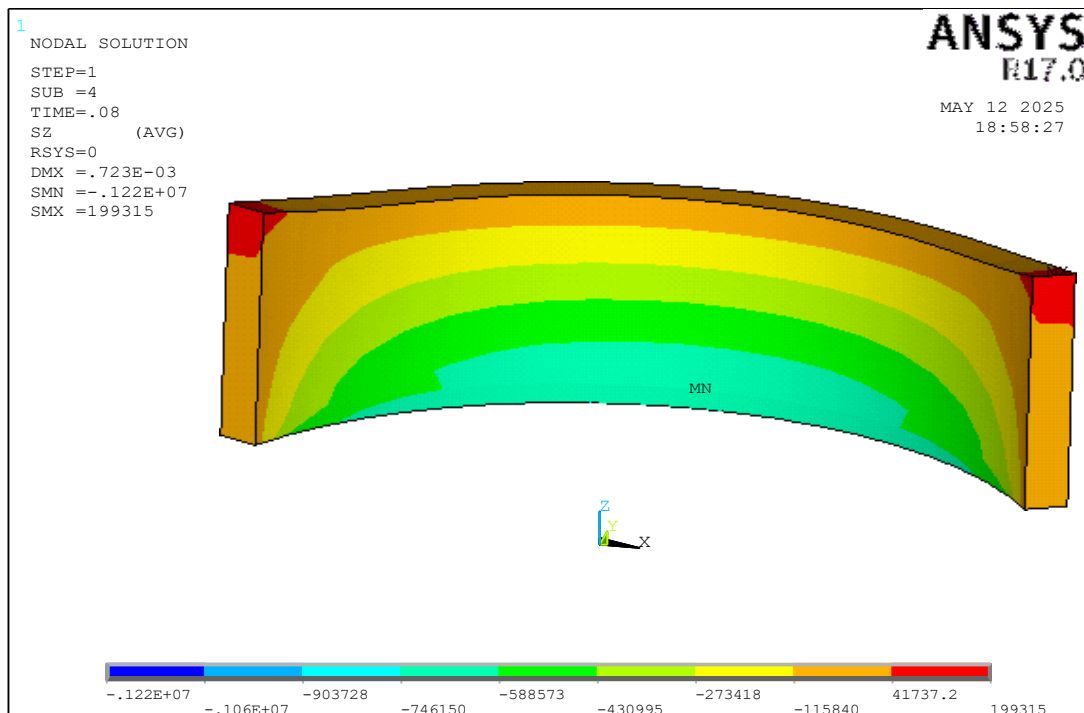


Fig.4.21. Variation des contraintes du nœud 1470 suivant la direction z.

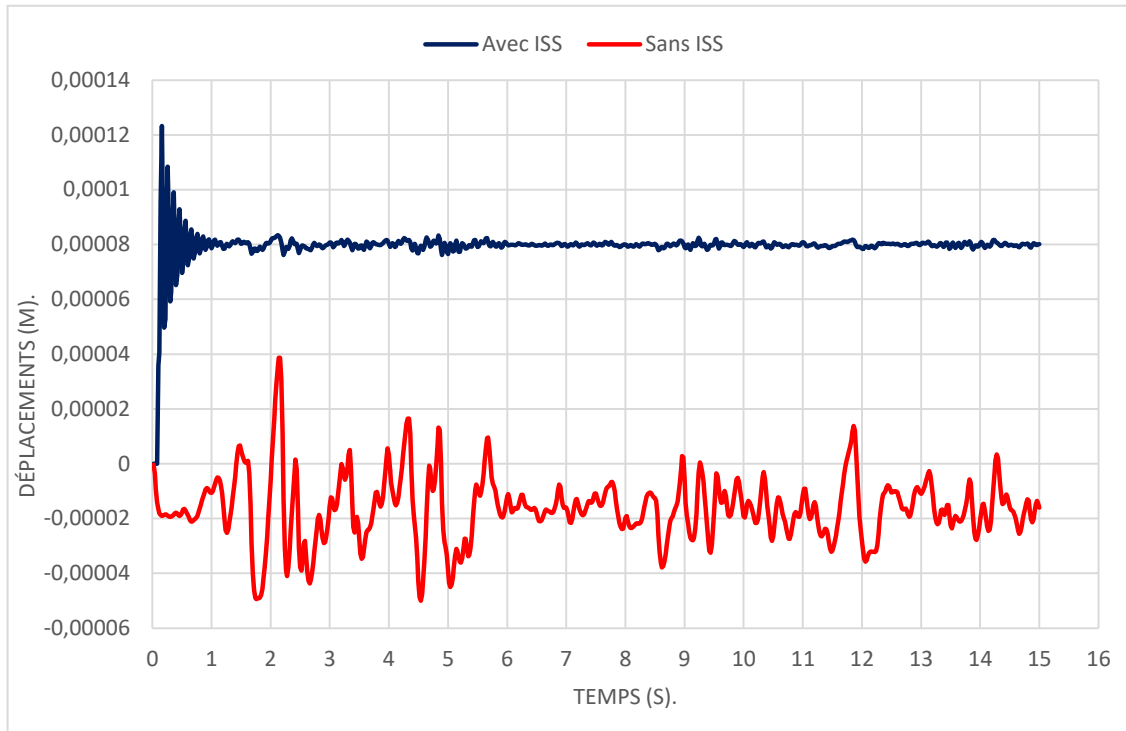


Fig.4.22. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction x avec et sans interaction sol structure.

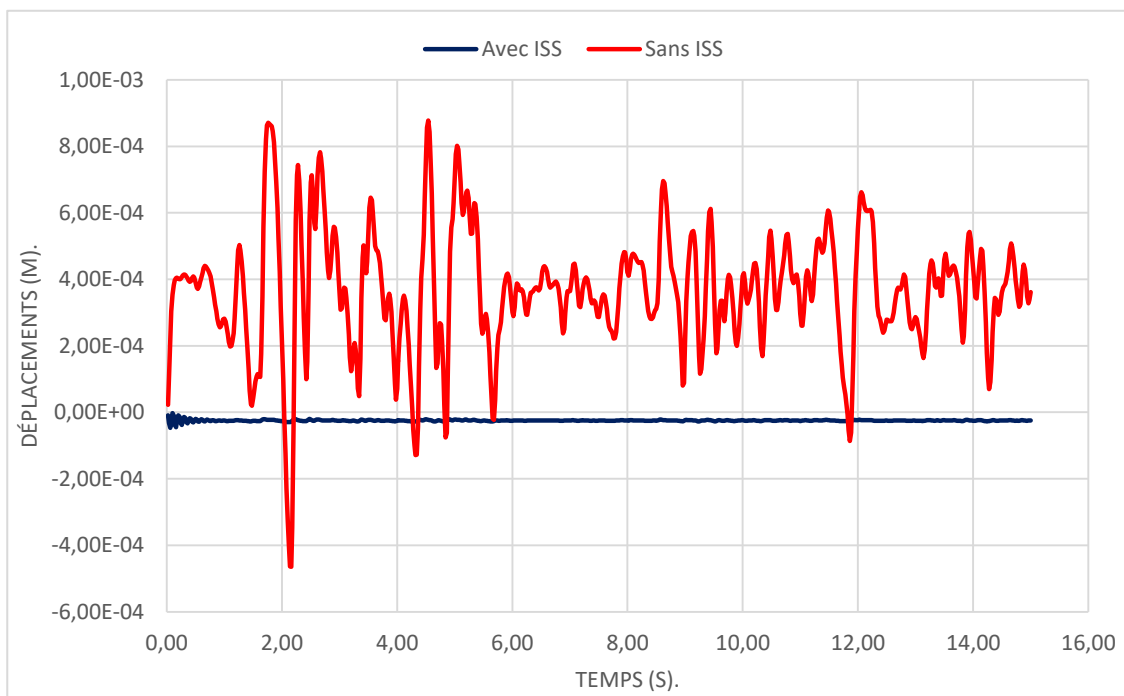


Fig.4.23. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction y avec et sans interaction sol structure.

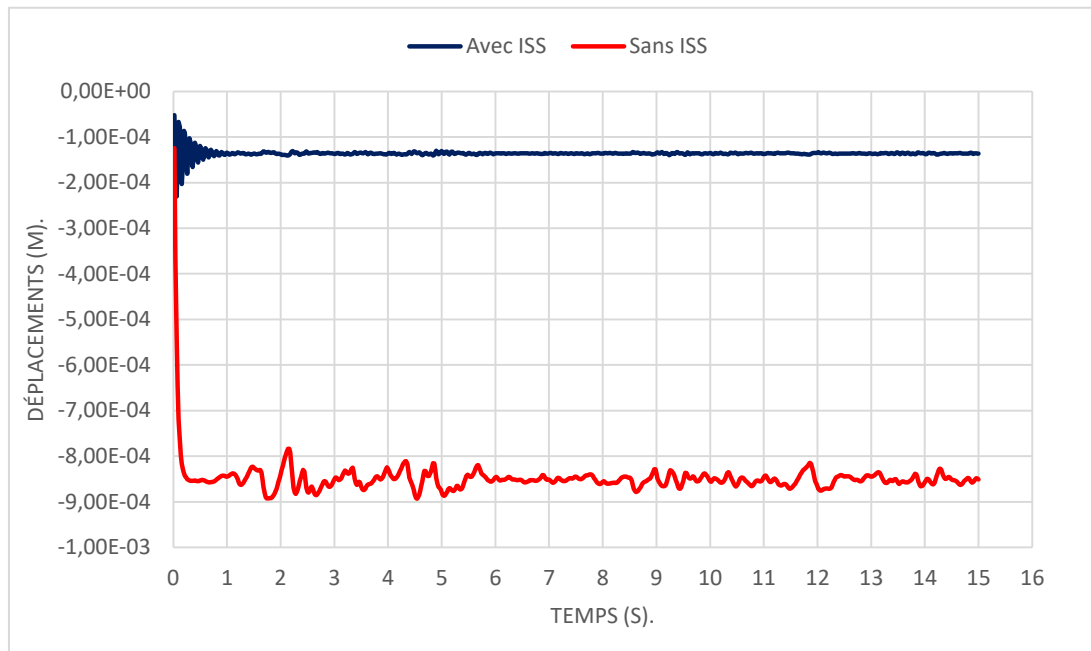


Fig.4.24. Variation des déplacements du nœud 1470 suivant la direction z avec et sans interaction sol structure.

D'après les figures 4.10, 4.11 et 4.12, du barrage avec sol et les figures 4.16, 4.17 et 4.18 du barrage à base encasté qui illustrent les déplacements suivant les directions x, y et z du nœud 1470, et les figures 4.22, 4.23 et 4.24, qui montrent la comparaison entre les déplacements du barrage sans interaction sol structure et le barrage avec interaction sol structure, on remarque que l'ajout de l'interaction sol-structure modifie le comportement global du barrage, influençant notamment les déplacements enregistrés dans les trois directions principales.

Les déplacements suivant x, y et z sont supérieurs à celui observé dans le cas du barrage encasté c.à.d. sans interaction sol structure cela s'explique par la prise en compte du sol qui introduit une certaine flexibilité au barrage pour se déplacer librement.

Le déplacement transversal suivant y est plus important il est de valeur 8×10^{-4} m, ce qui est attendu car c'est la direction de la petite inertie.

Le déplacement vertical suivant z est légèrement plus marqué que dans le cas du barrage encastré. Cette augmentation est due à la compressibilité du sol, qui permet une certaine descente verticale du barrage sous son poids propre. Bien que cette composante reste modérée, elle souligne l'importance de considérer l'élasticité du sol dans l'analyse de l'interaction sol-structure.

On remarque une variation importante des périodes et des déplacements du barrage lorsque le module de Young diminue (d'une valeur infinie lorsque le barrage est supposé encastré dans la roche vers une valeur de $6.22 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dans le cas où le barrage repose sur un sol de fondation).

On remarque dans les figures **4.19, 4.20 et 4.21** du barrage à base encastré et les figures **4.13, 4.14 et 4.15** du barrage avec sol qui donnent l'enveloppe des contraintes qu'elles sont maximales au niveau des parois du barrage à base encastré et les le contacte des parois avec sol de fondation.

4.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, l'effet de l'interaction sol structure a été étudié sur le barrage voute d'Oued Taht.

Deux hypothèses ont été entamées ; la première est de supposer le barrage encastré à sa base et la deuxième est de considérer le sol comme fondation d'assise. Pour les deux cas de types d'analyses ont été réalisées ; analyse modale et analyse transitoire.

L'introduction de l'interaction sol-structure permet de mieux représenter la réalité physique. Bien que cela entraîne des déplacements légèrement plus élevés, cela améliore la fiabilité du modèle en tenant compte de la souplesse et de la réaction du sol. Le barrage encastré offre une vision plus rigide, tandis que le barrage avec sol reflète un comportement plus réaliste des structures hydrauliques.

*CONCLUSION
GÉNÉRALE*

Conclusion Générale

L'étude menée dans ce mémoire a permis de mettre en évidence l'importance de l'interaction sol-structure dans le comportement dynamique des barrages voûtes, en particulier dans les zones à risque sismique.

À travers l'analyse comparative des résultats du calcul modale et transitoire entre l'hypothèse de base encastree et celle prenant en compte l'interaction complète avec le sol, appliquée au cas réel du barrage **OUED TAHT** à Mascara, il a été démontré que l'hypothèse d'une base rigide peut sous-estimer significativement la réponse sismique de l'ouvrage.

La modélisation numérique effectuée avec le logiciel **ANSYS** a révélé des différences notables en termes de périodes propres, déplacements et contraintes entre les deux approches, car la prise en compte des effets de l'interaction sol structure a donné une diminution des fréquences et par la suite une augmentation remarquable des périodes propres et des déplacements du barrage.

Ces résultats soulignent la nécessité d'intégrer l'effet du sol dans les phases de conception et de vérification des barrages voûtes afin d'assurer leur stabilité et leur sécurité à long terme.

En définitive, ce travail apporte une contribution modeste mais pertinente à la compréhension des phénomènes d'interaction sol-structure, tout en proposant une méthodologie de modélisation applicable à d'autres ouvrages similaires.

Il ouvre également la voie à de futures recherches plus approfondies, notamment en intégrant le comportement non linéaire des matériaux, les effets de l'eau et les particularités géotechniques locales.

RÉFÉRENCE
BIBLIOGRAPHIES

Référence et Bibliographie

- [1] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [2] G. Gazetas, "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 9, pp. 1363–1381, Sept. 1991.
- [3] J. P. Wolf, *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [4] E. Kausel, "Soil–structure interaction," in *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, M. Beer, I. A. Kougoumtzoglou, E. Patelli, and S. Au, Eds. Berlin, Germany: Springer, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_285-1
- [5] D. Garbrecht, "Historical development of dams," in *Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century*, 1st ed., A. Schumann and M. H. Mahmoud, Eds. London, U.K.: Taylor & Francis, 2006, pp. 3–9.
- [6] U.S. Bureau of Reclamation, *Hoover Dam: Frequently Asked Questions*. U.S. Department of the Interior, 2020. [Online]. Available: <https://www.usbr.gov/lc/hooverdam/faqs>
- [7] China Three Gorges Corporation, *Three Gorges Project Overview*, 2021. [Online]. Available: <https://www.ctg.com.cn/en/project/hydro/3gorges.html>
- [8] Itaipu Binacional, *Itaipu Dam: Technical Information and Energy Production*, 2021. [Online]. Available: <https://www.itaipu.gov.br/en/energy/production>
- [9] Egyptian Ministry of Water Resources and Irrigation, *High Aswan Dam – Project Overview*, 2020. [Online]. Available: <http://www.mwri.gov.eg/high-aswan-dam/>
- [10] G. B. Crosta, P. Dal Negro, and A. Frattini, "Vajont 1963 landslide: A retrospective on the prediction, prevention and consequences," *Landslides*, vol. 1, no. 1, pp. 51–61, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0006-6>
- [11] Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique (Algérie), *Stratégie nationale de mobilisation des ressources en eau à l'horizon 2030*, 2021. [Online]. Available: <http://www.mre.gov.dz/fr/publications>
- [12] Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT), *Liste des barrages en exploitation en Algérie*, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.anbt.dz>
- [13] Ministère de l'Hydraulique, *Les buts des barrages*, [schéma], Direction des barrages, Alger, 2015.

Référence et Bibliographie

- [14] M. Nouaouria, *Génie civil – Ouvrages hydrauliques*, Éditions Techniques du Bâtiment, Alger, 2018.
- [15] A. Lefebvre, *Hydraulique générale et barrages*, 3^e éd., Presses des Ponts, Paris, 2014.
- [16] J.-P. Gourc, *Ouvrages hydrauliques et barrages*, Éditions Eyrolles, Paris, 2012.
- [17] M. Lino, *Conception et calcul des barrages en béton*, Presses de l'ENPC, Paris, 2011.
- [18] P. André, *Barrages en remblai : conception, construction et entretien*, Éditions CSTB, Paris, 2013.
- [19] B. Maïni, *Techniques de construction des barrages*, 2^e éd., Dunod, Paris, 2016.
- [20] Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams*, FEMA 65, Washington, D.C., USA, 2005.
- [21] U.S. Army Corps of Engineers (USACE), *Engineering and Design - Earthquake Design and Evaluation for Civil Works Projects*, Engineer Manual EM 1110-2-6050, Washington, D.C., USA, 1999.
- [22] ICOLD, *Selecting Seismic Parameters for Large Dams – Guidelines*, Bulletin 148, International Commission on Large Dams, Paris, 2016.
- [23] Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, *Règlement Parasismique Algérien (RPA 99 - version 2003, révisée en 2010)*, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), Alger, Algérie, 2010.
- [24] M. A. Achoui et N. Bensmain, « Management des risques dans les projets de barrages par la méthode MADS-MOSAR : Cas de barrage voûte mince d'Oued Taht, Wilaya de Mascara », Mémoire de Master, Département de Génie Civil, Université Abou BekrBelkaid – Tlemcen, Algérie, juin 2014.
- [25] U.S. Coast and Geodetic Survey, *El Centro Earthquake Accelerogram – Imperial Valley Earthquake, May 18, 1940*. El Centro, California, USA : Array Station 9, 1940.