

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة البحث العلمي و التعليم العالي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de technologie
Département de génie civil



Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master II
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : GENIE CIVIL
Spécialité : VOIES ET OUVRAGES D'ART

Thème

*Etude dynamique d'interaction sol-fluide-
structure appliquée aux barrages*

Présenter par :

- BENFEKIH Anis Nabil
- FEKIH Abdelnour

Soutenu en juin 2019 devant le jury :

D ^r ATTIA Amina	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
D ^r KAMECHE Zine El Abidine	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
D ^r TAHAR BERRABAH Amina	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadreur

الملخص

الهدف من هذا العمل هو تحليل السلوك الديناميكي (سلوك مشروط) للسد الذي استلهم شكله الهندسي من السد متعدد القبعات "المفروش". تم اختيار رمز العناصر المحدودة "Ansys" للنمذجة الديناميكية للسد موضوع هذه الدراسة. تم افتراض ثلاث فرضيات لنمذجة تفاعل بنية التربة ؛ نموذج بقاعدة مثبتة ، نموذج مع تربة الأساس دون كتلة ونموذج مع الأساس مع احد كتلة تربة الاساس بعين الاعتبار. فيما يتعلق بنمذجة تفاعل بنية السائل ، تم استخدام نموذج الكتل المضافة ، وتم ضمان ذلك باستخدام عنصر SURF 154 المتاح في مكتبة "Ansys". تم إجراء مقارنة للنتائج بين النماذج المختلفة واستخلاص النتائج.

الكلمات المفتاحية: السد ، بنية تفاعل التربة ، بنية تفاعل السائل ، Ansys

RESUME

Le but de ce travail est d'analyser le comportement dynamique (comportement modale) d'un barrage dont la géométrie est inspirée de celle du barrage multi voûtes « El Mefrouche ». Le code élément finis « Ansys » est choisi pour la modélisation dynamique du barrage objet de la présente étude. Trois hypothèses ont été supposées pour la modélisation d'interaction sol-structure ; Modèle à base encastree, Modèle avec sol de fondation sans masse et Modèle avec sol de fondation avec masse. En ce qui concerne la modélisation de l'interaction fluide-structure le modèle des masses ajoutées est utilisé, ceci est assuré par l'utilisation de l'élément SURF 154 disponible dans la bibliothèque «Ansys». Une comparaison des résultats entre les différents modèles a été faite pour comprendre l'effet d'interaction sol-structure ainsi que celui d'interaction fluide structure sur le comportement du modal barrage.

Mots clé : Barrage, interaction sol structure, interaction fluide structure, Ansys

ABSTRACT

The aim of this work is to analyse the dynamic behavior (modal behavior) of a dam whose the geometry is inspired from that of "El Mefrouche" multi-arch dam. The finite element code "Ansys" is chosen for the dynamic modeling of the dam object of the present study. Three approaches have been assumed for soil-structure interaction modeling; model with fixed base, Model with foundation without mass and Model with foundation with mass.

For fluid-structure interaction modeling, the added masses approach is used, this is ensured by the use of the SURF 154 element available in the "Ansys" library. Comparison between results of different models was made to understand the soil –structure interaction and the soil-fluid interaction on the dam modal behavior.

Keywords: Dam, soil structure interaction, fluid structure interaction, Ansys

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions Allah qui nous a procuré ce succès.

A travers ce modeste travail; nous tenons à remercier notre encadreur Mme : TAHAR BERRABAH .A ces conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'elle nous a apportées durant notre réalisation de ce projet.

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

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude. Sans omettre bien sur de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire:

A mes très chers parents, pour leur sacrifices et leur encouragements, et qui grâce à eux j'ai pu achever mes études.

A ma très cher sœur hidaïet et à mon frère zakí sans oublier mes oncles Abderrahím et Choukri

A toute la famille BENABADJI et SETTOUTI.

A tous mes amis, ma famille, et en particuliers : Boumi, zakí, ryadh, othman et salim.

Enfin a tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et à ce qui me son chers.

FEKIH Abdelnour

Dédicaces

Je dédie ce mémoire:

A mes très chers parents, pour leur sacrifices et leur encouragements, et qui grâce à eux j'ai eu cette réussite.

A ma chère femme, pour ces encouragements, et mes deux chers petits enfants, Ilyes et Miral.

A mon très cher frère Fayçal.

Enfin à tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et à ce qui me son chers.

BENFEKIH Anis

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I: INTRODUCTION AU PROBLEME D'INTERACTION SOL-FLUIDE-STRUCTURE

I.1 INTRODUCTION 3

I.2 DEFINITION DU PHENOMENE D'INTERACTION SOL-STRUCTURE 3

I.3 METHODES D'ANALYSE DU PHENOMENE D'INTERACTION SOL-STRUCTURE 5

I.4 FONCTIONS D'IMPEDANCE : 9

I.5 LES COMPOSANTES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE : 9

I.6 METHODES D'ANALYSE DU PHENOMENE D'INTERACTION FLUIDE-STRUCTURE 11

I.6.1 La méthode de masse ajoutée : 12

I.6.2 Approche de Lagrange 13

I.6.3 Approche d'Euler..... 13

I.6.3.1 Effet d'inertie : 13

I.6.3.2 Effet de compressibilité : 13

I.6.3.3 Effet de viscosité : 14

I.7 CONCLUSION : 14

CHAPITRE II : Etat De L'art Sur Les Travaux D'interaction Sol-Fluide-Structure (Barrage)

II.1 INTRODUCTION 15

II.2 ETAT DE L'ART 15

II.3 CONCLUSION 18

CHAPITRE III Présentation du Barrage El Mefrouche

III.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE 19

III.2 NOTION SUR LE BARRAGE DE MEFROUCHE 19

III.3 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE L'OUVRAGE 20

III.4 APPLICATION DE LA PREFABRICATION A LA CONSTRUCTION D'UN BARRAGE A VOUTES MULTIPLES LE BARRAGE DU MEFFROUCH, EN ALGERIE 20

III.5 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BARRAGE, AVEC DECOUPAGE DES ELEMENTS DE L'OUVRAGE EN BLOCS PREFABRIQUE. 25

III.6 CONCLUSION 28

CHAPITRE IV : Modélisation Ansys du Barrage multi voûte (géométrie inspirée du barrage El Mafrouch)

IV.1 INTRODUCTION 29

IV.2 PROBLEMES DE DYNAMIQUE DES STRUCTURES PAR ANSYS 29

IV.3 LES ETAPE DES MODELISATIONS 30

IV.4 MODELISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE 37

IV.5 MODELISATION ELEMENTS FINIES DE BARRAGE ET DU SOL DE FONDATION 37

IV.6 MODELE ELEMENT FINIS DU BARRAGE AVEC SOL DE FONDATION 37

IV.7 MODELISATION DE L'INTERACTION FLUIDE STRUCTURE 39

IV.8 CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE L'ÉLÉMENT SURF154 40

IV.9 CONCLUSION 40

CHAPITRE V : Interprétations des résultats

V.1 INTRODUCTION 41

V.2 DEFINITION DE QUELQUES PARAMETRES UTILISES DANS L'ANALYSE MODALE ET DONNES PAR LE CODE

ANSYS 41

V.2.1 Facteur de participation.....41

V.2.2 Masse effective.....41

V.2.3 Masse effective totale.....41

V.2.4 Rapport.....42

V.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS42

V.3.1 Barrage vide à base fixe.....42

V.3.2 Effet d'interaction sol structure sur le comportement modal du barrage.....44

V.4 EFFET D'INTERACTION FLUIDE STRUCTURE SUR LE COMPORTEMENT MODAL DU BARRAGE MULTI-VOUTE

48

V.4.1 Barrage seul.....48

V.4.2 Le barrage avec sol sans masse.....49

V.4.3 Le barrage avec sol avec masse.....51

V.5 CONCLUSION 53

CONCLUSION GENERALE 55

Introduction générale

Les mouvements sismiques du sol ainsi que les efforts et les déplacements qu'ils imposent aux structures sont parmi les actions les plus délicates à décrire dans le domaine de la construction et du génie civil. Leurs origines physiques tout d'abord, liées à la tectonique des plaques et aux ruptures de l'écorce terrestre engendrées en profondeur, restent encore mal connues et incomplètement expliquées même si la sismologie a fait de grands progrès depuis quelques dizaines d'années. Le problème est d'autant plus complexe que l'acte sismique qui s'exerce sur une structure ou un bâtiment décrit localement en terme de déplacement, vitesse ou accélération du sol, résulte de nombreux facteurs fort différents :

- La nature et la localisation des ruptures initiales (foyer du séisme).
- L'énergie totale libérée.
- La nature des sols traversés et celle du sol localement considéré avec les modifications subies par l'onde sismique.

Les barrages représentent des systèmes constructifs complexes, vu leurs dimensions, l'importance de leur caractère économique et stratégique. L'augmentation de la demande d'approvisionnement en eau, d'irrigation et d'énergie hydroélectrique propre, donne un intérêt important à la construction de nouveaux barrages. La construction de ces ouvrages en zone sismique, constitue un danger potentiel permanent pour les populations avoisinantes, et une préoccupation importante pour les gouvernements. En conséquence, il est important, voire nécessaire de développer des méthodologies d'approche indispensables pour leur étude dynamique, en vue de l'évaluation de leur performance et de leur sécurité sous l'action sismique. Les barrages, comme tout autre structure, présentent une certaine interaction sismique sol-structure, ainsi que l'interaction fluide-structure avec le réservoir d'eau de stockage.

L'étude du phénomène d'interaction sol-structure est un domaine vaste et complexe. En particulier, dans les études de cas des barrages poids en béton sous sollicitations sismiques, l'évaluation des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur le parement amont du barrage peut en fonction des hypothèses retenues, s'avérer une tâche particulièrement complexe.

La méthode des éléments finis constitue l'outil le plus puissant actuellement disponible pour l'analyse approfondie des systèmes sol-structure faisant intervenir notamment des conditions géométriques d'interface quelconques.

Dans les calculs de structures sous sollicitation sismiques avec interaction sol-structure, la pratique courante consiste à considérer un mouvement de champ libre uniforme en tout point de la surface du sol.

Les études qui ont été menées montrent qu'il ne faut pas négliger certains points parmi eux :

1. Le mouvement en champ libre ; mouvement mesuré à la surface du sol en absence de la structure est équivalent au mouvement excitant le support de la structure. Mais en réalité ce mouvement est influencé par le mouvement de la structure elle-même, donc il peut être différent du mouvement en champ libre.
2. Le sol est considéré indéformable, c'est-à-dire que le support est parfaitement encastré alors qu'il peut y avoir une translation en plus d'une rotation de ce support.

La réponse dépend donc non seulement des caractéristiques de la structure mais aussi des caractéristiques du milieu extérieur entourant sa base. Considérant les deux premières hypothèses, la structure ne transmet qu'une partie négligeable d'énergie et le mouvement à la base de la fondation est transmis directement au champ libre sans aucune modification, ceci n'est valable que pour une structure flexible fondée sur un sol rocheux.

L'objectif du présent mémoire est d'étudier une structure (barrage) en tenant compte de l'interaction sol-structure. Pour cela on a pris deux cas de figure ; une modélisation du barrage seule avec un encastrement à sa base, et une modélisation du barrage avec le sol environnant.

Le mémoire, est organisé en cinq chapitres, une introduction générale consacrée à la problématique. Dans le premier chapitre, nous avons fait une introduction au problème d'interaction sol-fluide-structure. Par la suite nous avons exposé, dans le chapitre deux, l'état de l'art sur les travaux d'interaction sol-fluide-structure (Barrage).

Dans le troisième chapitre, nous avons fait une présentation du cas d'étude (Barrage El Mefrouche).

Le quatrième chapitre, est destiné à la modélisation ANSYS du barrage multi voutes dont la géométrie est inspirée de celle du barrage El Mefrouche.

En fin dans le cinquième chapitre on a interprété les différents résultats des analyses.

I.1 Introduction

Au cours d'une analyse dynamique d'une structure située sur un dépôt de sol, on pourrait utiliser l'accélérogramme en champ libre comme mouvement à la base de la structure tout en considérant cette base rigide. Cette approche, bien qu'utilisée souvent en pratique, est douteuse particulièrement si la structure repose sur un dépôt de sol meuble très mou. En effet la présence de la structure modifie le mouvement du sol sous la fondation. La raison de ce changement tient au fait que le sol et la structure interagissent pour créer un nouveau système dynamique combiné ; cette interaction se nomme interaction sol-structure. [01]

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

La prévision des mouvements couplés du système barrage-réservoir sous actions sismiques ainsi que l'évaluation des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur le parement amont du barrage est une tâche particulièrement complexe, plusieurs méthodes ont été développées pour traiter ce phénomène, on peut citer la méthode de westergaard, méthode de lagrange et celle d'Euler. [02]

Dans les études de cas des barrages en béton sous sollicitations sismiques, la méthode des éléments finis constitue l'outil le plus puissant actuellement pour l'analyse approfondie des systèmes fluide-sol-structure faisant intervenir notamment des conditions géométriques d'interface quelconques ainsi le choix des variables. [3]

I.2 Définition Du Phénomène D'interaction Sol-Structure

Par rapport à la figure 1.1, le phénomène d'interaction sol-structure peut être défini comme suit : si le mouvement au point D situé à l'interface du système sol-structure lorsque la structure est absente (champ libre) diffère du mouvement qui aurait au même point avec présence d'une structure on dit qu'il y a un phénomène d'interaction sol-structure. Cette définition est très générale ; une définition plus précise peut être donnée tel que : si l'interface se déplace ou se déforme différemment par rapport à la surface correspondante au le champ libre, il y a interaction.

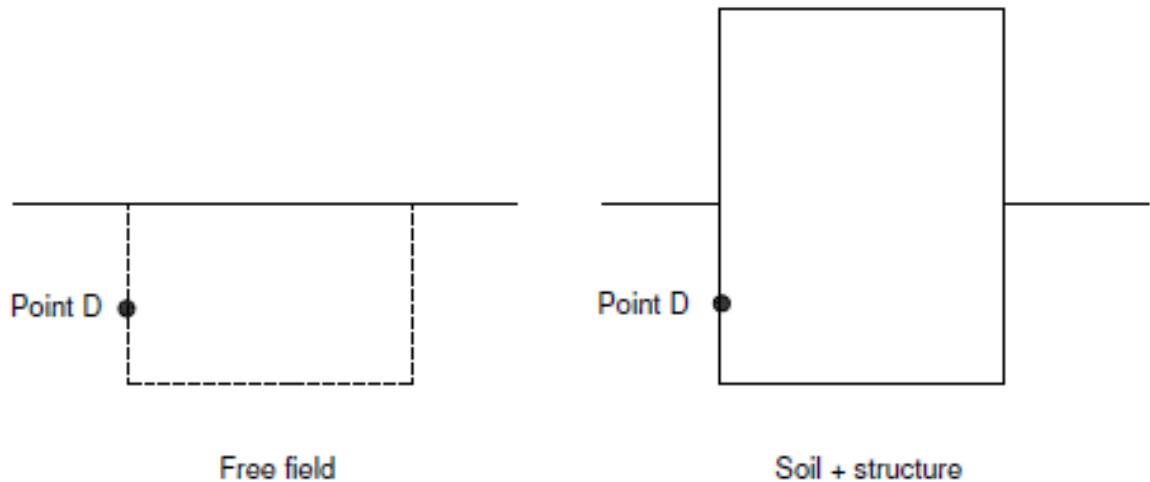


Figure 1.1 Définition du phénomène d'interaction sol-structure. [04]

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

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (1.1)$$

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

La figure 1.2 illustre l'aspect fondamental de l'interaction sol-structure; cet aspect est présenté ici dans le cas d'une fondation sur pieux, partiellement enterrée dans le sol, mais les conclusions restent applicables à tout type de fondation.

Si l'on s'intéresse au mouvement de la fondation, les déformations du sol sont transmises à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure; même en l'absence de superstructure le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différences de rigidité entre la fondation et le sol encaissant: le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique. Par ailleurs, le mouvement induit sur la fondation développe des oscillations de la superstructure et donc donne naissance à des forces d'inertie qui sont retransmises à la fondation sous forme de forces et de moments. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction inertielle. [04]

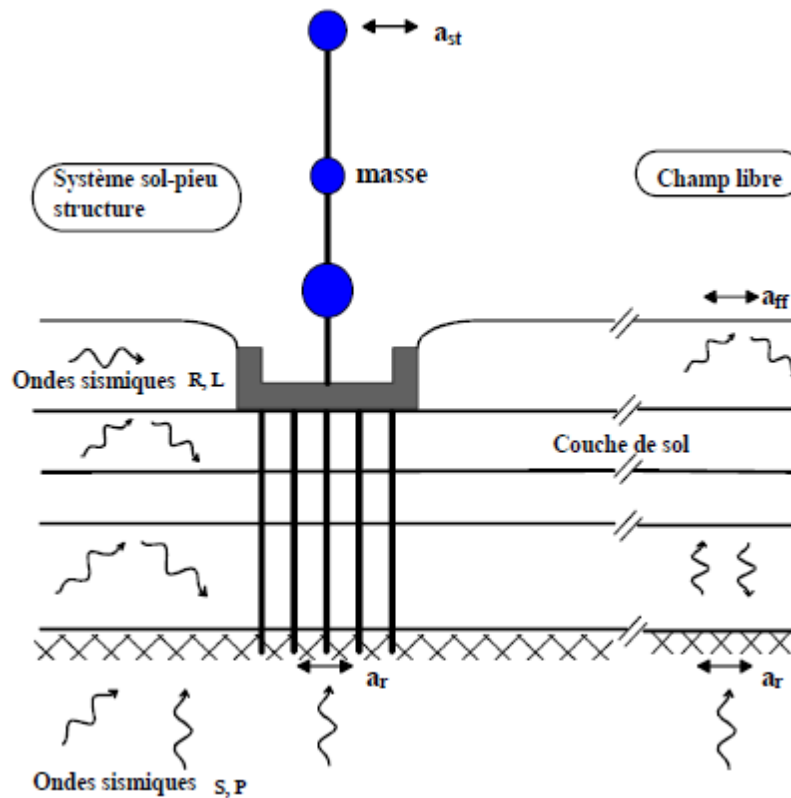


Figure 1.2 : Effet de l'interaction sol-structure. [04]

De toute évidence, le dimensionnement de la fondation doit tenir compte de ces deux composantes de l'interaction. Généralement, à tort, le terme interaction sol-structure ne désigne dans l'esprit des ingénieurs que la part inertielle; il convient de garder à l'esprit que l'interaction cinématique peut dans certaines configurations être significative, même si parfois elle peut être négligée. [04]

I.3 Méthodes d'analyse du phénomène d'interaction Sol-Structure

a) Méthodes globales :

Les méthodes directes, appelées aussi méthodes globales, traitent le problème de l'interaction sol-structure dans sa globalité de façon à obtenir les réponses du sol et de la structure simultanément. Elles consistent à résoudre directement l'équation du mouvement dans l'ensemble du système sol-structure

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{Q_f\} \quad (1.2)$$

(La mise en œuvre pratique de telles solutions est illustrée sur la figure 1.3).

En théorie, les méthodes globales peuvent être étendues aux cas tridimensionnels et sont susceptibles d'appréhender les comportements non linéaires dus à la loi de comportement d'un des matériaux (sol le plus souvent) ou aux interfaces sol-structure. Si les méthodes globales sont généralement coûteuses du point de vue ordinateur, elles requièrent souvent moins de temps humain que d'autres méthodes approchées exigeant une grande réflexion. Ce temps de réflexion représente également un coût non négligeable. [04]

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

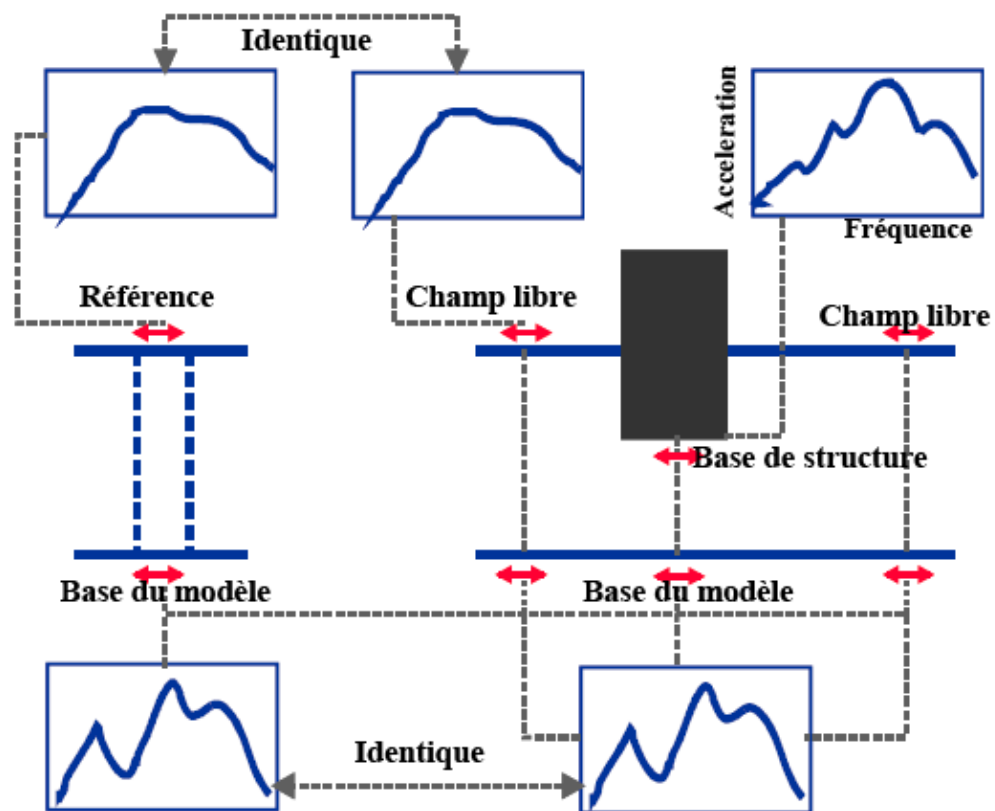


Figure 1.3: Représentation schématique d'un calcul interaction sol-structure méthode globale. [04]

Un des avantages principaux des méthodes globales est leur capacité à prendre en compte les hétérogénéités résultant soit des variations de faciès, soit des variations des caractéristiques de sol provenant de non linéarités. L'expérience montre qu'elles sont généralement mieux adaptées et plus faciles de mise en œuvre pour l'étude d'ouvrages enterrés.

b) Méthodes de sous structures (indirecte)

Cette méthode s'appuie sur le principe de superposition. L'idée est de résoudre le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives, où chacune des étapes étant réputée plus facile à résoudre que le problème global. Pour des raisons évidentes, les infrastructures envisagées sont constituées d'une part par le sol et la structure de l'autre part, comme indiqué dans la Figure.1.4. Les équations sont écrites pour chaque sous-système, alors les conditions de compatibilité à l'interface, la continuité des déplacements et des vecteurs de contraintes sont remplies.

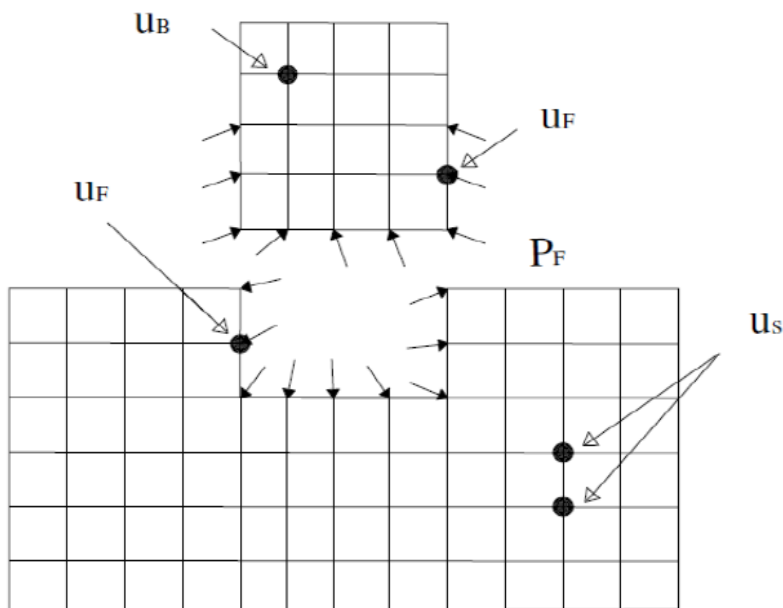


Figure 1.4 : Schématisation de la méthode de sous-structure

Les mouvements du sol qui ne sont pas influencés par la présence de structures, sont appelés mouvements de terrain (champ libre). Lorsque les structures sont présentes, elles interagissent avec le sol grâce à un processus qui est l'interaction sol-structure. L'interaction sol-structure a peu d'effet sur la réponse de certains systèmes mais un effet important sur la réaction des autres.

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

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

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

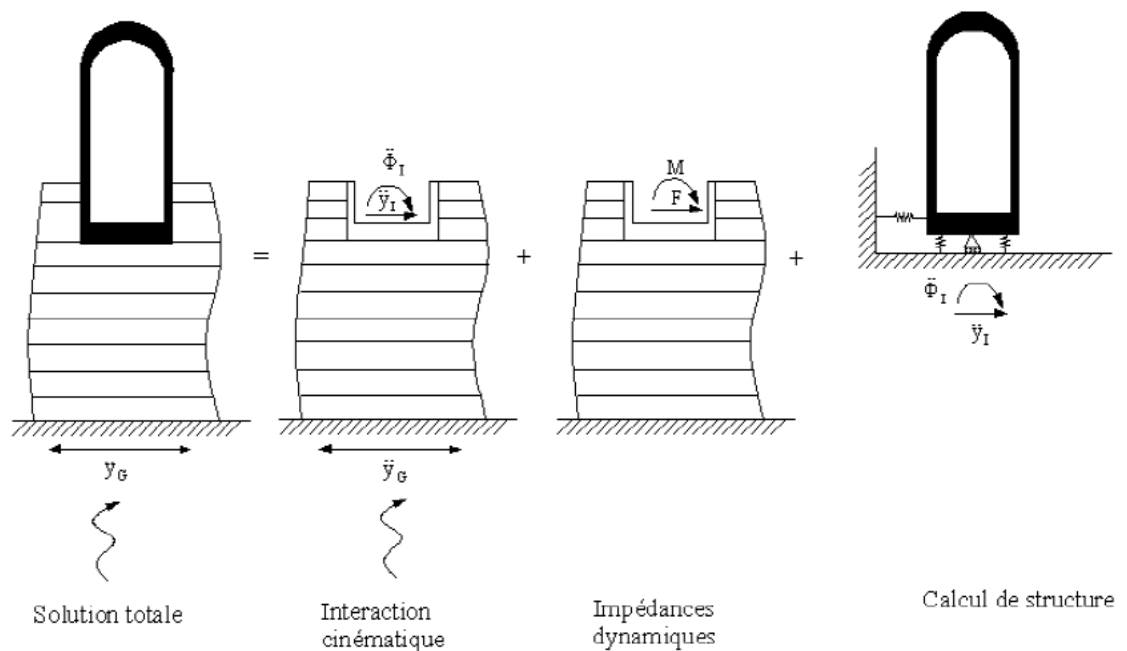


Figure 1.5 : Théorème de superposition. [06]

Dans la mesure où la fondation est parfaitement rigide, cette démarche est rigoureusement identique à celle conduisant à la résolution du système global en une étape. Cette décomposition est connue sous le nom de théorème de superposition de Kausel et est illustrée sur la figure 1.5. Son intérêt apparaît clairement s'il est possible de simplifier une des trois étapes du calcul.

L'interaction sol-structure est causée par deux phénomènes: l'incapacité de la fondation pour correspondre à la déformation en champ libre (interaction cinématique) et l'effet de la réponse dynamique du système de structure de base sur le mouvement du sol (Interaction inertielle). [06]

I.4 Fonctions d'impédance :

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

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

L'impédance de la fondation caractérise l'effort résultant sur la fondation sans masse lorsqu'elle est soumise à un déplacement imposé harmonique unitaire. Le mouvement de la fondation est celui d'une masse posée sur un ressort ayant pour raideur la partie réelle de l'impédance et pour amortissement sa partie imaginaire. [5]

I.5 Les Composantes D'interaction Sol-Structure :

Avant d'examiner les différentes méthodes 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 1.7 qui schématise un ensemble sol-structure.

a) Interaction cinématique :

L'interaction cinématique peut induire des modes de déformation, comme le basculement et la torsion que ne sont pas présents dans un mouvement en champ libre. L'interaction inertielle se produit lorsque les forces transmises au sol par la réponse dynamique de la structure de produire des mouvements de base qui ne se produirait pas dans une structure à base fixe. L'effet de l'interaction inertielle est généralement plus prononcé que l'effet de l'interaction cinématique. [06]

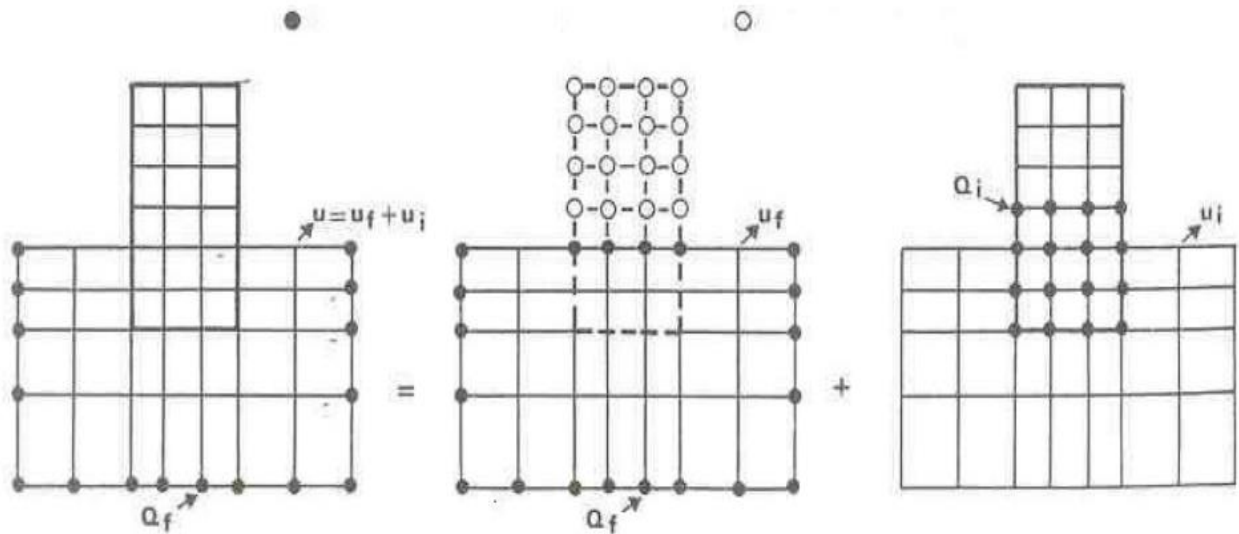


Figure 1.6 : Décomposition du problème d'interaction sol-structure [06].

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

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = Q_f \quad (1.3)$$

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

$$Q_i = [M - M_f]U_f + [C - C_f]\dot{U}_f + [K - K_f]\dot{U}_f \quad (1.4)$$

Force d'interaction cinématique :

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

$$Q_i = [K - K_f]U_f \quad (1.5)$$

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

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

b) Interaction inertielle :

L'équation (1.4) met clairement en évidence le fait qu'il y a interaction dès qu'il y a différence de masse ou de raideur entre le sol et la structure. Supprimons pour simplifier le terme d'amortissement dans cette équation et restreignons le problème à celui d'une structure posée à la surface du sol et soumise à la propagation verticale d'ondes de volume (cisaillement ou compression). Dans ces conditions, en champ libre, tous les points de la surface du sol sont animés d'un même mouvement. Si la fondation de l'ouvrage est infiniment rigide, le dernier terme de l'équation (2.3) s'annule; le vecteur de charge Q_i se réduit à :

$$Q_i = [M - M_f] \ddot{U}_f \quad (1.6)$$

Les forces Q_i appliquées à la base de la structure engendrent un mouvement du support, équivalent à un champ de forces d'inertie dans la structure. Par la suite, l'interaction ne résulte que des forces d'inertie développées dans cette structure. On lui donne le nom d'interaction inertielle. [06]

I.6 Méthodes d'analyse du phénomène D'interaction Fluide-Structure

Le couplage fluide-structure est très probablement, après l'interaction sol-structure, l'interaction la plus fréquemment rencontrée. Une analyse de la réponse sismique des structures telles que les barrages, les réservoirs de stockage et les structures offshore, nécessite la considération des effets d'interaction fluide-structure et, dans quelques circonstances, de la compressibilité de l'eau. Ces effets peuvent introduire des modifications substantielles dans les caractéristiques modales de la structure, telles que les fréquences et modes propres de vibrations.

La première solution au problème des pressions hydrodynamiques sur les barrages ayant un parement amont vertical exposé à un mouvement horizontal et harmonique a été publiée pour la première fois par WESTERGAARD en 1933. Depuis, beaucoup de recherches sont apparues sur ce sujet dans lesquelles différents aspects du problème ont été pris en compte.

Différentes méthodes de modélisation du fluide ont été développées, modélisation par des éléments finis ou bien des éléments infinis. Ces différentes méthodes se basent sur diverses hypothèses :

- Le barrage est supposé infiniment rigide ce qui n'est pas le cas des barrages en terre;
- Le liquide est considéré comme homogène, non visqueux et incompressible ;
- Le phénomène des ondes de surface est négligé ;
- Le mouvement du liquide est considéré comme irrotationnel ;
- Aucun changement n'intervient dans la configuration géométrique de la région occupée par le liquide durant les vibrations ;
- Seules les vibrations de petit ordre sont prises en considération.

Le problème de détermination de la pression hydrodynamique en cas de tremblement de terre est une partie essentielle de la tâche générale, qui consiste à assurer la stabilité sismique des structures :

- a) Formulation du problème.
- b) Recherche d'un système acceptable d'hypothèses concernant :
 - Le type de barrage et les différentes formes qui en découlent.
 - La nature de la fondation.
 - La nature du tremblement de terre (surtout son sens de propagation).
- c) Recherche de modèles mathématiques.

I.6.1 La méthode de masse ajoutée :

La première approche de ce problème a été abordée par WESTERGAARD, qui a calculé la répartition des pressions sur un écran vertical limitant un réservoir semi-infini de profondeur constante dans l'hypothèse d'un mouvement horizontal harmonique de l'écran de période T.

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

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

- Un effet d'inertie (qui s'ajoute à l'inertie de la structure).

- Un effet de compressibilité (qui produit des modes de résonance).
- Un effet de viscosité (qui produit un facteur d'amortissement ajouté).

I.6.2 Approche de Lagrange

Dans l'approche de Lagrange le fluide est modélisé par des éléments finis type fluide, les degrés de liberté de ce type d'élément finis sont les déplacements, ce qui rend les conditions de compatibilité facile à assurer au niveau d'interface structure-fluide.

I.6.3 Approche d'Euler

Dans l'approche Les degrés de liberté de l'élément finis fluide sont les pression alors que pour la structure sont les déplacements, donc toute un programme doit être établi pour assurer la continuité au niveau d'interface, donc soit pour transformer les pressions du fluide en déplacement ou bien les déplacements de la structure en pression.

I.6.3.1 Effet d'inertie :

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

Les hypothèses sur lesquelles repose cette méthode :

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

I.6.3.2 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 ,semble indiquer que la présence d'une couche de vase a pour résultat une réduction importante du phénomène de compressibilité et de réflexion ,autrement dit que la vase est parfois bénéfique.

I.6.3.3 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. [05]

I.7 Conclusion :

Ce chapitre expose le problème des interactions sol structure, Nous avons présenté ici quelques méthodes possibles pour le traitement du problème d'interaction sol-structure, sous un champ incident donné, et avec des caractéristiques du sol adjacent à la fondation aléatoire.

Toute en se basant sur une formulation vibrationnelle du problème dynamique d'un milieu élasto-dynamique, on peut ressortir le système d'équations différentielles régissant le milieu continu, en tenant compte des conditions, initiales, de continuité à l'interface sol structure et aux limites.

La méthode sous-structure permet le traitement local du problème d'interaction, mais son utilisation dans le domaine temporelle pose plusieurs difficultés. Cependant la méthode globale traite le problème complet, et prend du temps et de l'espace, mais elle est plus simple à utiliser

Une formulation générale du problème de l'interaction est défini dans le cadre de l'élasticité linéaire. Ainsi des différentes méthodes ont permis de simplifier l'analyse en éléments plus simples de l'interaction : en sol structure, pour lesquels la compréhension de phénomène physique est plus facile.

CHAPITRE II : Etat De L'art Sur Les Travaux D'interaction Sol-Fluide-

II.1 Introduction

Les barrages gravitaires sont des problèmes d'interaction fluide - structure - sol. Il est évident que le sol de fondation et le réservoir d'eau affectent la réponse dynamique des barrages gravitaires lors des tremblements de terre.

Dans le présent chapitre, un état de l'art de quelques travaux mené dans le domaine d'interaction dynamique sol-fluide-structure est présenté.

II.2 Etat de l'art

Une étude paramétrique a été réalisée par Tahar Berrabah, A. et al. En 2011 (Journal EJGE) afin d'observer l'effet combiné de la fondation du sol, corps du barrage (barrage Brézina) et réservoir d'eau sur le comportement modale du système totale. Deux hypothèses ont été retenues pour modéliser les interfaces fluides du barrage et fluide du sol : les éléments de contact et l'équation de couplage. Trois approches sont également adoptées pour étudier le phénomène d'interaction sol-structure : la fondation support fixe, la fondation sol sans masse et la fondation sol de masse. En conclusion, il a été démontré que la modélisation des interfaces par éléments de contact ou par équations de couplage donne les mêmes résultats et que la présence de réservoirs d'eau et la modélisation des fondations du sol produisent une diminution des fréquences du système modal. [09]

La stabilité d'un barrage en terre avec un noyau mince est assurée par les massifs recharges en amont. Les barrages en terre avec des noyaux minces sont allégées par l'effet de contact avec massifs recharges. Une étude du comportement mécanique en tenant compte de l'effet de contact a été effectuée par Ghefir et al. En 2012 (Jordan Journal of civil engineering) pour barrage en terre El-Izdihar vide, qui permet de prédire le comportement et estimer l'épaisseur de l'âme au-delà de laquelle le contact n'a aucun effet. La méthode des éléments finis a été choisie comme procédé de modélisation utilisant le code Ansys. Il a été conclu qu'au-delà de 25% du coefficient de frottement, le phénomène de contact n'a aucun effet sur le comportement statique du barrage objet de cette étude. Les dimensions du barrage dépendent du paramètre B/H, où B représente la largeur du fond du barrage et H la hauteur du barrage. [10]

Des analyses modales et transitoires ont été effectuées pour le barrage de Brezina par Tahar berrabah et al. En 2012 (Jordan Journal of civil engineering. Un modèle tridimensionnel par éléments finis (SOLID185) utilisant le logiciel ANSYS est créé pour modéliser le corps du barrage et le sol adjacent. Trois enregistrements sismiques différents ayant une accélération de pointe identique de 0,2 g, en supposant trois rapports d'amortissement visqueux différents : 2 %, 5 % et 10 %, ont été utilisés dans l'analyse. Les

résultats de cette analyse constituent une base de données pour une étude paramétrique sur l'effet d'interaction sol-structure, celui de la masse de la fondation du sol et celui du rapport d'amortissement sur le comportement dynamique du barrage-voûte en béton Brezina. Les analyses dynamiques du barrage-voûte en béton de Brezina pour les trois cas étudiés : barrage sans sol, barrage avec fondation massive du sol et barrage avec fondation sans masse du sol montrent que la présence du sol dans le modèle développe plus de contraintes dans le corps du barrage, surtout lorsque la masse du sol est considérée dans le modèle. [11]

Les réponses modales du barrage-voûte en béton de Brezina, en Algérie, sont déterminées à l'aide du code éléments finis ANSYS par tahar berrabah et al. En 2012 (Earth Science Research, **Centre canadien pour la science et l'éducation 2012**). Pour étudier les effets du sol de fondation, trois modèles 3D ont été créés, le barrage seul sans sol, le sol sans masse du barrage et le modèle barrage-sol avec masse du sol. De plus, une étude paramétrique de l'amortissement visqueux, en forme de Raleigh, a été réalisée. On constate que les fréquences naturelles des modes non amortis ou amortis obtenues à partir du modèle barrage-sol avec masse de sol sont nettement inférieures à celles du modèle barrage seul et nettement inférieures à celles obtenues à partir du modèle barrage-sol sans masse. De même, des comparaisons similaires ont été observées pour les grandeurs d'amortissement, en valeurs absolues, entre les trois modèles. Une revue approfondie de la littérature révèle que l'étude réalisée ici constitue plusieurs éléments d'originalité puisque très peu de travaux similaires ont été entrepris. Les réponses modales du système de sol de la fondation du barrage de Brezina sont calculées à l'aide du logiciel d'éléments finis, ANSYS. Les conclusions suivantes sont tirées des expériences numériques réalisées dans le présent document :

1) Pour l'étude du système barrage-sol, le sol de fondation doit être modélisé comme une structure déformable avec prise en compte de sa masse. Les fréquences naturelles des modes non amortis ou amortis sont beaucoup plus basses dans le sol du barrage avec masse de sol que dans celui du barrage seul, et significativement plus basses que dans le modèle de sol sans masse du barrage. La modélisation du sol avec sa masse affecte également la forme du mode en changeant la position du mode fondamental.

2) De même, pour n'importe lequel des rapports d'amortissement à l'étude, les valeurs relatives à l'amortissement calculées sont significativement inférieures, en valeur absolue, à celles du sol du barrage avec masse du sol que celles du sol sans masse du barrage, et bien inférieures à celles du modèle du barrage seul.

3) L'ajout d'un faible rapport d'amortissement de 2% seulement au modèle barrage-sol de Brezina réduit le nombre de modes nécessaires, par rapport au modèle non amorti, pour

obtenir 90% de la masse totale du système. Ceci est d'une importance pratique car cela réduit le temps CPU pour une analyse supplémentaire basée sur la méthode de superposition modale, telle qu'une analyse de réponse transitoire de superposition modale, qui sera entreprise à la suite du présent travail.

Les réponses modales du système de sol du barrage de Brezina sont déterminées à l'aide des packages commerciaux d'éléments finis ANSYS par tahar berrabah et al. En 2014 (**Elsevier 2014**). Les modèles de sol de fondation et de sol de fondation sans masse d'eau du barrage et de sol de fondation du barrage sont étudiés à partir de l'approche lagrangienne et de l'approche des masses ajoutées. Une description détaillée de la modélisation fondée sur ces deux approches est fournie. Ces deux approches de modélisation sont d'abord validées dans le cas d'un système réservoir-eau cylindrique. Les deux modes de bousculade et de couplage, utilisant les deux modèles et basés sur les deux approches mentionnées ci-dessus, sont déterminés. Les conclusions suivantes sont tirées à partir des calculs effectués ici :

1. Les fréquences de ballottement sont, comme prévu, faibles par rapport aux fréquences couplées, et les modes de ballottement ne provoquent pas de déformation du barrage. Les fréquences couplées obtenues par l'approche de masse ajoutée sont surestimées par rapport à celle de l'approche lagrangienne, ce qui est en accord avec les résultats rapportés dans la littérature. La surestimation est significative ou importante pour plusieurs modes.

2. les fréquences du système barrage-réservoir-fondation est modérément plus élevé que ceux du modèle barrage-fondation (sans eau). Les fréquences les plus élevées trouvées sont en contradiction avec les résultats d'autres barrages type voûte, y compris le barrage de Morrow Point. Les résultats obtenus ici sont probablement dus aux caractéristiques géométriques du barrage de Brezina, qui ne sont généralement pas celles d'un barrage voûte où l'effet membrane est présent.

3. En désignant le mode fondamental comme le mode qui entraîne la plus grande masse effective, les résultats montrent que la fréquence fondamentale couplée diminue modérément avec l'élévation du niveau de l'eau, sauf autour de la hauteur de 10 m à laquelle la fréquence propre est la plus élevée. La valeur maximale observée à la hauteur d'eau de 10 m reflète probablement la forte interaction entre le fluide et la structure du système barrage-réservoir-fondation. [13]

La réponse sismique non linéaire tridimensionnelle des barrages -poids en béton en considérant les éléments de contact à l'interface barrage-réservoir a fait l'objet d'une étude réalisée par Ouzendjal et al en 2017 (**Journal Asiatique Du Génie Civil (BHRC)**). L'interface de contact barrage-réservoir est modélisée avec des éléments tridimensionnels de

contact surface à surface basés sur le frottement de Coulomb. Une étude numérique de l'effet de l'interaction hydrodynamique et du glissement de l'eau le long de l'interface barrage-réservoir est réalisée. Les déplacements horizontaux maximaux et les contraintes principales dans les différentes sections du barrage sont présentés, ainsi le comportement sismique du barrage est examiné dans les cas de réservoirs vides et pleins. En outre, les emplacements des dommages dans le barrage en béton sont évalués.

Cette étude présente la réponse sismique non linéaire tridimensionnelle du barrage-poids en béton de Oued Fodda utilisant le code Ansys.

Le modèle Drucker-Prager [07] est utilisé dans l'analyse non linéaire du béton du corps du barrage. La pression hydrodynamique du fluide de réservoir est modélisée à l'aide d'éléments finis fluides basée sur une approche lagrangienne. Les auteurs ont tirés les conclusions suivantes:

1. La pression hydrodynamique de l'eau du réservoir augmente les déplacements horizontaux du barrage. Les déplacements horizontaux maximaux se produisent dans la région médiane de la crête du barrage.

2. La pression hydrodynamique de l'eau du réservoir augmente les principales contraintes dans le corps du barrage. Les principales contraintes de traction principales ont une tendance décroissante pour la distance comprise entre 0 et 30 m, mais elles ont une tendance croissante pour la distance comprise entre 30 et 95 m.

3. Les contraintes maximales principales de traction se produisent dans la région centrale de la crête du barrage, les parties supérieure et inférieure le long de l'axe central de symétrie et les régions des extrémités supérieures du barrage. Il est donc prévu que des fissures apparaissent dans ces parties et causent des dommages au barrage.

4. La pression hydrostatique et hydrodynamique de l'eau du réservoir doit être prise en compte dans les analyses numériques pour évaluer la réponse critique du barrage.

5. Les déformations générées se sont produites à des intervalles acceptables pour le béton utilisé dans le corps du barrage. [14]

II.3 Conclusion

Le problème de l'interaction barrage-réservoir-sol est un phénomène complexe qui a fait l'objet de plusieurs études. A cet effet, le but du présent travail est l'étude d'interaction dynamique sol-fluide-structure appliqué à un barrage multi-voûte en béton, et par la suite une comparaison des résultats entre les différents modèles proposés pour avoir une conclusion regroupant les divers cas d'études. Il est aussi à signaler que ce problème est un sujet d'actualité.

CHAPITRE III Présentation du Barrage El Mefrouche Structure

III.1 Situation géographique

Le barrage multi route d'El Mefrouche est situé près du village de El Mefrouche, Commune de Terny Beni Hediél, Daïra de Mansourah, Wilaya de Tlemcen, sur l'oued El Nachef.



Image 3.1 : situation géographique de barrage Mefrouche

III.2 Notion sur le barrage de Mefrouche

A la fin de 1952, la construction du barrage a été entreprise sur l'oued El Nachef, et mis en service en 1963, ce barrage à une capacité de 15 millions m³ avec un volume régularisable de 14 millions m³ pour une superficie de sous bassin versant de 90km², un périmètre de 46,3km et une longueur de 16,5km (image3.2). Barrage en béton à voûte multiples (17) séparé par des contreforts (seuil de déversement) limité par des barrages poids encre dans la roche, les voûtes sont en précontraint (pré fabriqué), un mur de soutènement y est construit pour la stabilité du barrage (poids), (image 3.3).



Image 3.2 : vue aérienne du barrage



Image 3.3 : vue aérienne du corps de barrage à voûte multiples

III.3 Caractéristiques principales de l'ouvrage

Hauteur maximum au-dessus du point le plus bas des fondations	35 m
Hauteur du barrage au-dessus du talweg	26 m
Côte du couronnement (N.G.A)	1125,00
Côte des plus hautes eaux exceptionnelle (N.G.A)	1124,50
Côte de la retenue normale	1122,00
Superficie de la retenue à la côte normale	189,35 ha
Revanche de sécurité au-dessus de la retenue normale	2,80 m
Largeur en crête (passerelle de service)	2,30 m
Epaisseur des contreforts à la base	2,50 m
Epaisseur des voûtes	0,80 m
Pentes du parement amont	0,80
Pentes du parement aval	0,5665
Volume de la retenue	14,993 hm ³
Volume annuel régularisé	14 hm ³ /an
Profondeur maximum	19 m

III.4 Application de la préfabrication à la construction d'un barrage à voûtes multiples le barrage du Meffrouch, en Algérie

L'application de la préfabrication dans la construction des barrages est exceptionnelle.

Le barrage du Meffrouch, en Algérie, est un des rares ouvrages où cette technique a été utilisée d'une manière systématique. C'est un ouvrage à voûtes multiples de 531 m de longueur en crête et de 25 m de hauteur au-dessus du para fouille. Il est constitué par une succession de 17 voûtes cylindriques inclinées, d'épaisseur constante égale à 0,80 m, écartées de 25 m et s'appuyant sur des contreforts de 2,50 m de largeur. Les deux ailes de l'ouvrage sont formées par des barrages-poids à parements inclinés (image 3.4).

A part le barrage proprement dit, on doit signaler les ouvrages annexes, l'évacuateur de crues sur la rive droite, la tour de prise d'eau sur la rive gauche et la passerelle de circulation au sommet des contreforts (image 3.13).

Le projet général du barrage a été dressé par le Bureau Coyne, de Paris, qui en a défini les dimensions principales. Les principes de l'exécution par préfabrication ont été mis au point par l'Entreprise G. Safont & Cle, à Alger. Les travaux ont été exécutés dans des conditions difficiles, pendant la période de la guerre d'Algérie de 1957 à 1964. C'est une des raisons qui ont amené l'entreprise à recourir à la préfabrication ; il était, en effet, incertain de pouvoir recruter en suffisance le personnel qualifié exigé pour l'exécution d'un tel ouvrage selon les méthodes traditionnelles. Grâce à la préfabrication, il devenait possible de limiter le personnel spécialisé pour recourir à une main-d'œuvre courante.

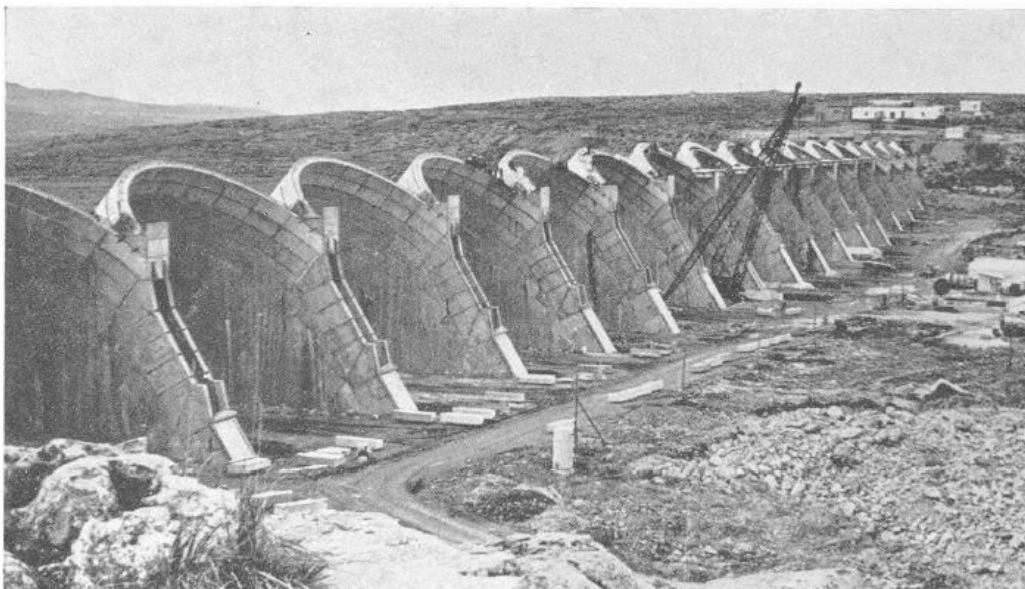


Image 3.4 Vue aval du barrage. On distingue, sur chaque contrefort, les gouottes des déversoirs ; au sommet des contreforts, les blocs devant supporter la passerelle.

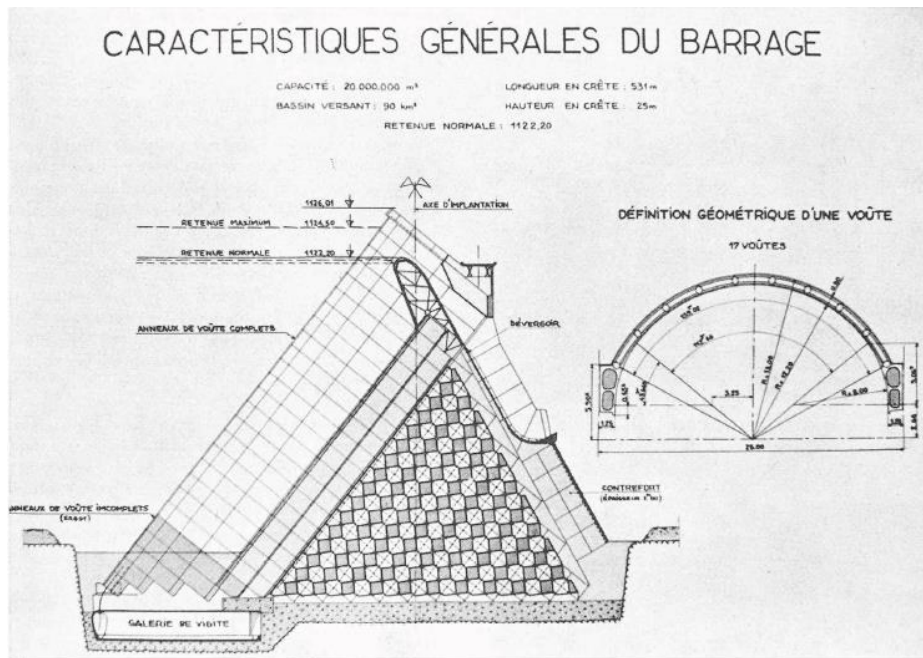


Figure 3.1 Caractéristiques générales du barrage, avec découpage des éléments de l'ouvrage en blocs préfabriqués.



Image 3.5 Vue d'ensemble du chantier de préfabrication, situé immédiatement en aval du barrage. Au premier plan, les éléments de voûtes, à l'arrière-plan, le stockage des blocs des contreforts. A droite, dans l'ombre, la fabrique de béton.

III.5 Caractéristiques générales du barrage, avec découpage des éléments de l'ouvrage en blocs préfabriqués.

Les voûtes cylindriques, d'épaisseur constante, sont découpées en anneaux de 1,20 m de hauteur. Chaque anneau est constitué par neuf voussoirs de 2,80 m de longueur. Les anneaux s'appuient sur les contreforts par l'intermédiaire de deux pièces spéciales évidées formant les blocs d'appui. Chaque anneau s'appuie, d'une part sur l'anneau qui précède, et, d'autre part, sur les deux blocs d'appui évidés (image3.6).

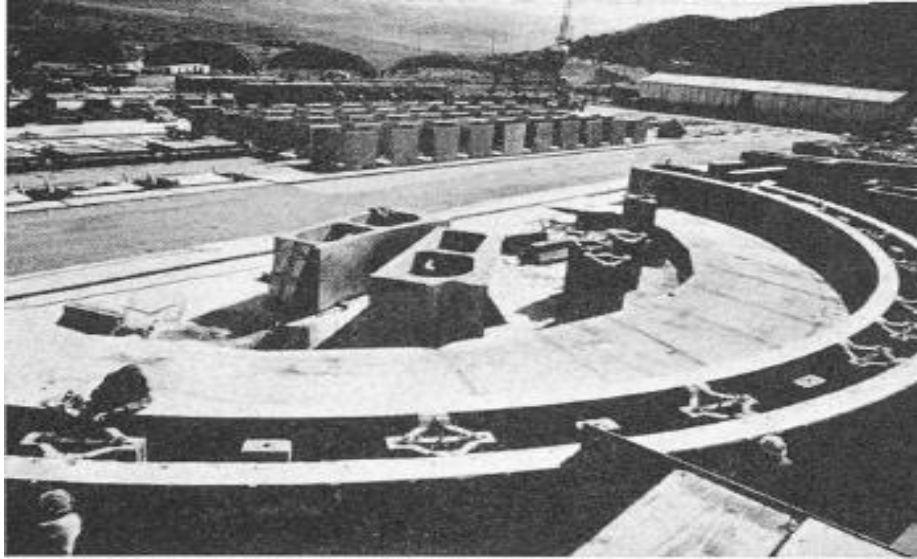


Image 3.6 Le coffrage d'un anneau de voûte délimitant les voussoirs correspondants. Au centre, deux blocs d'appui.

Pour garantir une exactitude suffisante des différents éléments préfabriqués, les voussoirs constituant le même anneau sont exécutés simultanément dans un moule coffrage et numérotés pour être présentés sur place dans le même ordre. Les neuf voussoirs sont séparés les uns des autres par des joints radiaux et les anneaux par des joints annulaires. Chaque voussoir est mis en place dans sa position définitive par un système de boulons qui le lie à son correspondant sur l'anneau qui le précède. Le montage des voussoirs des anneaux se fait à partir de la clé vers les naissances. La mise en place et le réglage se font au moyen d'une grue sur chenilles (image3.7).

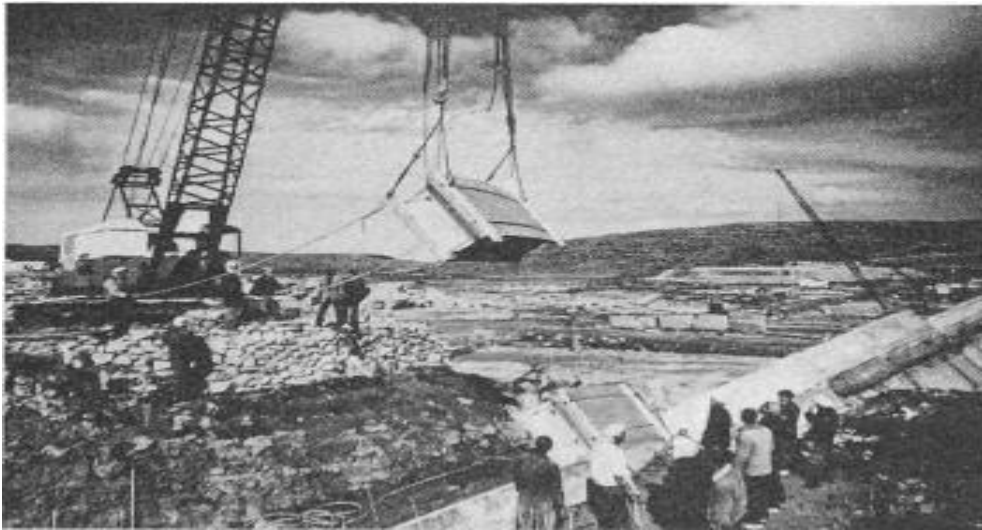


Image3.7 Mise en place d'un voussoir au moyen d'une grue sur chenilles. On distingue sur la face du voussoir les rainures de précontraint annulaire.

Les joints entre les voussoirs et entre les anneaux sont du même type. Ils sont constitués par une entaille trapézoïdale ménagée sur la tranche du voussoir et occupant environ les trois quarts de son épaisseur (image3.8).



Image 3.8 Calage d'un voussoir.

Deux voussoirs mis en correspondance l'un en face de l'autre laissent donc une cavité de plusieurs centimètres de largeur sur toute la longueur de la tranche. Cette cavité est garnie par un élément de béton appelé clavette, destiné à combler la plus grande partie du vide. Cependant cette clavette est munie de tétons d'appui qui ménagent un espace d'épaisseur uniforme sur tout son pourtour, permettant d'assurer une circulation du matériau de

remplissage du joint. Le remplissage du joint se fait par injection d'un mortier colloïdal, mis en place de façon à provoquer l'essorage de la masse injectée ; seule l'eau en excès suinte par les fentes séparant les joints. Ce système de jointolement a fait l'objet d'une étude préliminaire méthodique pour s'assurer d'une part de la compacité effective du remplissage, condition d'étanchéité des joints et, d'autre part, pour garantir la résistance à la compression de l'ensemble, puisque les joints doivent transmettre les efforts annulaires de la voûte, exercée au moyen de câbles extérieurs protégés dans des gaines plastiques par injections. Ces câbles sont ancrés dans le par fouille. La mise en tension se fait à partir du sommet des voûtes ; dans les voussoirs de l'anneau supérieur sont noyées les têtes d'ancrage.

Les contreforts ont été exécutés sous forme de blocs préfabriqués de deux types :

- a) les blocs de parement, formés de deux dalles de façade, de section carrée, solidarités par un noyau de liaison de même forme, mais décalé de 45° par rapport aux carrés des faces ;
- b) les blocs clavettes, posés entre les blocs de parement, formant cheville, laissant des vides de quelques centimètres d'épaisseur (image 3.5 et 3.9).

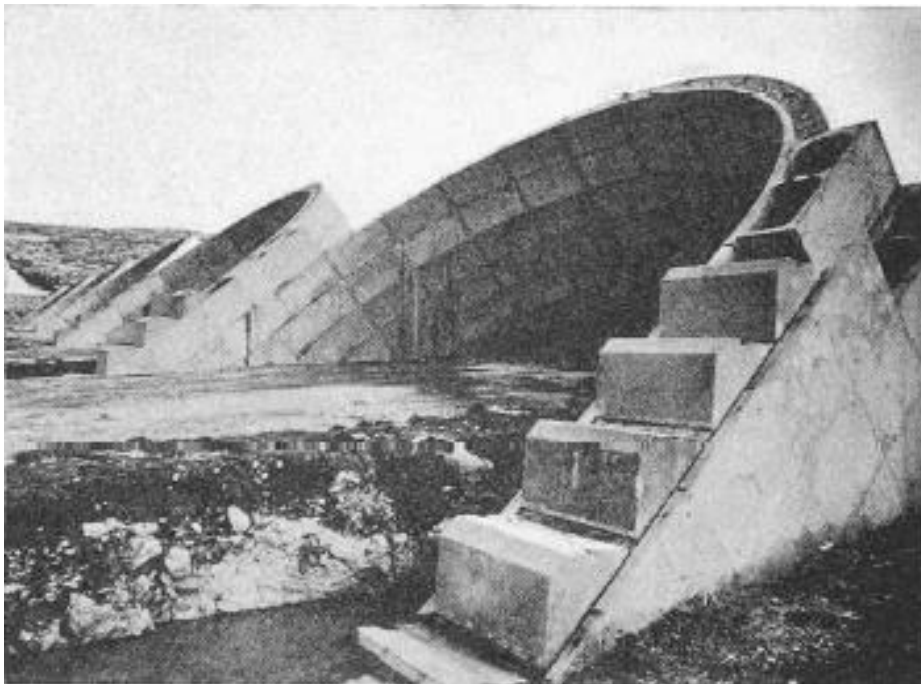


Image3.9 Etape de construction des contreforts et des voûtes. On distingue les blocs clavettes des contreforts en relief.

Cet ensemble est ensuite injecté de mortier colloïdal sous pression, à partir des joints inférieurs des assises. Le parement aval de chaque contrefort est aménagé en goulottes qui se raccordent dans sa partie supérieure avec un déversoir de surface et dans sa partie inférieure se termine par un saut de ski projetant l'eau au-delà de la fondation du contrefort. Ces

déversoirs sont destinés à ne fonctionner qu'exceptionnellement, pour évacuer les excédents éventuels de crues qui ne pourraient pas être absorbés par l'évacuateur de crues prévu sur la rive droite, en dehors du barrage. Tous les éléments des blocs constituant les déversoirs sont préfabriqués et liés entre eux par un joint à tenons injectés (image 3.10).

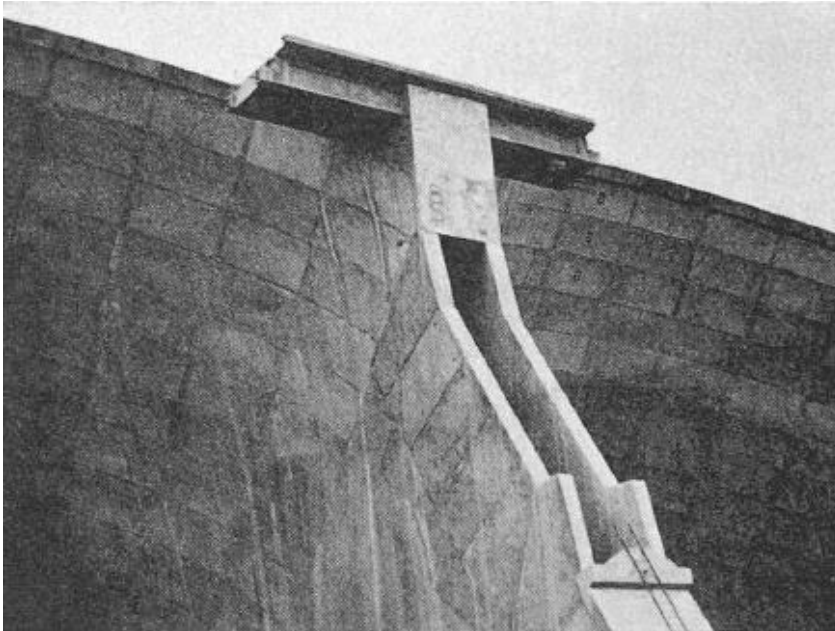


Image 3.10 Détail d'une goulotte du déversoir, avec le bloc au sommet supportant un élément de la passerelle.

La passerelle qui relie le sommet des contreforts est prévue, non seulement pour assurer la circulation d'une rive à l'autre en cas de déversement, mais aussi pour lier les sommets des contreforts et assurer leur stabilité latérale en cas de tremblement de terre. Cette passerelle est également construite selon les principes de la préfabrication. Chaque travée se compose de deux éléments, l'un encastré en console dans le sommet des contreforts, l'autre formant une travée indépendante qui s'appuie sur les consoles. En outre, chacun des éléments, travée ou console, est formé de poutres sur lesquelles on place la dalle préfabriquée. La solidarité entre les dalles et les poutres est assurée au moyen de tenons bétonnés sur place et liés par des armatures en attente (image 3.11).

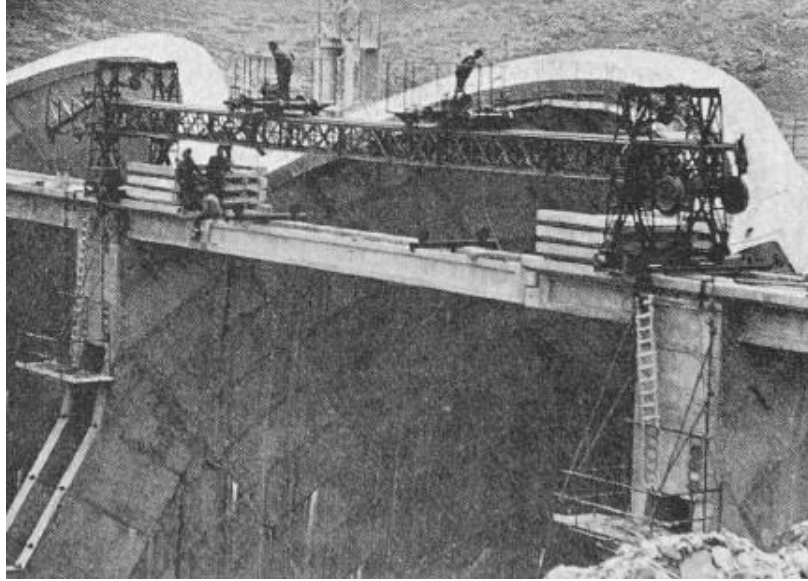


Image 3.11 Mise en place d'une travée intermédiaire de la passerelle. On distingue, en attente, les éléments de dalles préfabriquées.

L'évacuateur de crues et la tour de prise d'eau ont également été conçus pour être exécutés par préfabrication. Ils sont formés d'éléments superposés, jointoyés et solidarités par précontrainte.

Le barrage a été soumis à un premier remplissage sous notre contrôle ; on a pu constater une étanchéité tout à fait satisfaisante des voûtes, puisque seules quelques taches d'humidité sont apparues dans les parties basses (image 3.12).

On peut admettre ainsi qu'au point de vue technique l'ouvrage préfabriqué donne satisfaction. Maintenant que les travaux sont achevés, le paysage a repris son aspect immuable de toujours, aux horizons lointains et aux collines de formes douces où les arbres sont rares (image 3.13).

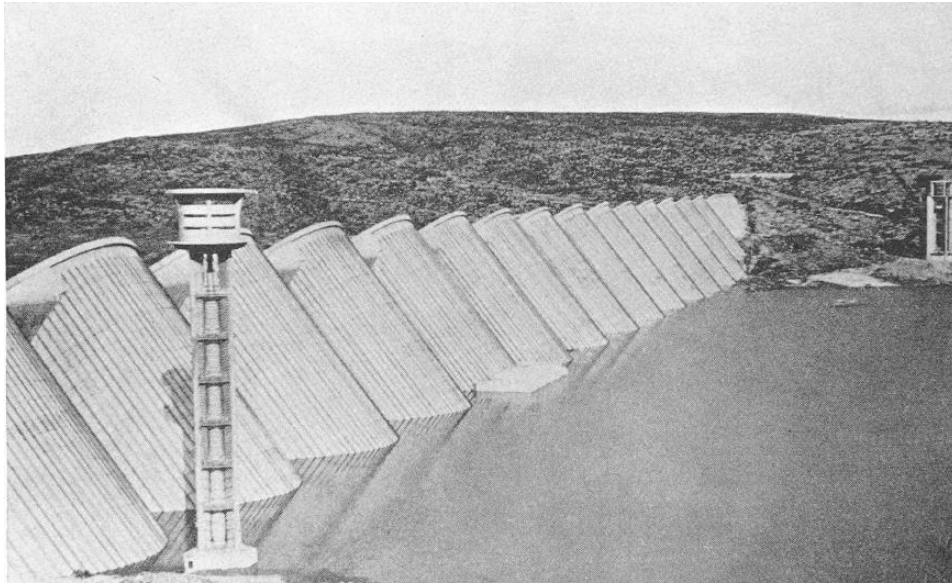


Image 3.12 Vue d'ensemble du barrage au début du remplissage. Au premier plan, la tour de prise d'eau

A l'arrière-plan, l'évacuateur de la rive droite. On distingue sur les voûtes les câbles de précontrainte longitudinale.



Image 3.13 La vallée du Mefrouch, à l'aval du barrage. Au premier plan, le village du chantier.

III.6 Conclusion

Dans cette partie de ce mémoire on a essayé de faire une présentation plus ou moins complète sur le barrage multi-voute d'El Mefrouch. Dans les chapitres suivant on va faire l'étude d'un barrage dont la géométrie est inspirée de celle du barrage d'El Mefrouche.

CHAPITRE IV : Modélisation Ansys du Barrage multi voûte (géométrie inspirée du barrage El Mafrouch)

IV.1 Introduction

Dans le présent chapitre l'effet d'Interaction sol - structure (corps du barrage) sur le comportement du barrage multi voûte dont la géométrie est inspirée du barrage El Mafrouch) va être modélisé utilisant le code Ansys. Un aperçu sur la méthode des éléments finis par le code Ansys va être exposé dans la section IV.2

IV.2 Problèmes de dynamique des structures par Ansys

Le code ANSYS est un logiciel basé sur la méthode des éléments finis. Deux environnements des logiciels permettent de mettre en œuvre ce code :

- ✓ ANSYS classique : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques.
- ✓ ANSYS Workbench : Cette plate forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièce) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul.

Basé sur D'Alembert principe et en raison du processus de discrétisation d'une structure continue par éléments finis l'équation différentielle de mouvement amorti forcé est donnée par:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = f(t) \quad (4.1)$$

M, C, K: masse du système, amortissement et la matrice de rigidité, respectivement.

Les vecteurs d'accélération nodales, les vitesses et les déplacements sont respectivement \ddot{U} , \dot{U} , U et f (t) est le vecteur des forces appliquées. Équilibre dynamique est obtenu si l'équation (4.1) détient pour tous les temps «t».

Tous les problèmes en dynamique des structures peuvent être formulés reposent sur l'équation de mouvement ci-dessus (Eq. 4.1). La Figure 4.1 présente un schéma où plusieurs types d'analyse en dynamique des structures selon le type de la charge appliquée peut être assuré par Ansys.

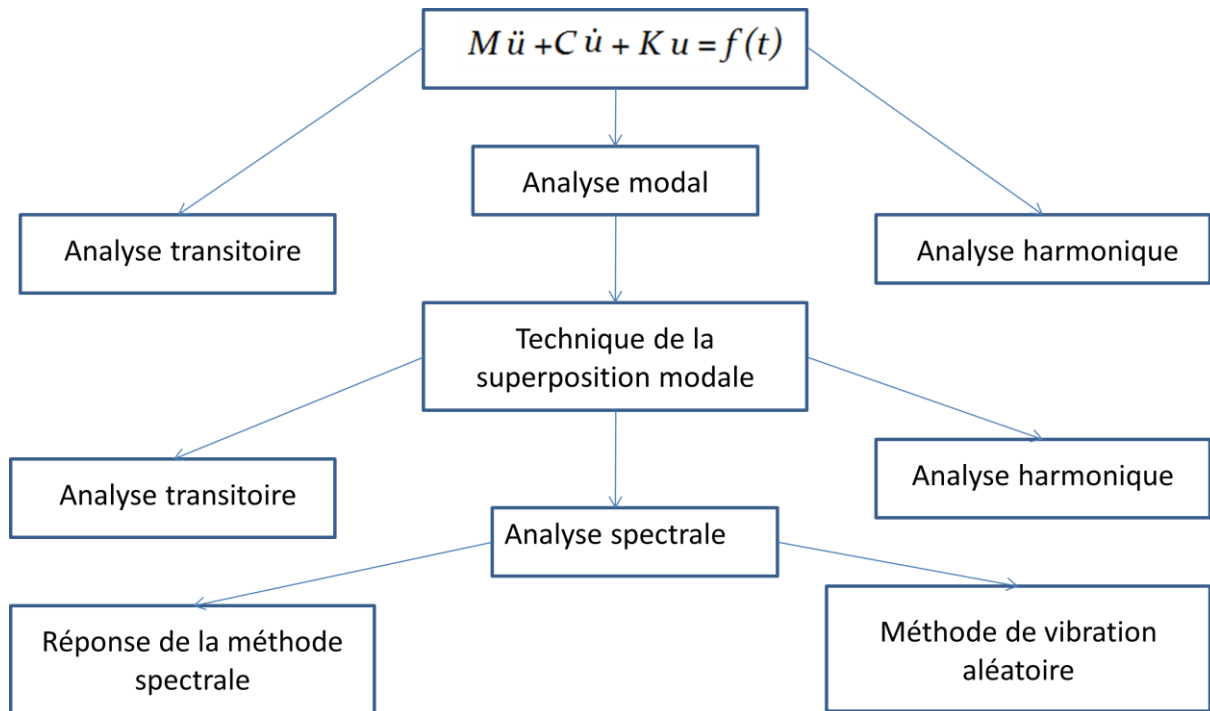


Figure 4.1 : Classification des Problèmes de Dynamique des Structures

IV.3 Les étape des modélisations

1) La première étape dans la modélisation est le dessin de la géométrie.

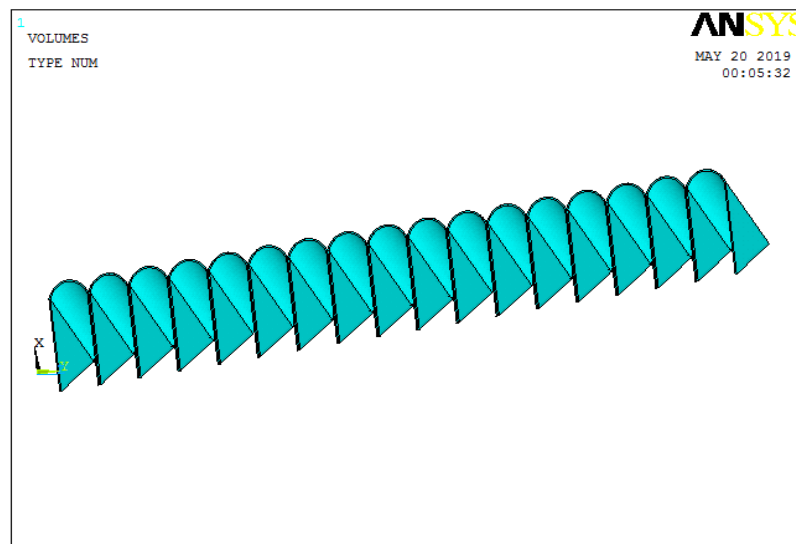


Image 4.1 dessin de la géométrie (3D)

2) Choix de l'élément de discrétisation

Dans l'icône « Element Type » on choisit le type d'élément à utiliser dans notre études et qui convient aux matériaux et à la géométrie.

Pour ce modèle, l'élément choisi pour la discrétisation du corps du barrage ainsi que du sol de fondation est le solid187 dont les caractéristiques sont montrées sur la figure 4.2.

L'image 4.2 schématise les étapes ansys à suivre pour choisir l'élément de discrétisation.

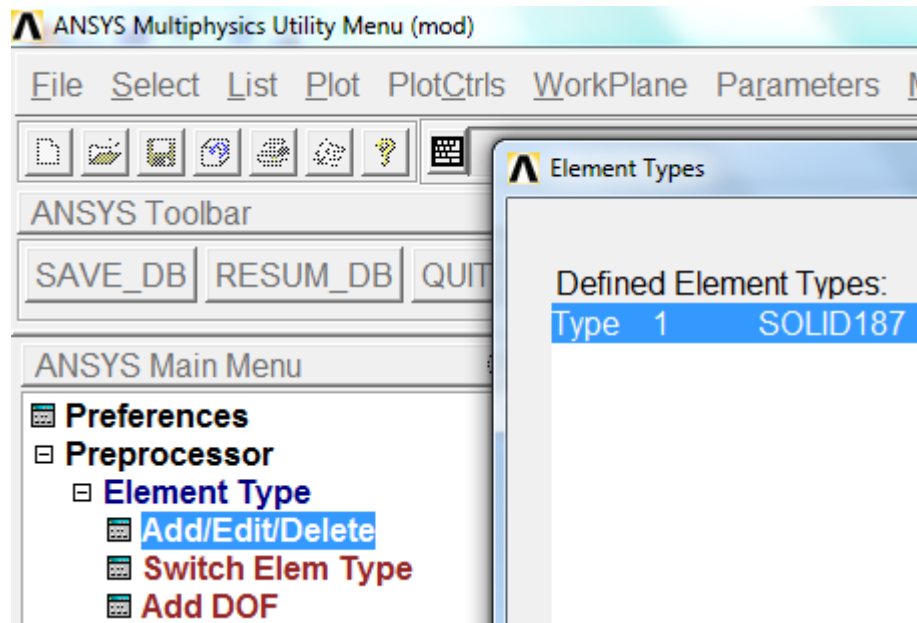


Image 4.2 Fonction de l'icône préprocesseur pour le choix du type d'élément

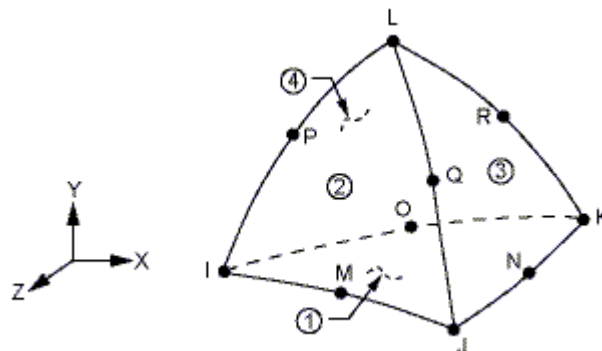


Figure 4.2 : Élément solid187

3) Introduction des caractéristiques des matériaux

On définit les matériaux à utiliser, dans l'icône « Material Props » ; leurs masses volumiques, leurs coefficients de poisson ainsi que leurs modules d'élasticité.

Les caractéristiques mécaniques requises pour l'analyse sont la masse volumique, le coefficient de poisson et le module de Young, tous ces Paramètres sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 Propriétés des matériaux de barrage multi voûte

Matériau	Module de young N/m ³	Coefficient de poisson	Masse volumique Kg/m ³
Corps de barrage	28.5e+09	0.25	2500

Le sol de fondation est une roche de masse volumique. Les valeurs de ses paramètres sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 4.2 Propriétés des matériaux de barrage multi voûte

Matériau	Module de young N/m ³	Coefficient de poisson	Masse volumique Kg/m ³
Sol de fondation	6.22e+09	0.25	2100

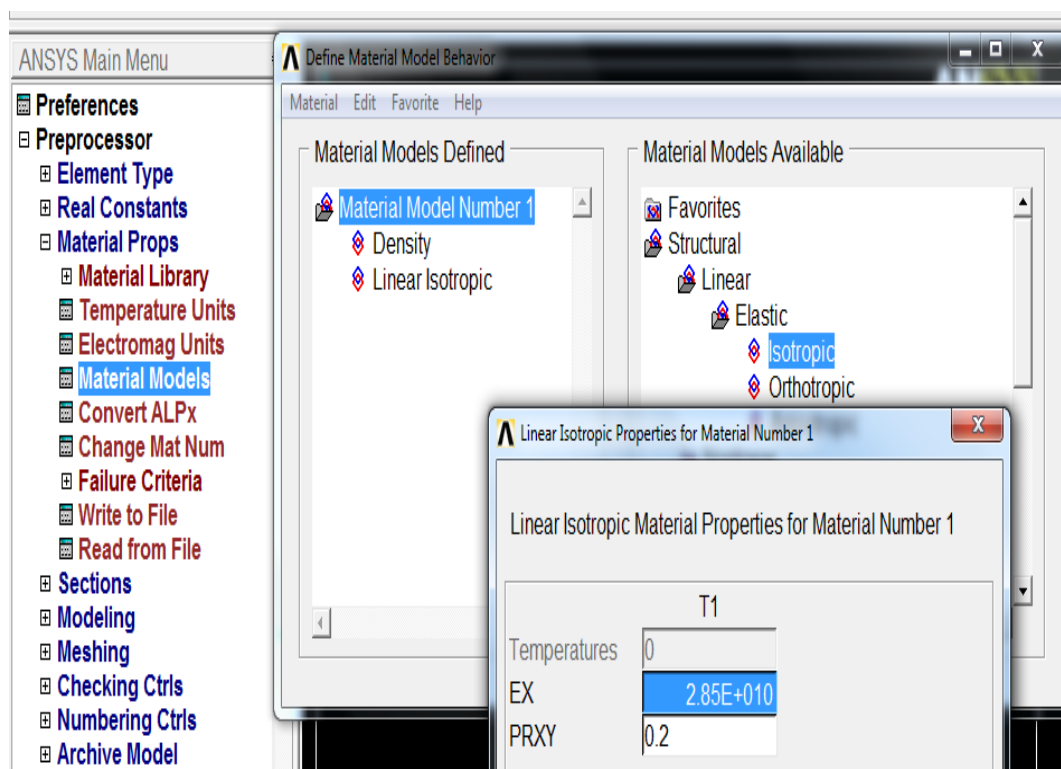


Image 4.3 fonction de l'icône preprocessor pour définir les caractéristiques des matériaux

4) Application des conditions aux limites

Les encastremements sont appliqués au niveau de la base du barrage et au niveau des deux contreforts extrêmes.

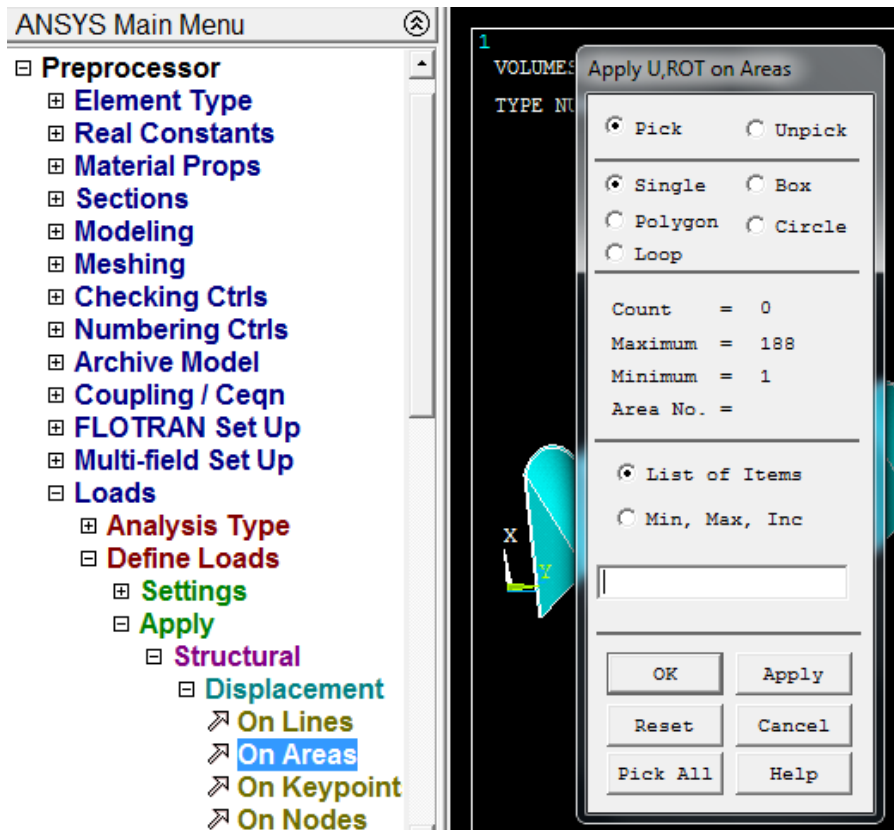


Image 4.4 fonction de l'icône preprocessor pour définir les conditions aux limites

5) Application des charges

Puisque dans notre travail il s'agit d'un calcul modal, la seule charge à introduire est l'accélération de la pesanteur.

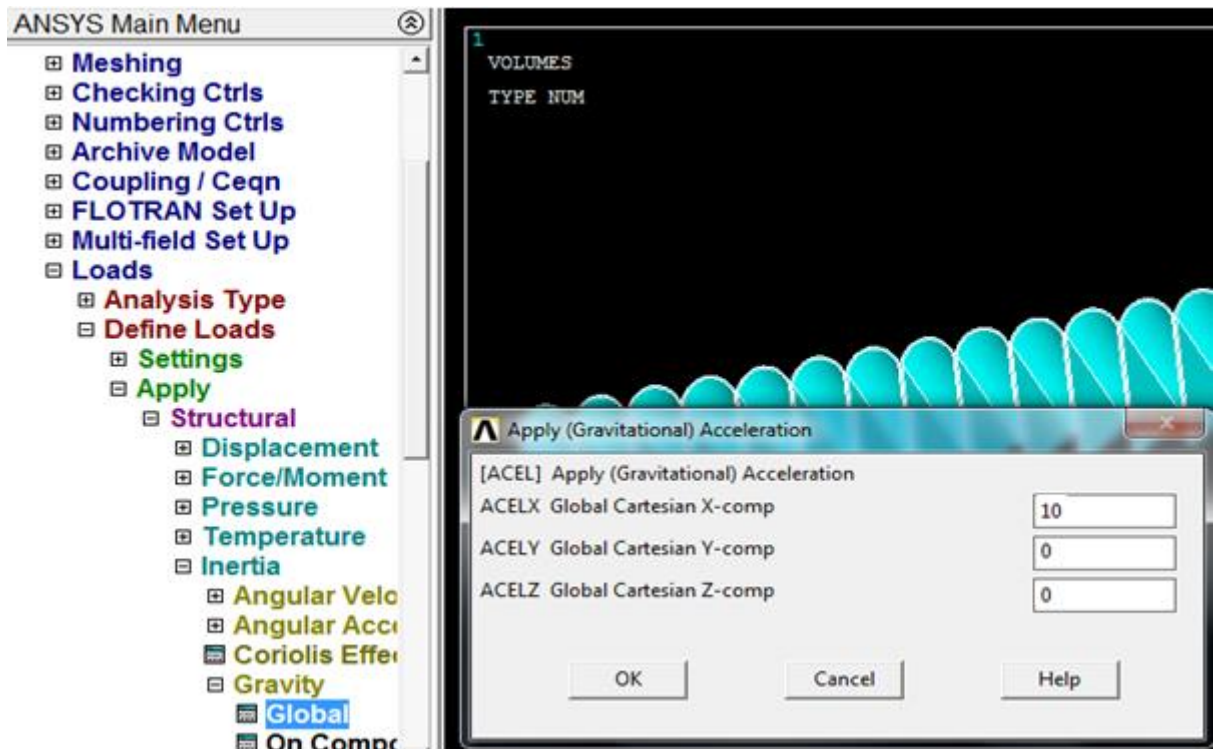


Image 4.5 fonction de l'icône proprocessor pour définir les charges
6) le maillage

On affectera pour chaque surface ou volume le matériau correspondant, puis on optera pour un maillage pour discrétiser le système. Le maillage ainsi que l'affectation des matériaux se fait à l'aide d'option « *meshing* ». Il est à noter que le logiciel dispose d'un nombre très importants des éléments finis pour le maillage de n'importe quelle structure.

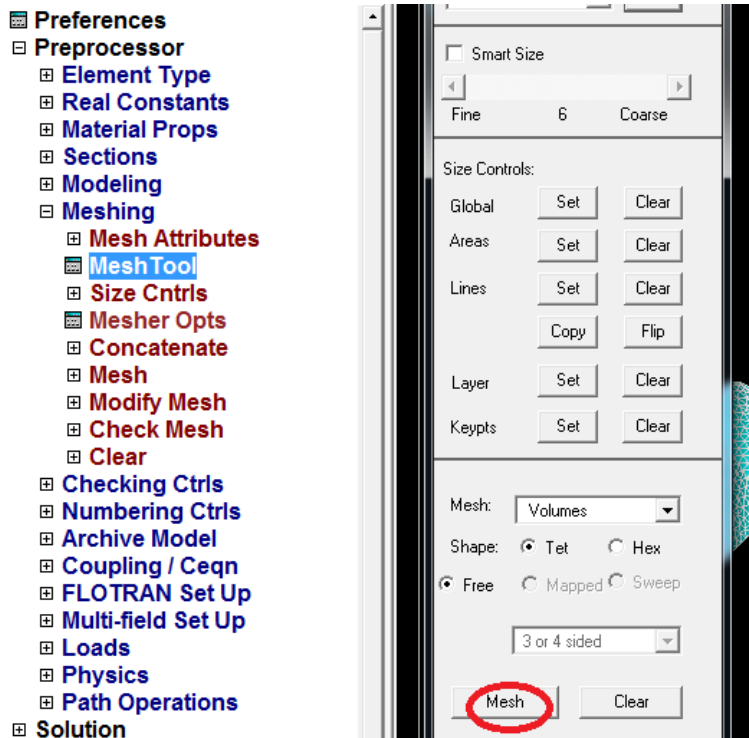


Image 4.6 fonction de l'icône preprocessor pour définir le maillage.

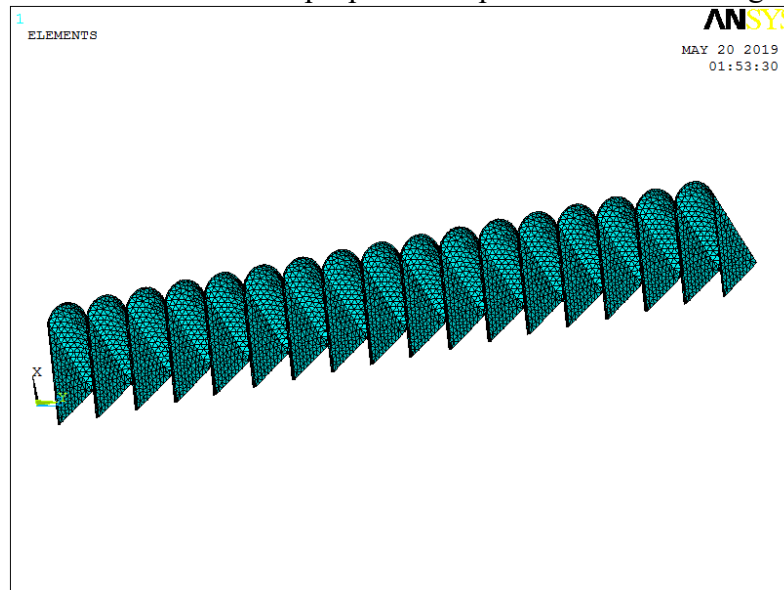


Image 4.7 maillage de la structure.

NB : Le nombre d'élément est de 29758 éléments avec un nombre de nœud de 57844 et chaque nœud contient 3 degré de liberté.

7) le choix du type d'analyse

Différents types d'analyses peuvent être assurées par ANSYS, pour notre cas on s'intéresse au calcul modale.

L'analyse modale calcule les fréquences propres et les modes propres.

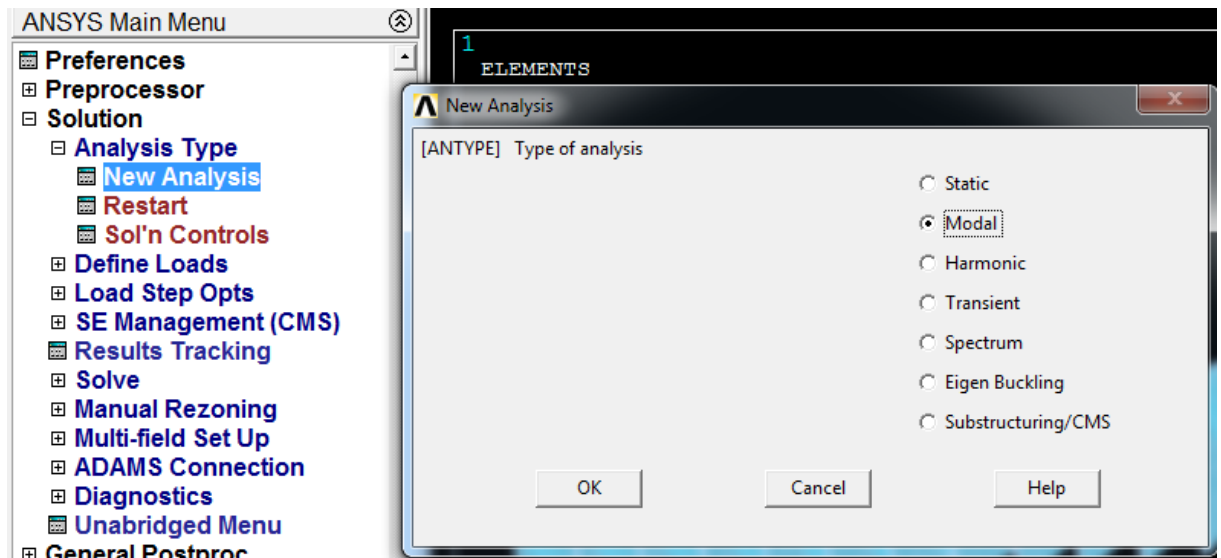


Image 4.8 fonction de l'icône solution pour définir le type d'analyse.

Ensuite on opte pour 100 mode de calcul

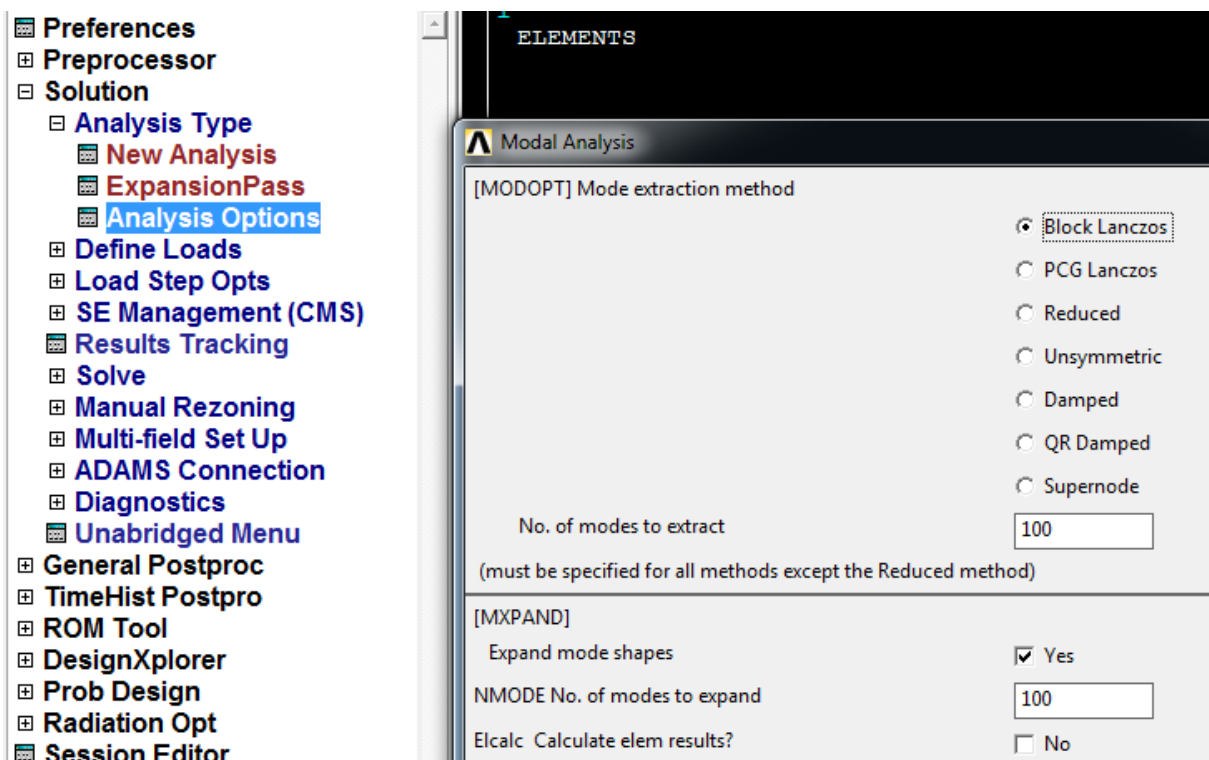


Image 4.9 fonction de l'icône solution pour définir le nombre de mode.

8. lancement de calcul

L'exécution de l'analyse se fait par l'icône « *Solve*→*current LS* ».

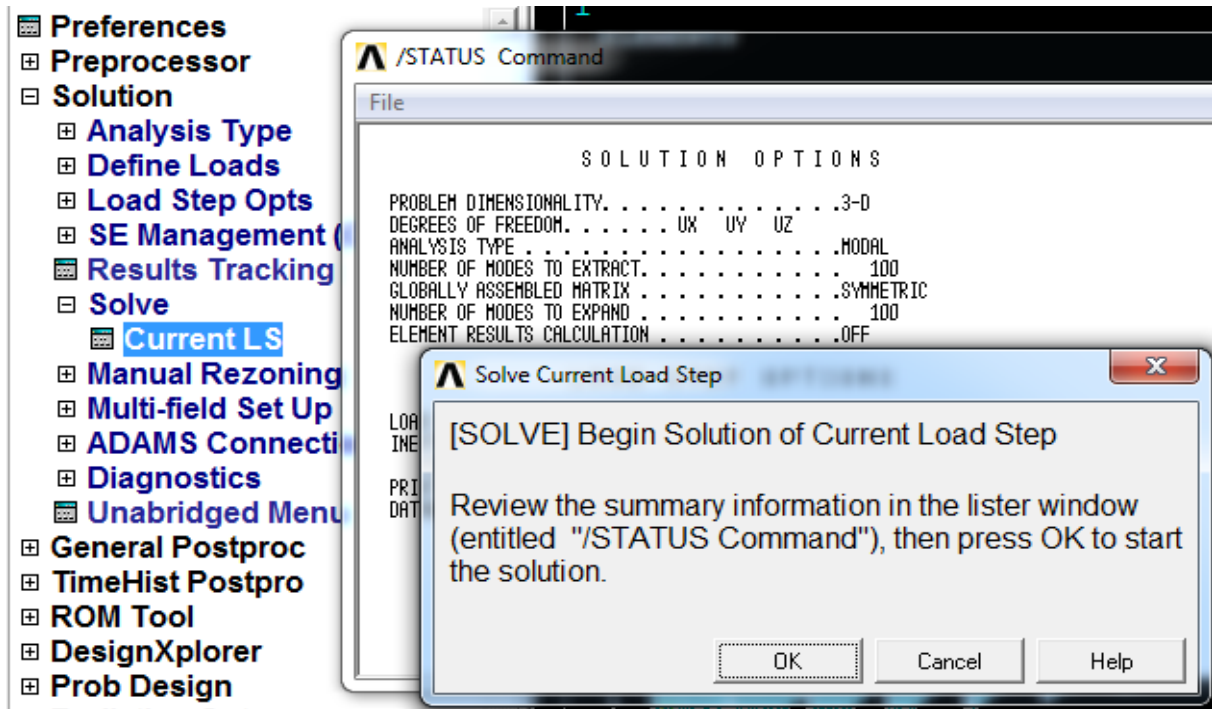


Image 4.10 fonction de l'icône *Solve*→*current LS* pour lancer l'analyse.

IV.4 Modélisation de l'interaction sol structure

Le travail consiste à modéliser l'interaction sol structure, considérant le barrage vide, à cet effet trois hypothèses ont été adoptées pour la prise en compte d'ISS :

- 1) Barrage à base encasturé, en négligeant l'effet d'interaction sol –structure.
- 2) Barrage avec sol de fondation, tenant compte de la masse de cette fondation et par conséquent de la composante inertielle de l'interaction ;
- 3) Barrage avec sol de fondation, négligeant la masse de cette fondation et par conséquent de la composante inertielle de l'interaction et on prend en considération seulement la composante cinématique;

IV.5 Modélisation éléments finies de barrage et du sol de fondation

La modélisation du phénomène d'interaction est faite en utilisant le code Ansys. Il est à signaler que l'élément utilisé pour la discrétisation que ce soit du volume du corps de barrage ou bien du sol de fondation l'élément « solid187 » expliqué dans la figure 4.2.

IV.6 Modèle élément finis du barrage avec sol de fondation

Utilisant les données géométriques inspirées du barrage El mafrouch ainsi que les caractéristiques mécaniques du béton présentées dans le présent chapitre, un modèle élément finis utilisant le code Ansys version 14 a été mis en place (figure 4.2). Les caractéristiques du sol de fondation sont résumées dans le tableau 4.2.

Pour tenir compte de l'interaction sol structure, le sol de fondation a été modélisé, les dimensions du sol suivant x, y et z ont été choisis après une étude de sensibilité du modèle aux dimensions du sol. Les extensions du sol de fondation sont comme suit :

Suivant x : 200 m de part et d'autre des extrémités du corps de barrage ;

Suivant y : 200 m de cote aval et amont de l'ouvrage ;

Suivant z : une extension de -200 m a été choisie ;

L'image 4.11 schématise le modèle du barrage avec sol de fondation avec et sans masse. Il faut signaler que les extrémités du système ainsi que sa base sont encastées.

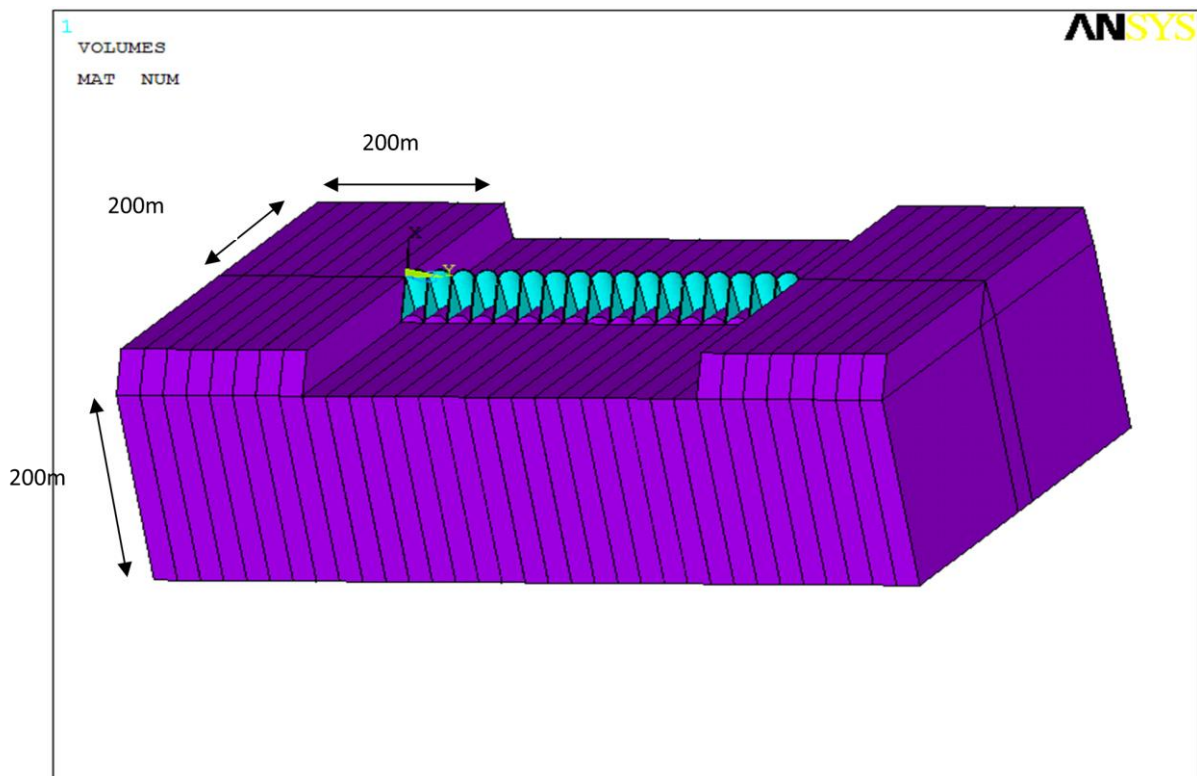


Image 4.11: La géométrie du barrage avec sol de fondation

Le modèle élément finis est présenté sur l'image 4.12

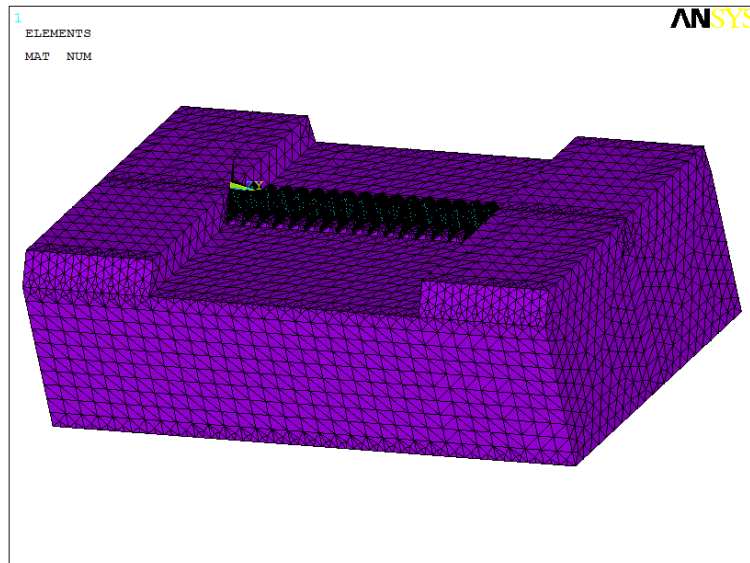


Image 4.12: Le modèle élément finis du barrage avec sol de fondation

IV.7 Modélisation de l'interaction fluide structure

La deuxième application consiste à modéliser l'interaction fluide structure, pour cette raison le barrage est considéré plein.

Pour chaque modèle d'interaction sol structure, deux analyses ont été mené ; avec et sans fluide.

L'approche des masses ajoutées a été utilisée pour modéliser le fluide, utilisant le code Ansys, l'élément SURF permet de représenter cette approche. Il s'agit de répartir la masse du fluide sur la surface de contact entre le réservoir et le barrage et/ou sol de fondation.

La figure 4.4 représente l'élément SURF 154 utilisé pour la modélisation de masse du fluide.

La géométrie, localisation des nœuds, est le système des coordonnées pour cet élément est montré dans la figure 4.3

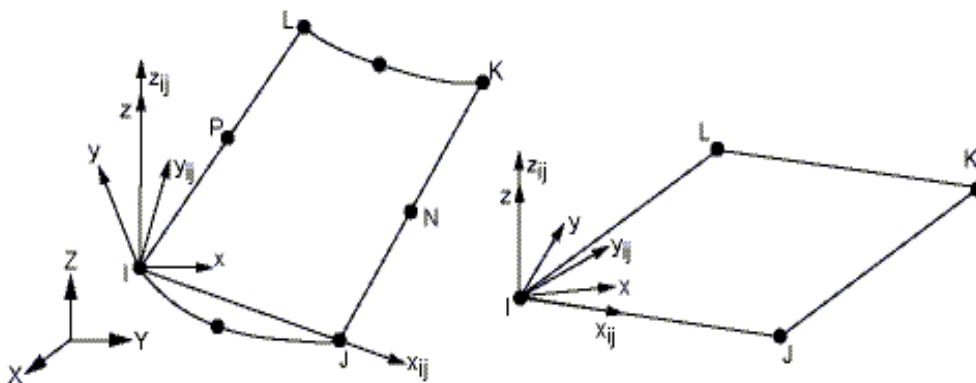


Figure 4.3: Élément type SURF154

IV.8 Calcul de l'épaisseur de l'élément SURF154

L'épaisseur de l'élément surf 154 est donnée par la formule suivante :

$$\text{Epaisseur d'élément SURF154} = \frac{\text{volume d'eau de reservoir (m}^3\text{)}}{\text{surface de contact fluide - barrage et/ou fondation (m}^2\text{)}} \times \text{masse volumique d'eau (kg/m}^3\text{)}$$

Tableau 4.3 Propriétés des matériaux de barrage multi voûte

Matériau	Module de young N/m3	Coefficient de poisson	Densité Kg/m3
Fluide	2.068 e+09	0.49	1000

Remarques

- 1) Le volume d'eau ne change pas, c'est juste la surface de contact qui change, à savoir si le sol de fondation est modélisé ou non.
- 2) Le maillage élément finis du barrage seul (à base encastrée) et de barrage avec sol de fondation (avec ISS) est maintenu (voir image 4.7 et 4.13).
- 3) Le volume d'eau du réservoir est calculé automatiquement par Ansys, tout en modélisant le fluide en lui donnant une masse volumique de 1000kg/m³.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre une présentation du code élément finis Ansys ainsi que les étapes de modélisation de notre cas d'étude avec et sans interaction sol structure et ainsi avec et sans fluide a été détaillée. Dans le prochain chapitre les résultats de calcul modal vont être exposé et discutés.

CHAPITRE V : Interprétations des résultats du calcul modal

V.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, les étapes de modélisation du Barrage multi-voûte dont la géométrie a été inspirée du barrage El Mafrouch ont été exposées. Le présent chapitre va être consacré à la présentation et la discussion des résultats du calcul modale de chaque cas étudié.

Pour voir l'effet d'interaction sol-structure et l'effet d'interaction sol-fluide-structure sur le comportement modale du barrage multi-voûte dont la géométrie a été inspirée du barrage El Mafrouch, six cas d'études ont été lancés à savoir:

1. Barrage vide à base fixe
2. Barrage vide avec ISS (fondation modélisée sans masse)
3. Barrage vide avec ISS (fondation modélisée avec masse)
4. Barrage remplis à base fixe
5. Barrage remplis avec ISS (fondation modélisée sans masse)
6. Barrage remplis avec ISS (fondation modélisée avec masse)

V.2 Définition de quelques paramètres utilisés dans l'analyse modale et donnés par le code Ansys

V.2.1 Facteur de participation

Le facteur de participation d'une excitation donnée est donnée par:

$$P_{fi} = \{\phi\}_i^T [M] \{D\} \quad (5.1)$$

où:

P_{fi} : Facteur de participation du mode i

$\{D\}$: Vecteur décrivant la direction d'excitation

$\{\phi\}_i$: Vecteur propre normaliser

$\{\phi\}_i^T$: La transposé du vecteur propre normaliser

V.2.2 Masse effective

La masse effective est donnée par:

$$M_{ei} = \frac{P_{fi}^2}{\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i} \quad (5.2)$$

M_{ei} : La masse effective de i^{ème} mode

V.2.3 Masse effective totale

$$M_{e\text{totale}} = \sum M_{ei} \quad (5.3)$$

V.2.4 Rapport

Le rapport est donnée par:

$$Rapport = \frac{P_{fi}}{P_{fi \max}} \quad (5.4)$$

V.3 Résultats et discussions

V.3.1 Barrage vide à base fixe

Le tableau 5.1, tableau 5.2 et tableau 5.3 présente les vingt premier modes suivant l'axe x, l'axe y et l'axe z respectivement. Il est à noter que de nombre de mode à présenter est au choix, pour notre cas, on a choisi vingt modes.

Remarque:

Tableau 5.1 : valeurs des fréquences du barrage à base fixe suivant x

Mode	Fréquence (Hz)	Période (seconde)	Facteur de participation	Rapport	Masse Effective (kg)
1	3.16554	0.31590	-1.9865	0.001235	3.94630
2	3.20051	0.31245	-0.88297E-01	0.000055	0.779635E-02
3	3.25519	0.30720	-5.7205	0.003556	32.7239
4	3.32427	0.30082	-0.19831	0.000123	0.393261E-01
5	3.40065	0.29406	-8.4628	0.005260	71.6186
6	3.47640	0.28765	0.35270	0.000219	0.124394
7	3.54413	0.28216	-9.1339	0.005677	83.4286
8	3.59872	0.27788	0.55178	0.000343	0.304462
9	3.63817	0.27486	7.6372	0.004747	58.3276
10	3.66335	0.27297	0.68999	0.000429	0.476089
11	3.67285	0.27227	7.4497	0.004630	55.4987
12	3.67547	0.27207	0.21911	0.000136	0.480092E-01
13	3.67696	0.27196	-5.1986	0.003231	27.0257
14	3.67897	0.27182	-2.3158	0.001439	5.36284
15	3.68198	0.27159	4.1656	0.002589	17.3526
16	3.68220	0.27158	0.94488	0.000587	0.892806
17	5.14426	0.19439	-3.8061	0.002366	14.4863
18	5.16447	0.19363	-0.78288E-01	0.000049	0.612897E-02
19	5.20161	0.19225	12.691	0.007888	161.054
20	5.26098	0.19008	0.16675	0.000104	0.278067E-01

Tableau 5.2 : valeurs des fréquences du barrage à base fixe suivant y

Mode	Fréquence (Hz)	Période (seconde)	Facteur de participation	Rapport	Masse Effective (kg)
1	3.16554	0.31590	-0.27714	0.000079	0.768056E-01
2	3.20051	0.31245	-48.173	0.013670	2320.66
3	3.25519	0.30720	-0.84378	0.000239	0.711958
4	3.32427	0.30082	-105.70	0.029995	11172.9
5	3.40065	0.29406	-1.8431	0.000523	3.39703
6	3.47640	0.28765	179.76	0.051010	32313.0
7	3.54413	0.28216	-2.7149	0.000770	7.37055
8	3.59872	0.27788	271.98	0.077180	73974.0
9	3.63817	0.27486	6.0096	0.001705	36.1151
10	3.66335	0.27297	329.38	0.093468	108492.
11	3.67285	0.27227	3524.0	1.000000	0.124184E+08
12	3.67547	0.27207	-21.335	0.006054	455.190
13	3.67696	0.27196	-19.042	0.005403	362.586
14	3.67897	0.27182	-1117.2	0.317037	0.124821E+07
15	3.68198	0.27159	200.51	0.056898	40203.1
16	3.68220	0.27158	884.85	0.251092	782951.
17	5.14426	0.19439	0.17948	0.000051	0.322118E-01
18	5.16447	0.19363	-23.600	0.006697	556.970
19	5.20161	0.19225	-0.55264	0.000157	0.305408
20	5.26098	0.19008	44.852	0.012728	2011.73

Tableau 5.3 : valeurs des fréquences du barrage à base fixe suivant z

Mode	Fréquence (Hz)	Période (seconde)	Facteur de participation	Rapport	Masse Effective (kg)
1	3.16554	0.31590	-6.3057	0.002154	39.7616
2	3.20051	0.31245	-0.14955	0.000051	0.223639E-01
3	3.25519	0.30720	-17.830	0.006089	317.912
4	3.32427	0.30082	-0.31731	0.000108	0.100686
5	3.40065	0.29406	-25.481	0.008702	649.282
6	3.47640	0.28765	0.52076	0.000178	0.271193

7	3.54413	0.28216	-26.197	0.008947	686.290
8	3.59872	0.27788	0.76374	0.000261	0.583297
9	3.63817	0.27486	20.500	0.007001	420.260
10	3.66335	0.27297	0.92361	0.000315	0.853050
11	3.67285	0.27227	9.6586	0.003299	93.2894
12	3.67547	0.27207	-0.12290	0.000042	0.151037E-01
13	3.67696	0.27196	-12.639	0.004316	159.733
14	3.67897	0.27182	-2.9640	0.001012	8.78511
15	3.68198	0.27159	8.8144	0.003010	77.6934
16	3.68220	0.27158	0.39145	0.000134	0.153235
17	5.14426	0.19439	-9.8922	0.003378	97.8558
18	5.16447	0.19363	-0.10007	0.000034	0.100145E-01
19	5.20161	0.19225	32.653	0.011152	1066.20
20	5.26098	0.19008	0.20985	0.000072	0.440376E-01

Il est à noter que le code Ansys donne les valeurs des fréquences et par conséquent des périodes dans les trois directions "x", "y" et "z". Pour notre modèle, la direction "x" est celle suivant la verticale (la pesanteur), alors que la direction "y" est celle dans le sens amont-aval (voir image 4.7 et 4.11).

Dans ce qui suit, on s'intéresse à la direction "y" car c'est la direction de faible inertie. Le tableau 5.2 montre que le mode fondamentale est le mode 11 qui entraîne le maximum de masse.

V.3.2 Effet d'interaction sol structure sur le comportement modal du barrage

La figure 5.1 schématise l'effet de modélisation du sol de fondation connu sous le nom d'interaction sol-structure sur le comportement modale du barrage objet de la présente étude. Trois types d'analyses ont été effectués :

- 1) Barrage vide à base encastree;
- 2) Barrage vide avec sol modélisé sans masse;
- 3) Barrage vide avec sol modélisé avec masse

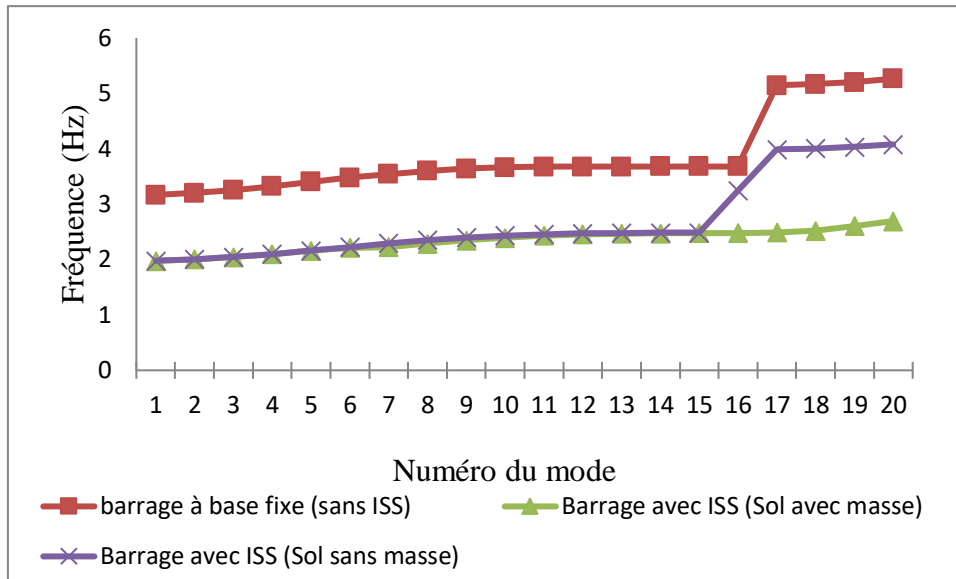


Figure 5.1 Effet d'ISS sur le comportement modal du barrage

Le tableau 5.4 résume Les vingt première fréquences de chaque cas étudié (barrage vide à base encastrée, barrage vide avec sol modélisé sans masse, barrage vide avec sol modélisé avec masse).

Tableau 5.4 Valeurs des fréquences du barrage pour les trois hypothèses de modélisation d'ISS

mode	Fréquence (Hz) barrage à base fixe (sans ISS)	Fréquence (Hz) Barrage avec ISS (Sol sans masse)	Fréquence (Hz) Barrage avec ISS (Sol avec masse)
1	3,16554	1,97852	1,97763
2	3,20051	2,00415	2,00321
3	3,25519	2,04543	2,04438
4	3,32427	2,09909	2,09792
5	3,40065	2,16126	2,15994
6	3,4764	2,22695	2,21466
7	3,54413	2,29125	2,22552
8	3,59872	2,34869	2,28977
9	3,63817	2,39609	2,34714
10	3,66335	2,43151	2,39465
11	3,67285	2,45567	2,43008
12	3,67547	2,47049	2,45443
13	3,67696	2,47833	2,46884

14	3,67897	2,48158	2,47234
15	3,68198	2,48193	2,47694
16	3,6822	3,24397	2,47865
17	5,14426	3,98908	2,491
18	5,16447	4,00496	2,52185
19	5,20161	4,03392	2,6069
20	5,26098	4,07908	2,69493

La figure 5.1 représente une comparaison entre les vingt premières fréquences pour chaque modèle.

Il est clair sur la figure 5.1 que la fréquence du barrage diminue lorsque le sol de fondation est pris en compte, beaucoup plus lorsque le sol de fondation est modélisé avec sa masse. La même remarque a été trouvée pour le barrage poids voûte de el Bayadh [15] et pour le barrage Oued taht [16].

Ajouter le sol de fondation à la structure, rend le système flexible et augmente sa masse ce qui engendre une diminution de la fréquence de système et par conséquent une augmentation de sa période.

Suivant le tableau 5.2, le tableau 5.5 et le tableau 5.6 on remarque que la modélisation du sol de fondation modifie non seulement les valeurs des fréquences mais aussi le positionnement du mode fondamentale (sachant que le mode fondamentale est le mode qui entraîne le maximum de masse). Pour le cas du barrage à base encastree, le mode fondamentale est le mode numéro 11, alors que si on ajoute le sol de fondation sans tenir en compte de la composante inertielle d'interaction, le mode fondamentale se décale au mode numéro 15 et si on tient en compte la composante inertielle le mode fondamentale se décale au mode numéro 14.

Tableau 5.5 Valeurs des fréquences du barrage avec sol sans masse

Mode	Fréquence (Hz)	Période (seconde)	Facteur de participation	Rapport	Masse Effective (kg)
1	1.97852	0.50543	-27.277	0.006964	744.032
2	2.00415	0.49896	-6.9627	0.001778	48.4798
3	2.04543	0.48890	86.454	0.022071	7474.25
4	2.09909	0.47640	-16.898	0.004314	285.557
5	2.16126	0.46269	-170.24	0.043461	28981.5

6	2.22695	0.44904	35.892	0.009163	1288.27
7	2.29125	0.43644	294.16	0.075097	86531.6
8	2.34869	0.42577	70.041	0.017881	4905.80
9	2.39609	0.41735	478.74	0.122218	229191.
10	2.43151	0.41127	128.04	0.032687	16393.4
11	2.45567	0.40722	768.95	0.196306	591280.
12	2.47049	0.40478	253.19	0.064637	64104.2
13	2.47833	0.40350	1577.9	0.402832	0.248985E+07
14	2.48158	0.40297	621.25	0.158601	385956.
15	2.48193	0.40291	3917.1	1.000000	0.153435E+08
16	3.24397	0.30826	1105.4	0.282204	0.122194E+07
17	3.98908	0.25068	-7.7663	0.001983	60.3154
18	4.00496	0.24969	-35.337	0.009021	1248.67
19	4.03392	0.24790	27.790	0.007095	772.283
20	4.07908	0.24515	-74.519	0.019024	5553.07

Tableau 5.6 Valeurs des fréquences du barrage avec sol avec masse

Mode	Fréquence (Hz)	Période (seconde)	Facteur de participation	Rapport	Masse Effective (kg)
1	1.97763	0.50565	111.86	0.000660	12513.4
2	2.00321	0.49920	69.799	0.000412	4871.91
3	2.04438	0.48915	-354.40	0.002090	125603.
4	2.09792	0.47666	111.28	0.000656	12382.7
5	2.15994	0.46298	642.31	0.003788	412560.
6	2.21466	0.45154	3751.1	0.022124	0.140707E+08
7	2.22552	0.44933	67.509	0.000398	4557.53
8	2.28977	0.43673	-1385.4	0.008171	0.191934E+07
9	2.34714	0.42605	2.8330	0.000017	8.02612
10	2.39465	0.41760	-2794.5	0.016482	0.780911E+07
11	2.43008	0.41151	-1063.0	0.006270	0.113003E+07
12	2.45443	0.40743	-9683.3	0.057113	0.937667E+08
13	2.46884	0.40505	-43699.	0.257737	0.190957E+10
14	2.47234	0.40448	-0.16955E+06	1.000000	0.287463E+11

15	2.47694	0.40372	-6178.1	0.036439	0.381689E+08
16	2.47865	0.40345	-38426.	0.226640	0.147657E+10
17	2.49100	0.40144	0.11746E+06	0.692783	0.137967E+11
18	2.52185	0.39653	-0.11232E+06	0.662461	0.126154E+11
19	2.60690	0.38360	-90278.	0.532464	0.815008E+10
20	2.69493	0.37107	-10186.	0.060075	0.103747E+09

Les mêmes résultats sont trouvés pour le barrage d'el Bayadh (Tahar Berrabah et al., 2012) ainsi que le barrage de oued Taht (Krenich et al., 2018).

V.4 Effet d'interaction fluide structure sur le comportement modal du barrage multi-voûte

V.4.1 Barrage seul

La figure 5.2 schématise l'effet de la modélisation d'interaction fluide structure sur le comportement modal du barrage seul c'est à dire sans modélisation d'interaction sol-structure. Il faut rappeler que l'approche des masse ajoutées est utilisée pour la modélisation du fluide moyennant l'élément SURF disponible dans la bibliothèque Ansys.

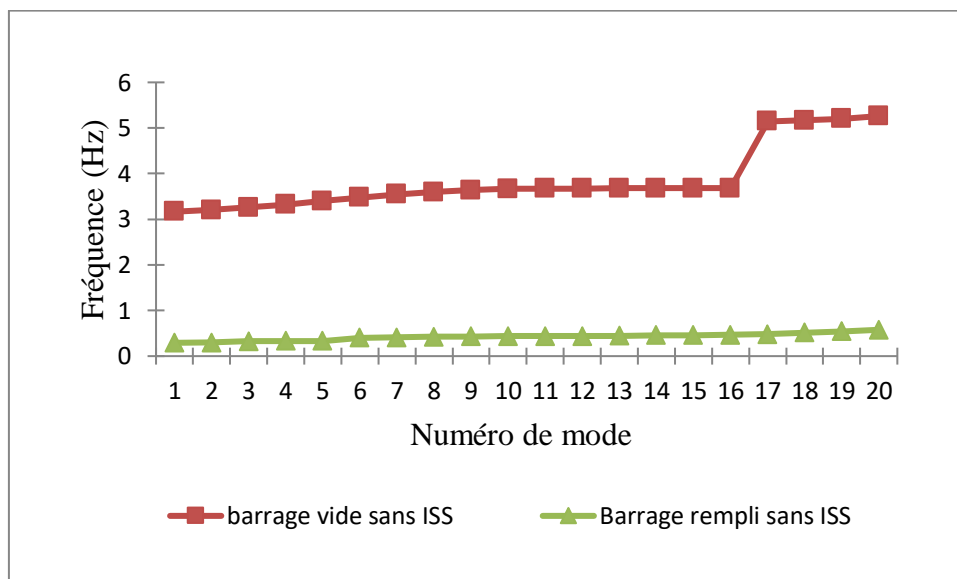


Figure 5.2. Effet d'IFS sur la réponse modal du barrage seul (sans ISS)

Le tableau 5.7 résume Les vingt première fréquences de chaque cas étudié (barrage vide sans ISS, Barrage rempli sans ISS)

Tableau 5.7 Valeurs des périodes du barrage seul avec et sans fluide

mode	Fréquence (Hz) barrage vide sans ISS	Fréquence (Hz) Barrage rempli sans ISS
1	3,16554	0,291897
2	3,20051	0,298617
3	3,25519	0,325882
4	3,32427	0,333788
5	3,40065	0,334767
6	3,4764	0,400268
7	3,54413	0,410525
8	3,59872	0,423055
9	3,63817	0,431983
10	3,66335	0,434858
11	3,67285	0,440716
12	3,67547	0,441478
13	3,67696	0,442292
14	3,67897	0,456416
15	3,68198	0,45903
16	3,6822	0,464346
17	5,14426	0,480213
18	5,16447	0,515541
19	5,20161	0,546731
20	5,26098	0,577367

Il est clair sur la figure 5.2 et sur le tableau 5.7 que la présence du fluide augmente la période du système et donc diminue sa fréquence.

V.4.2 Le barrage avec sol sans masse

La figure 5.3 schématise l'effet de la modélisation d'interaction fluide structure sur le comportement modal du barrage modélisé avec sol de fondation sans masse.

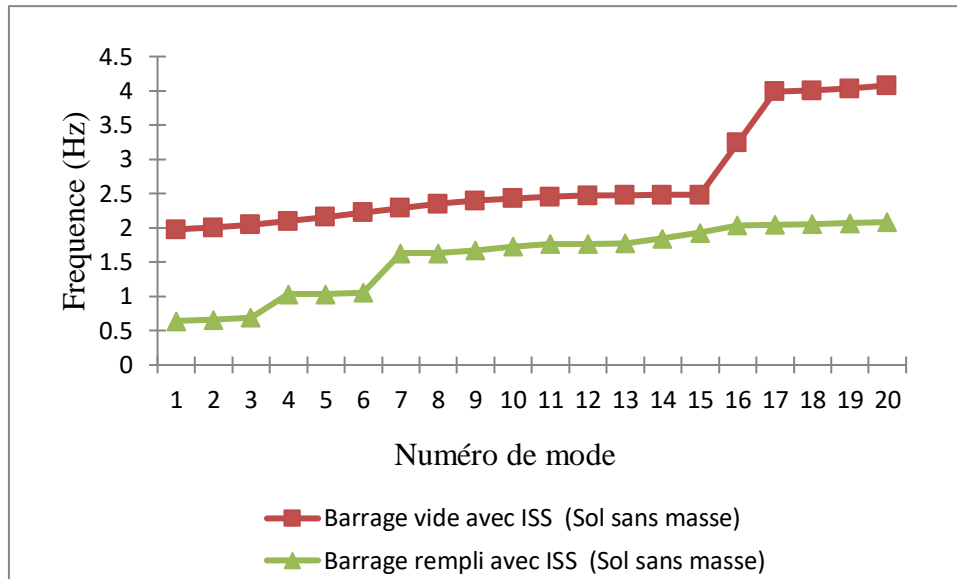


Figure 5.3 Effet d’IFS sur la réponse modal du barrage avec ISS (sol sans masse)

Tableau 5.8 Effet de la présence du fluide sur les valeurs des fréquences du barrage avec sol sans masse

mode	Fréquence (Hz)	Fréquence (Hz)
	Barrage vide avec ISS (Sol sans masse)	Barrage rempli avec ISS (Sol sans masse)
1	1,97852	0,509416
2	2,00415	0,530559
3	2,04543	0,562799
4	2,09909	0,764605
5	2,16126	0,779997
6	2,22695	0,85567
7	2,29125	0,876459
8	2,34869	0,886193
9	2,39609	0,889332
10	2,43151	0,913685
11	2,45567	0,937731
12	2,47049	1,04703
13	2,47833	1,09875
14	2,48158	1,20065
15	2,48193	1,27685

16	3,24397	1,38895
17	3,98908	1,39038
18	4,00496	1,39887
19	4,03392	1,40902
20	4,07908	1,47422

Il est clair sur la figure 5.3 et sur le tableau 5.8 que la présence du fluide diminue la fréquence du système.

V.4.3 Le barrage avec sol avec masse

La figure 5.4 schématise l'effet de la modélisation d'interaction fluide structure sur le comportement modal du barrage modélisé avec sol de fondation avec masse.

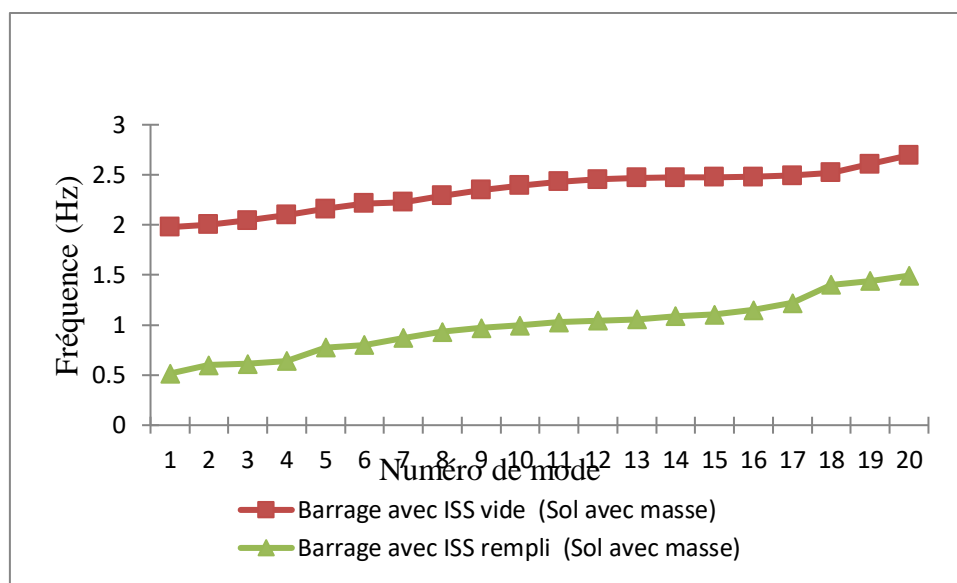


Figure 5.4 Effet d'IFS sur la réponse modal du barrage avec ISS (sol avec masse)

Tableau 5.9 Effet de la présence du fluide sur les valeurs des périodes du barrage avec sol avec masse

mode	Fréquence (Hz)	Fréquence (Hz)
	Barrage avec ISS vide (Sol avec masse)	Barrage avec ISS rempli (Sol avec masse)
1	1,97763	0,515658
2	2,00321	0,598906
3	2,04438	0,612978
4	2,09792	0,64152
5	2,15994	0,77469
6	2,21466	0,801642

7	2,22552	0,87181
8	2,28977	0,931199
9	2,34714	0,972114
10	2,39465	0,995673
11	2,43008	1,02806
12	2,45443	1,04577
13	2,46884	1,05699
14	2,47234	1,08839
15	2,47694	1,10611
16	2,47865	1,14834
17	2,491	1,21899
18	2,52185	1,40181
19	2,6069	1,4398
20	2,69493	1,49331

La figure 5.4 et le tableau 5.9 montrent que la prise en compte du fluide diminue la fréquence de la structure, c'est les mêmes résultats trouvés pour le barrage à base encastré et le barrage avec sol sans masse.

Tableau 5.10 Effet combiné d'ISS et d'IFS sur le mode fondamentale du barrage poids-voûte de Brezina [15].

Modèle d'ISS	Période fondamentale sans fluide (système vide) (seconde)	Période fondamentale avec fluide (fluide modélisé par élément SURF) (seconde)
Barrage Brezina avec ISS (sans masse)	9.334	12.22
Barrage avec ISS (avec masse)	7.83	8.31

Les mêmes résultats sont trouvés pour le barrage d'el Bayadh [15], la seule différence c'est que la présence du fluide pour ce barrage a un effet faible sur son comportement modale, c'est ce qui est présenté sur le tableau 5.10, cela est dû à la géométrie du barrage ; c'est un

barrage poids voûte, alors que pour le cas de notre barrage, est un barrage multi voûte, ce qui implique que l'effet membrane est présent dans son comportement. L'effet membrane se traduit par la différence remarquable de fréquence et par conséquent de période entre le cas vide et le cas rempli.

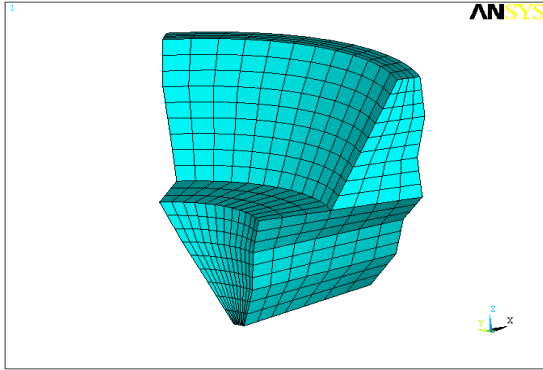


Image 5.1: barrage poids voûte de Brezina [13]

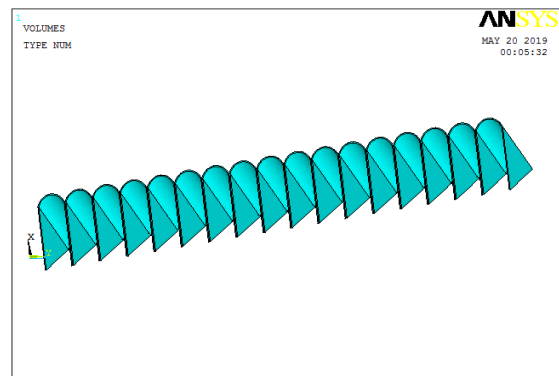


Image 5.2: barrage multi voûte Mefrouche

Tableau 5.11 Effet combiné d'ISS et d'IFS sur le mode fondamentale du barrage multi-voûte.

Modèle d'ISS	Fréquence fondamentale sans fluide (système vide)	Fréquence fondamentale avec fluide (fluide modélisé par élément SURF)
Barrage sans ISS (à base fixe)	3.67285 (mode numéro 11)	0.434858 (mode numéro 10)
Barrage avec ISS (sans masse)	2.48193 (mode numéro 15)	1.77443 (mode numéro 13)
Barrage avec ISS (avec masse)	2.21466 (mode numéro 6)	1.91242 (mode numéro 43)

D'après le tableau 5.11, il est clair que la présence du fluide diminue non seulement la fréquence fondamentale du système mais aussi change le positionnement de celle-ci.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, Le barrage multi voûte a été modélisé par le code élément finis Ansys, tout en prenant en considération l'effet d'interaction sol structure et l'effet d'interaction fluide structure.

L'analyse modale a permis de conclure ce qui suit:

- 1) La modélisation d'Interaction sol structure, modifie la fréquence du barrage, sachant que la fréquence est une caractéristique dynamique à prendre en considération dans les différents types de calcul dynamique (spectrale, transitoire...)
- 2) La modélisation d'Interaction fluide structure, modifie aussi la période du barrage ;
- 3) La modélisation d'interaction sol structure et fluide structure donne une augmentation des périodes du système ;
- 4) La grande différence de fréquence entre le cas vide et le cas rempli confirme l'effet membrane du barrage multi-voûte, ce qui n'est pas le cas pour le barrage de Brezina mais c'est le cas du barrage oued Taht.

Conclusion générale

Le barrage est un système composé de trois domaines : Le corps du barrage, le sol de fondation et le réservoir.

L'étude dynamique de n'importe quel barrage doit prendre en considération la présence de ces trois domaines.

L'objectif de ce travail est d'analyser le comportement dynamique (comportement modale) d'un barrage dont la géométrie est inspirée de barrage multi-voûte d'El Mefrouche.

Le code élément finis « Ansys » est choisi pour la modélisation dynamique du barrage objet de la présente étude.

Trois hypothèses ont été supposées pour la modélisation d'interaction sol-structure :

- 1) Modèle à base encastree ;
- 2) Modèle avec sol de fondation sans masse ;
- 3) Modèle avec sol de fondation avec masse.

En ce qui concerne la modélisation du fluide, la méthode des masses ajoutées est choisie comme hypothèse vue sa simplicité et sa facilité d'application. L'élément SURF 154 disponible sur la bibliothèque «Ansys» est utilisé pour modéliser le fluide.

Pour chaque modèle, un calcul Modale est mené pour extraire et comparer les fréquences qui représentent des caractéristiques dynamiques importantes du barrage.

Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- 5) La modélisation d'Interaction sol structure, modifie la fréquence du barrage, sachant que la fréquence est une caractéristique dynamique à prendre en considération dans les différents types de calcul dynamique (spectrale, transitoire...)
- 6) La modélisation d'Interaction fluide structure, modifie aussi la période du barrage ;
- 7) La modélisation d'interaction sol structure et fluide structure donne une augmentation des périodes du système ;
- 8) La grande différence de fréquence entre le cas vide et le cas rempli confirme l'effet membrane du barrage multi-voûte, ce qui n'est pas le cas pour le barrage de Brezina mais c'est le cas du barrage oued Taht.
- 9) Le code Ansys est un très bon outil pour le calcul dynamique des structures composées de plusieurs domaines ;
- 10) L'élément SURF sert bien pour la modélisation du fluide utilisant l'approche des masses ajoutées.

Il est important de signaler peut servir un support de base pour tout personne qui s'intéresse au domaine d'interaction sol-fluide-structure appliqué aux barrages.

Références bibliographiques

- Tahar Berrabah.A, Comportement modal du système de fondation du réservoir du barrage, Journal EJGE, 2011. [09]
- Ghefir.M, Contactez l'effet sur le barrage Dimensions de base (Étude de cas en Algérie: El-Izdihar Dam), Jordanie Journal de génie civil, 2012. [10]
- Tahar Berrabah.A, Structure d'étude d'interaction dynamique du sol, Jordanie Journal de génie civil, 2012. [11]
- Tahar Berrabah.A, Analyse modale tridimensionnelle du barrage-voûte en béton de Brezina, Algérie, Earth Science Research, 2012. [12]
- Tahar Berrabah.A, Interaction fluide-structure du barrage-voûte de Brezina : Analyse modale, ELSEVIER, 2014. [13]
- Ouzandjal.D, Réponse sismique tridimensionnelle non linéaire du barrage-poids en béton d'oued fouda en tenant compte des éléments de contact à l'interaction barrage-réservoir, Journal Asiatique Du Génie Civil, 2017. [14]
- Tahar Berrabah.A, Dynamic soil-Fluid-Structure interaction applied for concrete dam, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2012. [15]
- Krenich Nasreddine et al, Soil-fluid-structure interaction applied to the Oued Taht dam (taking into account the membrane effect), MATEC Web of Conferences 149, 02037 (2018). [16]
- Alain-PECKER. Dynamique des sols. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. [04]
- A. Filiatrault. Eléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures. Edition de l'école polytechnique de Montréal, 1996. [01]
- A. Seghir. Contribution à la modélisation numérique de la réponse sismique des ouvrages avec interaction sol-structure et interaction fluide-structure Application à l'étude des barrages poids en béton. Thèse de doctorat, université de Béjaïa, 2010. [02]
- Boumaïza malika 2009/2010, Contribution A L'étude Et A L'analyse Du Comportement Des Barrages En Terre Et De Leur Stabilité. [05]
- Benmalek Sidahmed Islam 2009/2010, Etude Statique Et Dynamique De L'interaction Sol-Structure (Cas D'un Barrage En Béton, Ecole Nationale Polytechnique. [06]
- Drucker DC, Prager W. Soil mechanics and plastic analysis of limit design, Quarterly of Applied Mathematics, No. 2, 10(1952) 157-65. [07]
- E.Kausel. «Early history of soil-structure interaction ». Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009
- Kasmi Fares, Mouhoubi Fatima, 2011/2012, Etude De La Réponse Sismique D'un Barrage-voûte Avec Interaction Fluide-Sol-Structure Par La Méthode Des Eléments Finis (Application Au Barrage-voûte De Tichi Haf). [03]