



République démocratique populaire algérienne

*Ministère d'enseignement supérieur et
de la recherche scientifique*

Université belhadj bouchaib - Ain temouchent

Faculté de science et technologie

Département Génie Civil

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : Structure

Thème

*Interaction dynamique Sol-fluide-structure
appliquée aux barrages*

Présenté Par :

Ourrad Sihem

Devant les jurys composés de :

Pr. Amara khaled

Université Ain temouchent

Président

Dr. Tahar berrabah Amina

Université Ain temouchent

Encadreur

Dr. Moussi Wahiba

Université Ain temouchent

Examinatrice

Année universitaire :2020-2021

Remerciement

Nous remercions avant tout Dieu de nous avoir gardé en bonne santé, de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous voudrions exprimer nos plus profonds remerciements à nos parents, à nos frères, à nos sœurs pour leurs sacrifices, pour leur soutien constant, leur patience et leur encouragement tout au long de ces années d'enseignement.

Nous remercions Madame Tahar berrabah Amina, notre encadreur de mémoire qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour nous avoir aidés à réaliser ce travail, sa grande disponibilité, les connaissances qu'elle nous a fait partager. Nous la remercions sincèrement d'avoir fait que ce travail se réalise dans les meilleures conditions scientifiques et humaines.

Nous adressons également, nos remerciements à tous les professeurs de l'université Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent en particulier nos enseignants du Département de Génie Civil.

Résumé

L'objectif principal du présent projet est l'initiation à la dynamique des structures en général et surtout à la dynamique des barrages. Pour ce faire, il nous a fallu passer en revue et assimiler les études préliminaires aux projets de barrages afin de présenter les particularités de ces ouvrages dans l'ensemble des structures de génie civil. Une section d'étude - section trapézoïdale de barrage poids en béton - a été choisie. Le comportement statique et dynamique en contexte linéaire (analyse statique et modale) de l'inspiration du barrage Koyna. Le but de ce travail base sur quatre hypothèses on était supposé pour la modélisation d'interaction sol-fluide-structure ; le modèle du barrage vide a base encastree, avec interaction sol-structure, plus le modèle du barrage avec interaction fluide-structure et modèle du barrage avec interaction sol-fluide-structure, on a utilisé la méthode de la masse ajoutée (Westergaard) et l'usage de l'élément SURF 153 dans le code ANSYS.

Mots Clés : Barrage, interaction sol-structure, interaction sol-fluide-structure, code ANSYS.

Abstract

The main objective of this project is the initiation to the dynamics of structures especially to the dynamics of dams. To do this, we had to review and assimilate the preliminary studies to the dam projects in order to present the peculiarities of these structures in all the civil engineering structures. A study section - trapezoidal section of a concrete gravity dam - was chosen. The static and dynamic behavior in linear context (static and modal analysis) of the inspiration for the Koyna Dam. The goal of this work is based on four hypotheses one was supposed for the modeling of soil-fluid-structure interaction; the model of the empty dam with embedded base, with soil-structure interaction, plus the model of the dam with fluid-structure interaction and the model of the dam with soil-fluid-structure interaction, we used the method of added mass (Westergaard) and the use of the element SURF 153 in the ANSYS code.

Keywords: Dam, soil-structure interaction, soil-fluid-structure interaction, ANSYS code.

Sommaire

	Page
Résume	a
Sommaire	b
Liste des tableaux	e
Liste des Figures	f
Introduction générale	I
Chapitre 01 : Généralités sur le phénomène interaction sol-fluide-structure appliqué aux barrage.	01
1-1-Introduction	01
1-2-Barrage	01
1-2-Types Des barrages	02
1-2-1-Barrage-poids	05
1-2-2-Barrage-voûte	05
1-2-3-Barrage à contreforts	06
1-3-L'interaction sol structure :	07
1-3-1-Définition de l'interaction sol structure :	07
1-3-2-Méthodes de prise en compte de l'interaction dynamique sol-structure	07
1-3-2-1- Méthodes globales ou directes :	07
1-3-2-2- Méthode des sous-structures :	08
1-3-2-3-Méthodes hybrides :	08
1-3-3- Etude du problème d'interaction Sol Structure	08
1-3-4-Notions d'interaction cinématique et inertielle :	09
1-3-4-1-Interaction cinématique	10
1-3-4-2-Interaction inertielle	11
1-3-4-3-Interface sol-structure (Fonction d'impédance)	12
1-4-L'interaction Fluide structure :	13
1-4-1Quelque méthode de l'interaction fluide structure :	13
1-5-Methodes de modélisation de l'Interaction sol Fluide structure :	14
1-5-1-Modélisation par ressorts :	15
1-5-2-Méthodes aux éléments finis :	16
1-6-Conclusion :	16
Chapitre 02 : Recherche bibliographique sur le phénomène d'interaction sol-fluide-structure appliqué aux barrages.	17
2-1-introduction.	17
2-2-Recherche Bibliographique.	17
2-3-Conclusion.	20
Chapitre 03 : Présentation de logiciel ANSYS.	21
3-1- Introduction	21
3-2- Généralité	21

3-3-Type d'analyse	22
3-3-1-L'analyse structure	22
3-3-2-L'analyse Thermique	23
3-3-3-L'analyse électromagnétique	23
3-3-4-Analyse en Champs Couplés	23
3-4- Démarche utilisée pour la création d'un modèle ANSYS	24
3-4-1- A partir de l'icône préférence	24
3-4-2- A partir de l'icône préprocesseur	24
3-4-3- A partir de l'icône solution	25
3-4-4- A partir de l'icône General Post proc.	26
3-4-5- Barre de commande ANSYS.	27
3-5-Conclusion.	28
Chapitre 04 : Présentation du barrage étudié koyna.	29
4-1-Introduction	29
4-2-Description du site, de la structure et des matériaux.	29
4-3-Propriétés des matériaux.	31
4-4- Modélisation élément finis du barrage koyna vide avec et sans interaction sol-structure :	31
4-5- Modélisation de l'interaction fluide structure.	33
4-6- Calcul de l'épaisseur de l'élément SURF153.	33
4-7-conclusion.	34
Chapitre05 : interaction Sol-Structure appliquée au barrage Koyna.	35
5-1-Introduction.	35
5-2-Définition de quelques paramètres utilisés dans l'analyse modale et donnés par le code ANSYS.	35
5-2-1-Facteur de participation.	35
5-2-3- Masse effective totale.	35
5-2-4- Rapport.	35
5-2-L'analyse statique.	36
5-2-1-Calcul Statique du barrage seul (Sans interaction).	36
5-2-2-Calcul statique du barrage vide avec interaction	39
5-3-La discussion de l'analyse statique.	42
5-4- L'analyse Modale :	42
5-4-1-Calcul modale du barrage vide seul.	42
5-4-2-Calcul modale du barrage vide avec sol.	43
5-4-3-Le rapport entre les deux fréquences du barrage vide sans et avec sol.	44
5-4-4-La discussion de l'analyse modale.	45
5-5-Conclusion.	46
Chapitre06 : interaction Sol-fluide-Structure appliquée au barrage Koyna.	47
6-1-Introduction.	47
6-2-L'analyse statique.	47
6-2-1- Calcul Statique du barrage seul rempli (Sans interaction sol structure).	50

6-2-2-Calcul statique du barrage rempli avec interaction.	54
6-3-La discussion de l'analyse statique.	54
6-4- L'analyse Modale.	54
6-4-1-Calcul modale du barrage rempli.	56
6-4-2-Calcul modale du barrage rempli avec sol.	57
6-4-3-Le rapport entre les deux fréquences du barrage vide sans et avec sol.	57
6-4-4-La discussion de l'analyse modale.	58
6-5-Conclusion.	58
Conclusion générale.	59
Références.	60

Liste des tableaux

N° de tableau	Description	Page
4-1	Propriétés de corps de barrage et sol de fondation	31
4-2	Propriétés du fluide de réservoir d'eau.	33
5-1	Les 20 premières fréquences suivant X du barrage vide sans interaction.	42
5-2	Les 20 premières fréquences suivant X du barrage vide avec interaction.	43
5-3	Les 30 premières fréquences suivant X du barrage vide (sans et avec interaction)	45
6-1	Les 20 premières fréquences suivant X du barrage rempli.	54
6-2	Les 20 premières fréquences suivant X du barrage rempli avec sol de fondation.	55
6-3	: Les 30 premières fréquences suivant X du barrage rempli (sans et avec sol de fondation)	56

Liste des figures

N° de figures	Description	Page
1-1	Barrage de Katse-le château d'eau de l'Afrique du sud.	2
1-2	Barrage El mahouane Setif- Algérie.	2
1-3	Schéma descriptif du barrage-réservoir vue de profil.	3
1-4	Schéma résume les types de barrages en béton.	4
1-5	Les types de barrages en béton.	5
1-6	Barrage poids de la Grande Dixence (Suisse)	5
1-7	Barrage voûte de Naret 1(Suisse)	6
1-8	Barrage à contreforts d'Ekbatan (Iran)	6
1-9	Schéma résume les types de barrages en remblais.	6
1-10	Différentes méthodes des sous-structures avec leurs étapes respectives. Adapté de Ostadan (2006).	10
1-11	Système complet. Adapté de (NEHRP Consultants Joint-Venture, 2012)78	11
1-12	Interaction Sol-structure.	12
1-13	Concept de la masse ajoutée de Westergaard.	13
1-14	les types de modélisation.	15
1-15	Modélisation du sol par un système de ressort.	16
3-1	Fenêtre de choix des domaines d'études.	22
3-2	Fenêtre de choix des types d'analyses	23
3-3	Fonction de l'icône préprocesseur.	24
3-4	Fonction de l'icône solution	25
3-5	Fonction de l'icône général postproc	26
3-6	Fonction de l'icône Time Hist postpro	27
3-7	Fonction de la barre de commande ANSYS	27
4-1	Géométrie du barrage Koyna	29
4-2	Station GPS Barrage de Koyna, Western Maharashtra, Inde	30
4-3	Barrage de Koyna, Western Maharashtra, Inde	30
4-4	Schéma de l'élément PLANE182	31
4-5	Modèle élément finis du Barrage Koyna a base fixe (sans interaction sol-structure).	32
4-6	Modèle élément finis du Barrage Koyna avec sol de fondation (avec interaction sol-structure)	32
4-7	Élément type SURF153	33
5-1	Déformation du barrage seul (Sans interaction).	36
5-2	Déplacement suivant X du barrage seul (Sans interaction).	36
5-3	Déplacement suivant Y du barrage seul (Sans interaction)	37
5-4	Contrainte suivant X du barrage seul (Sans interaction)	37

5-5	Contrainte suivant Y du barrage seul (Sans interaction)	38
5-6	Contrainte Von Mises du barrage seul (Sans interaction)	38
5-7	Déformation du barrage vide avec interaction.	39
5-8	Déplacement suivant X du barrage vide avec interaction.	39
5-9	Déplacement suivant Y du barrage vide avec interaction.	40
5-10	Contrainte suivant X du barrage vide avec interaction.	40
5-11	Contrainte suivant Y du barrage vide avec interaction.	41
5-12	Contrainte de VON MISES du barrage vide (avec interaction sol-structure)	41
5-13	Les 100 fréquences suivant X du barrage vide a base fixe.	42
5-14	Les 100 fréquences suivant X du barrage vide avec interaction.	43
5-15	Les 100 fréquences suivant X du barrage (sans et avec interaction).	45
6-1	Déformation du barrage rempli (Sans interaction sol structure).	47
6-2	Déplacement suivant X du barrage rempli (Sans interaction sol structure).	48
6-3	Déplacement suivant Y du barrage rempli (Sans interaction sol structure).	48
6-4	Contrainte suivant X du barrage rempli (Sans interaction sol structure).	49
6-5	Contrainte suivant Y du barrage rempli (Sans interaction sol structure).	49
6-6	Contrainte Von Mises du barrage rempli (Sans interaction sol structure).	50
6-7	Déformation du barrage avec interaction sol-fluide-structure.	50
6-8	Déplacement suivant X du barrage avec interaction. Sol-fluide-structure	51
6-9	Déplacement suivant Y du barrage avec interaction sol-fluide-structure.	51
6-10	Contrainte suivant X du barrage avec interaction sol-fluide-structure.	52
6-11	Contrainte suivant Y du barrage avec interaction sol-fluide-structure.	53
6-12	Contrainte de VON MISES du barrage avec interaction sol-fluide-structure.	53
6-13	Les 20 fréquences suivant X du barrage rempli a base fixe.	55
6-14	Les 100 fréquences suivant X du barrage rempli avec sol.	56
6-15	Les 20 fréquences suivant X du barrage (sans et avec interaction).	57

Introduction générale

Ces dix dernières années, les tremblements de terre demeurent la catastrophe la plus importante en faisant à la fois un nombre de victimes considérable et des dégâts matériels d'un montant gigantesque. Face à une telle catastrophe humaine et économique, les êtres humains se sont mobilisés depuis longtemps pour la protection des vies humaines et la limitation des dommages matériels. En effet, les mesures préventives contre les séismes s'organisent autour de deux axes sur le plan technique : la surveillance et la prévision des séismes d'un côté et la construction parasismique de l'autre. La surveillance et la prévision des séismes font l'objet du travail du sismologue. Malheureusement, il n'existe à l'heure actuelle aucun moyen fiable de prévoir où, quand et avec quelle puissance se produira un séisme. Les recherches sur la construction parasismique constituent un axe particulièrement important pour la prévention du risque sismique.

La construction parasismique consiste à trouver des techniques de génie civil permettant aux habitations de résister au mieux aux tremblements de terre. Pour cela, une bonne connaissance du comportement des structures sous sollicitations sismiques est très importante. Les structures étant fondées sur les sols par lesquels sont transmises des sollicitations sismiques, il s'avère en conséquence essentiel de connaître le fonctionnement de l'ensemble du système sol- structure en cas de séisme. En effet, non seulement la nature des sols a une influence sur le comportement des structures, mais les structures mises en mouvement induisent aussi des chargements supplémentaires dans les sols qui modère à leur tour les composantes des sollicitations.

Le terme générique décrivant l'étude de ces phénomènes porte le nom d'Interaction Sol-fluide- Structure (ISFS).

Les phénomènes d'interaction fluide-structure sont très largement répandus dans le monde qui nous entoure. Ils sont parfois non visibles comme l'écoulement sanguin dans un cœur ou alors plus remarquables comme le mouvement oscillant de la posidonie aquatique. Des études ont révélé l'impact de la présence de ces végétations sous-marines sur l'écoulement marin mais très peu d'entre elles ne traitent de structures élastiques artificielles. C'est dans ce contexte biomécanique d'interaction fluide-structure élastique que s'inscrivent les travaux menés durant cette thèse. Nous souhaitons l'appliquer à l'atténuation des vagues à des fins de préservation du littoral, 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, voir 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.

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

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-fluide-structure. Une modélisation du barrage seul avec un encastrement à sa base, et une modélisation du barrage avec le sol de fondation et le fluide de réservoir.

Le mémoire, est organisé en six 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) et la description du barrage étudié.

Le troisième chapitre, est destiné à la modélisation ANSYS du barrage poids dont la géométrie est inspirée de celle du barrage koyna.

Dans le quatrième chapitre, nous avons fait une présentation du cas d'étude (Barrage koyna).

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

1-1-Introduction :

Tous les ouvrages de génie civil présentent un certain degré d'interaction ou de couplage avec les milieux environnants. Ce couplage peut être dû aux effets thermiques, inertiels, cinématiques, ou autres. Pour le cas des barrages, on distingue deux types d'interactions : 'Interaction sol-structure' et 'Interaction fluide-structure'. Dans ce chapitre, on va dédier une généralité sur les barrages et ses types, ensuite des courtes définitions sur interaction Dynamique Sol-Structure et interaction dynamique Sol-fluide-Structure et ces méthodes de calculs.

1-2-Barrage :

Un barrage est un ouvrage artificiel disposé en travers d'un cours d'eau pour arrêter son écoulement, créer une retenue ou élever le niveau de l'eau en amont Plusieurs objectifs conduisent à la construction d'un barrage :

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



Figure 1-1 : Barrage de Katse-le château d'eau de l'Afrique du sud.



Figure 1-2 : Barrage El mahouane Setif- Algérie

1-2-Types Des barrages

On distingue différents types de barrages, tels que les barrages en maçonnerie ou en béton et des barrages en matériaux meubles. Les premiers appartiennent à au moins l'une des catégories suivantes : les barrages-poids (ouvrages de masse importante, dont le poids s'oppose à la poussée de l'eau), les barrages-voûtes (incurvés sur les flancs de la vallée), les barrages à contreforts (constitués de murs triangulaires parallèles au lit du cours d'eau), et les barrages mobiles, de hauteur modérée. Les trois premiers types, généralement en béton, nécessitent des fondations rocheuses de qualité. Ce sont des barrages-réservoirs : ils servent généralement à accumuler un certain volume d'eau pour l'irrigation, la lutte contre les crues ou la production d'énergie. Les barrages mobiles qui souvent réalisés en travers d'un cours d'eau, sont employés pour rendre ce dernier navigable.

Parmi les barrages en matériaux meubles, on peut citer les barrages en enrochement, les barrages en terre, constitués d'une terre homogène dans tout l'ouvrage ou de terres de différentes origines disposées en zone, les barrages mixtes, comportant un noyau étanche en terre argileuse et des enrochements. Le choix du type de barrage pour un site donné est déterminé par des

considérations économiques et de sécurité. Le coût d'un barrage est partiellement lié à la disponibilité des matériaux de construction et à l'accessibilité du site. La nature des fondations est décisive dans le choix du barrage à édifier.

Un barrage est soumis à plusieurs forces dont les plus significatives sont :

- la poussée hydrostatique exercée par l'eau sur son parement amont exposé à la retenue d'eau,
- les sous-pressions (poussée d'Archimède), exercées par l'eau filtrant dans le corps du barrage ou la fondation,
- les forces causées par l'accélération sismique.

La résistance à ces forces repose sur deux stratégies qui consistent à : d'une part construire un ouvrage suffisamment massif pour résister par son simple poids, qu'il soit rigide (barrage-poids en béton), ou souple (barrage en remblai). D'autre part - construire un barrage capable de reporter ces efforts vers des rives.

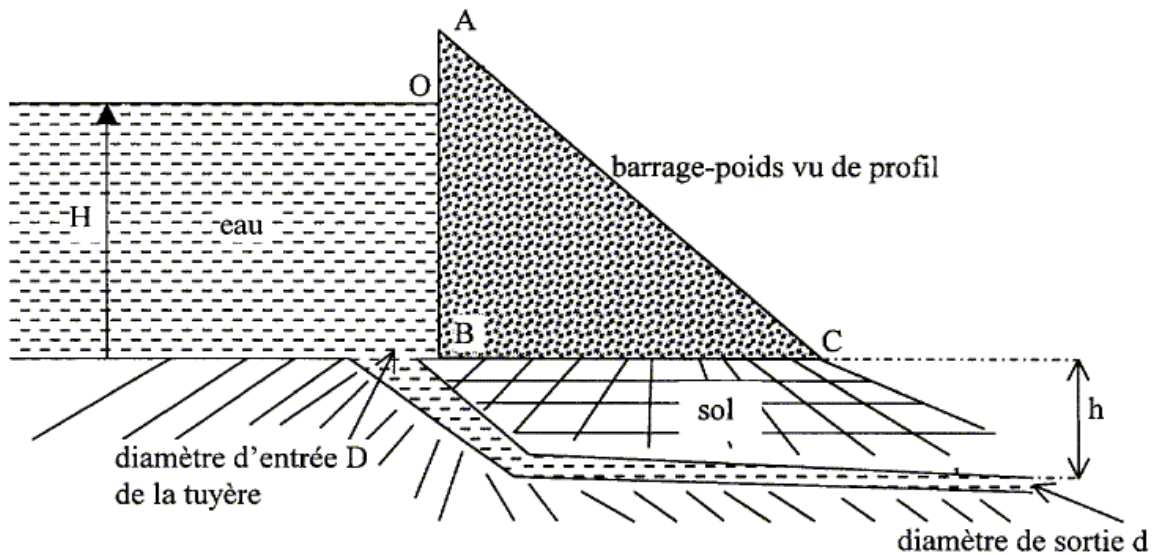


Figure 1-3 : Schéma descriptif du barrage-réservoir vue de profil.

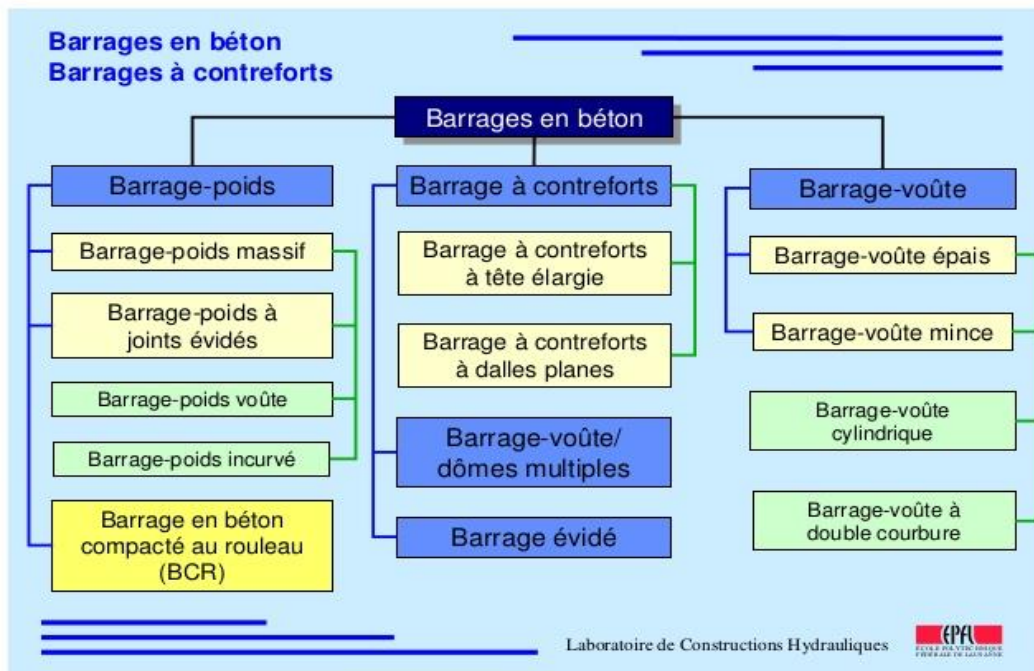


Figure 1-4 : Schéma résume les types de barrages en béton.

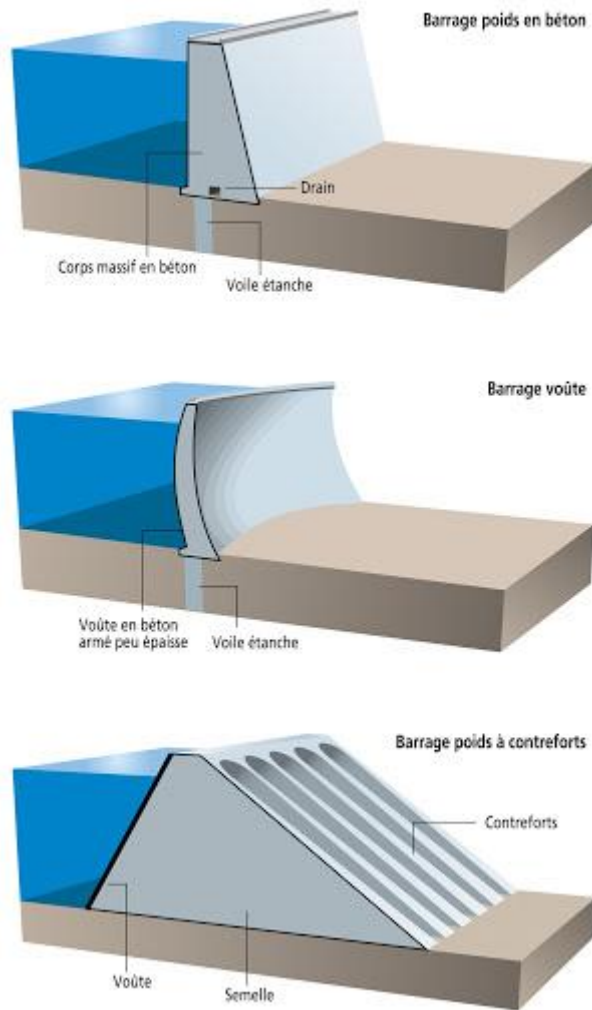


Figure 1-5 : les types de barrages en béton.

1-2-1-Barrage-poids

C'est un barrage en béton. Il possède un profil triangulaire. La stabilité du barrage-poids sous l'effet de la poussée de l'eau est assurée par le poids propre du matériau. Ce type de barrage convient bien pour des vallées larges ayant une fondation rocheuse.

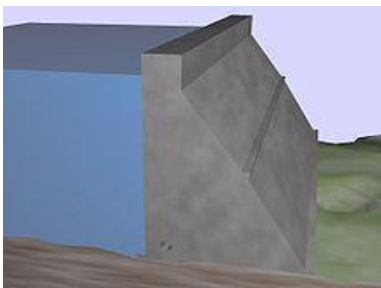


Figure 1-6 : Barrage poids de la Grande Dixence (Suisse)

1-2-2-Barrage-voûte

Il est généralement en béton dont la forme courbe permet un report des efforts de poussée de l'eau sur les rives rocheuses de la vallée. Ce type de barrage convient bien lorsque la topographie permet de fermer la vallée par une forme arquée de longueur réduite.

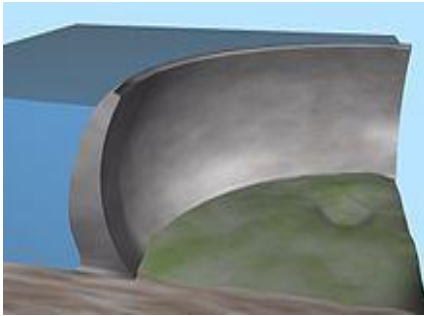


Figure 1-7 : Barrage voûte de Naret 1(Suisse)

1-2-3-Barrage à contreforts

Quand la vallée est trop large et que le volume de béton pour un barrage- poids se révèle trop considérable, le barrage à contreforts peut être une solution intéressante à condition économiques équivalentes. Il consiste en des murs en béton, parallèles de forme triangulaire, plus ou moins épais et espacés qui résistent à la pression de l'eau par équilibre statique. Ce type de barrage induit des contraintes sur la surface de la fondation moins élevée que dans le cas d'un barrage-voûte.

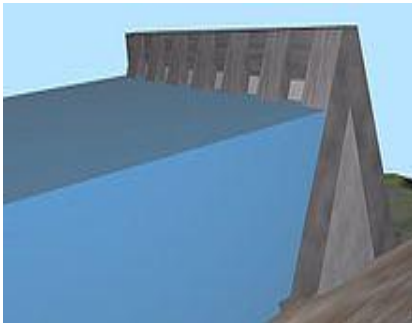


Figure 1-8 : Barrage à contreforts d'Ekbatan (Iran)

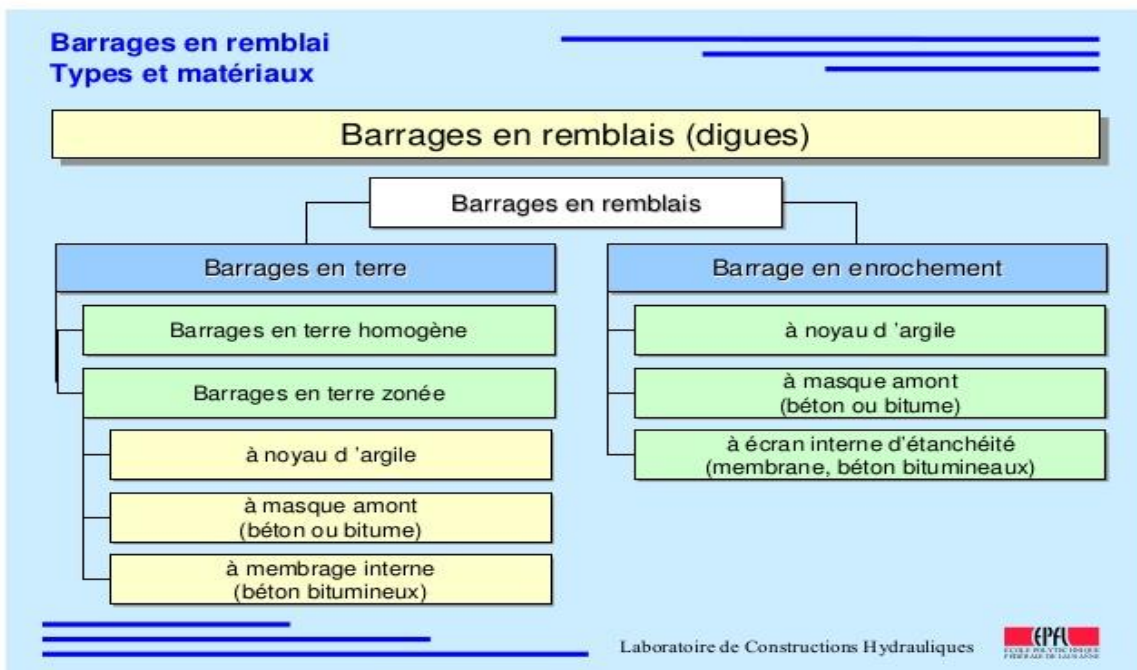


Figure 1-9 : Schéma résume les types de barrages en remblais.

1-3-L'interaction sol structure :

1-3-1-Définition de l'interaction sol structure :

Le sol n'est pas parfaitement rigide. Sous l'effet d'un chargement dynamique, le sol et la superstructure vibrent simultanément et interagissent l'un avec l'autre. La vibration de la super-structure entraîne des forces sur la fondation qui sont transmises au sol modifiant sa réponse. Le phénomène de la modification de la réponse du sol (de la structure) par la présence de la structure (le sol) s'appelle interaction sol-structure et il couvre deux phénomènes physiques (Stewart et al., 1999) : a) L'action et la réaction entre le sol et la structure causant la déformation du sol et des mouvements de la structure. Il s'agit de l'interaction inertielle. b) La compatibilité des déplacements entre la fondation, le sol et la structure. Il s'agit de l'interaction cinématique. La plus grande difficulté d'analyse de l'interaction sol-structure réside dans la prise en compte du sol et de la structure simultanément. Dans ce chapitre, on présente un ensemble de travaux antérieurs sur l'interaction sol-structure en général et sur le comportement linéaire et non linéaire de la fondation en particulier.

1-3-2-Méthodes de prise en compte de l'interaction dynamique sol-structure

Pour évaluer la réponse dynamique d'une fondation en tenant compte de l'interaction dynamique sol-structure, les étapes de calcul sont les suivantes :

- Estimer la valeur et les caractéristiques de la charge dynamique appliquée.
- Déterminer les caractéristiques géotechniques et le profil du sol : à savoir, le module de cisaillement G et le taux d'amortissement relatifs aux différentes couches du sol.
- Pré-dimensionner la fondation.
- Évaluer la réponse dynamique de la fondation pré-dimensionnée. Cette étape de conception commence souvent par simplifier le profil du sol servant de base à la fondation. Ensuite, il faut choisir la méthode de calcul de l'interaction dynamique entre le sol et la structure. A ce propos, plusieurs formulations et programmes de calcul ont été développés.
- Vérifier si l'amplitude estimée dans les étapes précédentes est conforme au critère de performance établie. S'il ne l'est pas, il faut répéter la procédure jusqu'à satisfaction.

1-3-2-1- Méthodes globales ou directes :

Cette méthode traite le problème de l'ISS dans sa globalité. Elle consiste à déterminer les mouvements dans le sol et dans la structure simultanément. Le sol et la structure sont modélisés par des éléments finis. La méthode directe présente l'avantage de pouvoir prendre en compte l'hétérogénéité du sol et d'introduire les lois de comportement nécessaire pour la description des non linéarités. La méthode globale de formulation résolue numériquement est confrontée au problème de prise en compte de la propagation des ondes dans un milieu semi-infini tel que le sol. C'est une méthode coûteuse surtout pour les problèmes tridimensionnels. Elle nécessite la maîtrise d'un logiciel de calcul spécialisé. De toute évidence, malgré qu'elle est complexe, cette méthode demeure la plus réaliste. Cependant, il est essentiel de formuler des méthodes plus facile et plus simple.

1-3-2-2- Méthode des sous-structures :

La famille des méthodes de sous-structures est fondée sur le principe de la décomposition des problèmes en étapes successives, chacune de ces étapes est plus facile à résoudre que le problème global, tant du point de vue modélisation que du point de vue calcul. Le plus important dans l'analyse du système sol-fondation est la détermination d'un élément de liaison entre la structure et le système sol-fondation. Dans le domaine élastique linéaire, cet élément de liaison correspond aux fonctions d'impédance qui sont appliquées à la base de la structure afin de déterminer sa réponse. Une étude bibliographique approfondie a permis de dénombrer plusieurs références relatives à l'estimation des fonctions d'impédance ou de déplacement qui ont fait l'objet de plusieurs recherches analytiques, expérimentales et numériques. Une recherche bibliographique abondante de ces paramètres est présentée à l'ouvrage (Seifert and Franck, 1991) et (Jendouba, 2012). La méthode des sous structures présente certaines limitations étant donné que l'amortissement est considéré constant durant les analyses et que la superposition des solutions de chaque étape ne correspond à la réponse réelle du système que si toutes les étapes sont entièrement linéaires.

1-3-2-3-Méthodes hybrides :

Ces méthodes sont situées entre les méthodes directes et les méthodes des sous-structures. Il s'agit de diviser le sol en deux domaines. Le premier est un champ proche de la structure où toutes les non linéarités sont prises en considération et le deuxième est un champ lointain où il n'y a pas lieu d'interaction entre le sol et la structure. Le champ lointain est modélisé par une matrice d'impédance. Le champ proche est incorporé dans le domaine de la superstructure. Le point délicat des méthodes hybrides est la détermination de la frontière entre les deux domaines qui dépend du problème traité. On a vu que dans la méthode des sous structures, les impédances ont servi comme élément de liaison à la base des structures. Dans la logique des méthodes hybrides, cet élément peut être muni d'une loi de comportement non linéaire. Il s'agit d'un macroélément (Crémer et al., 2001) qui reproduit le comportement irréversible du sol en interaction avec la structure. Le macroélément est muni d'une loi de comportement écrite en termes de forces et de déplacements généralisés de la fondation.

1-3-3- Etude du problème d'interaction Sol Structure

Formulation d'un problème d'interaction

L'analyse complète d'un problème d'interaction doit prendre en compte :

- La variation des caractéristiques du sol avec la profondeur ;
- Le comportement non linéaire du sol ;
- Le caractère tridimensionnel du problème ;
- Le schéma complexe de propagation des ondes qui engendrent le mouvement ;
- L'interaction avec les structures voisines ;

Pour les études de l'interaction sol – structure, le modèle d'ondes sismiques généralement considéré est celui d'onde de volume se propageant verticalement à partir d'un bed-rock horizontal supposé rigide.

1-3-4-Notions d'interaction cinématique et inertielle :

Le point commun de tout bâtiment est d'être construit sur un sol. Il existe cependant une grande variété de sols, et ce sur une même localisation géographique. Ces sols peuvent varier d'un type très solide comme un roc, à un type plus fragile comme une argile sensible. Durant un tremblement de terre, des vibrations sont générées par une faille profonde (l'hypocentre) et se propagent à travers le sol. Selon les propriétés du sol, les ondes sont modifiées et réfléchies durant leur propagation vers la surface, où elles entrent alors en contact avec des fondations de bâtiments. Ces ondes sont alors transmises à la structure qui se met en mouvement. La vibration de la structure va à son tour générer des ondes dans le sol et ainsi modifier le signal incident. Cette continuelle interaction entre le sol, la fondation et la structure est ce qui s'appellera dans cette recherche, l'interaction sol-structure (ISS).

Le terme ISS (en anglais SSI) comporte une littérature beaucoup plus vaste que la revue qui en sera faite ici. En raison des ramifications diverses de ce terme, plusieurs auteurs anglophones préfèrent aujourd'hui faire référence au terme interaction sol-fondation-structure (SFSI) pour désigner spécifiquement les effets dynamiques d'interaction du sol et de la structure en génie parasismique Mason et al. (2013). Cette désignation permet également de faire la distinction entre d'autres effets d'interaction récemment étudiés tel que, l'interaction structure-sol-structure (SSSI), pour désigner les effets à plus grande échelle d'interaction entre différents bâtiments rapprochés sur un même sol également appelé, interaction site-ville en français (Gueguen, Semblat, Bard, & Chazelas, 2013). Le lecteur intéressé par les effets SSSI est référé à la revue de littérature de Lou et al. (2011), ainsi qu'aux travaux récents de Mason et al. (2013).

La méthode des sous-structure a été introduite par Kausel et Roësset (1974) afin de résoudre les problèmes d'incohérence entre les solutions analytiques et les résultats des analyses numériques trop simplifiée de l'époque. La méthode est constituée de trois étapes qui sont :

1. L'interaction cinématique.
2. L'interaction inertielle.
3. Les fonctions d'impédance.

Il est à noter que ces trois étapes sous-entendent que le signal sismique est déjà calculé en champ libre. La recombinaison des systèmes pour obtenir la solution nécessite l'hypothèse de superposition et donc de réponse linéaire du sol et de la structure (S. Kramer & Stewart, 2004). Cette hypothèse n'est par contre habituellement respectée que dans un sens linéaire-équivalent (NEHRP Consultants Joint-Venture, 2012) et plusieurs développements de la méthode font appel à des éléments numériques se déformant de manière non linéaire pour la structure et pour le sol.

Il est également utile d'illustrer les différentes formes que peut prendre la méthode des sous-structures (Ostadan, 2006). En présence d'une fondation rigide, l'ensemble des déplacements de la fondation peut se faire à l'aide de trois degrés de liberté pour un système en deux dimensions. En présence d'une fondation moins rigide, les différents éléments de la fondation peuvent être modélisés et connectés à une distribution de ressorts pour représenter l'ensemble des degrés de liberté de la structure. Cette seconde méthode est celle retenue dans cette recherche et est présentée à la section suivante. Les deux dernières méthodes sont plutôt

utilisées en géotechnique dans les logiciels d'éléments finis reconnus que sont SASSI (*A System of Analysis of Soil-Structure Interaction*) (Lysmer, Ostadan, & Chin, 1999) et CLASSI (*Continuum Linear Analysis of Soil-Structure Interaction*).



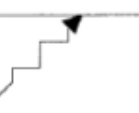

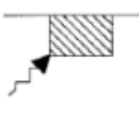
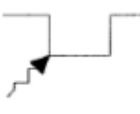
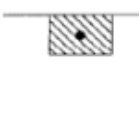
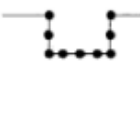
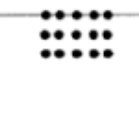
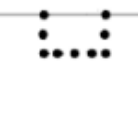
Method \ Analysis	Rigid Boundary	Flexible Boundary	Flexible Volume	Subtraction
Site Response Analysis (a)				
Scattering Analysis (b)			None	None
Impedance Analysis (c)				
Structural Response Analysis (d)	Standard	Standard +	Standard +	Standard +

Figure 1-10 : Différentes méthodes des sous-structures avec leurs étapes respectives.

Adapté de Ostadan (2006).

1-3-4-1-Interaction cinématique

L'interaction cinématique est un effet causé par la présence de fondations beaucoup plus rigides que le sol dans lequel elles se trouvent. La présence d'une fondation rigide dans le sol provoque une déviation de la réponse par rapport à la réponse en champ libre comme illustré à la figure .c et d. Cette variation résulte d'un ensemble de causes incluant la filtration des longueurs d'ondes inférieures à la dimension des fondations tel qu'observé par Housner (1957), la réduction de l'onde incidente pour des fondations encastrées dans le sol et dans le cas d'un bâtiment construit sur pieux, l'effet de l'interaction des pieux et du sol en dessous du niveau des fondations (NEHRP Consultants Joint-Venture, 2012). Dans la méthode des sous-structures, l'impact des interactions cinématiques est ajouté à la réponse totale du système à l'aide d'une fonction de transfert dont l'acronyme est FIM. Cette fonction a pour but de modifier l'excitation sismique en champ libre avant de la soumettre au bâtiment pour l'analyse dynamique.

Les effets de l'interaction cinématique sont importants pour les bâtiments rigides ayant de petites périodes fondamentales, pour les bâtiments construits sur radier ou pour les bâtiments ayant de profondes fondations (FEMA-440, 2005). Cependant, ignorer les effets de l'interaction cinématique est considéré comme conservateur puisque l'impact de cet effet réduit toujours la demande sismique à la base (S. Kramer & Stewart, 2004). Pour cette raison, les effets cinématiques sont ignorés dans cette recherche. Plus d'informations sur ces effets sont disponibles dans les ouvrages de référence (S. Kramer & Stewart, 2004; NEHRP Consultants Joint Venture, 2012).

1-3-4-2-Interaction inertielle

L'interaction inertielle est l'effet le plus notoire de l'interaction sol-structure puisqu'il implique la masse et l'amortissement qui sont deux variables bien connues en dynamique des structures. Dans la méthode des sous-structures, cette dernière étape consiste en l'évaluation de la réponse de la structure soutenue par un système de ressorts lorsqu'elle est soumise à l'excitation sismique modifiée par la fonction de transfert. Le fait de tenir compte d'une condition aux frontières flexibles basée sur un système de ressorts et d'amortisseurs plutôt qu'un encastrement apporte deux effets majeurs à la réponse dynamique :

- L'allongement de la période de vibration
- L'augmentation de l'amortissement

Globalement, ces deux effets ont pour impact d'augmenter les déplacements et d'amortir la réponse par la plastification des sols. Puisque les sols sont naturellement très plastiques, des déformations permanentes à la base de la structure peuvent compliquer l'occupation et la réparation du bâtiment suite à un séisme.

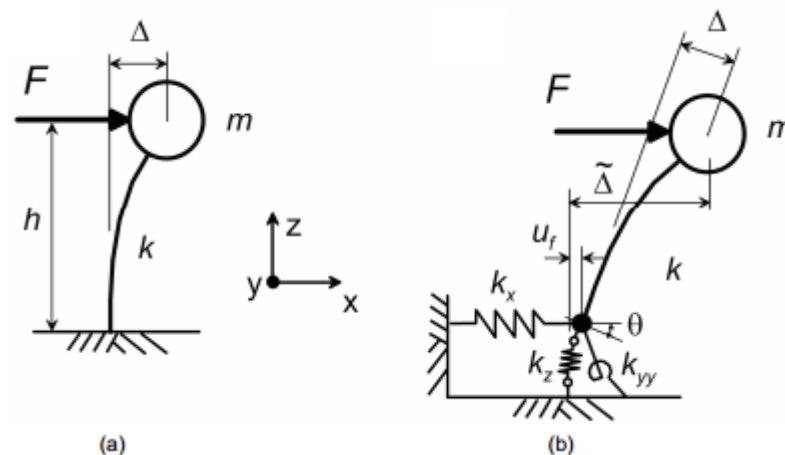


Figure 1-11 : Système complet. Adapté de (NEHRP Consultants Joint Venture, 2012)78

L'allongement de la période peut être évalué à partir de la solution classique de Veletsos & Meek (1974). Leur équation est basée sur un modèle à un degré de liberté (DDL) sans amortissement ayant d'un côté une condition aux frontières fixes (figure 1-3.a) et de l'autre une condition aux frontières flexibles (figure 1-3.b). Comme indiqué plutôt, c'est l'ajout de la flexibilité du sol (ressorts) qui apporte une période de vibration plus longue et des déplacements totaux plus grands.

Veletsos & Nair (1975) proposent également un facteur similaire pour tenir compte de l'augmentation de l'amortissement apporté par le sol ;Givens (2013) précise que la puissance trois dans cette équation est valide pour une analyse où la structure est linéaire élastique et qu'il faut prendre une puissance de deux autrement. L'amortissement du système est calculé comme la somme de l'amortissement de la fondation et d'une partie de l'amortissement de la structure. L'amortissement de la fondation est composé en partie de l'amortissement hystérétique (grande déformation dans le sol) et de l'amortissement radiant (rayonnement des ondes loin de la fondation) et peut être calculé à l'aide d'une équation présentée dans Veletsos & Nair (1975).

L'interaction sol –structure c'est l'étude du comportement d'une structure subissant une charge sismique. Elle traduit la modification du mouvement du sol (ou de la structure) lors

d'un séisme du fait de la présence de l'autre composant (structure ou sol).

Cette interaction est plus ou moins importante suivant la nature du sol, les caractéristiques de l'ouvrage et le type de fondation.

La résolution du problème d'interaction sol – structure, dépend de celle des problèmes suivants :

- ✓ La définition du risque sismique et du mouvement résultant ;
- ✓ L'étude du comportement du sol sous chargement cyclique ;
- ✓ L'évaluation du comportement du sol en champ libre ;
- ✓ L'évaluation de la réponse de la structure sous chargement dynamique.

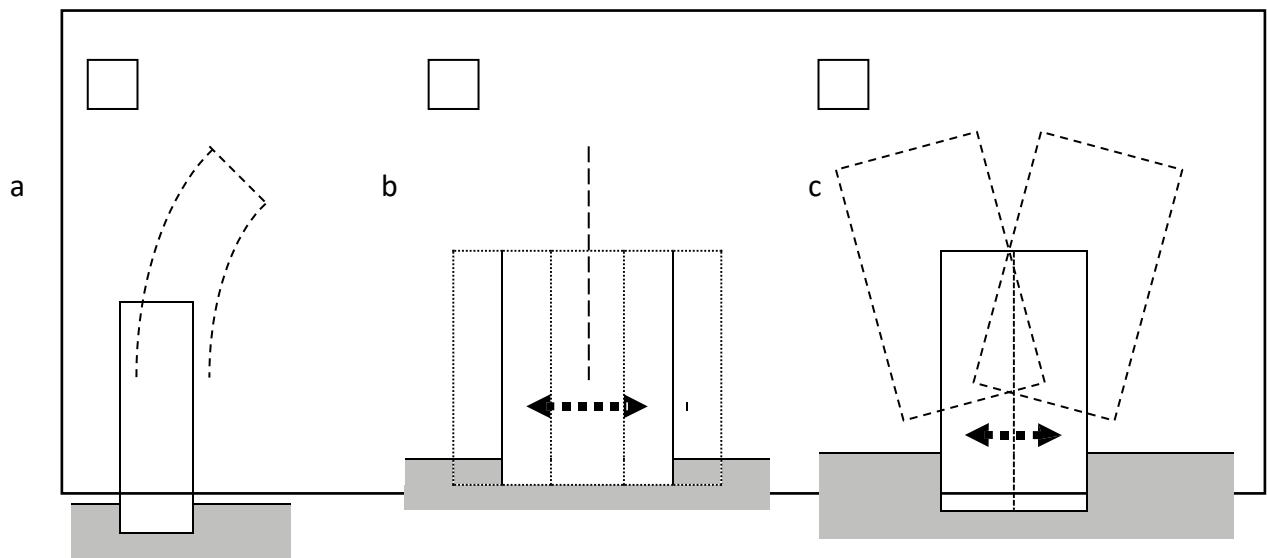


Figure 1-12 : Interaction Sol-structure.

- a) Sans ISS, structure souple et sol de très bonne résistance mécanique ;
- b) Sans ISS, structure raide et sol de très bonne résistance mécanique ;
- c) Avec ISS, structure raide et sol de faible ou moyenne résistance mécanique.

1-3-4-3-Interface sol-structure (Fonction d'impédance)

L'interface sol-structure est essentielle à la méthode des sous-structures, car c'est ce qui permet de tenir compte des propriétés physique du sol dans le sous-système contenant la super structure. Les fonctions d'impédance sont des fonctions décrivant la résistance opposée au mouvement dans le sol ce qui inclut la rigidité et l'amortissement (amortissement radial) du sol. Ces fonctions peuvent être numériquement représentées par un système simplifié de ressorts et d'amortisseurs calibrés pour la réponse du sol étudié (Dobry, 2014). Plusieurs auteurs proposent des solutions pour obtenir des valeurs de rigidité et d'amortissement pour différentes géométries de fondation dont les plus populaires sont Gazetas & Stokoe (1991), Pais & Kausel (1988) et Mylonakis, Nikolaou & Gazetas (2006).

Gazetas & Stokoe (1991) pour une semelle de fondation rectangulaire située en surface. La prise en considération de l'encastrement d'une fondation dans le sol est réalisée à l'aide de facteurs multiplicateurs appliqués sur la valeur de rigidité ou d'amortissement calculé en surface. Le NEHRP Consultants Joint-Venture (2012) fournit des tableaux complets

permettant de calculer toutes les valeurs d'amortissement et de rigidité.

1-4-L'interaction Fluide structure :

Le phénomène de comportement dynamique des barrages poids en béton à l'interaction fluide-structure sous actions sismiques constitue un domaine actif et très important. La prévision des mouvements couplés du système barrage-réservoir ainsi que l'évaluation des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur le parement amont du barrage est une tâche particulièrement complexe.

L'interaction barrage-réservoir se produit lorsque le mouvement de l'eau sur le talus amont du barrage engendre une propagation d'ondes de pression vers la direction amont du réservoir. L'interaction barrage-réservoir est simulée par la masse ajoutée concentrée (solution de Westergaard) aux nœuds submergés de la face amont de la prise d'eau. Ces masses sont déterminées en multipliant la pression hydrodynamique évaluée au niveau d'un nœud de la face amont par la surface dépendant de ce nœud. La pression hydrodynamique $p(y)$, varie en fonction de la profondeur.

1-4-1 Quelque méthode de l'interaction fluide structure :

✓ Méthode à masse ajoutée "Added mass" de Westergaard :

A l'origine, cette méthode a été développée pour les barrages mais elle peut être appliquée aux autres structures hydrauliques soumises à une excitation sismique, on prend comme exemple l'étude faite par Livaoglu et Dogangun en 2006 sur les réservoirs surélevés. Cette solution simplifiée et efficace s'appuie sur la solution analytique en déplacement du problème plan de vibration du réservoir sous hypothèse de barrage infiniment rigide, de réservoir rectangulaire semi-infini et d'excitation sismique harmonique et horizontale d'expression :

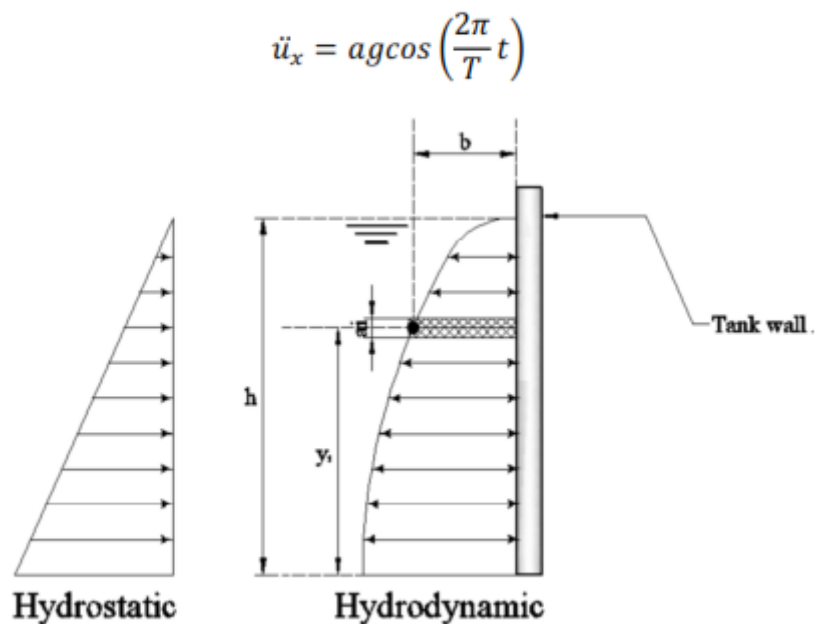


Figure 1-13 : Concept de la masse ajoutée de Westergaard.

✓ **Méthode de Housner :**

Cette méthode, bien connue, permet d'aboutir à des expressions des efforts résultants relativement plus simples, l'action du liquide est décomposée en deux types :

- Une action passive provoquant des efforts d'impulsion.
- Une action active provoquant des efforts d'oscillation.

Les efforts d'impulsion proviennent d'une partie de la masse du fluide dite « masse passive » qui réagit par inertie, à la translation des parois du réservoir. Le système mécanique équivalent est obtenu en considérant une masse M_n , liée rigidement au réservoir à une hauteur h_i telle qu'elle exerce sur les parois les mêmes efforts horizontaux que la masse du liquide équivalente.

Quant aux efforts d'oscillations, ils proviennent de l'autre partie du fluide dite « masse active » qui se met en mouvement d'oscillation sous l'action du séisme. Son équivalent mécanique s'obtient en considérant n ; M_1 masses retenues par des ressorts de raideurs K_n à des niveaux h_1 , dont les oscillations horizontales exercent les mêmes efforts vibratoires que la masse active du fluide, les raideur K_n sont déterminées sur la base des pulsations.

$$W_n = \sqrt{\frac{K_n}{M_1}}$$

✓ **Méthodes numériques :**

En générale pour vérifier un phénomène naturel ou un problème d'ingénierie, on est obligé de faire appel à un modèle mathématique pouvant d'écrire d'une manière fiable le problème en question. Ce modèle s'appuie généralement sur des postulats de base et des hypothèses simplificatrices pour aboutir à des équations gouvernantes, qui sont souvent des équations différentielles aux quelles sont ajoutées des conditions au limites. Dans plusieurs situations, la résolution analytique de ces équations s'avère difficile et parfois impossible, alors, le recours aux méthodes numériques est indispensable. Parmi ces méthodes on distingue :

- La méthode des différences finies ;
- La méthode des volumes finis ;
- La méthode des éléments de frontière ;
- La méthode des éléments finis.

1-5-Méthodes de modélisation de l'Interaction sol Fluide structure :

Le comportement d'une structure soumise à une sollicitation sismique dépend de :

- La nature de ce mouvement
- Les propriétés dynamiques de l'ouvrage et de celles du sol

Compte tenu d'interaction entre la structure et le milieu extérieur pouvant avant lieu et pour éliminer le problème de l'ISS on doit considérer une structure parfaitement encastrée dans le sol, cette hypothèse est d'autant plus valable que le sol, de fondation est peu déformable vis – à – vis de la structure qui peut être donc considérée comme encastrée.

Il n'y a pas non plus d'ISS dans le cas d'une structure rigide sur un sol rocheux. En générale, et plus particulièrement dans le cas de structure massives sur des sols moyennement on faiblement raides, il y a une intervention non négligeable du sol (modes de sols) et une modification de la réponse de la structure.

L'interaction a un effet favorable ou défavorable, et souvent elle joue dans le sens favorable et diminue la réponse, malgré ça, elle peut occasionner des amplifications locales au

niveau de certains degrés de liberté principalement en cas d'excursion en phase post élastique.

La modélisation la plus fréquente de l'ISS suppose que la structure soit fondée en surface sur un sol homogène et horizontal, avec des propriétés mécaniques connues et constantes au cours du séisme, et que le mouvement sismique sollicitant la structure soit des ondes de volume se propageant verticalement à partir d'un substratum horizontal (en réalité le sol est hétérogène et les propriétés dynamiques varient au cours du séisme donc apparition des ondes de surface).

Deux méthodes sont utilisées pour modéliser l'ISS :

- ✓ Soit intégrer dans un même modèle le sol associé et ouvrage (modélisé par des ressorts) c'est de loin la méthode la plus utilisée.
- ✓ Soit au contraire traiter par étape le sol jusqu'à sa surface puis la surface du sol et l'ouvrage (méthode globale ou directe).

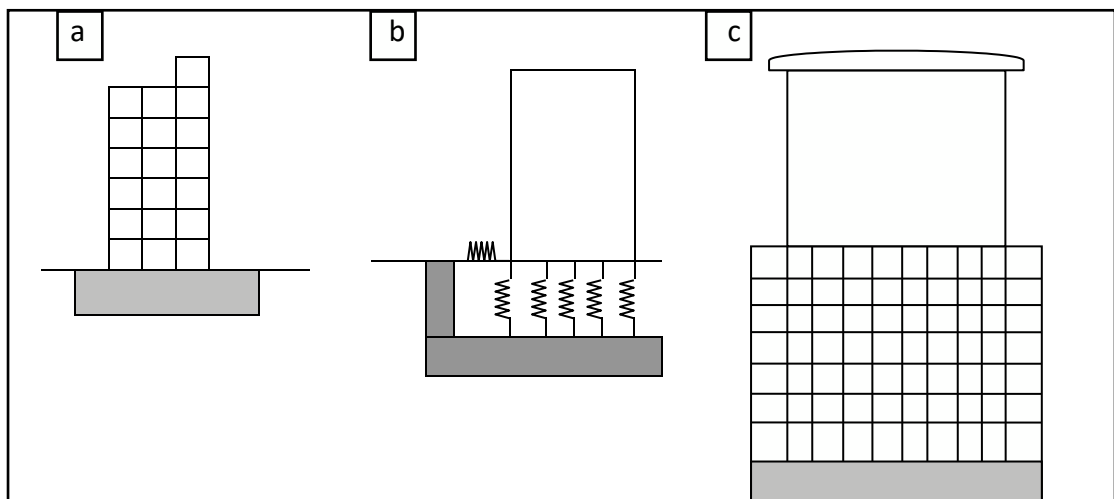


Figure 1-14 : les types de modélisation.

a) Encastrement parfait ;

b) Ressorts ;

c) Eléments finis

1-5-1-Modélisation par ressorts :

Pour la prise en compte de l'ISS on utilise une méthode simple consistant à séparer le sol et la structure (approche par sous – structures). Dans ces conditions le mouvement de structure est égal à la somme :

- ✓ Du mouvement que prendrait la structure fictive, supposé sans masse sous l'action de l'excitation sismique imposé à la base du modèle : interaction cinématique.
- ✓ Et du mouvement que prendrait le mouvement réel en l'absence de l'excitation sismique à la base du modèle, s'il était soumis aux forces résultant d'un calcul utilisant le mouvement précédent : interaction inertielle.

Il est à remarquer, pour une structure dont les fondations sont superficielles, l'interaction cinématique est nulle et le mouvement de la base du modèle est identique au mouvement du sol en champ libre.

Pour l'étude de l'interaction sol – structure, en plus de l'amortissement interne du sol, on considère l'amortissement géométrique ou radiatif qui ne dépend que de la forme de la fondation, des propriétés du sol et de la fréquence du mouvement. L'amortissement

géométrique correspond à une perte d'énergie par propagation à l'infini, par rayonnement des vibrations dans le sol.

La modélisation de l'ISS par ressorts concentrés est plus simple pour l'analyse dynamique d'ensemble, cependant elle nécessite par la suite une modélisation spécifique du radier. On obtient ainsi formellement quatre raideurs de sol en fonction de la fréquence :

- ✓ Raideur de translation verticale : $K_v(f)$;
- ✓ Raideur de translation horizontale : $K_h(f)$;
- ✓ Raideur de balancement (rocking) : $K_F(f)$;
- ✓ Raideur de torsion autour d'un axe verticale : $K_R(f)$;

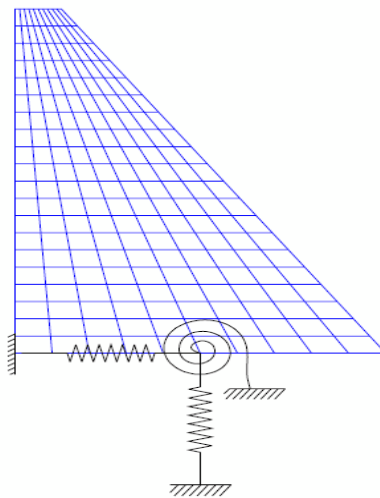


Figure 1-15 : Modélisation du sol par un système de ressort

1-5-2-Méthodes aux éléments finis :

La modélisation par la méthode aux éléments finis se base sur la discrétisation du milieu étudié pour résoudre les équations différentielles qui régissent son comportement. La démarche consiste dans un premier temps à construire un maillage prenant en compte les différents éléments du système, puis à choisir les lois de comportement pour chaque matériau et enfin à résoudre le problème numériquement.

1-6-Conclusion :

Le présent chapitre donne quelques notions sur le phénomène d'interaction sol-structure d'une part et d'interaction sol-fluide structure appliqué aux barrages. Le prochain chapitre va être dédié à la présentation de quelques travaux réalisés dans ce domaine.

2-1-introduction :

Dans ce chapitre, une recherche bibliographique de quelques travaux mené dans le domaine d'interaction dynamique sol-fluide-structure appliques aux barrages.

2-2-Recherche Bibliographique :

Une étude paramétrique a été réalisée par Tahar Berrabah, A. et al. En 2011 (Journal EIGE) afin d'observer l'effet combiné de la fondation du sol, corps du barrage (barrage Brézina) et réservoir d'eau sur le comportement modal du système total. 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.

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 Ghafir 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.

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.

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.

Le comportement dynamique d'un barrage à réservoir plein est connu pour être différent de celui d'un barrage avec un réservoir vide. Les pressions hydrodynamiques développées (Chopra, 1968 ; Chopra, 1995) affectent le mouvement du barrage, tandis que la réponse du barrage influence à son tour la réponse dynamique du réservoir. Ce phénomène est appelé dynamique barrage-réservoir-interaction (DRI) et cela pourrait être catastrophique en cas de résonance, c'est-à-dire lorsque les deux les domaines (barrage et réservoir) vibrent en phase.

Les effets réels du dynamique barrage-réservoir-interaction se concentrent principalement sur (a) la période fondamentale de vibration du système barrage-réservoir et (b) l'amplitude de la réponse dynamique de barrage. On pense que l'interaction DRI (a) provoque le ramollissement du système barrage-réservoir, c'est-à-dire que sa période fondamentale s'allonge, et (b) il modifie la réponse du barrage, à savoir il amplifie ou dés amplifie le mouvement sismique et entraîne des accélérations plus ou moins importantes à la crête du barrage en fonction de l'importance relative des fondamentaux du barrage et du réservoir périodes et la période dominante du mouvement sismique.

Wolf (1985) a présenté pour la première fois la méthode directe sol – structure analyse des interactions. En utilisant cette méthode, la région du sol près de la structure avec la structure est modélisée directement. Le système sol-structure idéalisé a été analysé en une seule étape. An d'excellents travaux sur l'interaction barrage-réservoir-fondation dans le domaine fréquentiel ont été réalisés par Chopra et al(1981).

Rizos et Wang (2002) ont développé une méthode d'analyse des interactions sol–structure dans le domaine temporel grâce à une méthode de solution échelonnée utilisant à la fois FEM et BEM.

Jahromi et al.(2007) utilisé technique d'analyse partitionnée impliquant une procédure de couplage itérative pour résoudre différents problèmes d'interaction sol-structure.

Lorsque la pression est utilisée comme variable du domaine fluide, termes hors diagonale résultant du couplage entre le solide et le fluide sous-structures rend les matrices de masse et de rigidité totales non symétriques pour le système couplé (Everstine, 1997). Ces couplés les équations peuvent être symétrisées lorsque des formulations basées sur le potentiel sont utilisées (Everstine, 1981; Olson et Bathe, 1985). Bouanani et al. appliqué avec succès une formulation de fluide basée sur le potentiel à l'analyse sismique des systèmes barrage-réservoir (Bouaanani et Lu, 2009 ; Bouanani et Renaud, 2014). L'objectif principal de cette étude est de mettre en œuvre la formulation eulérienne basée sur la pression dans un code d'éléments finis spécial appelé SNACS de manière symétrique pour l'évaluation sismique non linéaire des

barrages-voûtes en béton dans analyses dans le domaine temporel. En général, les problèmes d'interaction dans les barrages sont rigoureusement traités par des solutions semi-analytiques dans la fréquence domaine restreint au comportement linéaire (Hall et Chopra, 1982 ; Fenves et Chopra, 1985 ; Lotfi, 2007 ; Aftabi-Sani et Lotfi, 2011). Cependant, les phénomènes non linéaires dans les barrages en béton doivent être analysés dans le domaine temporel où la méthode des éléments finis est principalement utilisée pour discrétiser différentes régions.

De plus, les formulations eulériennes sont intrinsèquement ir-rotationnelles et ne souffrent pas de la présence de modes de circulation parasites et le comportement de verrouillage. Cependant, il nécessite un traitement spécial pour l'interface des domaines solide et fluide pour assurer la compatibilité conditions car les différentes variables sont utilisées dans les maillages solides et fluides.

La réalisation de telles analyses non linéaires incluant les facteurs mentionnés ci-dessus dans les simulations nécessite un très grand élément fini maquette. Evidemment, ces solutions numériques seraient extrêmement coûteuses et complexes à la fois en termes de mise en œuvre informatique et de temps d'exécution. Par conséquent, avoir une mise en œuvre efficace et efficiente pour chaque partie d'une modélisation aussi compliquée peut améliorer la capacité de capturer des résultats plus fiables. Intégration des conditions aux limites absorbantes pour l'extrémité tronquée des barrages' la fondation et le réservoir peuvent réduire considérablement le nombre d'éléments pour ces pièces, ce qui permet un maillage fin dans la simulation pour capturer différentes caractéristiques non linéaires du corps du barrage dans la région d'intérêt principal. Couche parfaitement adaptée (PML) et les conditions aux limites non réfléchissantes d'ordre élevé sont les deux méthodes les plus courantes que les chercheurs ont appliquées dans leurs tentatives. Au cours de la dernière décennie, la recherche sur le PML en tant que nouvelle condition limite absorbante pour l'extrémité des deux zones de fondation et le domaine réservoir a notamment progressé dans les applications (Basu et Chopra, 2003, 2004 ; Khazaee et Lotfi, 2014 ; Fathi et al., 2015).

En 2012, Lotfi et Samii ont introduit l'idée de l'approche Wavenumber comme une frontière non réfléchissante efficace et robuste condition basée sur la relation de dispersion exacte dans un canal d'eau infini, ce qui peut réduire considérablement la longueur requise du modèle de réservoir (Lotfi et Samii, 2012). Cette technique a également été adoptée pour calibrer la condition aux limites d'ordre élevé en temps domaine (Samii et Lotfi, 2013) et plus tard pour proposer une technique approximative de nombre d'ondes, qui a été efficacement utilisé dans les analyses harmoniques et transitoires utilisant des longueurs de réservoir normalisées très faibles (par exemple, $L/H = 0,2$) (Zare-Estakhraji et Lotfi, 2016 ; Lotfi et Zenz, 2016).

Comme indiqué ci-dessus, les algorithmes de résolution du problème d'interaction dans le domaine temporel ainsi que les procédures de traitement des articulations non-linéarité ont été développées plus tôt. Cependant, quelques travaux ont étudié les effets de l'interaction barrage-eau sur l'ouverture/ fermeture dans les barrages-voûtes (Ahmadi et al., 2001 ; Wang et al., 2012 ; Hariri-Ardebili et Kianoush, 2015). Ordinateur à usage général des programmes tels que Abaqus, ADINA, ANSYS et LSDYNA peuvent être utilisés pour les analyses sismiques non linéaires des barrages-voûtes en béton. Cependant, il y a un manque d'informations sur les propriétés des matériaux à utiliser dans les modèles constitutifs non linéaires disponibles pour

les joints et Blocs de béton. Par conséquent, une analyse non linéaire simplifiée peut souvent être supérieure à une analyse sophistiquée pour laquelle certains éléments de base les informations ne sont pas disponibles. Dans la formulation lagrangienne-eulérienne, comme mentionné ci-dessus, des matrices asymétriques sont obtenues pour masse totale et rigidité du système couplé. Dans cette formulation, les degrés de liberté de déplacement et de pression sont pris en compte respectivement des éléments barrage et réservoir. La solution directe ou simultanée et le schéma partitionné sont les deux classes principales pour la solution des systèmes de champs couplés (Ghaemian et Ghobarah, 1999 ; Ahmadi et al., 2001).

Une implémentation symétrique appelée technique pseudo-symétrique utilisant un solveur direct est proposée ici pour analyse sismique non linéaire des barrages-voûtes en béton. En utilisant le schéma de marche du temps de Newmark, cette technique a été utilisé avec succès dans une analyse linéaire des barrages-voûtes en béton (Omidi et Lotfi, 2007). Ici, la procédure est implémentée dans le programme SNACS en tant que code d'éléments finis spécial (Omidi, 2010) sous une forme incrémentale requise pour les analyses avec la méthode d'intégration temporelle HHT (Hilber et al., 1977). SNACS est encore amélioré pour évaluer l'ouverture des joints effets sur la réponse sismique des barrages-voûtes tandis que l'interaction barrage-eau est incluse dans les simulations. Le programme utilise deux options non linéaires pour les joints. Une alternative dans laquelle les contraintes de cisaillement dans l'interface se comportent linéairement simule simplement le joint ouverture et fermeture. Cette loi de comportement implémentée dans ADAP-88 est principalement adaptée à la modélisation des joints de contraction avec clés de cisaillement. L'autre option est une séparation tandis que les contraintes de cisaillement sont libérées dans le joint (Lotfi et Espandar, 2002, 2004 ; Arabshahi et Lotfi, 2009). Les deux options sont relativement simples et efficaces avec une mise en œuvre directe et aucuns problèmes de convergence.

2-3-Conclusion :

On a essayé d'exposer les travaux abordés par les chercheurs, qui ont étudié l'interaction sol-structure, interaction fluide-structure et interaction barrage-réservoir qui détermine notre axe de travail.

3-1- INTRODUCTION

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

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

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

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

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

□ La version démo : c'est une version purement commerciale et très limitée, elle ne permet pas de faire de véritables simulations, car les résultats peuvent contenir des erreurs qui sont dues à une limitation du nombre de nœuds maximaux utilisables ou à un certain nombre de modules qui ne fonctionnent pas.

□ La version universitaire : consacrée aux recherches (ANSYS release 12, 2009).

3-2- GÉNÉRALITE

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

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

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

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

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

Autres lignes de produits :

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

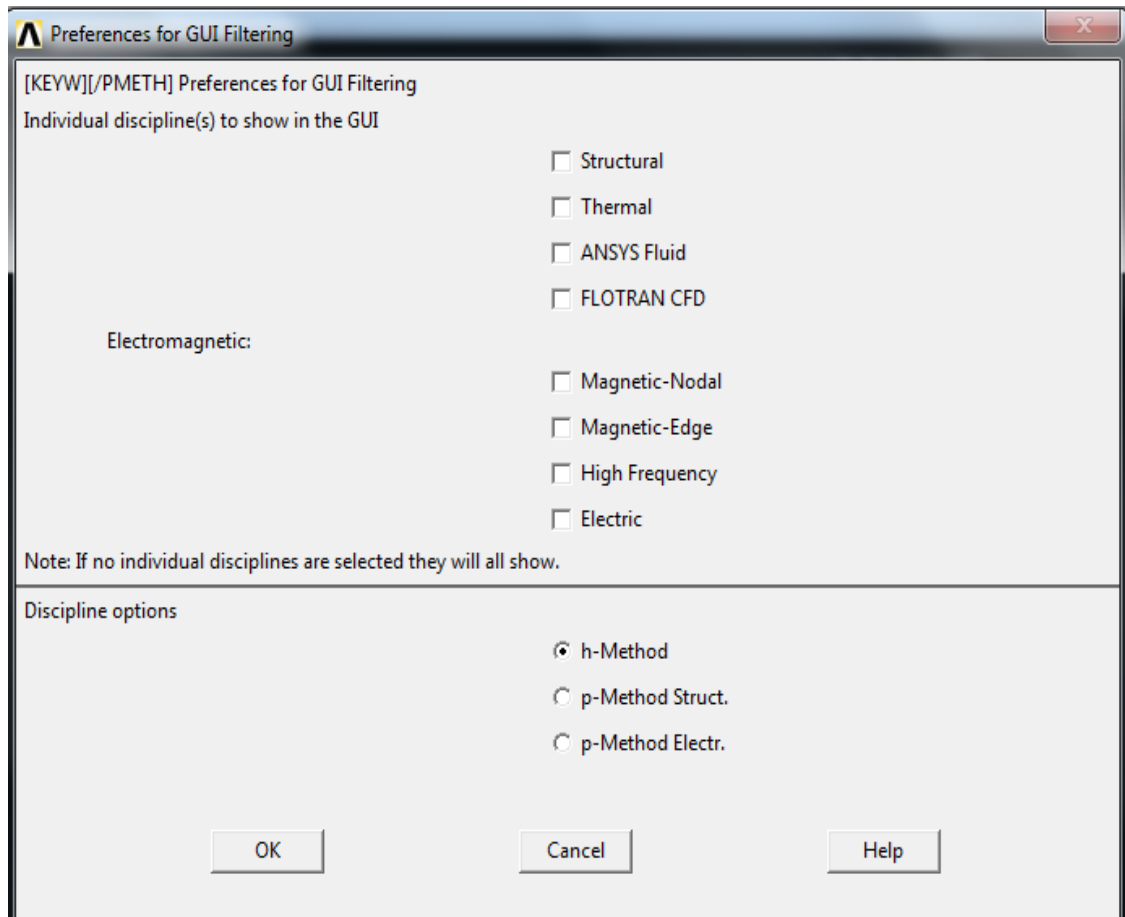


Figure3-1 : Fenêtre de choix des domaines d'études.

3-3-TYPE D'ANALYSE

Différents types d'analyses peuvent être assurées par ANSYS.

3-3-1-L'analyse structure : est utilisée pour déterminer les déformations, les contraintes, et les forces de réaction.

□ Analyse statique :

- Utilisée pour des conditions de chargement statique,

- Les comportements non linéaires comme les grands déplacements, fortes déflexions, les raideurs géométriques, le contact, la plasticité, l'hyper élasticité, et le fluage peuvent être simulés.

□ Analyse dynamique :

- Elle inclut les effets de masse et d'amortissement,

- L'analyse modale calcule les fréquences propres et les modes propres,

- L'analyse harmonique détermine la réponse d'une structure à des charges

sinusoïdales d'amplitude et de fréquences connues,

- L'analyse transitoire dynamique détermine la réponse d'une structure à des charges variables dans le temps et peut inclure un comportement non linéaire.

□ Autres fonctionnalités structurales :

- Analyse spectrale,
- Vibrations aléatoires,
- Déformation "Eigenvalue",
- Sous-structuration.

3-3-2-L'analyse Thermique: l'analyse thermique est utilisée pour déterminer la répartition de la température d'un corps. D'autres grandeurs sont intéressantes incluant la quantité de chaleur échangée, les gradients et les flux thermiques.

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

3-3-3-L'analyse électromagnétique: est utilisée pour calculer le champ magnétique dans des appareils électromagnétiques.

3-3-4-Analyse en Champs Couplés: L'Analyse en Champs Couplés étudie l'interaction mutuelle entre deux ou plusieurs champs. Chaque champ étant dépendant d'un autre, la résolution séparée de chacun est impossible. On a donc besoin d'un programme qui permet la résolution des deux problèmes physiques en les combinant.

Exemples:

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

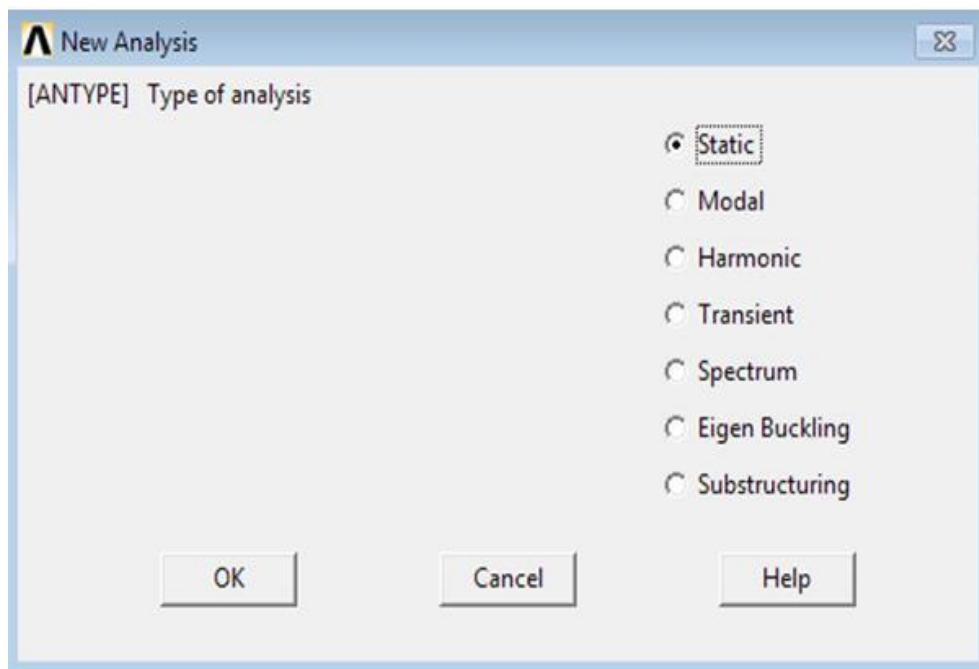


Figure 3-2 : Fenêtre de choix des types d'analyses

3-4- DÉMARCHE UTILISÉE POUR LA CRÉATION D'UN MODÈLE ANSYS

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

3-4-1- A partir de l'icône préférence

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

3-4-2- A partir de l'icône préprocesseur

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

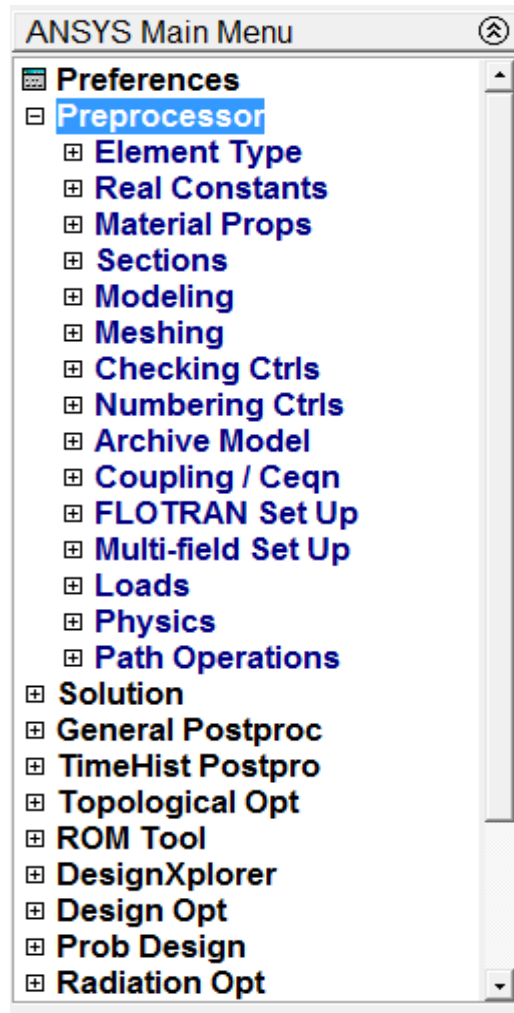


Figure 3-3 : Fonction de l'icône préprocesseur

✓ Dans l'icône « *Élément Type* » on choisit le type d'élément a utilisé dans notre études et qui convient aux matériaux et à la situation ; des éléments plan, éléments fluide, éléments de volume...

✓ On définit les matériaux à utiliser, dans l'icône « Material Props », leurs masses volumiques, leurs coefficients.

✓ On la géométrie de la structure (objet d'étude), en commençant par la création des points,

○ des lignes, des surfaces, ainsi que les volumes. Cette étape est assurée par l'option

○ « *modelling* » puis « *create* ».

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

✓ partir de l'option « *define load* », on introduit les conditions aux limites de notre modèle, c à d ; un encastrement au niveau des frontières du sol ainsi que l'accélération de l'apesanteur qui est de (10m/s^2) , le signale sismique et la pression hydrostatique.

3-4-3- A partir de l'icône solution

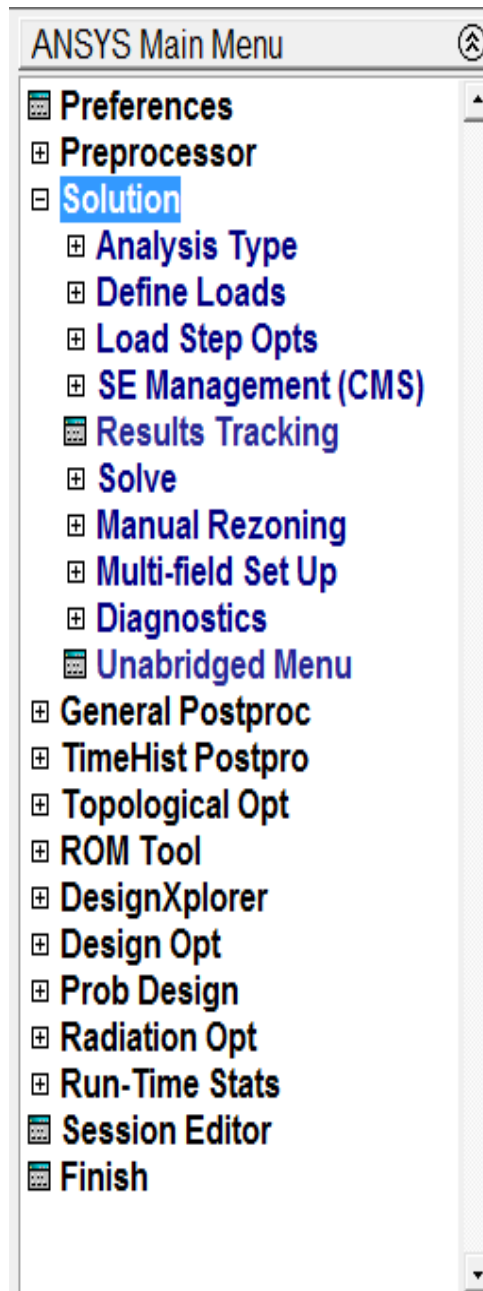


Figure 3-4 : Fonction de l'icône solution

✓ On choisie le type d'analyse qu'on veut exécuter, ainsi que les détails de

chaque analyse

- (nombre de mode, pas de temps.....).
- ✓ L'exécution de l'analyse se fait par l'icône « *Solve*→*current LS* ».
- ✓ La lecture des résultats se fait par un fichier output qu'on crée avant l'exécution.

3-4-4- A partir de l'icône General Post proc

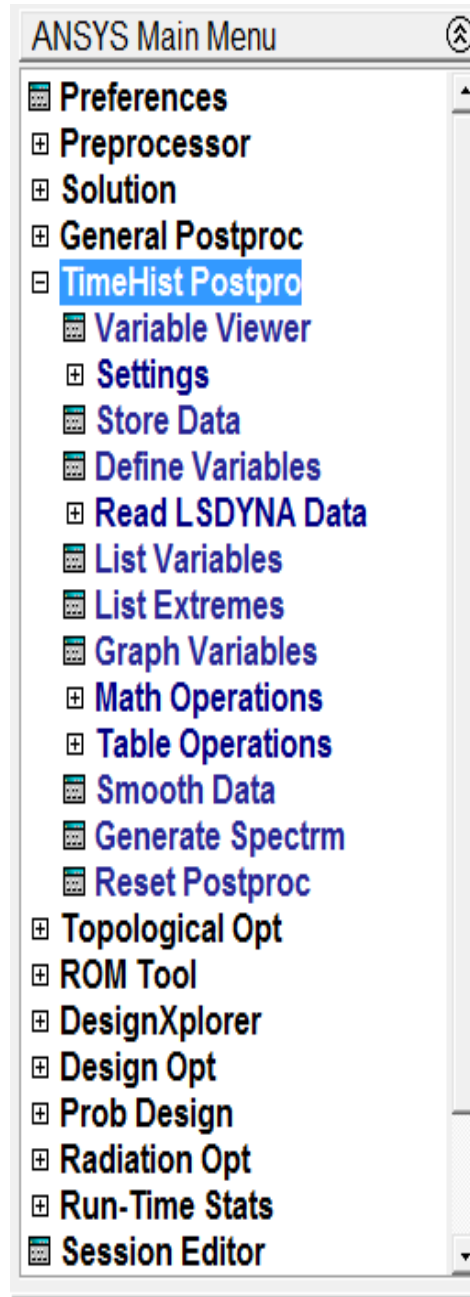


Figure 3-5 : Fonction de l'icône général postproc

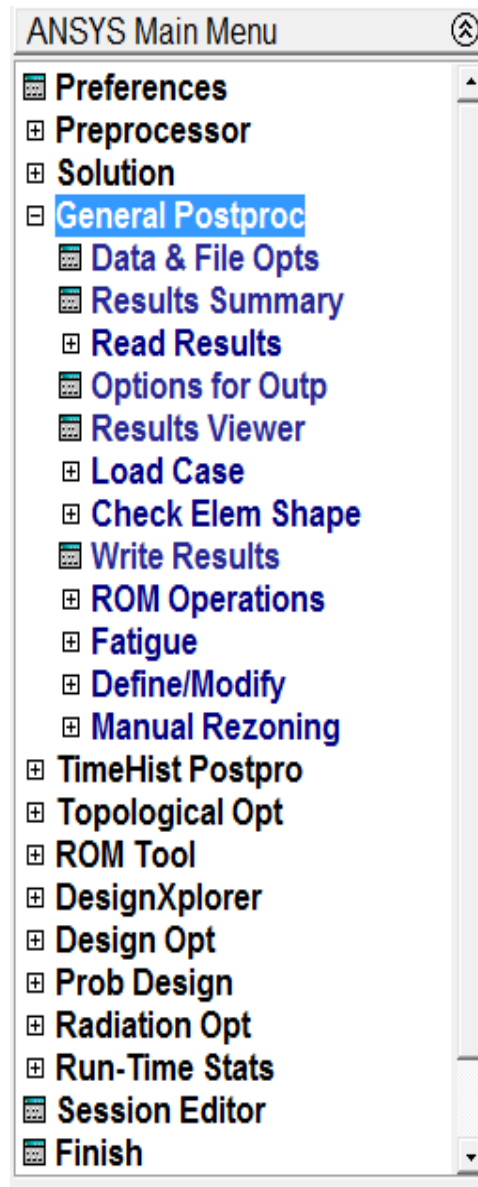


Figure 3-6 : Fonction de l'icône Time Hist postpro

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

3-4-5- Barre de commande ANSYS



Figure 3-7 : Fonction de la barre de commande ANSYS

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

l'insertion des programmes.

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

3-5-Conclusion :

Ce chapitre est un apprentissage du code ANSYS et ses différentes méthodes d'analyse (Statique, modale, transitoire.....etc.). Les analyses statique et modale vont faire l'objet du prochain chapitre.

4-1-Introduction

Dans le but d'atteindre l'objectif de la présente recherche, et qui consiste à étudier l'effet combiné de la présence du sol de fondation ainsi que le réservoir d'eau sur le comportement des barrages connu dans la littérature sous le nom de phénomène d'interaction sol-fluide-structure, le barrage koyna a été choisi comme cas d'étude.

Le logiciel Ansys version 15 est choisi comme code élément finis pour la modélisation du phénomène d'interaction sol fluide structure appliqué au barrage koyna.

Cette section présente :

- Une présentation de la géométrie du barrage koyna.
- Les caractéristiques des matériaux du barrage koyna, de sol de fondation ainsi que le fluide de réservoir.
- La modélisation élément finis, par Ansys version 15, du barrage koyna tenant en compte du phénomène d'interaction sol-fluide-structure.

4-2-Description du site, de la structure et des matériaux :

Le **Barrage de Koyna** est l'un des plus grands barrages dans Maharashtra, Inde. C'est un barrage en moellons construit sur Rivière Koyna qui monte dans Mahabaleshwar, une station de montagne dans Sahyadri gammes. Il est situé dans Koyna Nagar, Quartier de Satara, niché dans le Ghâts occidentaux sur la route nationale entre Chiplun et Karad, à environ quarante milles à l'intérieur des terres de la mer d'Arabie dans la région sud-ouest de l'Inde. Il a été conçu comme un barrage-poids droit mesurant 103 m de haut et 853 m de long. Il mesure 14,8 m d'épaisseur à la crête et 68,6 m d'épaisseur à la base de la section la plus haute. Le barrage a été construit en sections monolithiques de 15,2 m de large, avec un Déversoir de débordement de 91,4 m de largeur situé au centre de l'ouvrage.

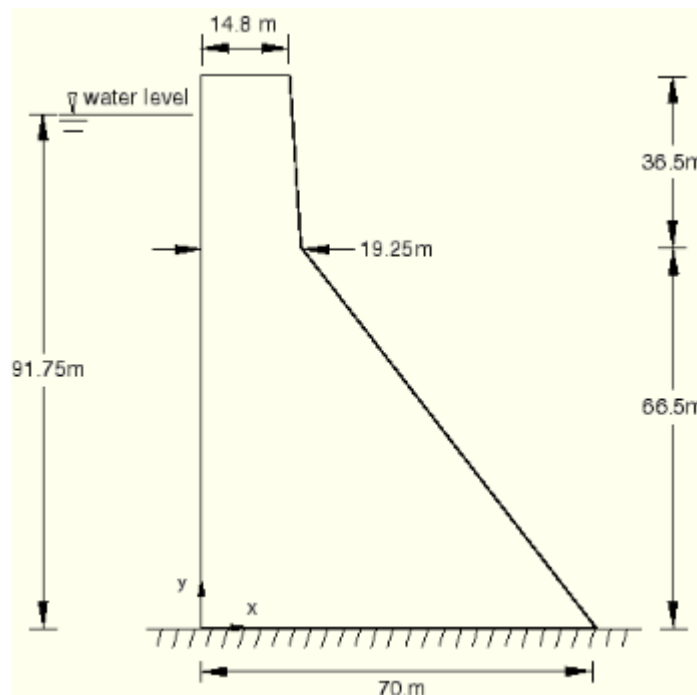


Figure 4-1 : Géométrie du barrage Koyna

Le barrage de Koyna a été construit principalement en béton de gravats. Pendant la construction, fraîchement placé, des couches de neuf pouces d'épaisseur de béton à affaissement élevé et à air occlus ont été recouvertes de correspondant couches de neuf pouces d'épaisseur de gros gravats. La taille maximale du diamètre du décombres variait de quatre à seize pouces. Ces deux couches ont été vibrées ensemble pour créer une ascenseur ligne, puis ont été finis selon les méthodes établies pour les ascenseurs en béton conventionnels.

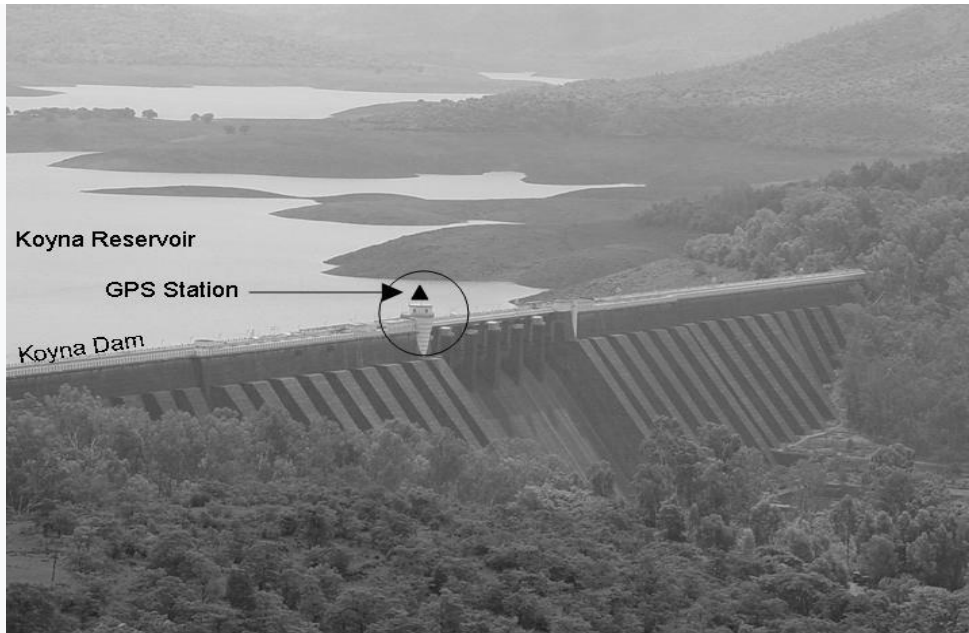


Figure 4-2 : Station GPS Barrage de Koyna, Western Maharashtra, Inde



Figure 4-3 : Barrage de Koyna, Western Maharashtra, Inde

4-3-Propriétés des matériaux :

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

Matériaux	Module de young N/m ³	Coefficient de poisson	Densité Kg/m ³
Corps de barrage (En béton)	3300	0.33	$6.2 \cdot 10^{+10}$
Sol de fondation	31027	0.2	2643

Tableau 4-1 : Propriétés de corps de barrage et sol de fondation.

4-4- Modélisation élément finis du barrage koyna vide avec et sans interaction sol-structure :

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

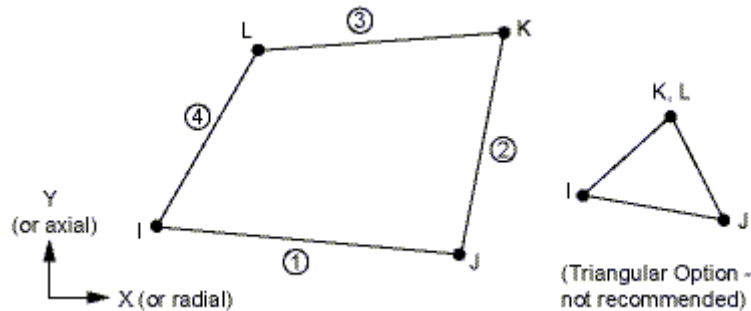


Figure 4-4 : schéma de l'élément PLANE182

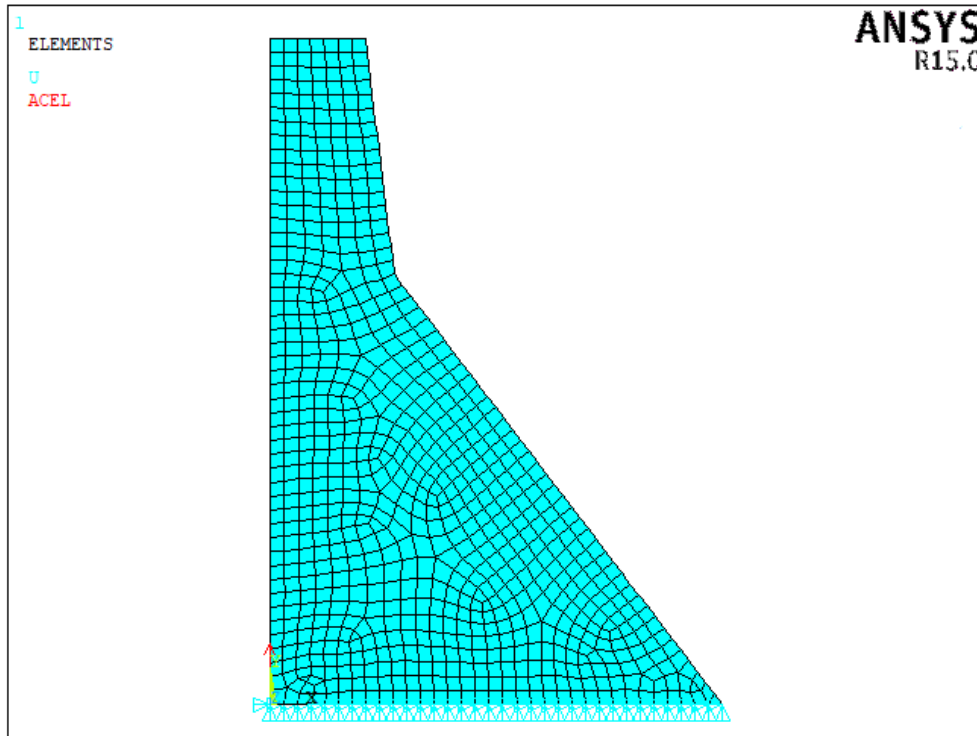


Figure 4-5 : Modèle élément finis du Barrage Koyna a base fixe (sans interaction sol-structure).

La figure 4-5 représente le model élément finis du koyna dam a base fixe c'est à dire sans prise en compte du phénomène d'interaction sol-structure.

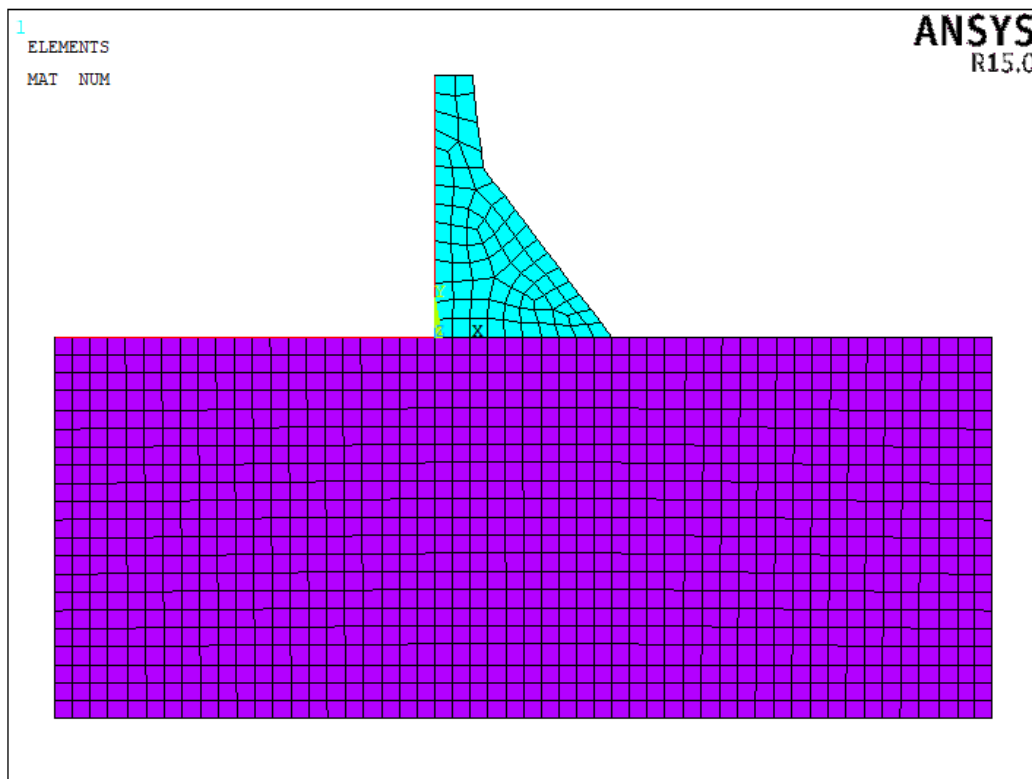


Figure 4-6 : Modèle élément finis du Barrage Koyna avec sol de fondation (avec interaction sol-structure)

La figure 4-6 représente le model élément finis du barrage de koyna avec sol de fondation c'est à dire tenant en compte du phénomène d'interaction sol-structure.

Il est à noter que l'extension du sol de part et d'autre du barrage est prise égale à 150 m, cette dimension est jugée suffisante après calcul des sensibilités des résultats de calcul statique et modale par rapport à ce paramètre.

4-5- 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 4-6 représente l'élément SURF 153 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 4-6.

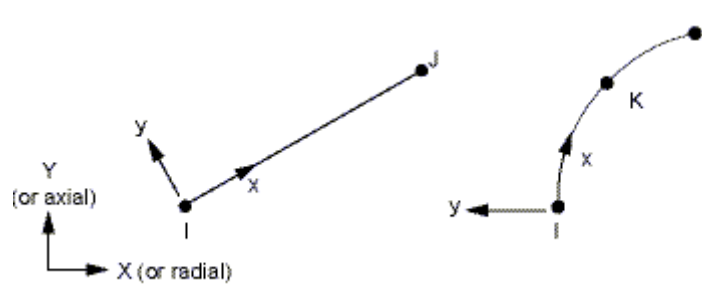


Figure 4-7 : Élément type SURF153

4-6- Calcul de l'épaisseur de l'élément SURF153

L'épaisseur de l'élément surf 153 est donnée par la formule suivante :

$$\text{Epaisseur d'élément SURF153} = \frac{\text{volume d'eau de reservoir (m}^3\text{)}}{\text{surface de contact fluide - barrage et/ou fondation (m}^2\text{)}} \times \text{masse volumique d'eau (kg/m}^3\text{)}$$

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

Tableau 4-2 : Propriétés du fluide de réservoir d'eau.

4-7-conclusion :

Une présentation du barrage Koyna a fait l'objet de ce chapitre ainsi que sa modélisation utilisant le code Ansys version 15. Les analyses statique et modale du barrage vont faire l'objet du chapitre suivant.

5-1-Introduction :

Ce chapitre consiste à calculer la réponse statique du barrage en terme de déformation et des déplacements ainsi que la distribution des contraintes dans le corps du barrage les déformés et les facteurs de participation modale dans le sens X. Les calculs sont menés par le code ANSYS 15.

Pour chaque type d'analyse, deux modèle a été choisi :

- Le barrage vide seul ; c'est à dire a base encastree et par conséquent sans interaction sol structure.
- Le barrage vide avec interaction sol structure ou la fondation du barrage est modélisée tout en prend en compte sa masse.

5-2-Définition de quelques paramètres utilisés dans l'analyse modale et donnés par le code ANSYS :

5-2-1-Facteur de participation

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

$$P_i = \{\phi\}_i^T [M] \{D\}$$

Où :

P_i : 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

5-2-2- Masse effective :

La masse effective est donnée par :

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

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

5-2-3- Masse effective totale :

$$M_{e\ totale} = \sum M_{ei}$$

5-2-4- Rapport :

Le rapport est donné par :

$$Rapport = \frac{P_{fi}}{P_{fi\ max}}$$

5-2-L'analyse statique :

5-2-1-Calcul Statique du barrage seul (Sans interaction) :

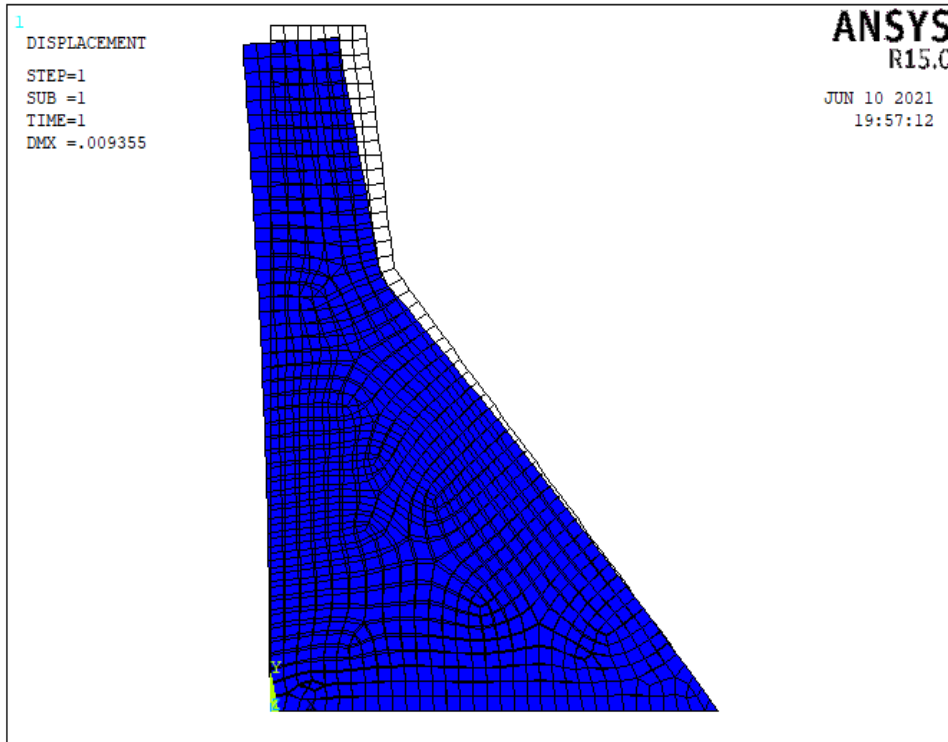


Figure 5-1 : Déformation du barrage seul (Sans interaction).

La figure 5-1 présente la déformation du barrage seul vide sans interaction tel que $d=0.009355m$.

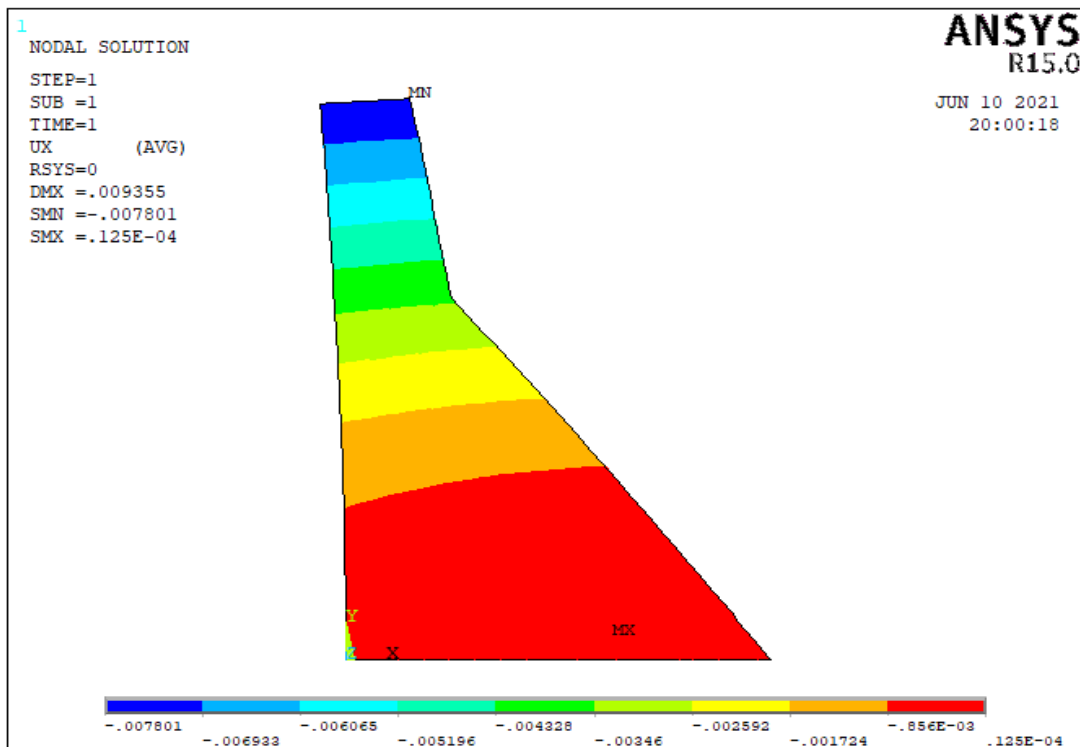


Figure 5-2 : Déplacement suivant X du barrage seul (Sans interaction).

La figure 5-2 présente le déplacement suivant X du barrage seul vide sans interaction tel que $D_{max}=0.125 \cdot 10^{-4} m$ et $D_{min}=-0.007801m$.

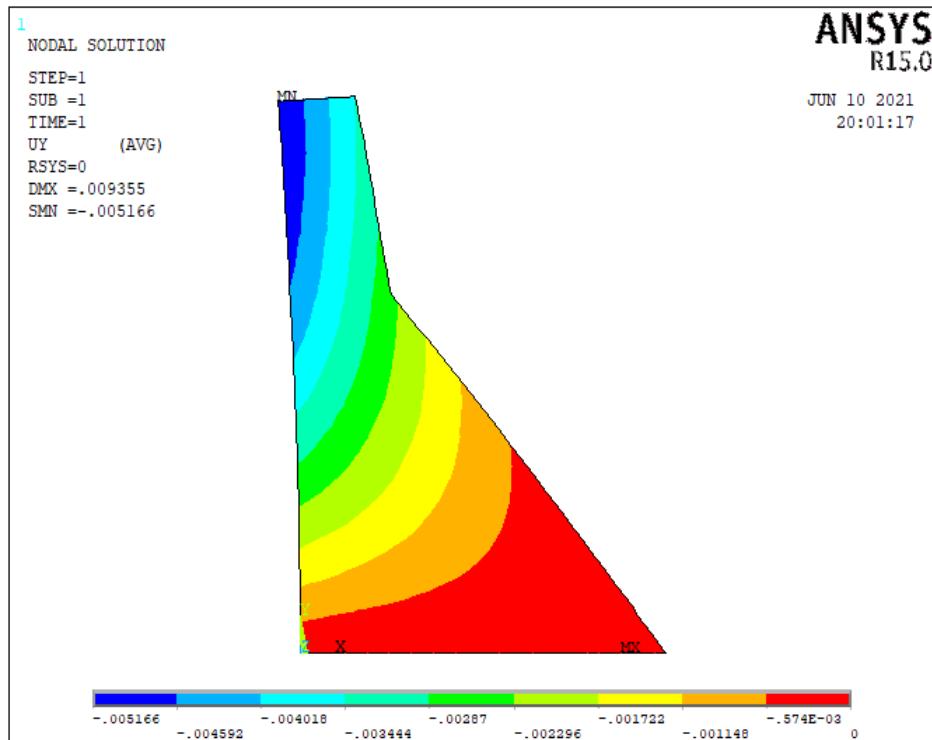


Figure 5-3 : Déplacement suivant Y du barrage seul (Sans interaction)

La figure 5-3 présente le déplacement suivant Y du barrage seul vide sans interaction tel que $D_{min} = -0.005166m$.

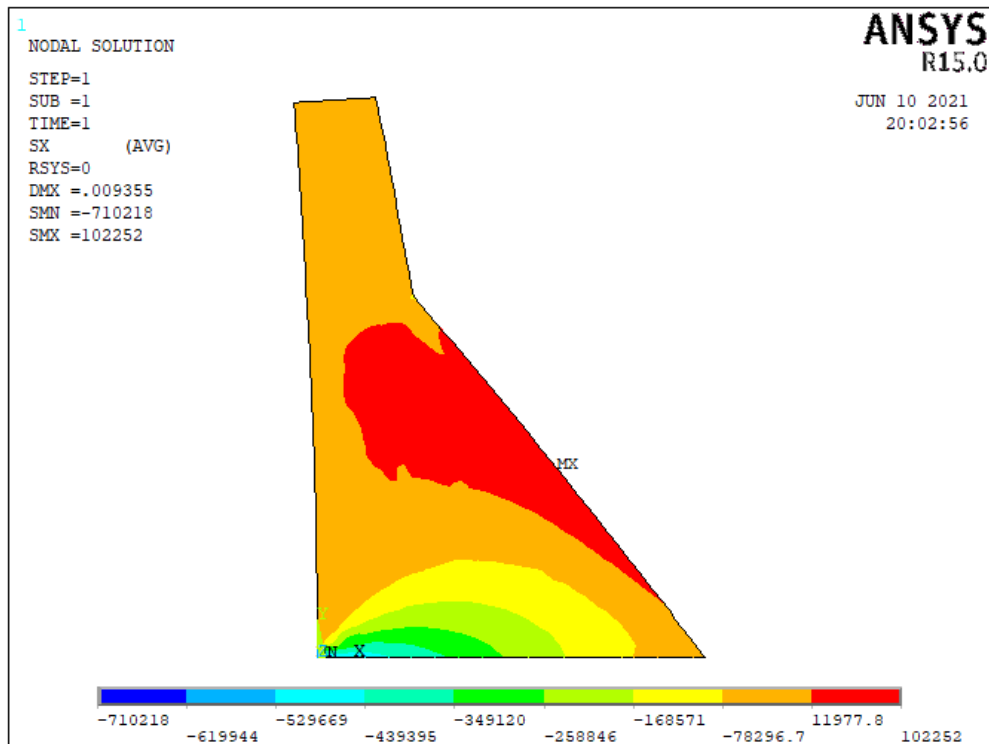


Figure 5-4 : Contrainte suivant X du barrage seul (Sans interaction)

La figure 5-4 présente la contrainte suivant X du barrage seul vide sans interaction tel que $S_{max} = 102252N/m^2$ et $S_{min} = -710216 N/m^2$.

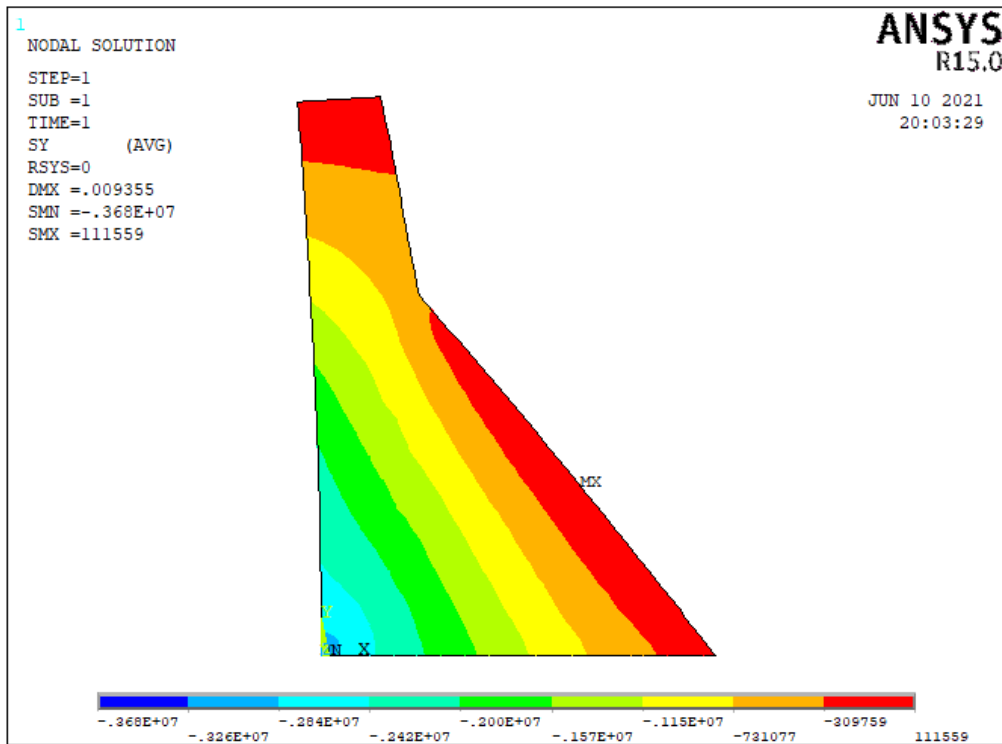


Figure 5-5 : Contrainte suivant Y du barrage seul (Sans interaction)

La figure 5-5 présente la contrainte suivant Y du barrage seul vide sans interaction tel que $S_{max}=111559 \text{ N/m}^2$ et $S_{min}=-0.368 \cdot 10^{07} \text{ N/m}^2$.

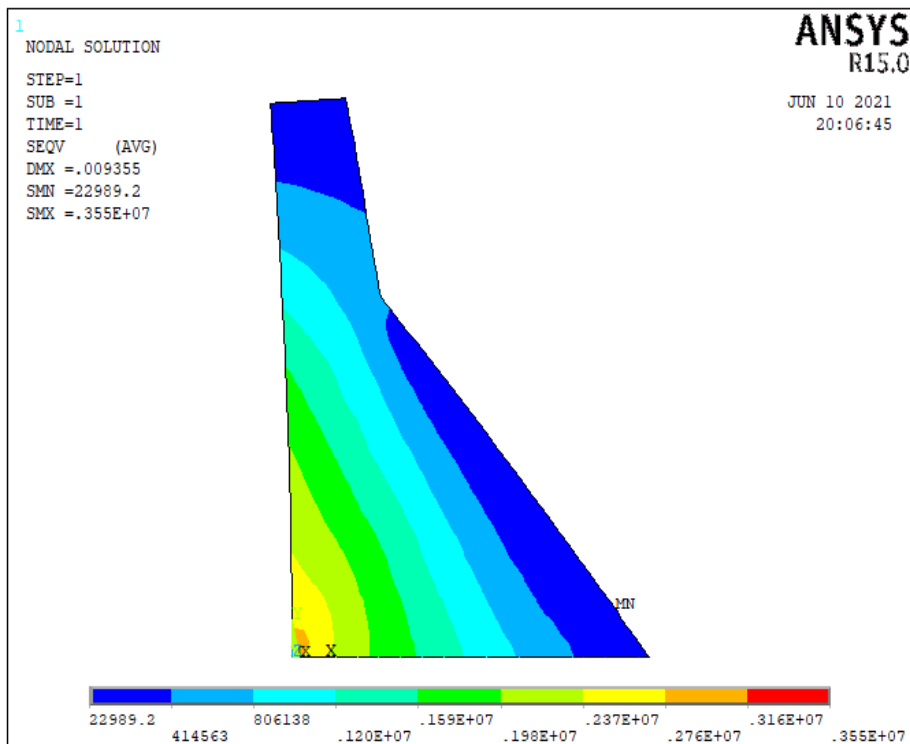


Figure 5-6 : Contrainte Von Mises du barrage seul (Sans interaction)

La figure 5-6 présente la contrainte Von Mises du barrage seul vide sans interaction tel que $S_{max}=0.355 \cdot 10^{07} \text{ N/m}^2$ et $S_{min}=22989.2 \text{ N/m}^2$.

5-2-2-Calcul statique du barrage vide avec interaction :

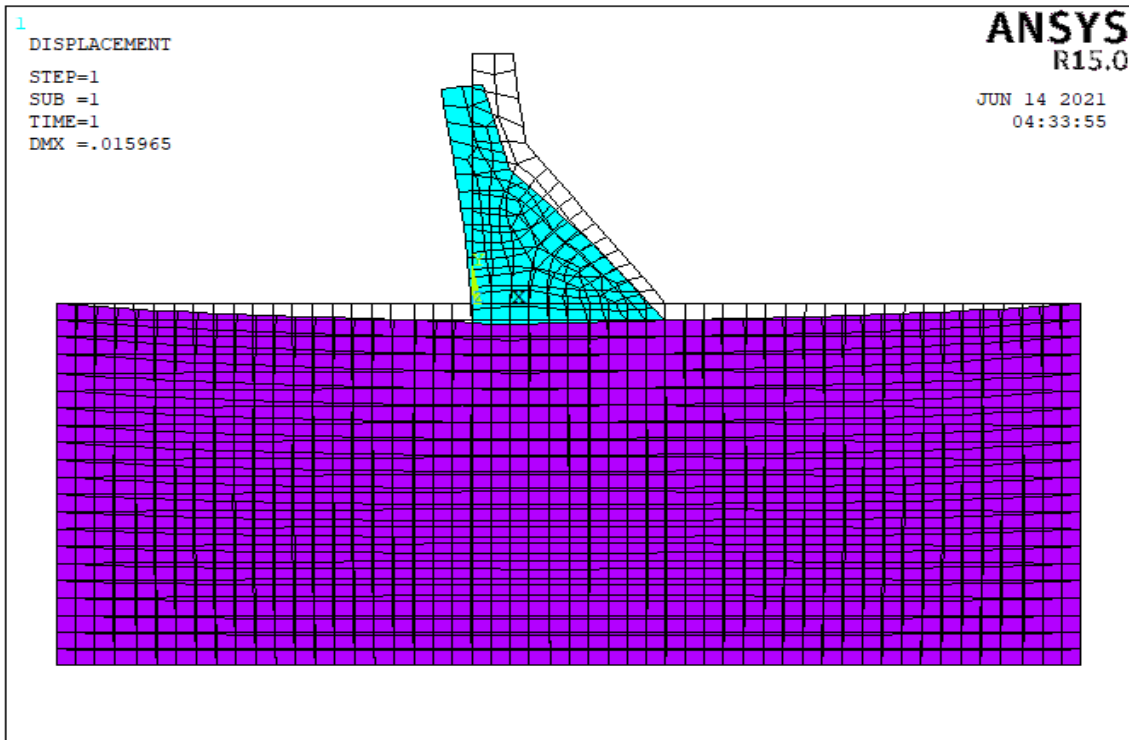


Figure 5-7 : Déformation du barrage vide avec interaction.

La figure 5-7 présente la déformation du barrage vide avec interaction tel que $d=0.015965m$.

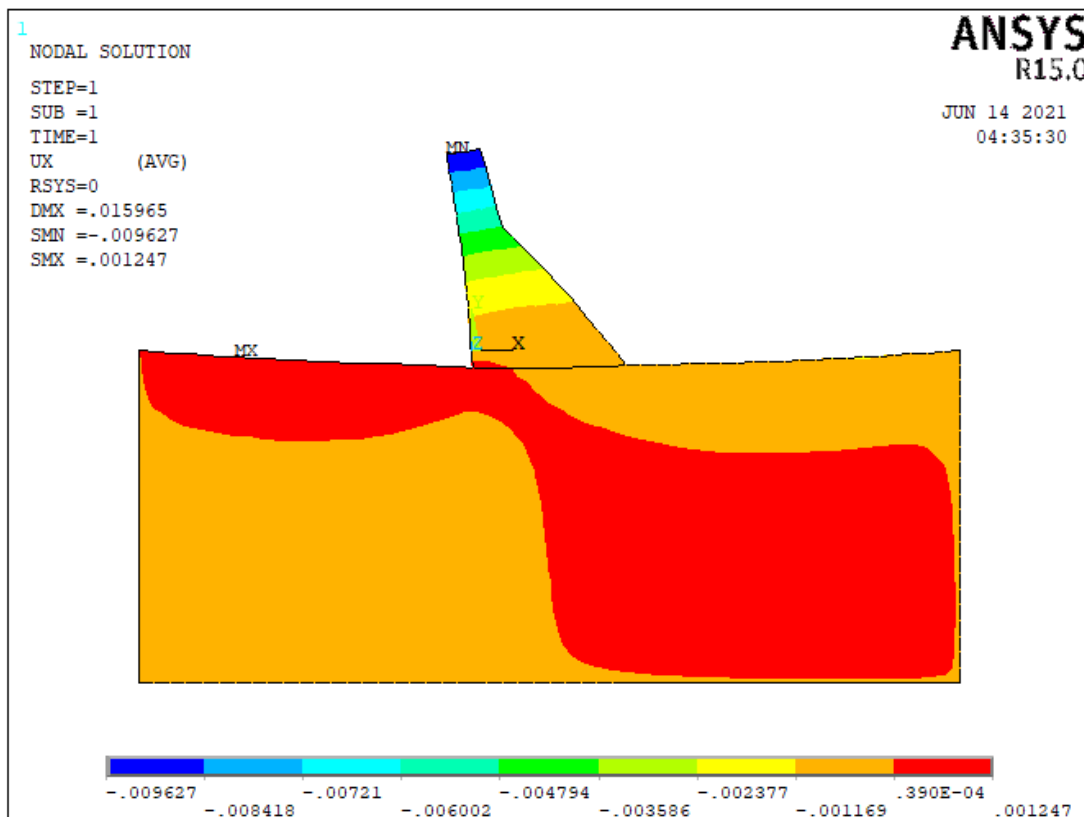


Figure 5-8 : Déplacement suivant X du barrage vide avec interaction.

La figure 5-8 présente le déplacement suivant X du barrage vide avec interaction tel que $D_{max}=0.001247m$ et $D_{min}=-0.009627m$.

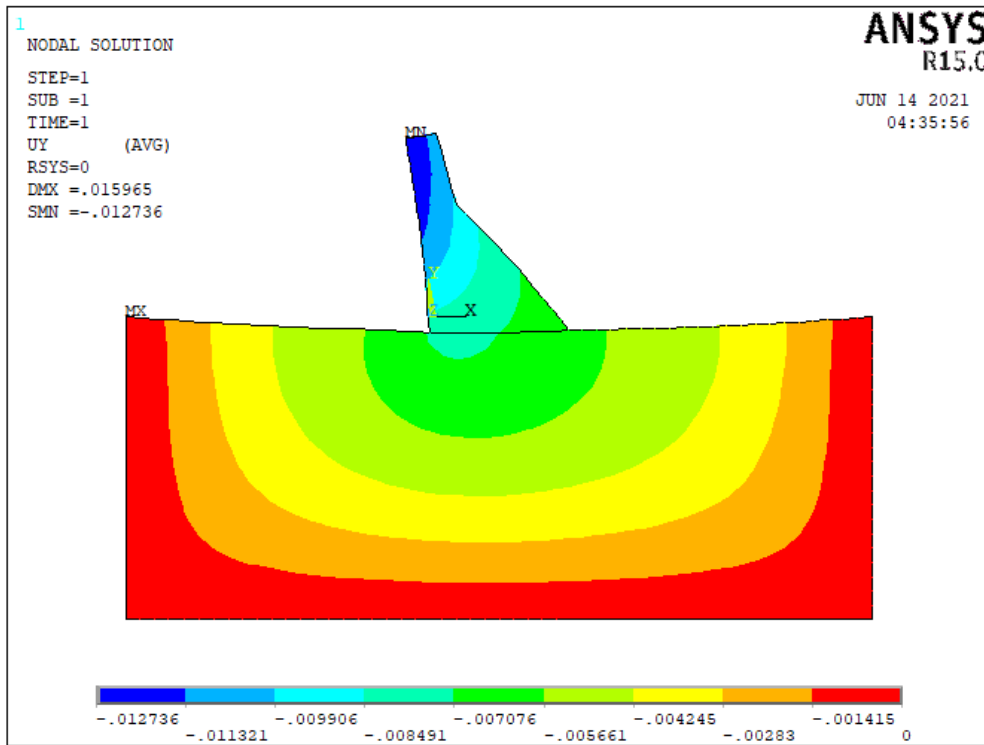


Figure 5-9 : Déplacement suivant Y du barrage vide avec interaction.

La figure 5-9 présente le déplacement suivant Y du barrage vide avec interaction tel que $D_{max}=0.015965m$ et $D_{min}=-0.012736m$.

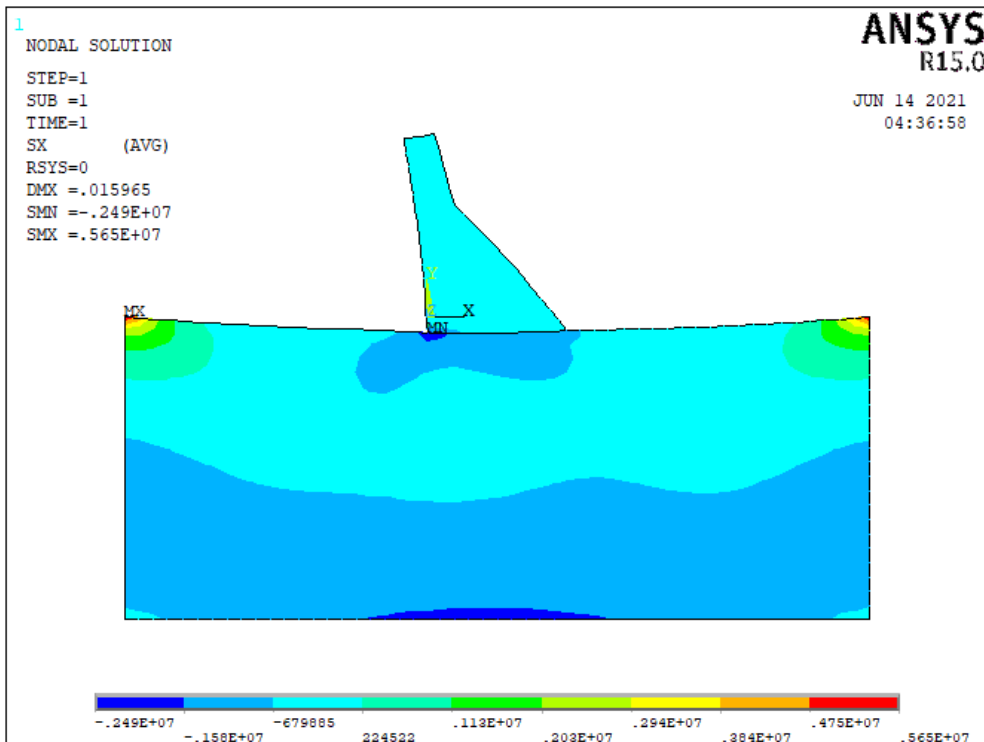


Figure 5-10 : Contrainte suivant X du barrage vide avec interaction.

La figure 5-10 présente la contrainte suivant X du barrage vide avec interaction tel que $S_{max}=0.565 \cdot 10^{+07} \text{ N/m}^2$ et $S_{min}=-0.249 \cdot 10^{+07} \text{ N/m}^2$.

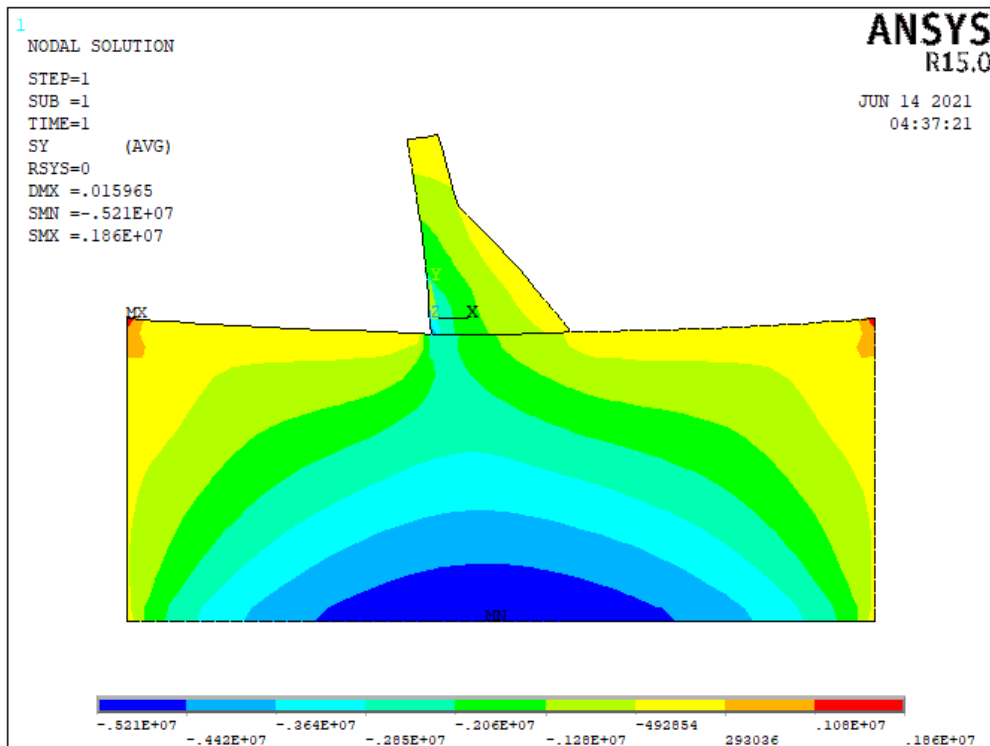


Figure 5-11 : Contrainte suivant Y du barrage vide avec interaction.

La figure 5-11 présente la contrainte suivant Y du barrage vide avec interaction tel que $S_{max}=0.186 \cdot 10^{+07} \text{ N/m}^2$ et $S_{min}=-0.521 \cdot 10^{+07} \text{ N/m}^2$.

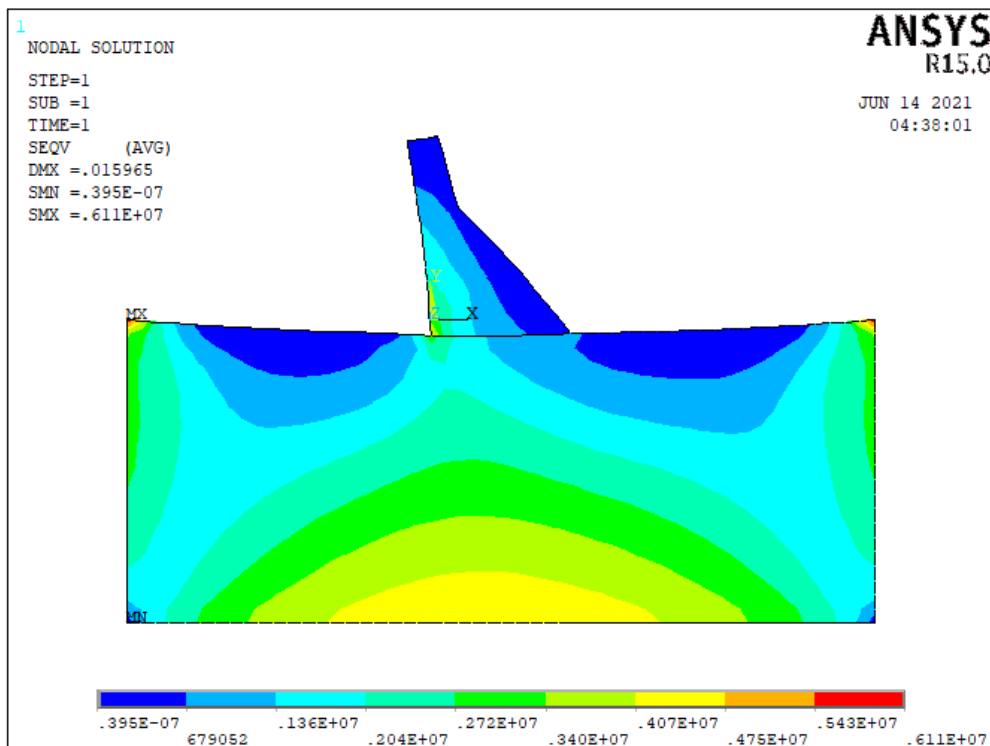


Figure 5-12 : Contrainte de VON MISES du barrage vide (avec interaction sol-structure)

La figure 5-12 présente la contrainte de Von Mises du barrage vide avec interaction tel que $S_{max}=-0.611 \cdot 10^{+07} = 0.395 \cdot 10^{-07} \text{ N/m}^2$ et $S_{min}=0.395 \cdot 10^{-07} \text{ N/m}^2$.

5-3-La discussion de l'analyse statique :

D'après les figures ci-dessus ; On remarque la valeur de la **déformation** du barrage vide seul est **inférieur** par rapport le cas du barrage vide avec interaction.

En suite les valeurs de **déplacement suivant X** ($D_{max}=0.125.10^{-4}m$) du barrage vide sans interaction est **inférieur** que le ($D_{max}=0.00124m$) du barrage avec interaction, et le ($D_{min}=-0.0078m$) du barrage vide sans interaction est **inférieur** que le ($D_{min}=-0.0096m$) du barrage vide avec interaction.

Aussi les valeurs de **déplacement suivant Y** ($D_{min}=-0.0516m$) du barrage vide sans interaction est **supérieur** que le ($D_{min}=-0.0127m$) du barrage vide avec interaction.

On remarque toute les **contraintes** maximales du barrage vide avec interaction quel que soit **suitant X, suivant Y, et les contraintes VON MISES** sont **supérieur** que les contraintes maximales du barrage vide sans interaction.

Par contre ; les contraintes minimales du barrage vide avec interaction quel que soit **suitant X, suivant Y** sont **supérieur** que les contraintes minimales du barrage vide sans interaction, mais la contrainte minimale de **VON MISES** du barrage vide avec interaction est **inférieur** la contrainte minimale du barrage vide sans interaction.

5-4- L'analyse Modale :

5-4-1-Calcul modale du barrage vide seul :

MODE	Fréquence	PERIOD	PARTIC, FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	MASS FRACTION	TO TOTAL MASS
1	3,01776	0,33137	1713	1	2,93E+06	0,317936	0,309357
2	8,0219	0,12466	-1522,3	0,888657	2,32E+06	0,569013	0,244302
3	10,8644	9,20E-02	-982,08	0,573302	964480	0,673511	0,101678
4	15,8202	6,32E-02	1072,4	0,626031	1,15E+06	0,798115	0,121242
5	24,1087	4,15E-02	428,78	0,250309	183856	0,818035	1,94E-02
6	24,2211	4,13E-02	-731,46	0,426998	535031	0,876004	5,64E-02
7	33,4828	2,99E-02	465,68	0,271844	216853	0,899499	2,29E-02
8	35,8038	2,79E-02	308,66	0,180185	95271,7	0,909821	1,00E-02
9	38,491	2,60E-02	215,23	0,12564	46321,9	0,91484	4,88E-03
10	40,9026	2,44E-02	-243,57	0,142189	59328	0,921268	6,25E-03
11	44,584	2,24E-02	152,95	0,089284	23392,4	0,923802	2,47E-03
12	46,6405	2,14E-02	-317	0,185054	100491	0,93469	1,06E-02
13	49,507	2,02E-02	277,82	0,162182	77185,2	0,943053	8,14E-03
14	53,4837	1,87E-02	132,59	0,077403	17580,8	0,944958	1,85E-03
15	57,5474	1,74E-02	60,398	0,035258	3647,96	0,945353	3,85E-04
16	58,1158	1,72E-02	-216,83	0,126578	47015,4	0,950447	4,96E-03
17	59,8635	1,67E-02	170,28	0,099404	28995,8	0,953588	3,06E-03
18	62,0446	1,61E-02	204,99	0,119666	42020,8	0,958141	4,43E-03
19	65,8477	1,52E-02	-106,57	0,062214	11358,1	0,959372	1,20E-03
20	66,9555	1,49E-02	-57,96	0,033835	3359,42	0,959736	3,54E-04

Tableau 5-1 : Les 20 premières fréquences suivant X du barrage vide sans interaction.

Le tableau 5-1 résume les 20 première fréquence du barrage vide sans interaction sol-structure ainsi que les paramètres suivants : période, facteur de participation, ratio, masse effective, masse de fraction et masse total.

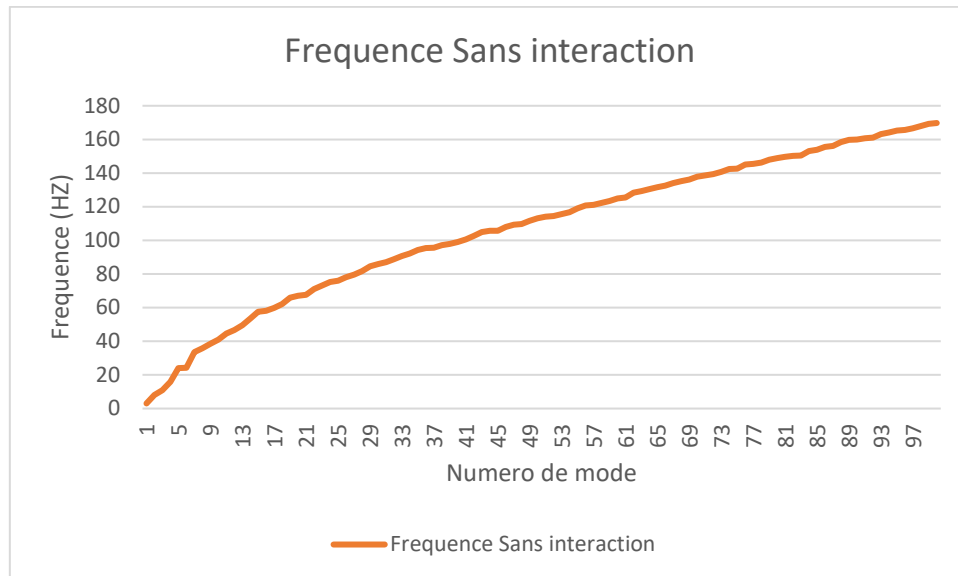


Figure 5-13 : Les 100 fréquences suivant X du barrage vide a base fixe.

La figure 5-13 représente les 100 premières fréquences suivant X du barrage sans interaction.

5-4-2-Calcul modale du barrage vide avec sol :

MOD E	Fréquence avec interaction	PERIOD	PARTIC, FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	MASS FRACTION	TO TOTAL MASS
1	2,82732	0,35369	2396,3	0,3092	5,74E+06	3,24E-02	2,98E-02
2	6,37086	0,15696	-7750,1	1	6,01E+07	0,370816	0,3118
3	6,69536	0,14936	-2293,2	0,295899	5,26E+06	0,40045	2,73E-02
4	7,93093	0,12609	7224,7	0,93221	5,22E+07	0,694575	0,270959
5	9,59077	0,10427	26,891	0,00347	723,121	0,694579	3,75E-06
6	10,2133	9,79E-02	1415,6	0,182661	2,00E+06	0,705872	1,04E-02
7	11,9615	8,36E-02	1316,6	0,169878	1,73E+06	0,715639	9,00E-03
8	12,6294	7,92E-02	878,51	0,113354	771772	0,719988	4,01E-03
9	13,8021	7,25E-02	1357,3	0,175134	1,84E+06	0,730369	9,56E-03
10	14,1544	7,06E-02	-3398,3	0,438492	1,15E+07	0,795446	6,00E-02
11	16,3873	6,10E-02	-631,54	0,081488	398837	0,797693	2,07E-03
12	16,9606	5,90E-02	-141,73	0,018288	20087,7	0,797807	1,04E-04
13	17,5761	5,69E-02	3113,9	0,401783	9,70E+06	0,852444	5,03E-02
14	18,6116	5,37E-02	137,99	0,017805	19040,6	0,852551	9,88E-05
15	20,1541	4,96E-02	1233,4	0,15915	1,52E+06	0,861124	7,90E-03
16	20,2492	4,94E-02	-389,33	0,050236	151579	0,861978	7,87E-04
17	21,4044	4,67E-02	-1342,3	0,173195	1,80E+06	0,87213	9,35E-03
18	21,7479	4,60E-02	-455,22	0,058737	207225	0,873298	1,08E-03
19	22,3766	4,47E-02	-1113,3	0,143653	1,24E+06	0,880283	6,43E-03
20	22,4725	4,45E-02	-29,047	0,003748	843,704	0,880287	4,38E-06

Tableau 5-2 : Les 20 premières fréquences suivant X du barrage vide avec interaction.

Le tableau 5-2 résume les 20 première fréquence du barrage vide avec interaction sol-structure ainsi que les paramètres suivants : période, facteur de participation, ratio, masse effective, masse de fraction et masse total.

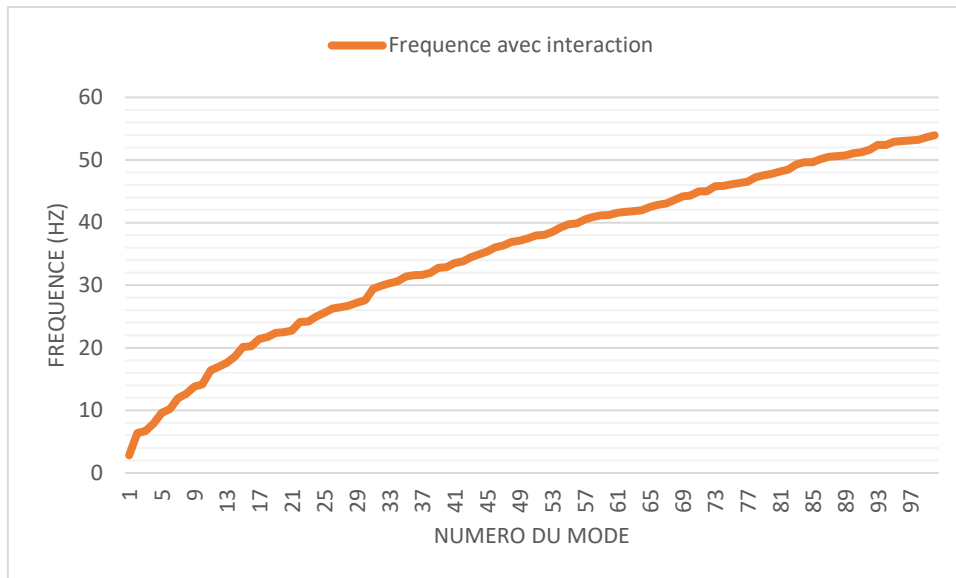


Figure 5-14 : Les 100 fréquences suivant X du barrage vide avec interaction.

La figure 5-14 représente les 100 premières fréquences suivant X du barrage vide avec interaction.

5-4-3-Le rapport entre les deux fréquences du barrage vide sans et avec sol :

MODE	Fréquence sans interaction sol structure	Fréquence avec interaction sol structure	Rapport entre les deux fréquences
1	3,01776	2,82732	1,06735707
2	8,0219	6,37086	1,25915496
3	10,8644	6,69536	1,622676
4	15,8202	7,93093	1,99474715
5	24,1087	9,59077	2,51373977
6	24,2211	10,2133	2,37152536
7	33,4828	11,9615	2,79921415
8	35,8038	12,6294	2,83495653
9	38,491	13,8021	2,78877852
10	40,9026	14,1544	2,88974453
11	44,584	16,3873	2,72064343
12	46,6405	16,9606	2,7499322
13	49,507	17,5761	2,81672271
14	53,4837	18,6116	2,87367556
15	57,5474	20,1541	2,85536938
16	58,1158	20,2492	2,87002943
17	59,8635	21,4044	2,79678477
18	62,0446	21,7479	2,85290074
19	65,8477	22,3766	2,94270354

20	66,9555	22,4725	2,97944154
21	67,6735	22,7457	2,97522169
22	70,9716	24,1045	2,9443299
23	73,1185	24,1565	3,02686647
24	75,1759	25,0146	3,00528092
25	75,9998	25,612	2,96735124
26	78,1309	26,2913	2,9717397
27	79,5395	26,4567	3,00640291
28	81,673	26,7461	3,05364147
29	84,6364	27,2113	3,11034019
30	85,7963	27,6197	3,10634438

Tableau 5-3 : Les 30 premières fréquences suivant X du barrage vide (sans et avec interaction)

Le tableau 5-3 résume les 30 première fréquence du barrage vide avec et sans interaction sol-structure ainsi que le rapport entre les deux fréquences.

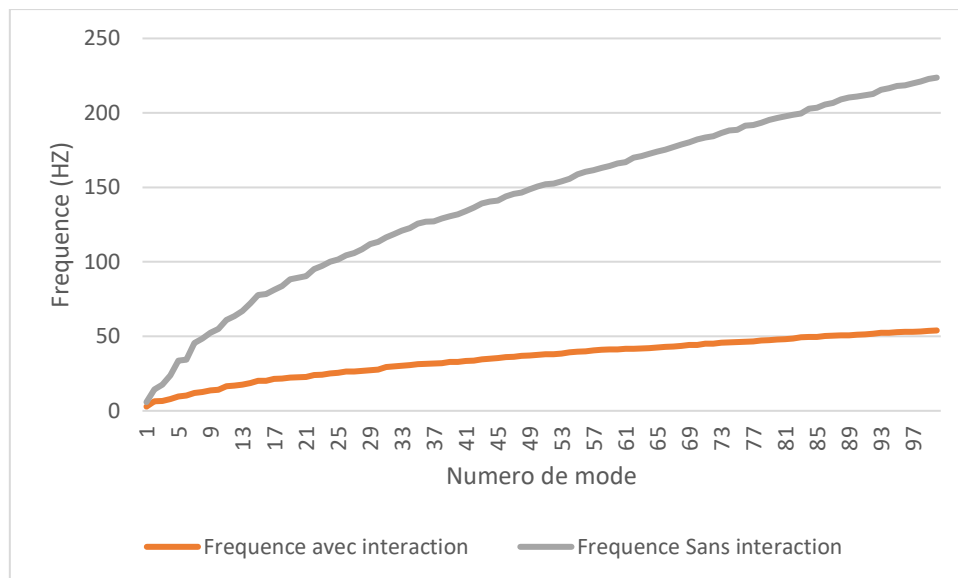


Figure 5-15 : Les 100 fréquences suivant X du barrage (sans et avec interaction).

La figure 5-15 représente les 100 premières fréquences suivant X du barrage vide avec interaction et sans interaction Sol-structure.

5-4-4-La discussion de l'analyse modale :

L'analyse modale donne les fréquences propres, les périodes, et les rapports ainsi que la masse effective pour chaque mode propre.

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

Comme résultats, 100 modes ont été extrait pour chaque cas d'étude. D'après le tableau 5.3, il est clair que la fréquence du barrage vide sans interaction sol-structure est plus grande que celle du barrage vide avec interaction sol-structure.

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

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

Sachant que le mode fondamental est le mode qui entraîne le maximum de masse dans la direction considérée (ayant un $RATIO = 1$) (voir tableau 5-1 et tableau 5-2), Pour le cas du barrage à base encastree, le mode fondamental est le mode numéro 03, alors que pour le cas du barrage avec sol de la fondation, le mode fondamental est le mode numéro 01.

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

5-5-Conclusion :

Le calcul statique et modale du barrage de koyna vide avec et sans interaction sol structure a été abordé dans ce chapitre.

Le prochain chapitre va être consacré au calcul statique et modale du même barrage tout en prend en considération la présence du réservoir d'eau.

6-1-Introduction :

Le but de ce chapitre est d'étudier l'effet de la présence du fluide (réservoir d'eau) sur le comportement statique et modale du barrage koyna avec et sans interaction sol-structure.

Deux modèles vont être élaborés utilisant le code ANSYS version 15, à savoir :

- Le barrage rempli seul (interaction fluide structure).
- Le barrage rempli avec sol (interaction sol structure fluide).

Pour chaque modèle deux types d'analyses vont être lancés

- Analyse statique
- Analyse modale

6-2-L'analyse statique :

Les résultats de l'analyse statique vont être présentés dans cette section.

6-2-1- Calcul Statique du barrage seul rempli (Sans interaction sol structure) :

Les résultats de l'analyse statique du barrage à base encastree c'est à dire sans prise en compte du phénomène d'interaction sol structure font l'objet du présent paragraphe.

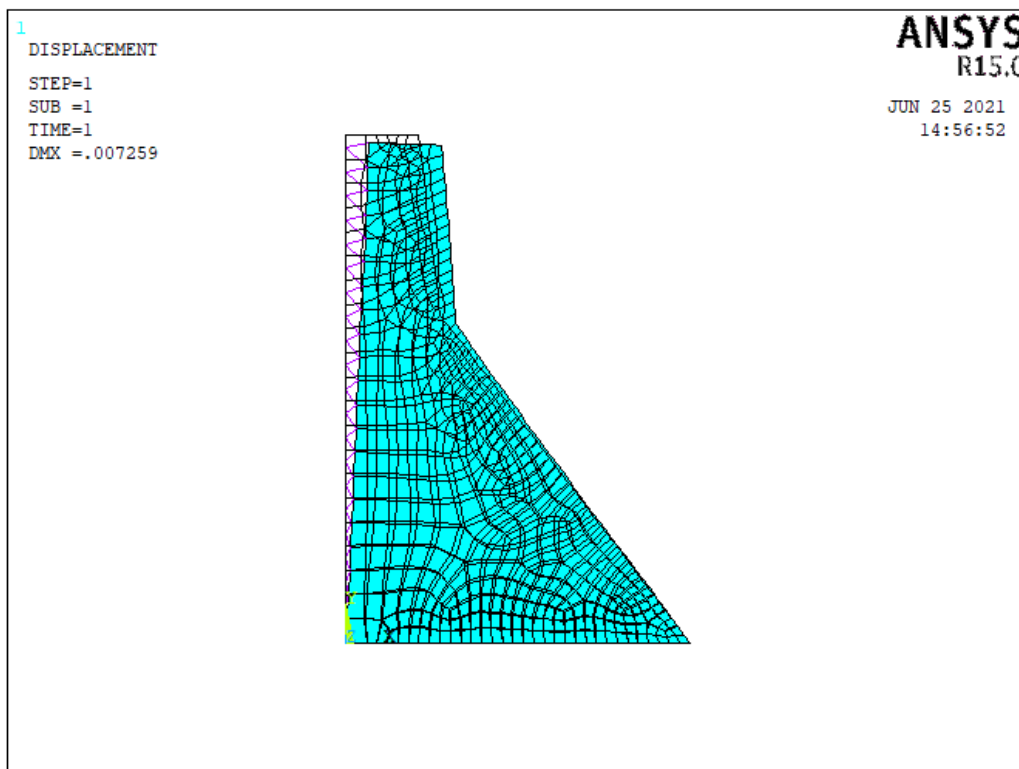


Figure 6-1 : Déformation du barrage rempli.

La figure 6-1 représente la déformation du barrage rempli tel que $d=0.007259\text{m}$.

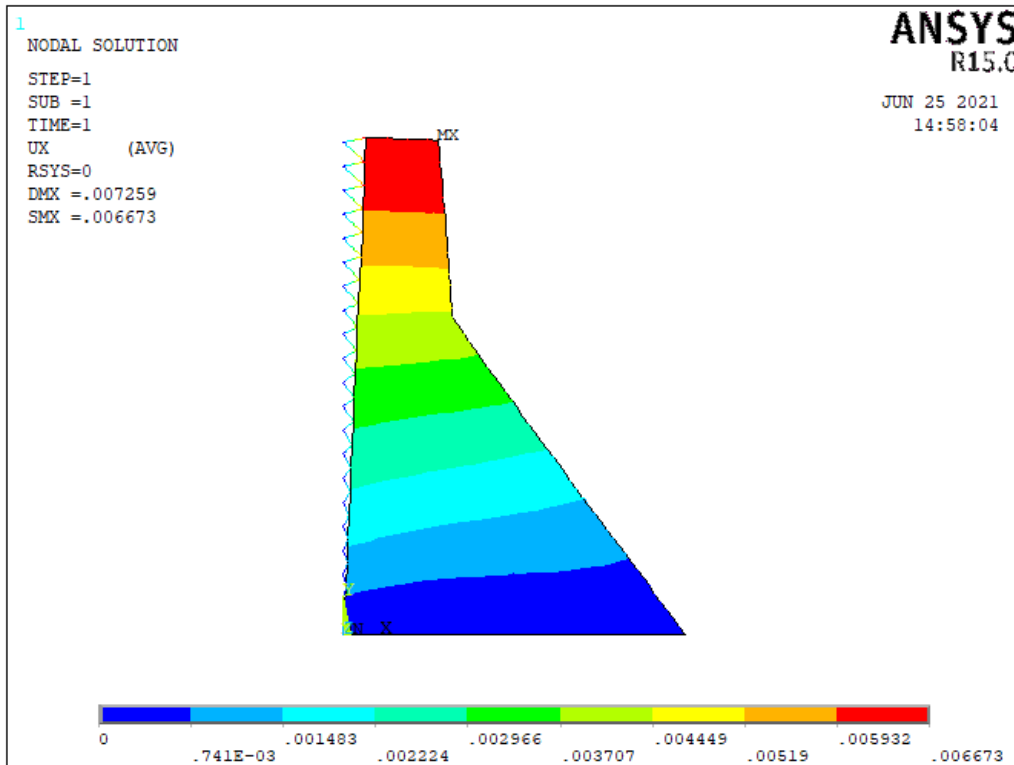


Figure 6-2 : Déplacement suivant X du barrage rempli (Sans interaction sol structure).

La figure 6-2 représente le déplacement suivant X du barrage rempli (Sans interaction sol structure) tel que $D_{max}=0.007259m$ et $D_{min}=-0.006673m$.

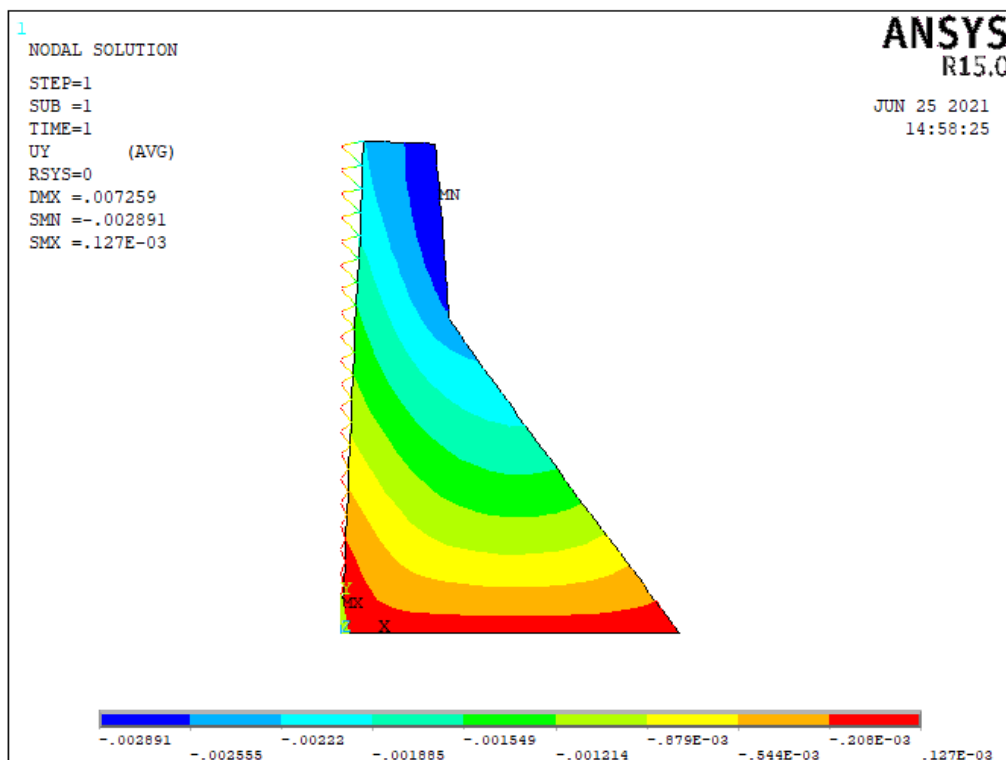


Figure 6-3 : Déplacement suivant Y du barrage rempli (Sans interaction sol structure).

La figure 6-3 représente le déplacement suivant y du barrage rempli (Sans interaction sol structure) tel que $D_{max}=0.127 \cdot 10^{-3} m$ et $D_{min}=-0.002891m$.

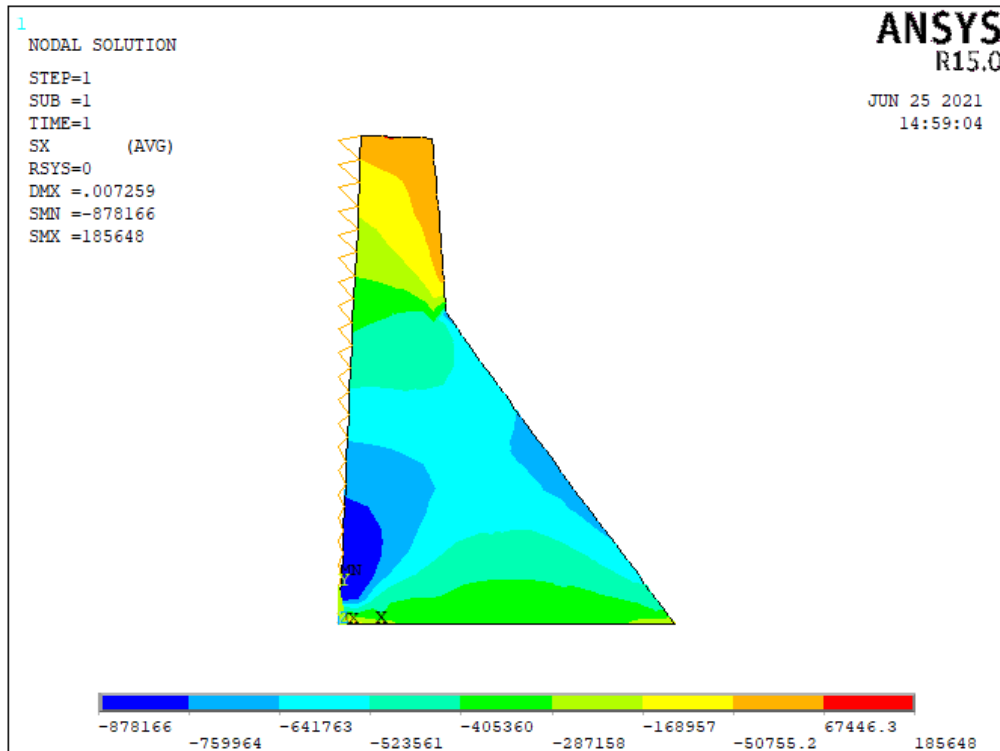


Figure 6-4 : Contrainte suivant X du barrage rempli (Sans interaction sol structure).

La figure 6-4 représente la contrainte suivant X du barrage rempli (Sans interaction sol structure) tel que $S_{max}=185648 \text{ N/M}^2$ et $S_{min}=-878166 \text{ N/M}^2$.

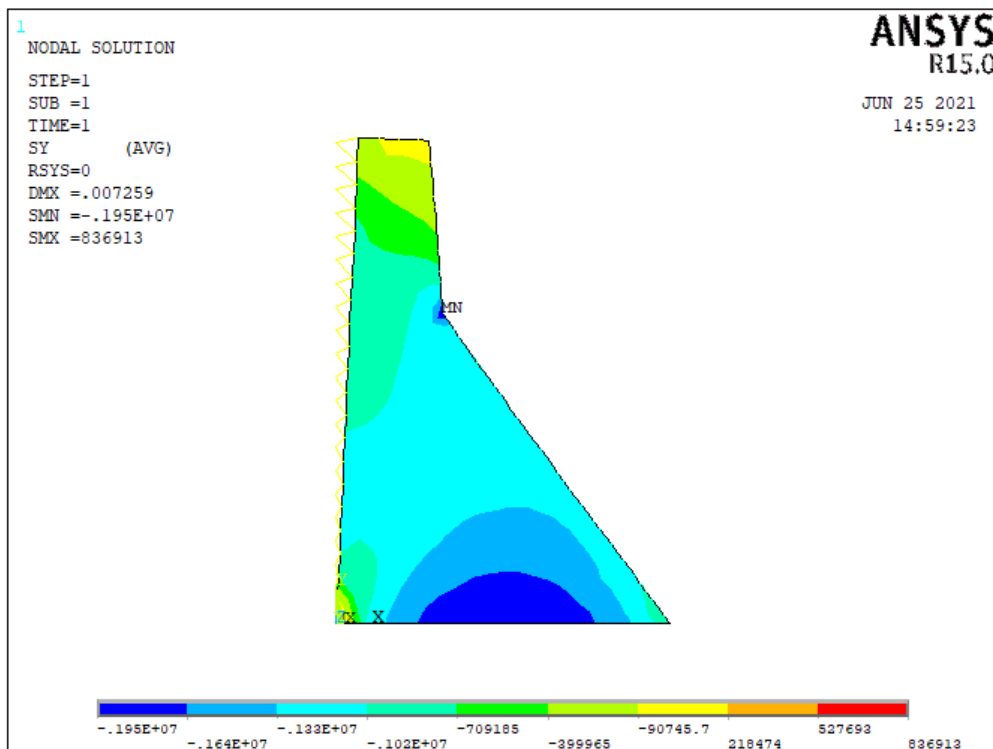


Figure 6-5 : Contrainte suivant Y du barrage rempli (Sans interaction sol structure).

La figure 6-5 représente la contrainte suivant Y du barrage rempli (Sans interaction sol structure) tel que $S_{max}=836913 \text{ N/M}^2$ et $S_{min}=-0.195.10^{+07} \text{ N/M}^2$.

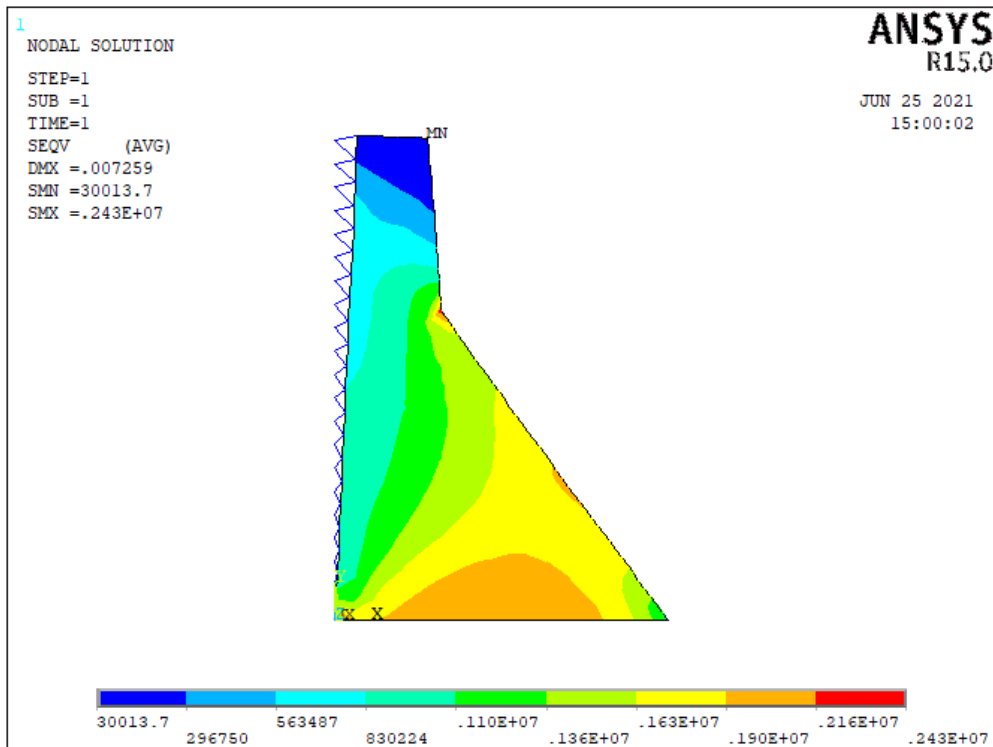


Figure 6-6 : Contrainte Von Mises du barrage rempli (Sans interaction sol structure).

La figure 6-6 représente la contrainte Von Mises du barrage rempli (Sans interaction sol structure) tel que $S_{max}=0.023.10^7$ N/M² et $S_{min}=300137$ N/M².

6-2-2-Calcul statique du barrage rempli avec interaction :

Les résultats de l'analyse statique du barrage avec sol de fondation c'est a dire tenant en compte du phénomène d'interaction sol structure font l'objet du présent paragraphe.

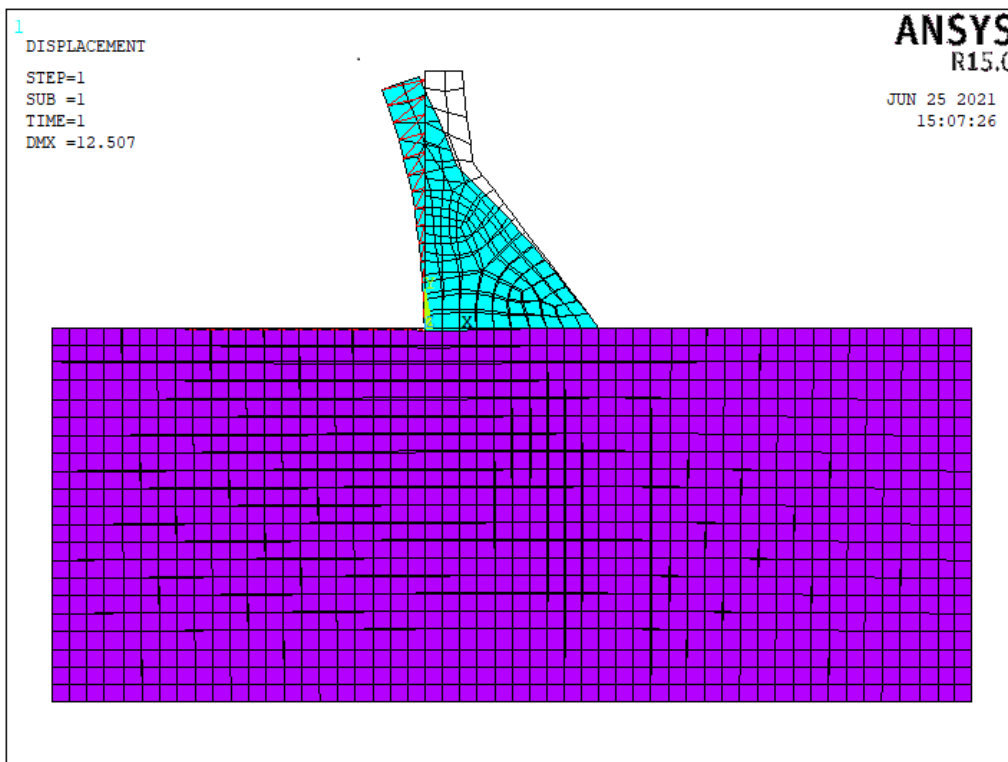


Figure 6-7 : Déformation du barrage avec interaction sol-fluide-structure.

La figure 6-7 représente la déformation du barrage avec interaction sol-fluide-structure tel que $d=12.507m$.

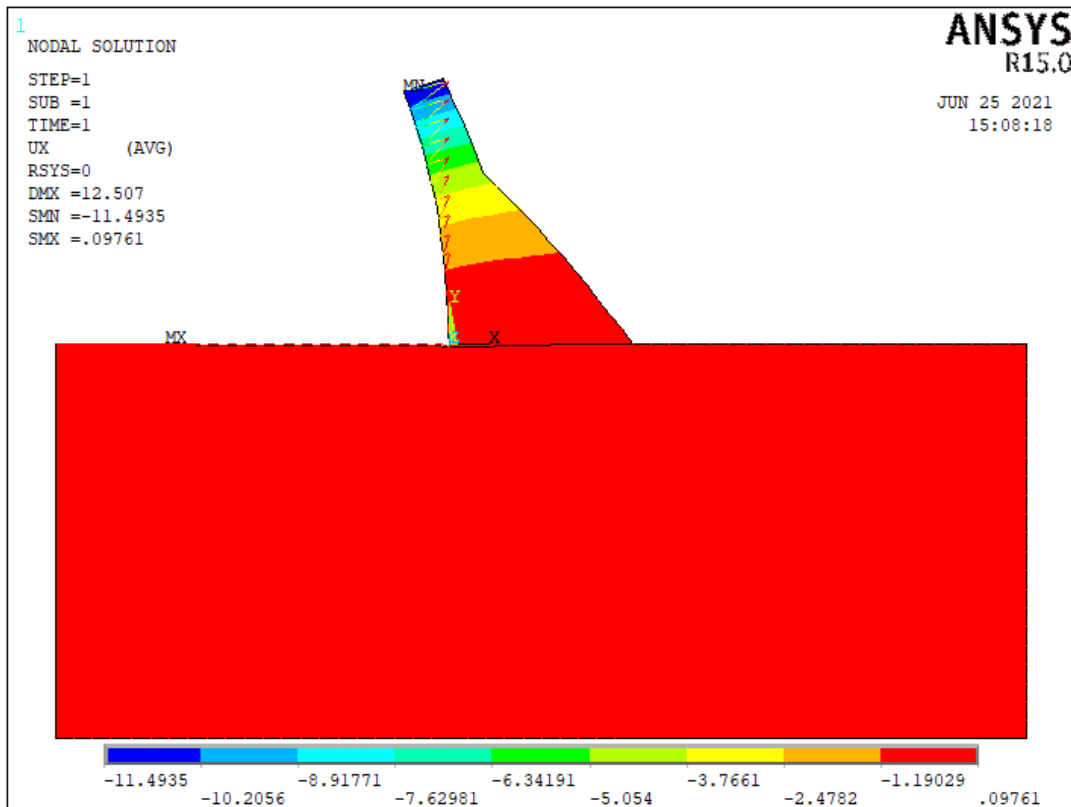


Figure 6-8 : Déplacement suivant X du barrage avec interaction. Sol-fluide-structure

La figure 6-8 représente le déplacement suivant X du barrage avec interaction sol-fluide-structure tel que $D_{max}=0.09761m$ et $D_{min}=-11.4935m$.

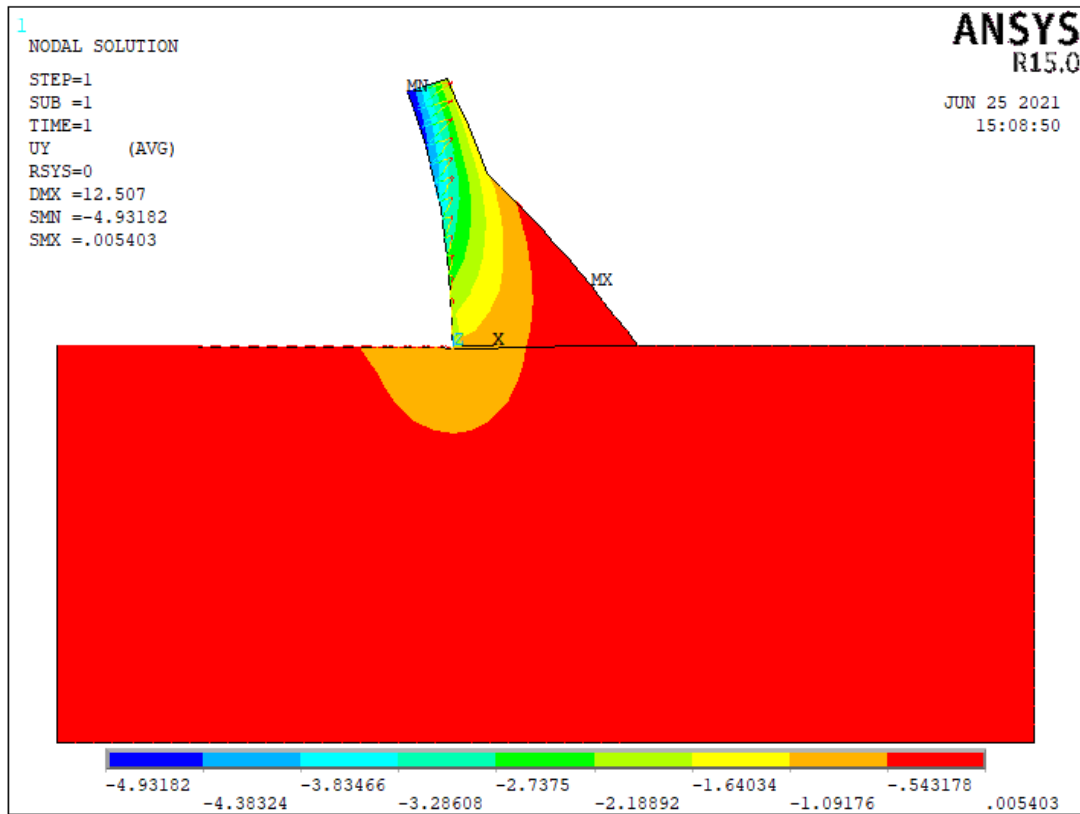


Figure 6-9 : Déplacement suivant Y du barrage avec interaction sol-fluide-structure.

La figure 6-9 représente le déplacement suivant Y du barrage avec interaction sol-fluide-structure tel que $D_{max}=0.05403m$ et $D_{min}=-4.93182m$.

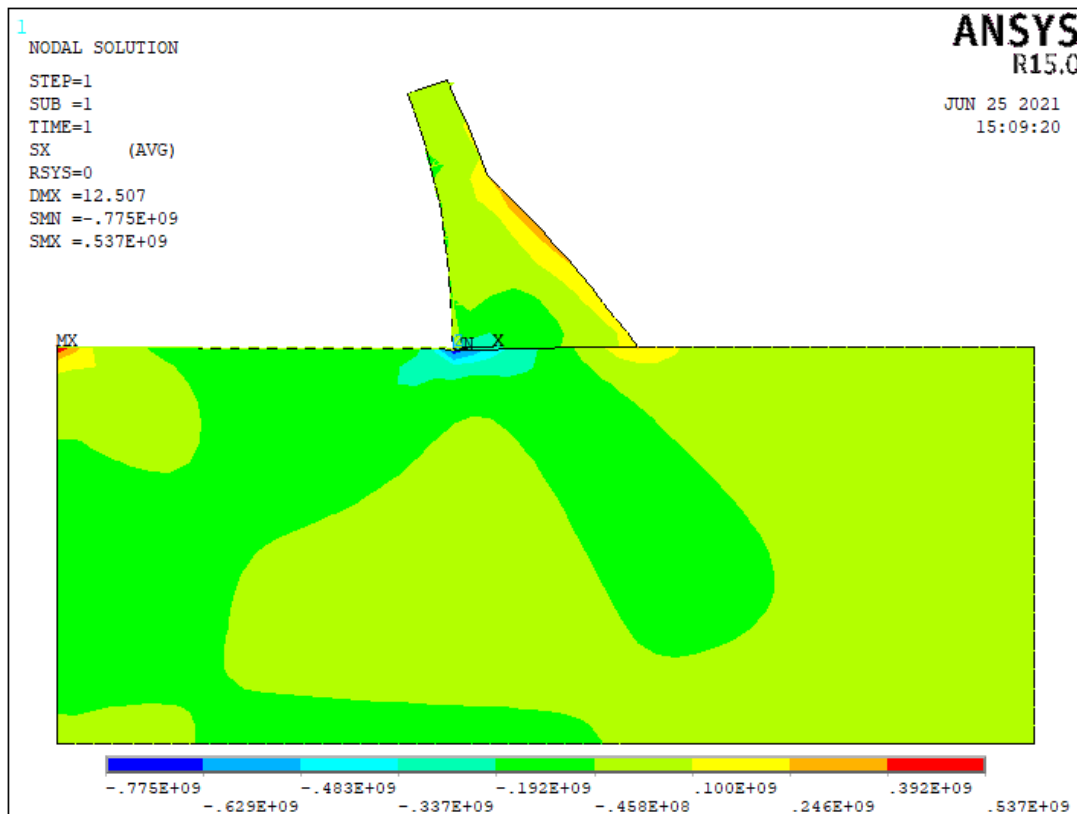


Figure 6-10 : Contrainte suivant X du barrage avec interaction sol-fluide-structure.

La figure 6-10 représente la contrainte suivant X du barrage avec interaction sol-fluide-structure tel que $S_{max}=0.537.10^{+09} \text{ N/M}^2$ et $S_{min}=-0.775.10^{+09} \text{ N/M}^2$.

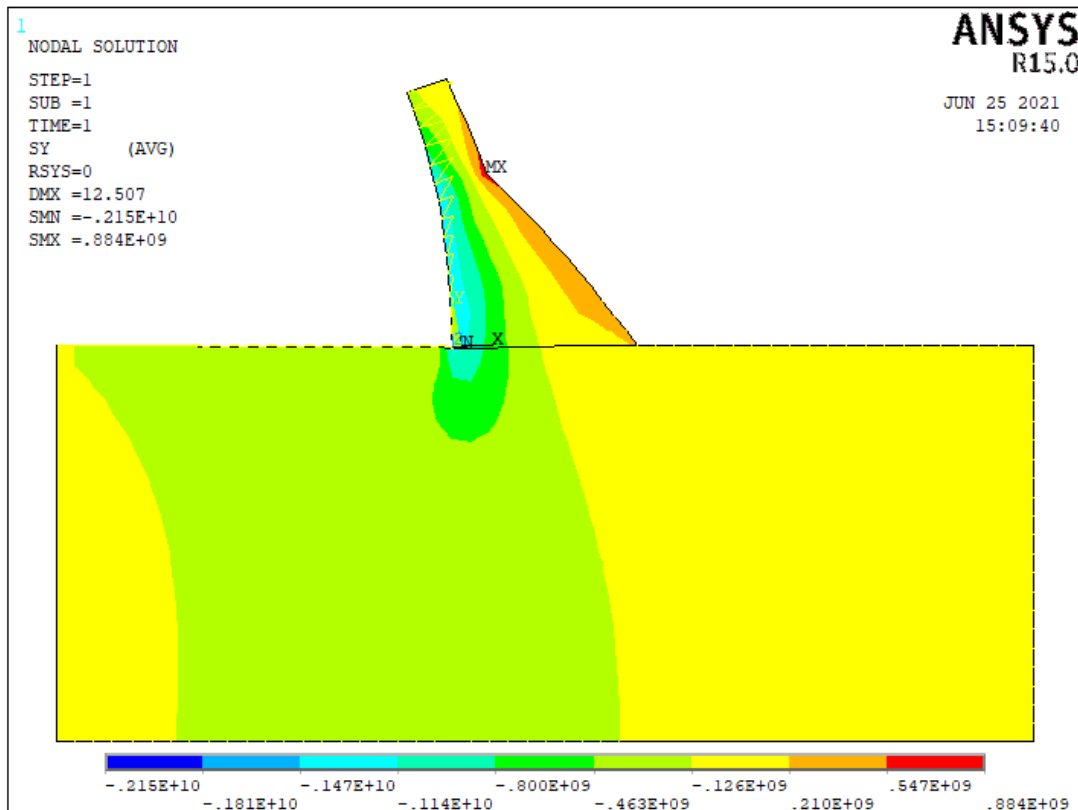


Figure 6-11 : Contrainte suivant Y du barrage avec interaction sol-fluide-structure.

La figure 6-11 représente la contrainte suivant Y du barrage avec interaction sol-fluide-structure tel que $S_{max}=0.215.10^{+10} \text{ N/M}^2$ et $S_{min}=-0.884.10^{+09} \text{ N/M}^2$.

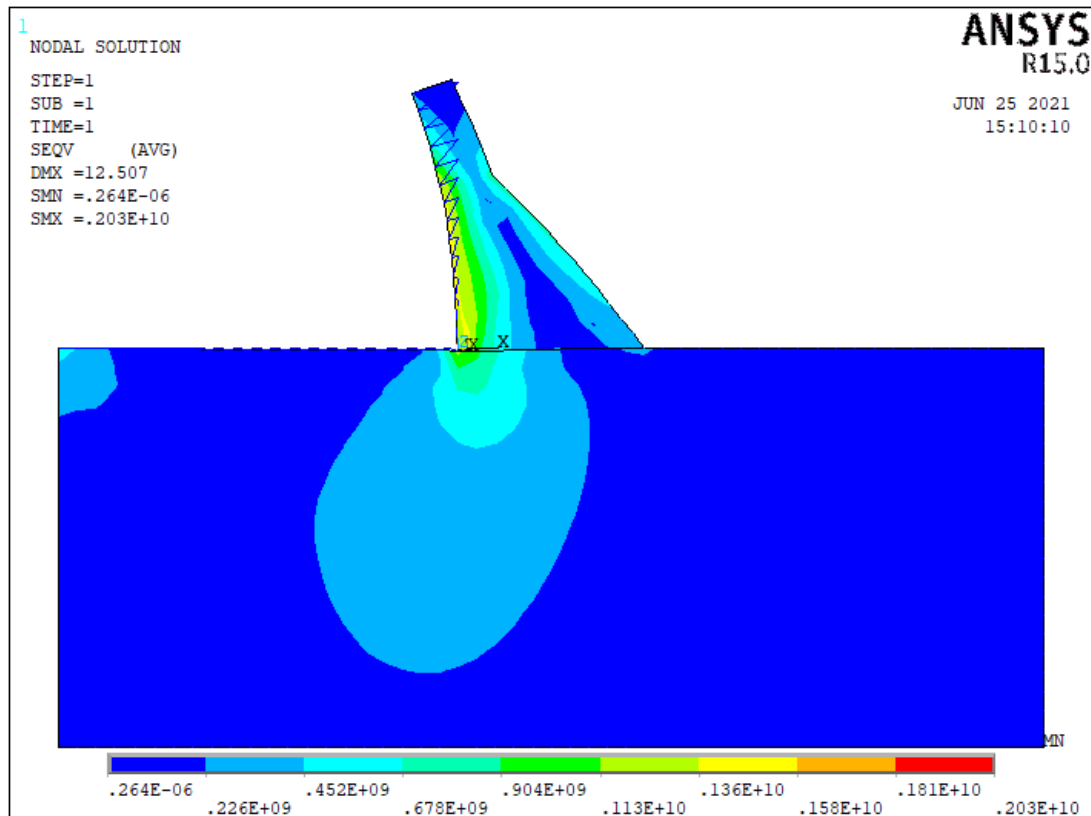


Figure 6-12 : Contrainte de VON MISES du barrage avec interaction sol-fluide-structure.

La figure 6-12 représente la contrainte Von Mises du barrage avec interaction sol-fluide-structure tel que $S_{max}=0.203.10^{+06}$ N/M² et $S_{min}=-0.264.10^{+10}$ N/M².

6-3-La discussion de l'analyse statique :

D'après les figures ci-dessus ; On remarque la valeur de la **déformation** du barrage rempli (sans interaction sol-structure) est **inférieur** par rapport le cas du barrage rempli avec interaction sol-fluide-structure.

En suite les valeurs de **déplacement suivant X** ($D_{max}=0.007259m$) du barrage rempli sans interaction sol structure est **inférieur** que le ($D_{max}=0.09761m$) du barrage avec interaction sol-fluide structure, et le ($D_{min}=0.00673m$) du barrage rempli sans interaction sol structure est **inférieur** que le ($D_{min}=11.49m$) du barrage rempli avec interaction sol-fluide-structure.

Aussi les valeurs de **déplacement suivant Y** ($D_{min}=0.002881m$) du barrage rempli sans interaction sol-structure est **inférieur** que le ($D_{min}=4.93182m$) du barrage rempli avec interaction sol-fluide-structure.

On remarque toute les **contraintes** maximales et minimales du barrage avec interaction sol-fluide-structure quel que soit **suitant X, suivant Y, et les contraintes VON MISES** sont **supérieur** que les contraintes maximales et minimales du barrage rempli (sans interaction sol-structure).

Sauf que, la contrainte maximale de VON MISES du barrage rempli (sans interaction sol structure) est supérieure que la contrainte maximale de VON MISES du barrage avec interaction sol –fluide -structure.

6-4- L'analyse Modale :

6-4-1-Calcul modale du barrage rempli :

MODE	Fréquence	PERIOD	PARTIC, FACTOR	RATIO	EFFECTIV E MASS	MASS FRACTI ON	TO TOTAL MASS
1	2,85694	0,35003	1768,4	1	3,13E+06	0,46845	0,248671
2	7,74884	0,12905	-1572,9	0,889437	2,47E+06	0,671689	0,196723
3	10,3665	9,65E-02	-958,71	0,542139	919132	0,747198	7,31E-02
4	15,2228	6,57E-02	1120,5	0,633635	1,26E+06	0,850344	9,98E-02
5	23,1441	4,32E-02	-189,8	0,107332	36025,7	0,853304	2,86E-03
6	23,4118	4,27E-02	840,05	0,475037	705686	0,911278	5,61E-02
7	32,2746	3,10E-02	469,95	0,265751	220854	0,929421	1,76E-02
8	34,6268	2,89E-02	348,01	0,196796	121112	0,939371	9,63E-03
9	37,04	2,70E-02	138,14	0,078119	19083,8	0,940939	1,52E-03
10	39,3846	2,54E-02	-303,69	0,171733	92228,3	0,948516	7,33E-03
11	42,5164	2,35E-02	99,651	0,056351	9930,32	0,949331	7,90E-04
12	44,0255	2,27E-02	274,95	0,155482	75599,4	0,955542	6,01E-03
13	47,9611	2,09E-02	341,56	0,193148	116664	0,965126	9,28E-03
14	51,2659	1,95E-02	158,53	0,089646	25131,7	0,967191	2,00E-03
15	53,5501	1,87E-02	84,634	0,047859	7162,94	0,967779	5,70E-04
16	55,9023	1,79E-02	-121,79	0,068869	14832,1	0,968998	1,18E-03
17	57,7871	1,73E-02	206,31	0,116664	42562,9	0,972495	3,38E-03
18	59,7368	1,67E-02	232,87	0,131683	54227,2	0,976949	4,31E-03
19	60,6164	1,65E-02	-37,07	0,020962	1374,16	0,977062	1,09E-04
20	63,9254	1,56E-02	95,006	0,053725	9026,13	0,977804	7,18E-04

Tableau 6-1 : Les 20 premières fréquences suivant X du barrage rempli.

Le tableau 6-1 résume les 20 première fréquence du barrage vide sans interaction sol-structure ainsi que les paramètres suivants : période, facteur de participation, ratio, masse effective, masse de fraction et masse total.

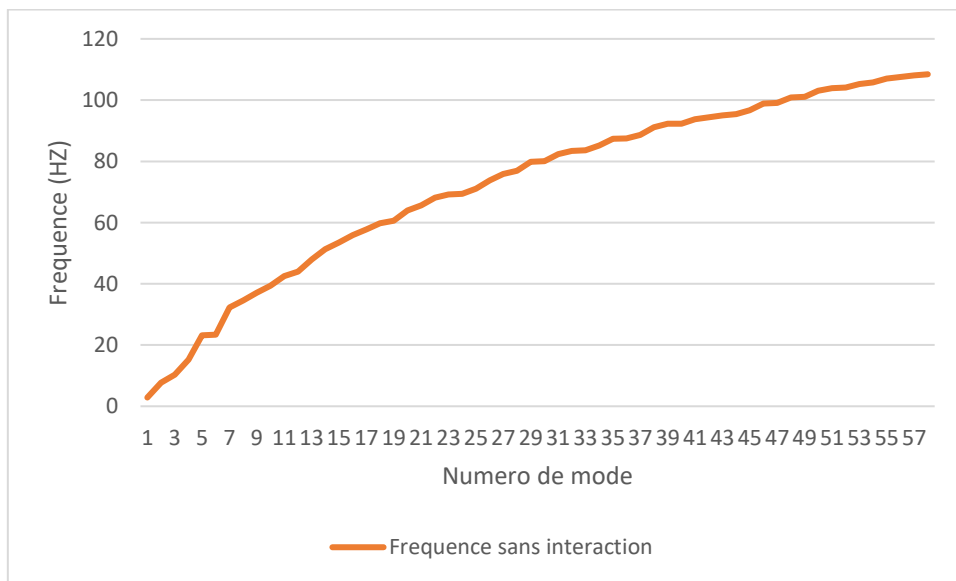


Figure 6-13 : Les 20 fréquences suivant X du barrage rempli a base fixe.

La figure 6-13 représente les 20 premières fréquences suivant X du barrage rempli a base fixe.

6-4-2-Calcul modale du barrage rempli avec sol :

MODE	Fréquence avec interaction	PERIOD	PARTIC, FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	MASS FRACTION	TO TOTAL MASS
1	0,178677	5,5967	21850	0,581643	4,77E+08	0,865719	3,05E-02
2	0,533011	1,8761	-19930	0,530529	3,97E+08	0,891472	2,54E-02
3	0,644528	1,5515	-11445	0,304654	1,31E+08	0,899964	8,37E-03
4	0,964259	1,0371	22440	0,597354	5,04E+08	0,932613	3,22E-02
5	1,126	0,8881	-27438	0,730386	7,53E+08	0,981423	4,81E-02
6	1,23824	0,80759	3510,9	0,093461	1,23E+07	0,982222	7,88E-04
7	1,38977	0,71954	7199,8	0,191658	5,18E+07	0,985583	3,31E-03
8	1,40185	0,71334	-6813,8	0,181383	4,64E+07	0,988594	2,97E-03
9	1,61159	0,6205	-6241	0,166134	3,89E+07	0,991119	2,49E-03
10	1,68697	0,59278	3159,3	0,084101	9,98E+06	0,991766	6,38E-04
11	1,74451	0,57323	-6823,8	0,181647	4,66E+07	0,994785	2,98E-03
12	1,80174	0,55502	-1934,5	0,051497	3,74E+06	0,995028	2,39E-04
13	1,92742	0,51883	-110,33	0,002937	12173,7	0,995028	7,78E-07
14	1,96572	0,50872	766,36	0,0204	587309	0,995067	3,75E-05
15	2,04382	0,48928	3201,3	0,085218	1,02E+07	0,995731	6,55E-04
16	2,05622	0,48633	3274,5	0,087167	1,07E+07	0,996426	6,85E-04
17	2,07421	0,48211	-842,66	0,022432	710080	0,996472	4,54E-05
18	2,12127	0,47142	-99,066	0,002637	9814,06	0,996473	6,27E-07
19	2,14513	0,46617	1421	0,037828	2,02E+06	0,996604	1,29E-04
20	2,17329	0,46013	-255,3	0,006796	65176,8	0,996608	4,17E-06

Tableau 6-2 : Les 20 premières fréquences suivant X du barrage rempli avec sol de fondation.

Le tableau 6-2 résume les 20 première fréquence du barrage vide avec interaction sol-structure ainsi que les paramètres suivants : période, facteur de participation, ratio, masse effective, masse de fraction et masse total.

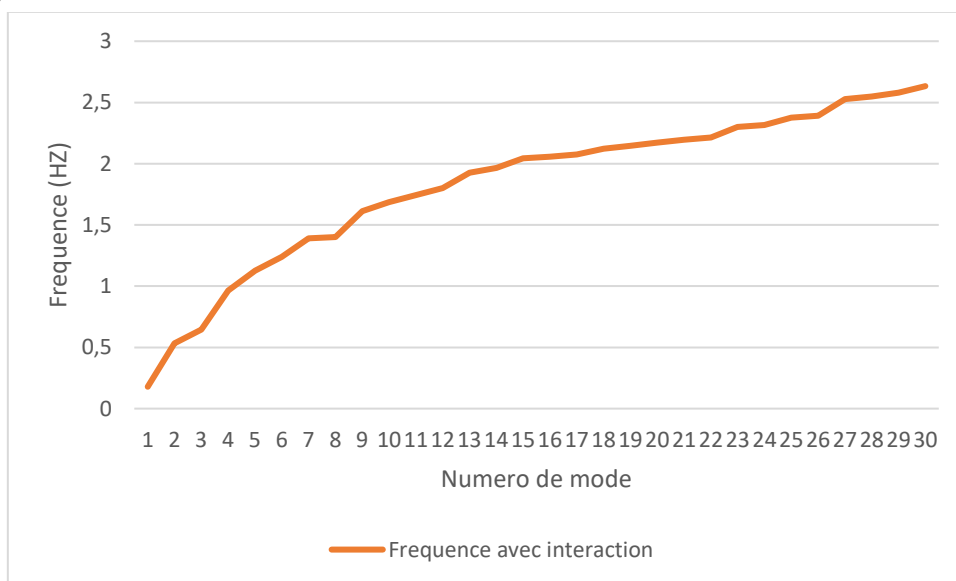


Figure 6-14 : Les 100 fréquences suivant X du barrage rempli avec sol.

La figure 6-14 représente les 100 premières fréquences suivant X du barrage rempli avec sol de fondation.

6-4-3-Le rapport entre les deux fréquences du barrage vide sans et avec sol :

MODE	Fréquence sans interaction sol structure	Fréquence avec interaction sol structure	Rapport entre les deux fréquences
1	2,85694	0,178677	0,06254139
2	7,74884	0,533011	0,06878591
3	10,3665	0,644528	0,06217412
4	15,2228	0,964259	0,06334308
5	23,1441	1,126	0,04865171
6	23,4118	1,23824	0,05288957
7	32,2746	1,38977	0,0430608
8	34,6268	1,40185	0,04048454
9	37,04	1,61159	0,04350945
10	39,3846	1,68697	0,04283324
11	42,5164	1,74451	0,04103146
12	44,0255	1,80174	0,04092492
13	47,9611	1,92742	0,04018715
14	51,2659	1,96572	0,03834362
15	53,5501	2,04382	0,0381665
16	55,9023	2,05622	0,03678239
17	57,7871	2,07421	0,035894
18	59,7368	2,12127	0,03551027
19	60,6164	2,14513	0,03538861
20	63,9254	2,17329	0,03399728

Tableau 6-3 : Les 30 premières fréquences suivant X du barrage rempli (sans et avec sol de fondation)

Le tableau 6-3 résume les 30 première fréquence du barrage rempli avec et sans interaction sol-fluide-structure ainsi que le rapport entre les deux fréquences.

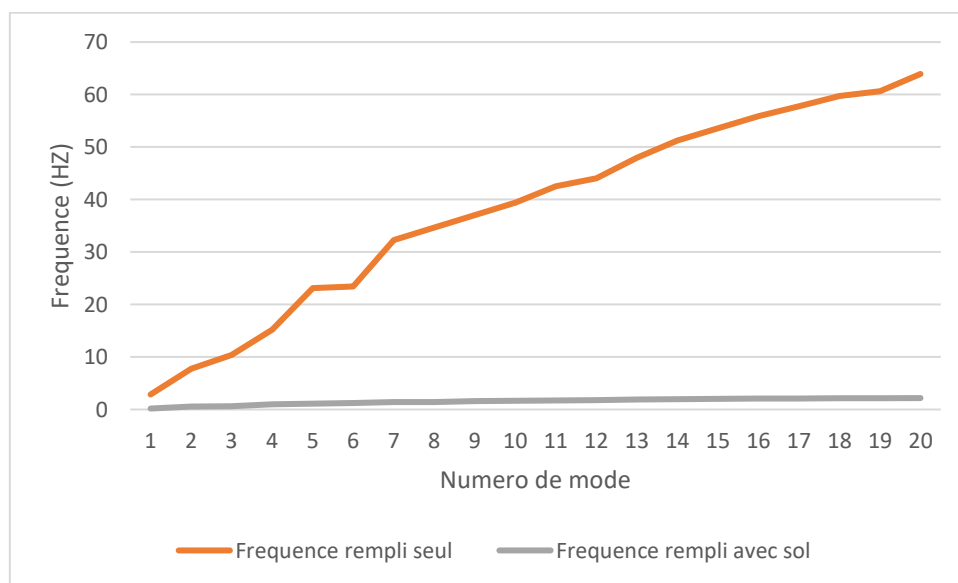


Figure 6-15 : Les 20 fréquences suivant X du barrage (sans et avec interaction).

La figure 6-15 représente les 20 premières fréquences suivant X du barrage vide avec interaction et sans interaction Sol-structure.

6-4-4-La discussion de l'analyse modale :

L'analyse modale donne les fréquences propres, les périodes, et les rapports ainsi que la masse effective pour chaque mode propre.

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

Comme résultats, vingt modes ont été extrait pour chaque cas d'étude. D'après le tableau 6.3, il est clair que la fréquence du barrage rempli sans interaction sol-structure est plus grande que celle du barrage avec interaction sol-fluide-structure.

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

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

Sachant que le mode fondamental est le mode qui entraîne le maximum de masse dans le direction considérée (ayant un $RATIO = 1$) (voir tableau6-1), Pour le cas du barrage rempli a base encastree.

On peut conclure que la prise en considération de fluide joue le rôle d'amortisseur ; le calcul modal change non seulement les valeurs des fréquences mais aussi le positionnement du mode fondamental.

6-5-Conclusion :

Ce chapitre a été consacré au calcul statique et modale du barrage koyna tout en prend en considération la présence du réservoir d'eau et le sol de fondation aussi.

Conclusion générale

Dans ce présent travail, une investigation des effets d'interaction sol structure, sur le comportement d'un barrage poids en béton ancré dans un massif de sol, a été réalisée en utilisant un modèle d'élément finis afin d'évaluer la sécurité de l'ouvrage.

Ce modèle, implique la discrétisation en éléments finis du système sol- barrage-réservoir. A cet effet un programme de calcul a été utilisé.

L'étude des vibrations libres tout en se basant sur la méthode de superposition statique et modale, montre que :

1-La prise en compte de l'interaction sol structure conduit à une augmentation des valeurs de la période fondamentale. Cette augmentation est due, essentiellement à la nature du sol de la fondation constitué d'argile et de marne, contrairement à celui de la base fixe où le sol de fondations est considéré comme rocheux.

2-les déformations au sommet du barrage ainsi que les contraintes normales suivant x sont plus important dans le cas de barrage seul (en comparaisons avec ceux dans le cas du système sol/barrage (avec ISS).

L'étude de l'influence de l'interaction sol-fluide -structure sur la réponse du barrage, en terme de déplacements et contraintes, nous a conduit à faire les conclusions suivantes :

- La prise en compte de l'effet de l'interaction sol structure, conduit à l'augmentation des valeurs des déplacements maximaux au sommet et a l'interface du contacte sol / barrage.
- L'interaction fluide structure engendre une augmentation des valeurs des contraintes normales.
- La prise en compte de l'effet de la pression statique dans la réponse vibratoire du barrage, conduit à l'augmentation des valeurs des contraintes normales dans les deux cas d'étude mais surtout dans le cas de l'ISFS ou le fluide joue le rôle d'amortisseur.

En perspective, on envisage de prendre en compte le phénomène de linéarité que ce soit pour le sol ou pour le barrage, et surtout la prise en compte de la pression interstitielle dans le sol. En outre l'étude paramétrique, peut être étendue pour tenir compte de l'effet de la variabilité spatiale de l'excitation, ainsi que le traitement de la limite de troncature avec des éléments infinis, ainsi que l'effet sur site.

Liste des références

- 1- Akkose, M., Adanur, S., Bayraktar, A., Dumanoglu, A.A., [2008]. Elasto-plastic earthquake response of arch dams including fluid-structure interaction by the lagrangian approach. Appl. Math. Model. 32 (11), 2396–2412.
- 2- Amina, T.B., Mohamed, B., André, L., Abdelmalek, B., [2015]. Fluid–structure interaction of brezina arch dam: 3D modal analysis. Eng. Struct. 84, 19–28.
- 3- Bouaanani, N., Lu, F.Y., [2009]. Assessment of potential-based fluid finite elements for seismic analysis of dam-reservoir systems. Comput. Struct. 87 (3–4), 206–224.
- 4- Bouaanani, N., Renaud, S., [2014]. Effects of fluid-structure interaction modeling assumptions on seismic floor acceleration demands within gravity dams. Eng. Struct. 67, 1–18.
- 5- Calayir, Y., Dumanoglu, A., Bayraktar, A., [1996]. Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the eulerian and lagrangian approaches. Comput. Struct. 59 (5), 877–890.
- 6- Calayir, Y., Karaton, M., [2005]. Seismic fracture analysis of concrete gravity dams including dam-reservoir interaction. Comput. Struct. 83 (19–20), 1595–1606.
- 7- Chopra AK, Chakrabarty P. Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-fluid-foundation rock interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1981;9:363–83.
- 8- Chopra, A. K. [1968] “Earthquake behavior of reservoir-dam systems,” Journal of the Engineering Mechanics Division 94(6), 1475–1500.
- 9- Chopra, A. K. [1995] Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- 10- Crémer, C., Pecker, A., and Davenne, L. (2001). Cyclic macro element for soil-structure interaction : material and geometrical non linearities. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 25 :1257–1284.
- 11- Dogangun, A., Durmus, A., Ayvaz, Y., [1996]. Static and dynamic analysis of rectangular tanks by using the lagrangian fluid finite element. Comput. Struct. 59 (3), 547–552.
- 12- Everstine, G.C., [1981]. A symmetric potential formulation for fluid-structure interaction. J. Sound Vib. 79 (1), 157–160.
- 13- Everstine, G.C., [1997]. Finite element formulations of structural acoustics problems. Comput. Struct. 65 (3), 307–321.
- 14- Felippa, C., Park, K., [1980]. Staggered transient analysis procedures for coupled mechanical systems: formulation. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 24 (1), 61–111.
- 15- Hou, G., Wang, J., Layton, A. [2012]. Numerical methods for fluid-structure interaction: a review. Commun. Comput. Phys. 12 (2), 337–377.
- 16- Jahromi HZ, Izzuddin BA, Zdravkovic L. Partitioned analysis of nonlinear soil–structure interaction using iterative coupling. Interaction and Multiscale Mechanics 2007;1(1):33–51.
- 17- Jendouba, A. (2012). Interaction Sol-Structure : Effet des impédances de fondations sur le comportement dynamique des pylônes de transmission. Editions universitaires européennes.
- 18- Maity D, Bhattacharyya SK. A parametric study on fluid structure interaction problems. Journal of Sound and Vibration 2003;263:917–35.
- 19- Olson, L.G., Bathe, K.J., [1985]. Analysis of fluid-structure interactions: a direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential. Comput. Struct. 21 (1–2), 21–32.
- 20- Park, K., Felippa, C.A., Ohayon, R., [2001]. Partitioned formulation of internal fluid-structure interaction problems by localized lagrange multipliers. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 190 (24–25), 2989–3007.
- 21- Rizos DC, Wang Z. Coupled BEM–FEM solutions for direct time domain soil–structure interaction analysis. Engineering Analysis with Boundary Elements 2002;26:877–88.
- 22- Sieffert, J. G. and Franck, C. (1991). Manuel des fonctions d’impédance Fondations superficielles. France, presses académiques Edition. 175p.

- 23- Stewart, S.M., et al. [1999] A Prospective Analysis of Stress and Academic Performance in the First Two Years of Medical School. *Oxford Medical Education*, 33, 243-250. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2923.1999.00294.x>.
- 24- Westergaard H. M. (1931), Water Pressures on Dams during Earthquakes, *ASCE Transactions*, pp. 418-433, November 1931.
- 25- Westergaard, H.M., [1933]. Water pressures on dam during earthquakes. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 98 (2), 418–433.
- 26- Wilson, E., Khalvati, M., [1983]. Finite elements for the dynamic analysis of fluid-solid systems. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 19, 1657–1668.
- 27- Wolf JP. *Dynamic soil–structure interaction*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1985.