

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE.

Ecole Nationale Polytechnique
Département Hydraulique



Projet de Fin d'Etudes

Thème :



ETUDE STATIQUE ET DYNAMIQUE DE L'INTERACTION
SOL-STRUCTURE (CAS D'UN BARRAGE EN BETON).



Réalisé par :
Mr. BENMALEK Sidahmed Islam.

Encadré par :
Melle TAHAR BERRABAH Amina.
Mr BELHADJ Omar.

موجز :

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير الهيكل والتربة على سلوك التفاعل الحيوي من خطورة السد المصنف على حسب الثقل تحت تأثير الإشارة زلزالية والتربة المحيطة بها. وأجريت اختبارات على ثلاثة أنواع مختلفة النماذج ، وتحليل ساكن ، وتحليل الوسائط وتحليل عابر. دراستنا نظرت إلى ثلاثة سيناريوهات هي :
السد دون تفاعل التربة و الهيكل.
السد بتفاعل التربة دون الكتلة.
السد بتفاعل التربة مع الكتلة
وتم تحليل هذه النماذج المختلفة باستخدام برنامج ANSYS
مفاتيح البحث : السد المصنف على حسب الثقل ، والعناصر المكمولة ، التربة و الهيكل، تفاعل الاتصال ، ANSYS.

RESUME :

Dans ce présent travail on a étudié l'effet d'interaction sol-structure sur le comportement dynamique d'un barrage poids en béton sous l'effet d'un signal sismique ainsi que du sol environnant.

Trois analyses ont été pratiquées sur différents types de modèles ; Analyse statique, analyse modale et une analyse transitoire.

Notre étude s'est penchée sur trois cas de figures qui sont :

- Barrage modélisé sans interaction sol-structure.
- Barrage modélisé avec interaction sol-structure sol modélisé sans masse.
- Barrage modélisé avec interaction sol-structure sol modélisé avec masse.

Ces différents modèles ont été analysés à l'aide du logiciel ANSYS.

Mots clés : Barrage poids, éléments finis, interaction sol-structure, effet de contact, ANSYS.

ABSTRACT :

In this work we studied the effect of the surrounding soil as described by the effect of soil-structure interaction on the dynamic behavior of a concrete gravity dam under the effect of a seismic signal.

Three tests were performed on different types of models, static analysis, modal analysis and transient analysis.

Our study looked at three scenarios are:

- Dam modeled without soil-structure interaction.
- Dam modeled soil-structure interaction soil modeled without mass.
- Dam modeled soil-structure interaction modeled soil mass.

These models were analyzed using the software ANSYS.

Keywords: gravity dam, finite element, soil-structure interaction, contact, ANSYS.

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE.....	10
CHAPITRE 1 : Généralités sur les barrages.	
I. INTRODUCTION.....	12
a) Définition d'un barrage.....	12
b) Différents types de barrages.....	12
c) Conception et calcul des barrages en béton	17
CHAPITRE 2 : Généralités sur le phénomène d'interaction sol- structure.	
I. INTRODUCTION.....	22
II. ARTICLES ET ETUDES SUR L'INTERACTION SOL-STRUCTURE	22
III. DEFINITION DU PHENOMENE D'INTERACTION SOL-STRUCTURE.....	25
a) Aspect fondamental de l'interaction	25
IV. FORMULATION DU PHENOMENE D'INTERACTION SOL- STRUCTURE	27
a) Méthode directe (méthode globale).....	27
b) Méthode indirecte	29
V. LES COMPOSANTES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE.....	31
a) Force d'interaction inertielle	32
b) Force d'interaction cinématique.....	32
VI. CONCLUSION	32
CHAPITRE 3 : Généralités sur les contacts.	
I. DEFINITION DU CONTACT	33
II. DIFFERENTS TYPES DE CONTACT	34
a) Contact unilatéral, sans frottement	34
b) Frottement.....	35
III. ELEMENTS DE CONTACT	37
a) Modélisation du contact	37
b) Rigidité du contact.....	38
CHPITRE 4 : Présentation du code ANSYS.	
I. INTRODUCTION.....	39
II. DEFINITION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS.....	39
III. PRESENTATION DU CODE ANSYS.....	39
a) Généralités	39
b) Types d'analyse	41

IV.	DEMARCHE UTILISEE POUR LA CREATION D'UN MODELE ANSYS	42
V.	CONCLUSION.....	46

CHAPITRE 5 : Modélisation du Barrage à l'aide du code ANSYS.

I.	INTRODUCTION.....	47
II.	METHODOLOGIE.....	47
	a) Modélisation d'interaction sol-structure.....	47
	b) Modélisation de l'interface de contact sol-structure.....	47
III.	MAILLAGE DU MODELE.....	48
	a) Description de l'élément.....	48
	b) Définition des différents types d'analyse.....	50
	c) Donnée du problème.....	50
IV.	ETUDE DE SENSIBILITE.....	51
	a) Analyse modale.....	52
	b) Analyse statique	55
V.	MODELISATION DU CONTACT.....	57
	a) Description de l'élément CONTA172.....	57
	b) Description de l'élément TARGE169.....	57
VI.	CONCLUSION.....	59

CHAPITRE 6 : Analyses et comparaisons.

I.	INTRODUCTION.....	60
	a) Analyse modale	60
	b) Analyse statique à vide	61
	c) Analyse statique du barrage avec réservoir.....	67
	d) Analyse dynamique.....	71
II.	CONCLUSION.....	76

CONCLUSION GENERALE.

ANNEXE.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

Liste des figures :

Figure 1.1 : Barrage poids.	13
Figure 1.2 : Barrage de Vassivière.	14
Figure 1.3 : Barrage d'Argentat.	14
Figure 1.4 : Barrage de Luzège.	15
Figure 1.5 : Coupe verticale d'un barrage voûte.	16
Figure 1.6 : Barrage de Grandval.	17
Figure 1.7 : Barrage de Faux-la-Montagne.	17
Figure 1.8 : Barrage à contreforts.	17
Figure 1.9 a : Equilibre avec fissuration.	18
Figure 1.9 b : Effet du drainage sur l'équilibre.	18
Figure 1.10 : Diagramme d'un barrage voûte.	20
Figure 1.11 : Modèle de modélisation en éléments finis.	21
Figure 2.1 Définition du phénomène d'interaction sol-structure (Emilio Rosenbluenth, 1980).	25
Figure 2.2 : Effet de l'interaction sol-structure sur un ouvrage.	26
Figure 2.3 : Schématisation d'un problème d'interaction sol structure.	28
Figure 2.4 : Schématisation d'une méthode des sous structures.	29
Figure 2.5 : Théorème de superposition.	30
Figure 2.6 : Décomposition du problème d'interaction sol-structure.	31
Figure 3. 1: Problème de contact unilatéral.	34
Figure 3.2 : La loi de contact.	35
Figure 3.3 : Régularisation de loi de contact.	35
Figure 3.4 : La loi de Tresca.	36
Figure 3.5 : La loi de Coulomb.	36
Figure 3.6 : Modélisation des surfaces en contact.	38
Figure 4.1 : Fenêtre de choix des domaines d'études.	40
Figure 4.2 : Fenêtre de choix des types d'analyses.	42
Figure 4.3 : Fonction de l'icône preprocessor.	43
Figure 4.4 : Fonction de l'icône solution.	44
Figure 4.5 : Fonction de l'icône general postproc.	45
Figure 4.6 : Fonction de l'icône TimeHist postpro.	45
Figure 4.7 : Fonction de la barre de commande ANSYS.	45
Figure 5.1 : La représentation d'un élément de PLANE42.	48
Figure 5.2 : Maillage du barrage en 2D.	49
Figure 5.3. : Maillage du système barrage-sol de fondation	49
Figure 5.4 : Géométrie et dimension du barrage.	51
Figure 5.5 : Forme propre pour la fréquence fondamentale suivant X.	53
Figure 5.6 : Forme propre pour la fréquence fondamentale suivant Y.	54

Figure 5.7 : Déplacement suivant X du parement amont pour les 3 modèles de dimension de sol.	55
Figure 5.8 : Déplacement suivant Y du parement amont pour les 3 modèles de dimensions de sol.	56
Figure 5.9 : Dimension finale du modèle.	56
Figure 5.10 : Représentation de l'élément CONTA172.	57
Figure 5.11 : Représentation de l'élément TARGE169.	58
Figure 5.12 : Représentation des deux surfaces (cible et de contact).	58
Figure 5.13 : Représentation de la surface de contact.	59
Figure 5.14 : Représentation de la surface cible.	59
Figure 6.1 : Déplacement suivant X du parement amont des différents barrages.	62
Figure 6.2 : Déplacement suivant Y du parement amont des différents barrages.	62
Figure 6.3 : Iso-contraintes σ_x des différents barrages.	63
Figure 6.4 : Iso-contraintes σ_y différents barrages.	63
Figure 6.5 : Iso-contraintes σ_{xy} des différents barrages.	64
Figure 6.6 : Déplacement suivant X du parement amont pour différents coefficients de frottement.	65
Figure 6.7 : Déplacement suivant Y du parement amont pour différents coefficients de frottement.	65
Figure 6.8 : Contraintes σ_x pour différents coefficients de frottement.	66
Figure 6.9 : Contraintes σ_y pour différents coefficients de frottement.	66
Figure 6.10: Contraintes σ_{xy} pour différents coefficients de frottement.	67
Figure 6.11 : Déplacement suivant X du parement amont des différents barrages.	68
Figure 6.12 : Déplacement suivant Y du parement amont des différents barrages.	68
Figure 6.13 : Iso-contraintes σ_x des différents barrages.	69
Figure 6.14 : Iso-contraintes σ_y des différents barrages.	69
Figure 6.15 : Iso-contraintes σ_{xy} du barrage avec masse de sol.	70
Figure 6.16 : Iso-contraintes σ_{xy} du barrage sans masse de sol.	70
Figure 6.17 : Iso-contraintes σ_{xy} du barrage seul.	71
Figure 6.18 : Point de la crête.	71
Figure 6.19 : Signal sismique d'El centro.	72
Figure 6.20 : Déplacement suivant X d'un point de la crête des différents barrages.	72
Figure 6.21 : Déplacement suivant Y d'un point de la crête des différents barrages.	73
Figure 6.22 : Iso-contraintes σ_x d'un point de la crête des différents barrages.	74
Figure 6.23 : Iso-contraintes σ_y d'un point de la crête des différents barrages.	74
Figure 6.24 : Iso-contraintes σ_{xy} d'un point de la crête des différents barrages.	75
Figure 6.25 : Iso-contraintes « Von Mises stress » d'un point de la crête des différents barrages	75

Liste des tableaux :

Tableau 5.1 : Caractéristiques du modèle.	50
Tableau 5.2 : Moment d'inertie par rapport à l'origine et au centre de gravité.	52
Tableau 5.3 : présentation des résultats de l'analyse modale suivant X.	53
Tableau 5.4 : Présentation des résultats de l'analyse modale suivant Y.	54
Tableau 5.5 : Variation des fréquences propres en fonction des dimensions du sol.	55
Tableau 6.1 : Les neuf premiers modes pour les trois modèles de barrage.	60
Tableau 6.2 : Les neuf premiers modes pour les différents coefficients de frottement.	61

INTRODUCTION GENERALE :

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

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

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

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

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

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

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

La modélisation a été faite en 2-D par le logiciel ANSYS, le logiciel est basé sur la méthode des éléments finis. Différents types d'analyse ont été menés sur le barrage on citera ; l'analyse statique, analyse modale et analyse dynamique.

L'effet de contact a été pris en compte pour observer son effet sur la structure étudiée, la pression de l'eau est représentée par une pression hydrostatique.

Le présent mémoire se compose de chapitres complémentaires les uns aux autres, on commence tout d'abord par une définition de tous les types de barrage et on s'attardera sur les barrages en béton, puis on passe à une généralité sur le phénomène d'interaction sol-structure dans ce chapitre on spécifie les différentes composantes de l'interaction, par la suite un chapitre est spécifique au contact ainsi que la modélisation du contact.

Le chapitre suivant définira la méthode des éléments finis et le code ANSYS avec ses multiples fonctionnalités, la méthode à suivre pour la création d'un modèle ANSYS. Le chapitre 5 est destiné à la modélisation ANSYS du barrage, une étude de sensibilité est effectuée, les différents types d'analyse appliquées sont définie et détaillé.

Dans le dernier chapitre on interprétera les différents résultats des analyses menées sur les trois modèles de barrage étudiés.

On terminera par une conclusion du mémoire.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les barrages.

I. INTRODUCTION :

a) Définition d'un barrage :

Les barrages, ouvrages hydrauliques édifiés au travers d'une vallée, ont pour objet de retenir, en les accumulant en hauteur, les eaux d'une rivière. Leur objectif primitif et qui demeure toujours essentiel est l'irrigation. Ils peuvent également être utilisés en tant que régulateurs de crues, à des fins énergétiques (production d'énergie hydroélectrique) ou pour l'alimentation en eau potable. Ces différentes fonctions sont souvent associées afin de valoriser un même barrage. Mais, dans la gestion du stock de l'eau, une prépondérance est toujours donnée à l'une d'entre elles. D'autres utilisations, bien que secondaires, sont également à mentionner : usages industriels (rétention d'effluents boueux), navigation, création de polders, de plans d'eau...

Les barrages comptent parmi les constructions humaines les plus anciennes. Leur développement actuel coïncide avec les évolutions démographique et économique, qui imposent, dans la plupart des régions du globe, la construction de réservoirs de plus en plus grands, tant en hauteur qu'en longueur, afin d'assurer de manière continue et régulière les besoins en eau et en énergie des populations, des cultures et des industries.

Globalement, les autres objectifs des barrages sont mineurs en regard des trois buts principaux ; ils sont néanmoins importants dans l'aménagement des pays ; il faut citer :

- L'alimentation en eau potable ou industrielle.
- La régularisation en vue de la navigation.
- Les développements touristiques et de loisirs.
- La recharge et l'assainissement des nappes phréatiques.

b) Différents types de barrages :

La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site déterminent le type de barrage. Les barrages sont construits en béton ou en maçonnerie; les digues (ou barrages en remblai) sont en terre ou en enrochement.

○ LES BARRAGES EN MATERIEAUX MEUBLES :

Les *barrages en terre* font partie des premiers ouvrages d'art réalisés par l'homme. Le développement des engins de terrassement et de compactage et une meilleure connaissance de la mécanique des sols permettent de réaliser de nos jours des ouvrages importants (jusqu'à 100 m de hauteur ou 10 millions de m³ de remblais) dans des conditions économiques intéressantes.

Leur profil est très variable et dépend essentiellement de la nature et des propriétés des matériaux disponibles au voisinage du site. On distingue le *barrage homogène*, constitué pour

l'essentiel d'une seule sorte de terre compactée aussi imperméable que possible, et le *barrage à zones*, fait de plusieurs sortes de terre de perméabilités différentes.

Les barrages en terre sont très sensibles à l'érosion par l'eau. Certaines précautions sont donc à prendre préventivement comme la surélévation de la crête théorique du barrage pour compenser le tassement des matériaux, la mise en œuvre de filtres et drains pour éviter les risques d'entraînement de terre dus à des circulations d'eau à l'intérieur du barrage, enfin l'adoucissement du talus amont pour parer à son instabilité lors des changements du niveau de retenue.

Les *barrages en enrochements* sont constitués d'éléments rocheux de toutes dimensions (« tout-venant » de carrière), l'étanchéité étant assurée par un *organe souple* placé soit sur le parement amont (masque réalisé en béton armé ou en produits noirs), soit dans le corps du barrage (écran constitué d'un noyau en terre « imperméable »).

La principale difficulté de ce type de barrage provient des tassements dus à l'écrasement et au dérapage des blocs entre eux. Survenant lors de la construction et se poursuivant après, ils peuvent mettre en péril l'organe souple d'étanchéité. Pour accélérer le tassement, les blocs constitutifs du barrage sont arrosés intensément afin de lubrifier leurs contacts.

○ BARRAGES-POIDS EN BETON :

La stabilité des barrages-poids sous l'effet de la poussée de l'eau est assurée par le poids du matériau. Ces ouvrages peuvent être en maçonnerie ou en béton, en maçonnerie hourdée à la chaux pour les plus anciens, en béton compacté au rouleau pour les plus récents. Ce type de barrage (figure 1.1) convient bien pour des vallées larges ayant une fondation rocheuse. Ils sont souvent découpés en plots à la construction, l'étanchéité entre plots étant assurée par un dispositif placé à l'amont des joints.

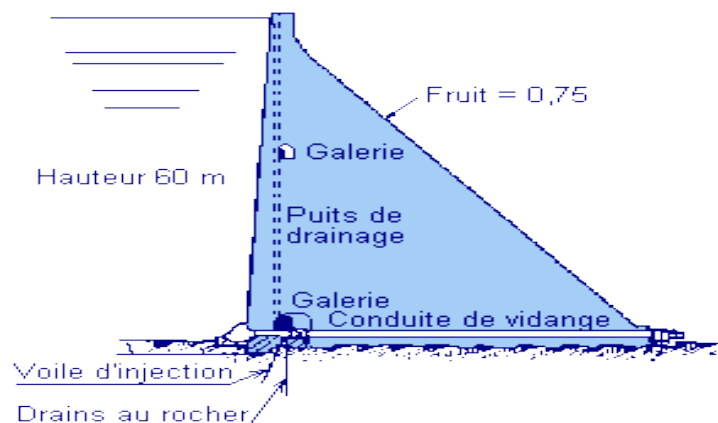


Figure 1.1 : Barrage poids.

Les formes sont diverses, forme rectangulaire simple pour les plus petits, forme triangulaire de façon classique, formes audacieuses plus élancées dans la partie supérieure à la fois pour des raisons architecturales et de quantité de matériau mis en œuvre. Au siècle

dernier, les maîtres d'œuvre ont cherché à économiser de la matière en raidissant progressivement les parements. Ils ont donné une forme légèrement courbe au tracé en plan du barrage de manière à permettre les mouvements de la structure en évitant l'ouverture des joints, notamment en hiver.

Les ruptures successives du barrage de Bouzey ont amené les constructeurs à plus de prudence en mettant en évidence le rôle joué par les sous-pressions tant dans les fondations que dans le corps du barrage. Les formes les plus fréquentes des barrages-poids modernes sont des profils triangulaires qui se redressent en partie supérieure pour supporter la route de couronnement (figure 1.2).

Le parement amont est souvent vertical ou avec un fruit très faible.



Figure 1.2 : Barrage de Vassivière

On peut distinguer les barrages pour lesquels les fonctions poids et étanchéité sont assurées de manière conjointe, comme les barrages en maçonnerie "homogène" (bien que le parement amont soit souvent mieux appareillé et/ou recouvert d'un enduit), et ceux pour lesquels les deux fonctions sont parfaitement séparées : barrage-poids à masque amont du type Lévy, barrage-poids en béton compacté au rouleau (BCR) avec membrane d'étanchéité

La stabilité des barrages-poids repose essentiellement sur leur fruit et, si nécessaire, sur l'efficacité du drainage qui met le massif poids à l'abri des sous-pressions. Leur inconvénient majeur est de ne pas utiliser pleinement les capacités du matériau constituant la partie résistante du barrage (maçonnerie ou béton) à supporter des efforts importants de compression. Il est donc venu rapidement à l'idée des projeteurs de supprimer du béton superflu en allégeant la structure, en créant des arcades ou des niches sur le parement aval, en réduisant la surface d'assise au sol.

Lorsque ces élégissements descendent jusqu'à la fondation, il en résulte une augmentation des contraintes appliquées au sol de fondation. Mais la réduction de la surface d'assise se traduit par un meilleur drainage de ce contact. Les sous-pressions dangereuses pour la stabilité de l'ouvrage sont alors limitées. Pour certains barrages en rivière, les vannes représentent une part importante du parement amont. La structure résistante est alors limitée au socle d'assise et aux contreforts entre vannes.



Figure 1.3 : Barrage d'Argentat

○ BARRAGES-VOÛTES

Les barrages-voûtes sont des barrages généralement en béton dont la forme courbe permet un report des efforts de poussée de l'eau sur les rives rocheuses de la vallée. L'utilisation de l'effet d'arc bien connu des constructeurs de cathédrales est plutôt récente dans le domaine des barrages (encore qu'on en trouve des applications dès le XIII^{ème} siècle en Iran ainsi que, sous une forme plus rustique, par les Romains).

La réalisation d'une voûte est certainement la façon d'utiliser au mieux les capacités du béton à supporter les efforts de compression, de diminuer le volume du matériau à mettre en œuvre. Les barrages-poids-voûtes sont des barrages-poids dont la forme nettement arquée rend possible la création d'un véritable effet voûte et donc un report des efforts sur les appuis latéraux.

Ce type de barrage convient bien lorsque la topographie permet de fermer la vallée par une forme arquée de longueur réduite sans pour autant avoir une qualité de rocher en fondation suffisante pour admettre des sollicitations ponctuelles fortes de type encastrement.

Il s'agit en général de barrages construits dans la première moitié du XX^{ème}. Le parement amont est en général vertical de manière à simplifier les coffrages. Le parement aval est souvent incliné mais il peut se présenter sous forme de marches d'escalier superposées pour simplifier l'exécution.



Figure 1.4 : Barrage de Luzège

Précédées par des voûtes d'une trentaine de mètres de haut dans les années 1920, les grandes voûtes minces ont fait leur apparition au milieu du XX^{ème} siècle. Grâce à des méthodes et des moyens de calculs plus puissants, les formes se sont allégées de manière à économiser de la matière et à faire travailler la structure au maximum de ses possibilités. Les

arcs circulaires sont devenus paraboliques, elliptiques ou en spirales logarithmiques. Les parements à double courbure ont été généralisés.

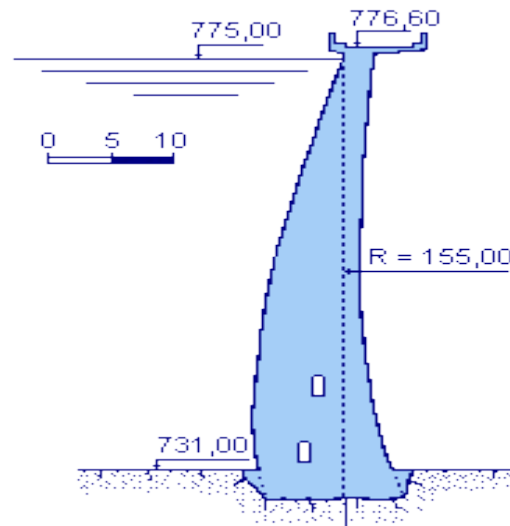


Figure 1.5 : Coupe verticale d'un barrage voûte.

Les projecteurs ont poursuivi dans cette direction jusqu'à connaître les premiers déboires : fissuration de grandes voûtes trop minces eu égard à leur fondation rocheuse très rigide, rupture de la voûte de Malpasset pour des raisons autres, géologiques notamment. Ils sont alors revenus à des formes moins allégées mais garantissant des coefficients de sécurité plus confortables.

Les barrages-voûtes sont construits par plots indépendants. Ceux-ci sont clavés en fin de construction de manière à rendre la voûte monolithique et à solliciter lors de la mise en eau à la fois les arcs et les consoles que sont les plots de construction. La stabilité de ces barrages dépend essentiellement de la capacité (de résistance, de rigidité) de leur fondation à supporter des efforts concentrés au droit des appuis, efforts liés à l'encastrement de la structure, à la poussée des arcs, mais aussi, pour les voûtes minces, aux fortes sollicitations hydrauliques dues à la finesse de la structure.

La présence de culées peut toutefois permettre un report plus aisé des efforts sur les rives.

○ BARRAGES A CONTREFORTS

Un barrage à contreforts comprend :

Une série de murs parallèles, généralement de forme triangulaire, plus ou moins épais et plus ou moins espacés (les contreforts).

Une bouchure entre contreforts transmettant à ceux-ci la poussée de l'eau.

La bouchure peut être constituée :

- D'une dalle plane en béton.
- D'un élargissement du contrefort vers l'amont.
- D'une voûte de faible portée.



Figure 1.6 : Barrage de Grandval



Figure 1.7 : Barrage de Faux-la-Montagne

Le nombre de contreforts peut varier de quelques unités pour les plus grands d'entre eux (barrage de Grandval ou de Calacuccia), à plusieurs dizaines comme sur les barrages de la Girotte, de Roselend et sur les barrages de type Considère (Vezins ou Rophémel).

Pour ces derniers, l'audace des constructeurs est allée jusqu'à réduire l'épaisseur des voûtelettes à quelques dizaines de centimètres, nécessitant le recours au béton armé. Cette épaisseur augmente un peu en partie basse mais demeure réduite à l'approche de la fondation. Les parements amont sont en général fortement inclinés de manière à transmettre directement au pied des contreforts et donc à la fondation rocheuse une partie de la poussée de l'eau sur le parement amont.

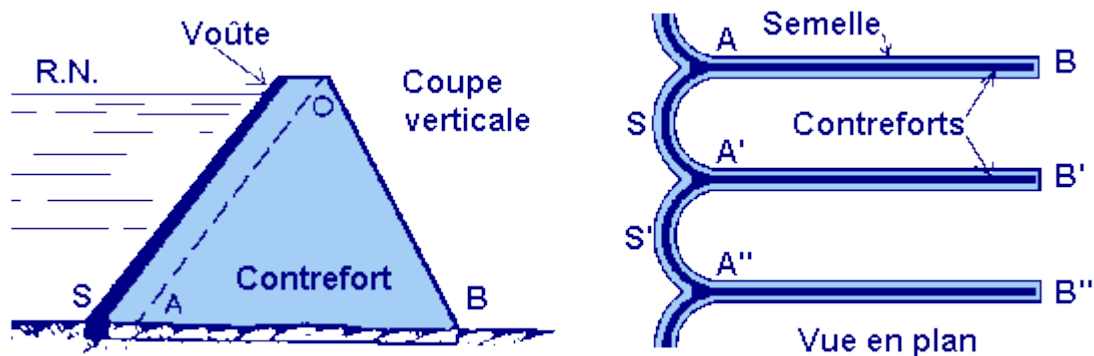


Figure 1.8 : Barrage à contreforts.

Les barrages à contreforts sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité.

c) Conception et calcul des barrages en béton :

Ces barrages s'opposent à la force créée par la pression de l'eau soit par leur propre poids (barrages poids), soit en reportant sur les rives par un effet de voûte la poussée hydraulique (barrages voûte), soit encore en associant ces deux possibilités (barrages poids-voûte), soit enfin en reportant les efforts sur le sol par l'intermédiaire de contreforts. (Barrages contreforts).

- Les barrages poids : Ils présentent l'avantage de ne solliciter que très peu la résistance des berges, par contre leur construction nécessite une grande quantité de béton, et une excellente qualité du sol d'assise.

Actions exercées sur un barrage poids :

C'est Maurice LEVY (1838 – 1910) ingénieur français qui, à la fin du XIX^e siècle, a mis en évidence l'importance des sous-pressions dans la stabilité des barrages poids. Les barrages poids modernes sont caractérisés par une section pratiquement triangulaire. La somme de leurs fruits amont et aval est comprise entre 0.70 et 0.80.

Les plus résistants aux sollicitations dynamiques sont :

- ✓ barrages-voûtes et les barrages poids-voûtes, de part leur hyperstaticité.
- ✓ Les barrages en enrochement à noyau central argileux, de part leur capacité à supporter de grandes déformations.

Barrages poids : résistance aux sollicitations horizontales transversales est faible.

Améliorée si les joints sont remplis de coulis de ciment et si ces joints présentent une surface supportant le cisaillement (joints avec des décrochements).

Les barrages à contreforts : peu résistant pour les sollicitations transversales, mieux avec l'élargissement des âmes des contreforts à l'aval pour les rendre jointives.

Les barrages en enrochement à masque : l'élément étanche est fragile.

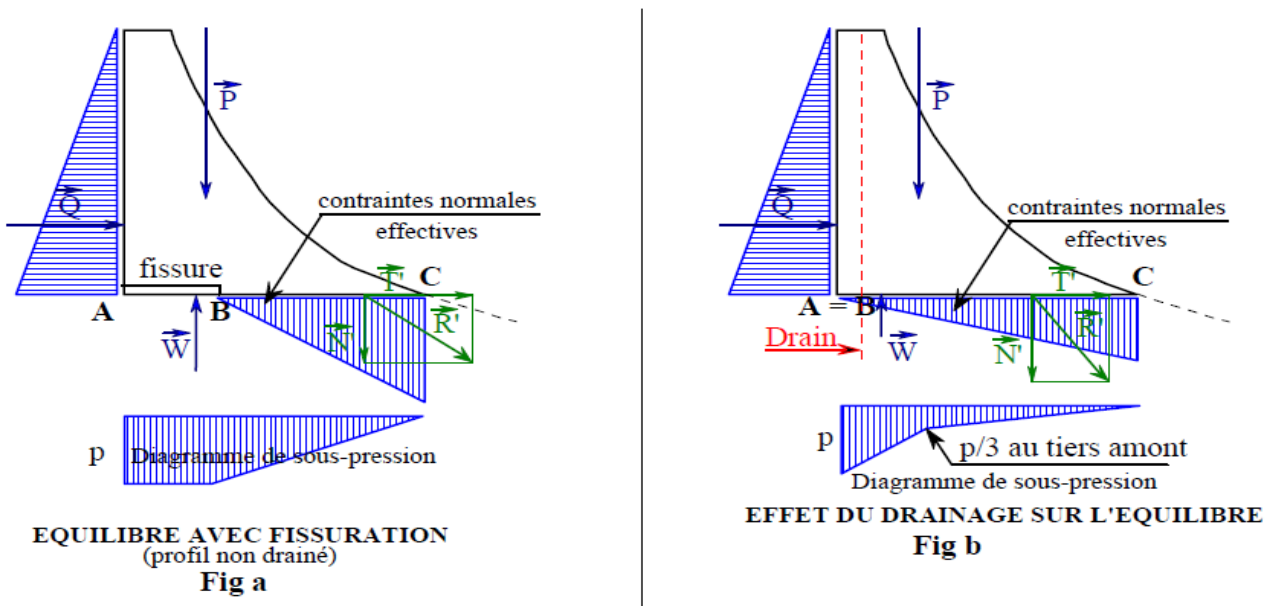


Figure 1.9 a : Equilibre avec fissuration.

Figure 1.9 b : Effet du drainage sur l'équilibre.

Les actions exercées sur le barrage sont :

\vec{P} : Poids du barrage.

\vec{Q} : Poussée de l'eau.

\vec{W} : Résultante des pressions d'eau interstitielle (ascendante) sur la section ABC.

\vec{R} : Résultante des forces (cas étanche).

\vec{R}' : Résultante des forces (cas avec infiltration).

N : Composante normale de la résultante.

T : Composante tangentielle de la résultante.

$$\vec{R} = \vec{P} + \vec{Q} \quad (1.1)$$

$$\vec{R}' = \vec{P} + \vec{Q} + \vec{W} \quad (1.2)$$

$$\text{Composantes de } R' \quad \begin{cases} N' = N - W & \text{(composante normale)} \\ T' = T & \text{(composante tangentielle)} \end{cases} \quad \begin{matrix} (1.3) \\ (1.4) \end{matrix}$$

Les ouvrages du XIX^e siècle ont été dimensionnés en négligeant la sous-pression \vec{W} due à l'eau percolant dans le barrage ou dans sa fondation. On sous-estimait alors l'inclinaison de la résultante effective \vec{R}' devant résister au cisaillement. On peut noter que toute apparition de fissure côté amont entraîne l'apparition de sous-pression (voir figure 1.9 a).

On doit vérifier :

- ✓ Que la contrainte totale au pied amont est au moins égale à la pression du réservoir.
- ✓ Que la contrainte effective au pied amont est une compression.
- ✓ La stabilité au glissement (rapport T/N).

Les barrages à contreforts :

Les contreforts en béton de forme triangulaire supportent en principe des voûtes de faible portée ou des dalles planes qui transmettent la poussée de l'eau vers le sol. Ces barrages nécessitent moins de béton (20 à 25 % de moins) que les barrages poids et n'exigent pas de vallée étroite comme les barrages voûtes. Il est néanmoins nécessaire que le rocher soit de bonne qualité. Dans de telles structures, le parement amont (dalles ou voûtes) doit être incliné de l'ordre de 0.3/1 (rapport de l'horizontale / la verticale) pour profiter de la composante verticale de la poussée de l'eau. Les coffrages sont plus complexes à réaliser. L'influence des variations thermiques sur les fondations est importante. On préfère donc à ce type de construction, les barrages en B.C.R.

Les barrages poids évidés :

Ce sont des barrages où l'on a créé des vides, par coffrage, dans leur partie interne. Il est paradoxal de vouloir alléger un barrage poids, mais le gain de poids est largement

compensé par la diminution des sous-pressions grâce à un drainage intense réalisé à partir de ces cavités. Il existe très peu de constructions de ce type en Europe.

Les barrages voûtes :

Ils sont constitués par une coque en béton à simple ou double courbure. Ce type de barrage est implanté dans une vallée présentant une zone relativement étroite (verrou) pour permettre l'arc-boutement de l'ouvrage sur les rives qui doivent être géologiquement très saines.

La courbure de la voûte permet de reporter les efforts de pression sur les appuis de rive, tout en conservant une paroi comprimée. Une première approche, très grossière, de dimensionnement consiste à considérer une superposition d'arcs supposés indépendants. La contrainte dans le béton est généralement de l'ordre de 5 MPa afin de limiter les problèmes de déformations aux ancrages.

La valeur de la contrainte est alors déduite de la formule du tube et vaut :

$$\sigma = \frac{p(z).R}{e} \quad (1.5)$$

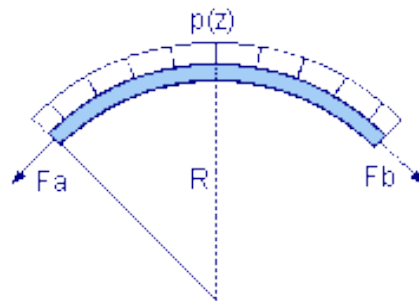


Figure 1.10 : diagramme d'un barrage voûte.

σ (MPa) : contrainte moyenne dans un arc.

$P(z)$ (MPa) : pression de l'eau à la cote z .

R (m) : rayon amont de la voûte.

e (m) : épaisseur de la voûte.

Dans la réalité, les arcs ne sont pas indépendants; de plus le barrage est partiellement encastré en pied, ce qui conduit à adopter d'autres modèles de calculs par un double découpage de la voûte en poutres courbes horizontales (arcs) et en poutres verticales (consoles). Les efforts appliqués à chaque nœud se répartissent entre ces deux familles de poutres et les déplacements des arcs et des consoles sont égaux à leur intersection. Actuellement, une des méthodes numériques utilisées est le calcul par éléments finis.

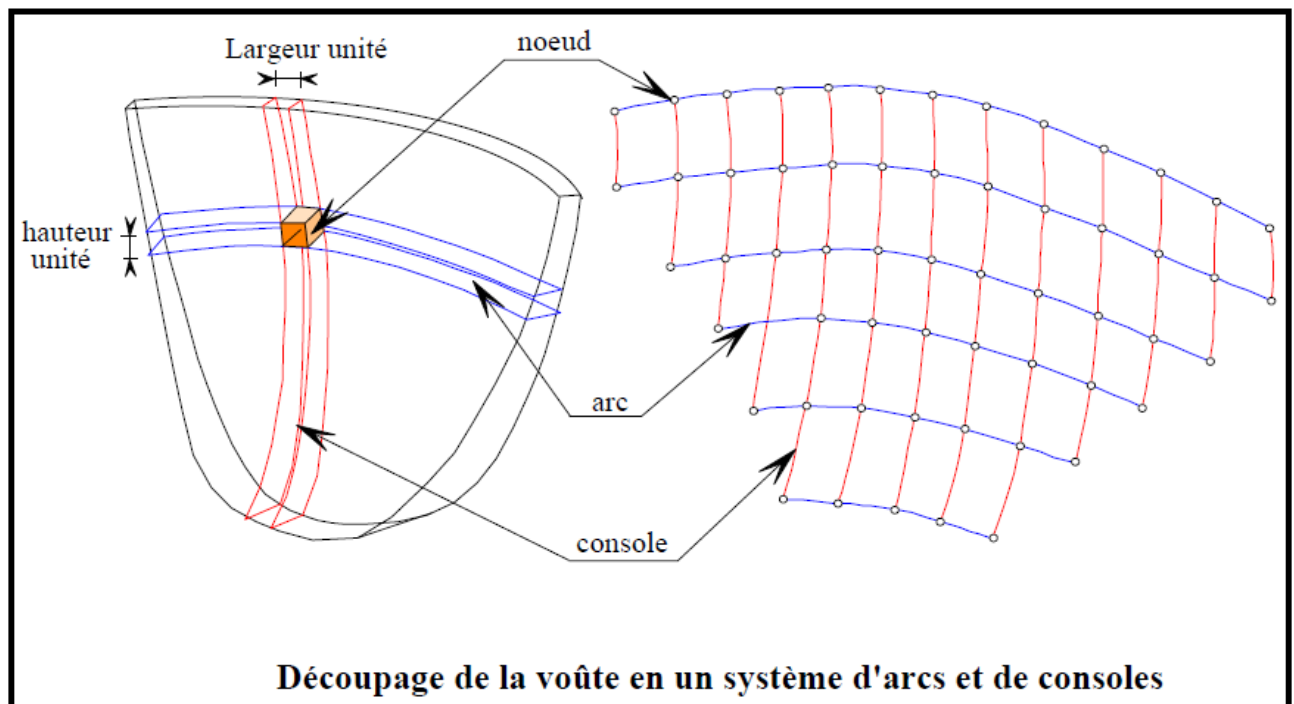


Figure 1.11 : Modèle de modélisation en éléments finis.

CONCLUSION :

Ce chapitre est une présentation des différents types de barrages existant et une approche de calcul de la conception des barrages en béton. Dans le cadre du présent travail notre étude se limite à un seul cas à savoir l'étude du comportement d'un barrage poids en béton et son assise (c.à.d. l'interaction entre la structure et sa fondation). Cette notion sera présentée en détail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2 : Généralités sur le phénomène d'interaction sol-structure.

I. INTRODUCTION :

Le mouvement du sol qui n'est pas influencé par la présence de la structure est dit mouvement du champ libre. Si la structure est fondée sur une roche solide et elle est soumise à un signal sismique, la grande rigidité de la roche impose que le mouvement de cette dernière soit proche de celui du champ libre; c.à.d. La structure fondée sur une roche est considérée comme étant à base fixe. Par contre, la même structure se comporte différemment si elle repose sur un sol meuble. Ceci peut être expliqué par :

Premièrement : L'incapacité de la fondation de suivre les déformations du champ libre, ce qui engendre un décalage du mouvement par rapport à celui du champ libre.

Deuxièmement: La réponse dynamique de la structure elle-même induit une déformation du sol support.

Ce processus, dans lequel la réponse du sol est influencée par le mouvement de la structure et inversement, où la réponse de cette dernière a une influence sur le mouvement du sol, est appelé le phénomène d'interaction sol-structure (ISS).

L'interaction sol-structure peut dans certain cas avoir un effet négligeable sur la réponse dynamique de plusieurs structures et de systèmes de fondations. Dans d'autres cas, son effet peut être significatif. La question qui se pose : négliger son effet est il conservatif ou pas? Ceci dépend du détail du problème.

Dans ce chapitre on présentera quelques publications et études sur l'interaction sol-structure, puis une illustration de l'interaction sol-structure et finalement une présentation des différentes méthodes d'analyse liée à l'interaction sol-structure.

II. ETUDES ENTERIEUR SUR L'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

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

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

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

Trois types d'analyses ont été faites :

- Une analyse linéaire de l'interaction dynamique sol-structure.
- Une analyse non-linéaire de l'interaction dynamique sol-structure.
- Pour la même structure, l'analyse à été faite sans prendre en considération l'effet d'interaction dynamique sol-structure (structure encastrée à la base).

Trois enregistrements sismiques ayants trois différentes valeur de PGA (Peak Ground Acceleration 0,15 g, 0,3 g et 0,45 g) ont été choisis pour solliciter le modèle. Ainsi que trois types de sol caractérisés par des vitesses de propagation des ondes de cisaillement.

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

Il commence par une comparaison entre une structure à base fixe et une autre à base flexible. Par la suite, une étude paramétrique a aboutit à des validations et critiques de quelques résultats des chercheurs concernant l'interaction inertielle sol-structure. Enfin, des expressions du code américain (BSSC97) ont été validées par l'introduction des spectres du code algérien (RPA99.version2003). Il a été proposé de combiner le rapport d'ancrage e/r (e : profondeur d'ancrage, r : rayons équivalents d'une fondation rectangulaire) couramment utilisé avec un autre rapport e/h qui tient compte de la hauteur (h) de la structure. Il a été démontré que l'*interaction sol-structure* n'affecte que le mode fondamental. L'application du code algérien dans le dimensionnement d'une structure en béton armé a montré que l'interaction sol-structure permet de diminuer le ferrailage et de majorer le joint sismique de 45%.

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

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

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

K. Louay et al, 2006 : Ont fait une étude paramétrique de l'influence de l'interaction sol structure sur la fréquence fondamentale des structures sous chargement sismique. L'analyse est effectuée avec une modélisation numérique par élément finis. Le comportement du sol et de la structure est supposé de type élastique. L'analyse statique des résultats obtenus pour un portique représentant un système à un seul degré de liberté a permis la détermination d'un paramètre adimensionnel, intitulé rigidité relative du système sol-structure noté K_{ss} . un abaque a été construit, en variant les paramètres N_b , N_θ , N_e (nombre d'ouverture dans le sens horizontal et transversal et nombre d'étage respectivement).

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

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

Tahar Berrabah.A (2007) :

A étudier l'effet du sol environnant tel que décrit par l'effet d'interaction sol-structure sur le comportement dynamique du barrage de Brezina (barrage poids voûte en béton, situé à El Beyadh à ouest de l'Algérie), est étudié dans la présente étude.

L'effet sur le comportement du réservoir du barrage n'est pas pris en compte, le but de cette thèse est d'étudier l'interaction du barrage.

III. DEFINITION DU PHENOMENE D'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

Si le mouvement d'un point D (Fig. 2.1) situé à l'interface du système sol-structure diffère du mouvement qui aurait lieu en champ libre (la structure inexistante) alors il y a interaction sol-structure. Cette définition est très générale ; une définition plus précise peut être donnée tel que : l'interface se déplace ou se déforme différemment par rapport à la surface correspondante dans le champ libre, il y a interaction.

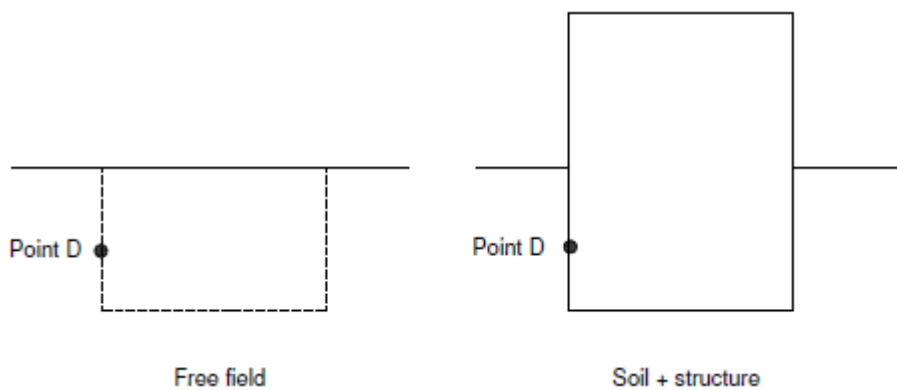


Figure 2.1 Définition du phénomène d'interaction sol-structure (Emilio Rosenbluenth, 1980).

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

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.0)$$

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

a) Aspect fondamental de l'interaction :

La figure 2.2 illustre l'aspect fondamental de l'interaction sol-structure; cet aspect est présenté ici dans le cas d'une fondation sur pieux, partiellement enterrée dans le sol, mais les conclusions restent applicables à tout type de fondation.

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

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

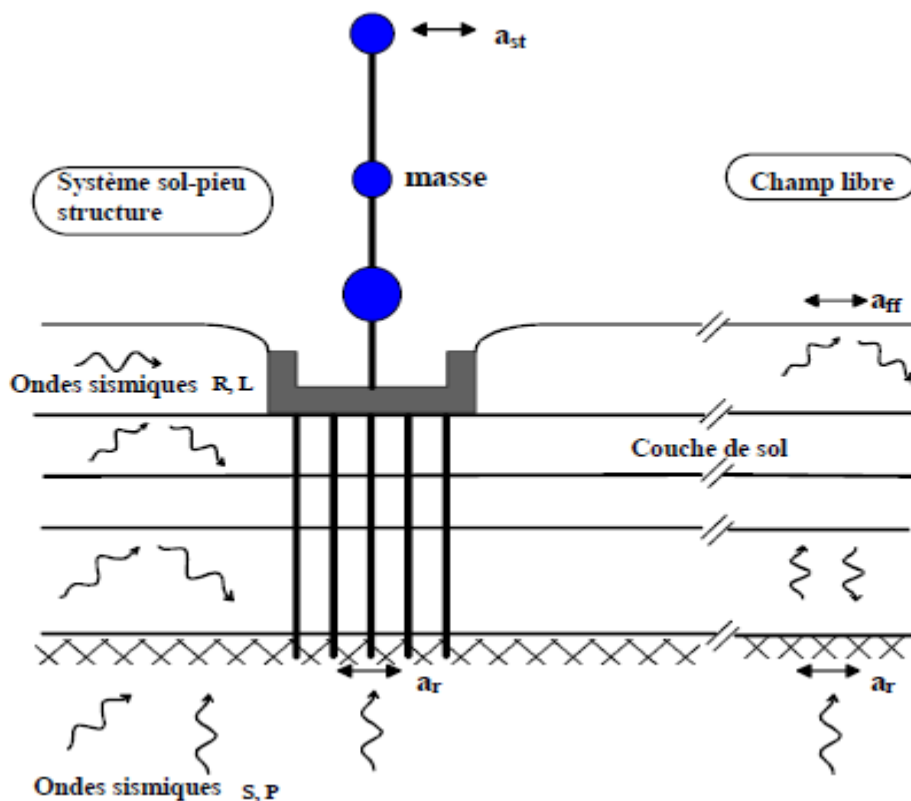


Figure 2.2 : Effet de l'interaction sol-structure.

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

IV. FORMULATION DU PHENOMENE D'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

Les méthodes pour l'analyse de l'interaction sol-structure peuvent être divisées en deux catégories principales: la méthode directe (ou méthode globale) et la méthode par sous-structures.

a) Méthode directe (méthode globale) :

Cette méthode permet de résoudre l'équation dynamique en une seule étape:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MI\ddot{u}_g \quad (2.1)$$

Où:

U: représente le vecteur du déplacement relatif par rapport à la base,

I: Vecteur influence, \ddot{u}_g indique la direction de la sollicitation,

M, C, K: Matrice masse, matrice d'amortissement et de matrice de rigidité, respectivement du système.

En général, la technique de résolution est basée sur la méthode des éléments finis qui présente une plus grande flexibilité et permet de prendre en compte les comportements non linéaires tels que l'inélasticité, comportement des matériaux, le soulèvement ou le glissement de la fondation. La schématisation de la solution de la méthode globale est illustrée dans la Fig. 2.3 ci-dessous:

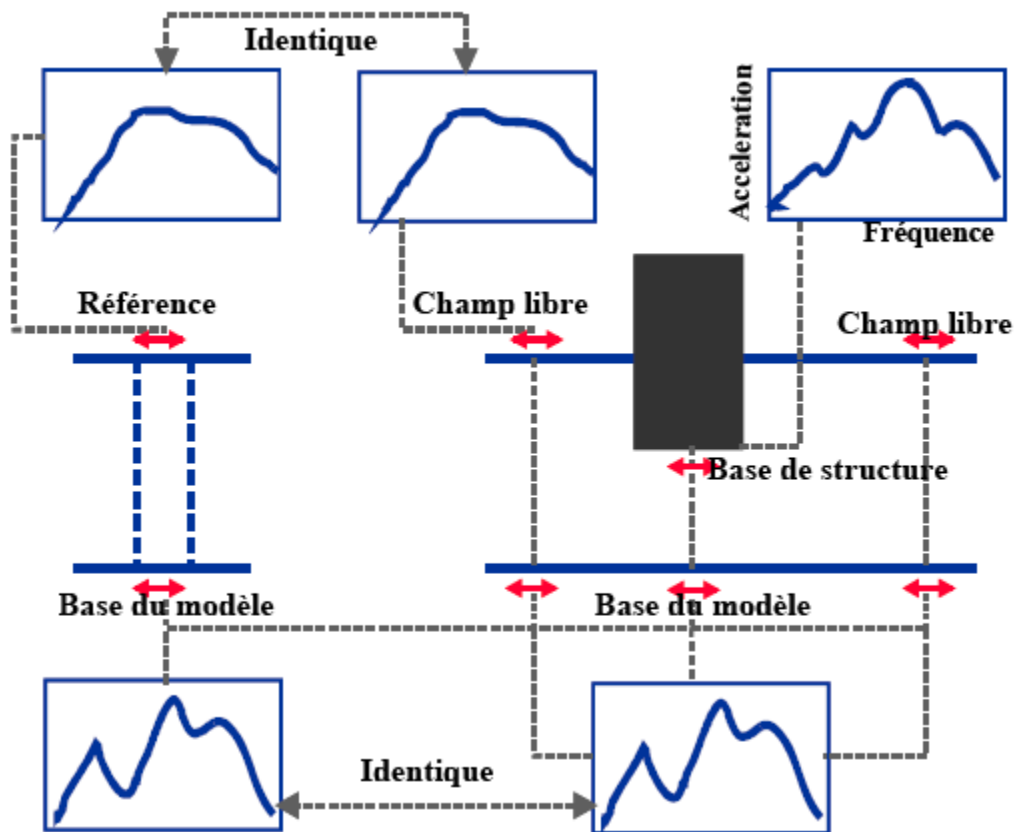


Figure 2.3 : Schématisation d'un problème d'interaction sol structure.

Première étape: Le mouvement sismique de dimensionnement est connu (spécifié) à la surface du sol, en champ libre.

Deuxième étape: Le mouvement est calculé à la base inférieure du modèle, choisie à une profondeur suffisante pour que la présence d'une structure en surface n'affecte pas ce mouvement; cette étape est connue sous le nom de déconvolution du mouvement sismique.

Troisième étape: Le mouvement déconvolué est imposé uniformément à la base du système sol structure et la réponse est calculée par résolution de l'équation. 2.1.

La difficulté de la résolution par éléments finis des problèmes dynamiques d'interaction sol structure réside dans le traitement des conditions aux limites. « Une onde heurtant une surface libre était totalement réfléchi ». Dans le cas présent, les limites du modèle sont introduites de manière artificielle dans celui-ci et la réflexion des ondes à ces interfaces contribue à maintenir l'énergie qu'elles transportent à l'intérieur du modèle, alors que dans la réalité elles la transportent à l'infini (au moins partiellement si d'autres réflexions interviennent).

Sous le vocable *amortissement géométrique*. Il était possible d'annihiler ce phénomène en introduisant des frontières absorbantes dont le rôle est de rétablir les conditions de contraintes et de déplacements à la frontière; dans le cas des poutres ces frontières sont représentées par des amortisseurs dont les caractéristiques sont fonction de celles du milieu extérieur au modèle.

Pour le milieu tridimensionnel des frontières analogues ont été développées; ces éléments ne constituent une solution exacte au problème que dans le domaine fréquentiel; dans le domaine temporel elles ne représentent qu'une solution approchée.

b) Méthode indirecte :

Cette méthode s'appuie sur le principe de superposition. L'idée est de résoudre le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives, où chacune des étapes étant réputée plus facile à résoudre que le problème global. Pour des raisons évidentes, les infrastructures envisagées sont constituées d'une part par le sol et de l'autre part, comme indiqué dans la Fig. 2.4. Les équations sont écrites pour chaque sous-système, alors les conditions de compatibilité à l'interface, la continuité des déplacements et des vecteurs de contraintes sont remplies.

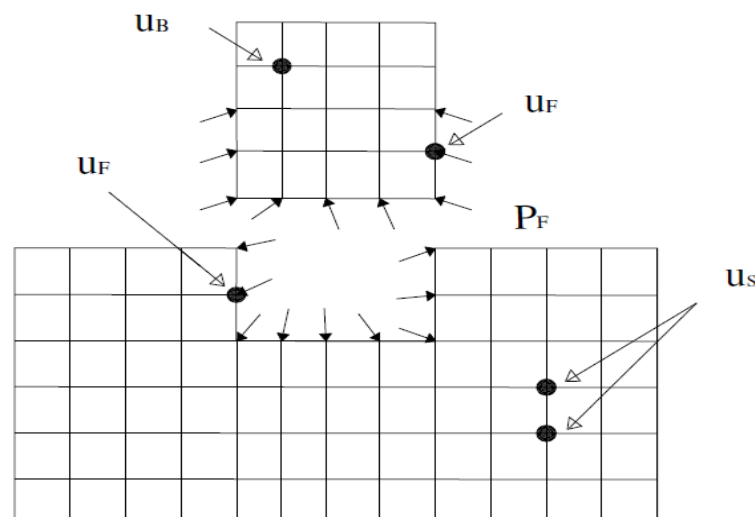


Figure 2.4 : Schématisation des sous structures.

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

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

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

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

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

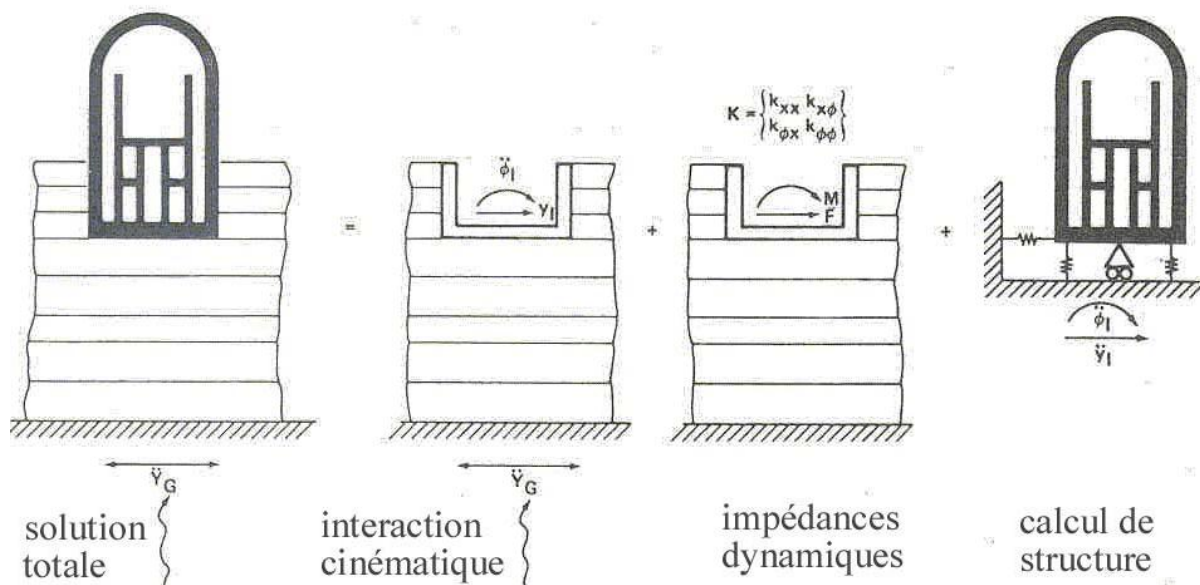


Figure 2.5 : Théorème de superposition (Wolf).

Dans la mesure où la fondation est parfaitement rigide, cette démarche est rigoureusement identique à celle conduisant à la résolution du système global en une étape. Cette décomposition est connue sous le nom de théorème de superposition de Kausel et est illustrée sur la figure 2.5. Son intérêt apparaît clairement s'il est possible de simplifier une des trois étapes du calcul.

L'interaction sol-structure est causée par deux phénomènes: l'incapacité de la fondation

pour correspondre à la déformation en champ libre (interaction cinématique) et l'effet de la réponse dynamique du système de structure de base sur le mouvement du sol (Interaction inertielle) (Steven L. Kramer, 1996).

V. LES COMPOSANTES D'INTERACTION SOL-STRUCTURE :

Avant d'examiner les différentes méthodes de l'interaction sol-structure, il est utile de formuler de façon générale le problème. Cette formulation est orientée vers un traitement par éléments finis du phénomène d'interaction. En effet, la complexité du problème est telle que le recours aux méthodes numériques est pratiquement inévitable. Les équations du mouvement sont obtenues par référence à la figure 2.6 qui schématise un ensemble sol-structure.

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

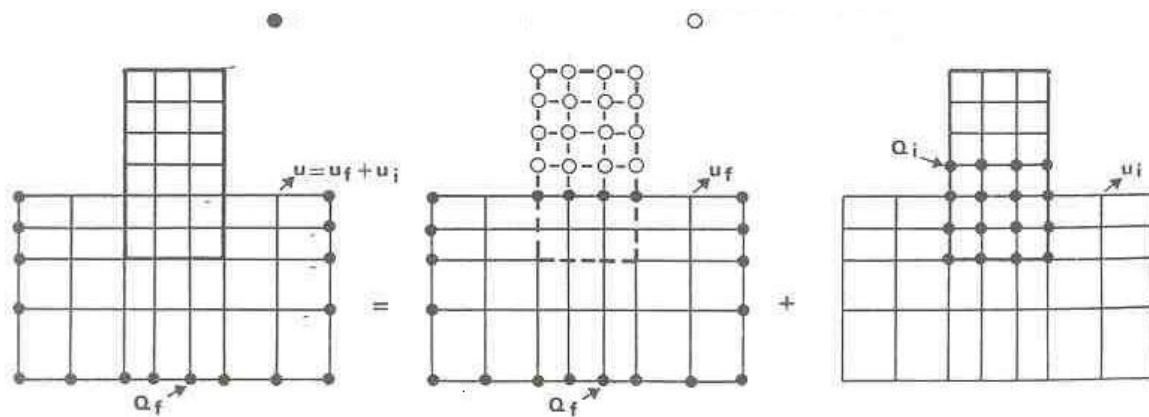


Figure 2.6 : Décomposition du problème d'interaction sol-structure (Kausel)

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

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{Q}_f \quad (2.2)$$

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

$$Q_i = [M - M_f]\ddot{U}_f + [C - C_f]\dot{U}_f + [K - K_f]U_f \quad (2.3)$$

a) Force d'interaction inertielle :

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

$$Q_i = [M - M_f]\ddot{U}_f \quad (2.4)$$

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

b) Force d'interaction cinématique :

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

$$Q_i = [K - K_f]U_f \quad (2.5)$$

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

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

VI. CONCLUSION :

Dans ce chapitre on retient que l'interaction sol-structure ne peut être négligé, car c'est composantes doivent être prise en compte dans le calcul de structure (interaction cinématique, interaction inertielle), cependant l'effet de contact reste un facteur non négligeable, se phénomène sera expliquer dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3 : Généralité sur les contacts

I. DEFINITION DU CONTACT :

On rencontre le problème de contact dans diverses situations : articulation dans les éléments de treillis, engrenages, fondations, etc.....

Dans la plupart des cas, le problème de contact peut être traité avec l'hypothèse de petits déplacements. Cependant il existe de nombreux cas, où l'hypothèse de petits déplacements n'est plus valable comme dans : les procédés de mise en forme, impact de véhicules, adhérence pneu/chaussée, etc.....

Les lois de comportement numérique de contact et de frottement sont fortement non linéaire et conduisent souvent à des oscillations des nœuds de contact qui décollent et recollent d'une interaction à l'autre. Face à ce problème numérique, des techniques de régulations des lois de comportement de contact sont souvent utilisées. Depuis une décennie de nombreux chercheurs se sont mis à améliorer ou élaborer des algorithmes de contact et de frottement entre deux corps déformables, mais seule la comparaison à des résultats analytiques ou expérimentaux fiables permet de mesurer leurs performances réelles.

Dans les problèmes de mécanique des solides et des structures, il existe trois formes de Non-linéarité :

- Les non-linéarités de type comportement qui portent sur la loi de comportement du Matériau : plasticité, endommagement, . . .
- Les non-linéarités de type géométrique qui sont prises en compte dans le cas de grandes Déformations ou de grands déplacements (lorsque la configuration déformée ne peut plus être confondue avec la configuration non déformée).
- Les non-linéarités de type contact associées au fait que dans un contact parfait entre deux solides du décollement ou du glissement peut apparaître. Elles se séparent en deux catégories, les non-linéarités de contact unilatéral et celles de frottement.

Les non-linéarités de type contact sont parmi les plus difficiles à traiter car elles mettent en jeu des changements brusques de comportement (au passage contact-décollement et au passage adhérence-glissement).

Il existe plusieurs méthodes permettant d'inclure les conditions aux limites de contact dans la modélisation par éléments finis. La méthode de la pénalisation (Chen et al), la méthode des multiplicateurs de Lagrange (Diekmaun et al). Les méthodes mixtes ou méthodes hybrides qui sont les combinaisons des deux méthodes par formulation du problème de complémentarité (Kwak, Kim et Kaid) sont les plus couramment utilisées.

II. DIFFERENTS TYPES DE CONTACT :

a) Contact unilatéral, sans frottement :

Le contact unilatéral est la relation qui existe, sur la zone de contact, entre les efforts normaux (pressions de contact) et le mouvement relatif des deux corps dans la direction normale ; décollement.

On considère deux solides élastique Ω_1 et Ω_2 . On note $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ l'ensemble des deux corps. Ils sont soumis à des déplacements imposés \vec{u}_d sur la zone $S_u = S_{u_1} \cup S_{u_2}$, à des efforts imposés \vec{F}_d sur la zone $S_F = S_{F_1} \cup S_{F_2}$ et à des forces de volume \vec{f}_d agissant sur les deux domaines.

$$(\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \cdot \vec{n} \geq 0 \tag{3.1}$$

$$F_n = F_{n1} = -F_{n2} \leq 0 \tag{3.2}$$

$$\vec{F}_t = \vec{F}_{t1} = -\vec{F}_{t2} \tag{3.3}$$

$$((\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \cdot \vec{n}) F_n = 0 \tag{3.4}$$

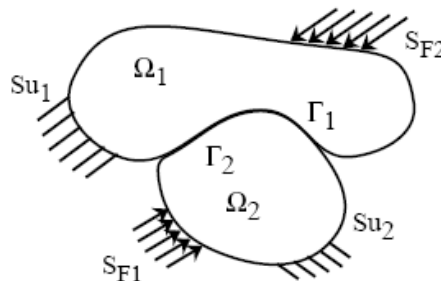


Figure 3. 1: Problème de contact unilatéral.

L'équation (3.1) indique qu'il ne peut y avoir que décollement et non pénétration.

L'équation (3.2) indique que les efforts normaux ne peuvent correspondre qu'à de la compression. L'équation (3.3) indique l'absence de forces tangentielles de frottement. En fin, l'équation (3.4), appelée condition de complémentarité, indique qu'en un point il y a soit contact, soit décollement.

Le phénomène de contact unilatéral défini précédemment peut être schématisé sous la forme du graphe présenté par la figure 3.2

On se rend facilement compte sur ce graphe de la non linéarité de la loi.

On rencontrera parfois des formes régularisées de la loi de contact, telle que celle présentée sur la figure 3.3, qui ont l'avantage de fournir une relation bi-univoque explicite entre la pénétration et la pression de contact. La pénétration que ces lois autorisent est souvent justifiée par un écrasement possible des aspérités.

L'indentification d'une telle loi à l'aide de mesures physiques est cependant délicate.

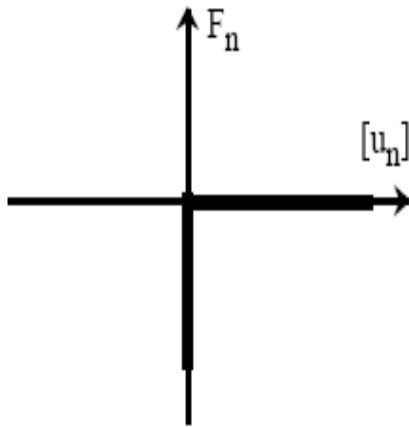


Figure 3.2 : La loi de contact.

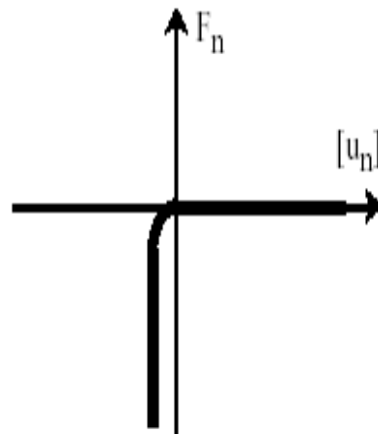


Figure 3.3 : Régularisation de loi de contact.

b) Frottement :

Le frottement est la relation qui existe entre les efforts tangentiels (forces de frottement) sur la zone de contact et le mouvement tangentiel relatif des deux corps (glissement).

Les phénomènes physiques à faire apparaître dans une loi de frottement sont l'existence d'un seuil d'effort en dessous duquel aucun glissement n'est possible et une éventuelle dépendance de ce seuil à l'intensité des efforts normaux. Par ailleurs le déplacement de glissement semble irréversible ce qui pousse à imaginer, pour les lois de frottement, des relations entre les forces de frottement et la vitesse de glissement.

Bien évidemment, ces lois ne doivent intervenir que lorsqu'il n'y a pas de décollement sur la zone de contact.

Pour définir les lois de frottement, on définit le glissement et la vitesse de glissement par :

$$((\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \cdot \vec{n}) F_n = 0 \tag{3.5}$$

$$|\vec{u}_t| = \frac{\partial |\vec{u}_t|}{\partial t} \tag{3.6}$$

La plus simple (en apparence) des lois de frottement est la loi de Tresca qui s'écrit de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \|\vec{F}_t\| < g \quad \text{alors } [\vec{u}_t] = 0 \end{array} \right. \tag{3.7} \text{ (Adhérence)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \|\vec{F}_t\| > g \quad \text{alors } \exists \alpha > 0 \text{ tel que } [\vec{u}_t] = \alpha \vec{F}_t \end{array} \right. \tag{3.8} \text{ (Glissement)}$$

Où g est un seuil du rapport adhérence / glissement fixé a priori. Le graphe de cette loi est tracé sur la figure 3.4, on posant :

$$[\vec{u}_t] = [\vec{u}_t] \frac{|\vec{u}_t|}{\|\vec{u}_t\|} \text{ et } \vec{F}_t = F_t \frac{\vec{F}_t}{\|\vec{F}_t\|} \quad (3.9)$$

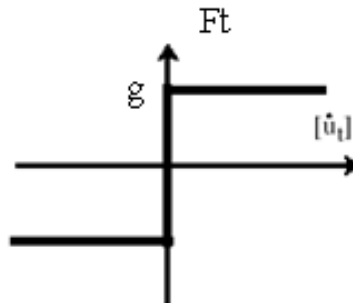


Figure 3.4 : la loi de Tresca

Pour décrire la dépendance de ce seuil à l'intensité des efforts normaux. On utilise une loi de Tresca dont le seuil μ est proportionnel à l'effort normal. C'est la loi de Coulomb(1785).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \|\vec{F}_t\| < \mu \|\vec{F}_n\| \quad \text{alors } [\vec{u}] = 0 \\ \text{Si } \|\vec{F}_t\| = \mu \|\vec{F}_n\| \quad \text{alors } \exists \alpha > 0 \text{ tel que } [\vec{u}_t] = \alpha \vec{F}_t \end{array} \right. \quad (3.10) \text{ (Adhérence)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \|\vec{F}_t\| = \mu \|\vec{F}_n\| \quad \text{alors } \exists \alpha > 0 \text{ tel que } [\vec{u}_t] = \alpha \vec{F}_t \end{array} \right. \quad (3.11) \text{ (Glissement)}$$

Où μ est le coefficient de frottement qui dépend des matériaux en présence et des états de surface ; Fig 3.5.

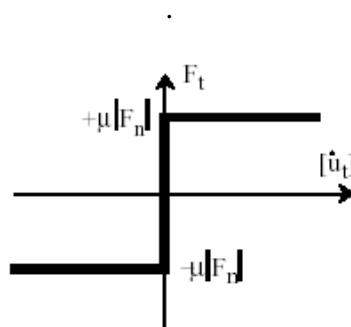


Figure 3.5 : la loi de Coulomb.

III. ELEMENTS DE CONTACT :

On appelle élément de contact, des éléments d'épaisseur nulle disposés entre les maillages des deux domaines. Ils disposent de deux couches de nœuds géométriquement confondues ce qui permet de modéliser les discontinuités de décollement et de glissement.

Lorsqu'on utilise les lois de contact non régularisées, ces éléments peuvent être associés à des caractéristiques matérielles simples qui évoluent en fonction des statuts de contact. Par exemple, leur module de raideur est très grand en cas de contact et très faible en cas de décollement, dans ce cas, ce mode de résolution s'apparente aux méthodes de pénalisation et souffre naturellement des problèmes de conditionnement de ces dernières.

Par contre, lorsqu'on utilise des lois régularisées, la loi de comportement de ces éléments suit ses lois qui donnent alors des relations de comportement biunivoque entre effort et déplacement. Les éléments ont un comportement de type plastique et les méthodes de résolution sont celles des problèmes de plasticité classique.

a) Modélisation du contact :

La modélisation du problème consiste à représenter chaque discontinuité par élément finis de contact, en prenant en compte la géométrie réelle de la discontinuité et ses caractéristiques mécaniques.

Pour modéliser les solides en contact, il faut faire un choix judicieux des éléments finis.

Ce choix porte essentiellement sur la géométrie de l'élément et son ordre. Ainsi on choisira soit des éléments plans linéaires en très grand nombre, soit des éléments d'ordre plus élevé et en nombre plus restreint. Les choix de ces deux types d'éléments porte essentiellement sur la précision des résultats d'une part, et le cout de calcul d'autre part. Notre problème exige une précision importante dans le calcul des contraintes, le plus judicieux et d'utiliser des polynômes d'ordres plus élevé.

S_0 : Surface initiale du contact
 S_c : Surface potentielle du contact
 S_1, S_2 : Surface des solides 1 et 2

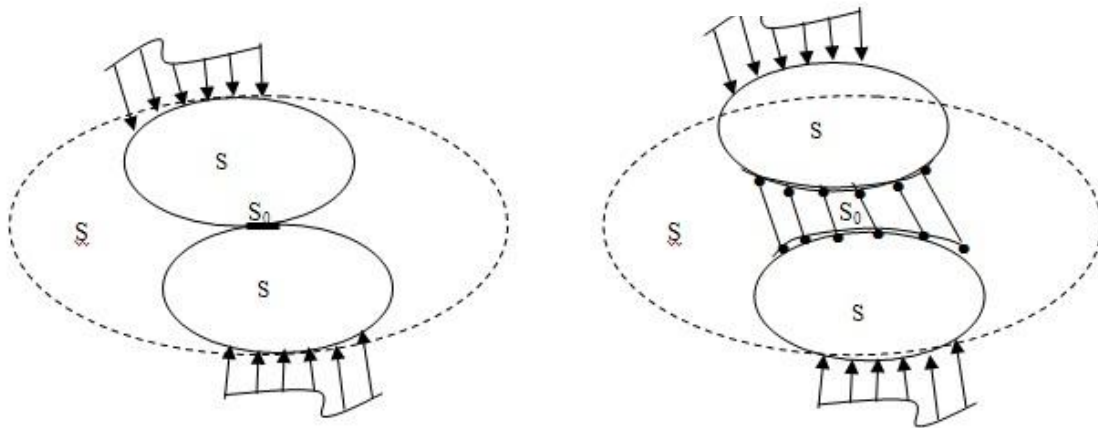


Figure 3.6 : modélisation des surfaces en contact.

b) Rigidité du contact :

La rigidité de contact est le paramètre le plus important qui affecte à la fois la précision et le comportement de convergence. On rappelle qu’une rigidité plus élevée donne une meilleure précision, mais avec une convergence plus difficile.

Pour déterminer soigneusement une valeur adéquate de la rigidité de contact. La “meilleure“ valeur dépend souvent du problème. La valeur par défaut n’est pas requise pour déterminer une valeur appropriée générant une solution convergée avec un niveau de précision acceptable.

Pour les éléments surface-à-surface, on spécifie la rigidité de contact en tant que facteur (FKN) , en fait le programme ANSYS détermine la rigidité de contact en multipliant la rigidité de l’élément sous-jacent par un facteur que vous donnez.

$$k_{\text{contact}} = \text{FKN} \times (k_{\text{sous-jacent}}). \quad (3.12)$$

Pour les éléments surface-à-surface, la rigidité de contact a pour dimension une rigidité par unité d’aire. Une bonne valeur de la rigidité de contact est souvent obtenue en rendant la rigidité de contact égale à la rigidité des éléments sous-jacents.

CHAPITRE 4 : Présentation du code ANSYS

INTRODUCTION

Dans ce chapitre on fera la présentation du code ANSYS ainsi que la définition de la méthode des éléments finis, et on terminera par la méthodologie à suivre pour la création d'un modèle ANSYS.

Le présent calcul est basé sur la méthode des éléments finis.

DEFINITION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS :

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Concrètement, cela permet par exemple de calculer *numériquement* le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc.

Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, où, grâce à la formulation variationnelle, les solutions du problème vérifient des conditions d'existence plus faibles que celles des solutions du problème de départ et où une discrétisation permet de trouver une solution approchée.

PRESENTATION DU CODE ANSYS

a) GENERALITES

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

- **ANSYS classique** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en se basant sur les commandes disponibles dans le code ANSYS. Il est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- **ANSYS Workbench** : Cette plate forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièce) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées

par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

Le code ANSYS est utilisé par des ingénieurs du monde entier dans pratiquement tous les domaines d'ingénierie (Belharizi.M, 2007):

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

ANSYS/Multiphysics 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/Multiphysics:

- 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.
- DesignSpace - Un outil de conception et d'analyse facile d'utilisation pour des analyses rapides sous environnement CAO.
- ANSYS/ProFEA - Pour l'analyse ANSYS et l'optimisation de modèles sous Pro/ENGINEER.

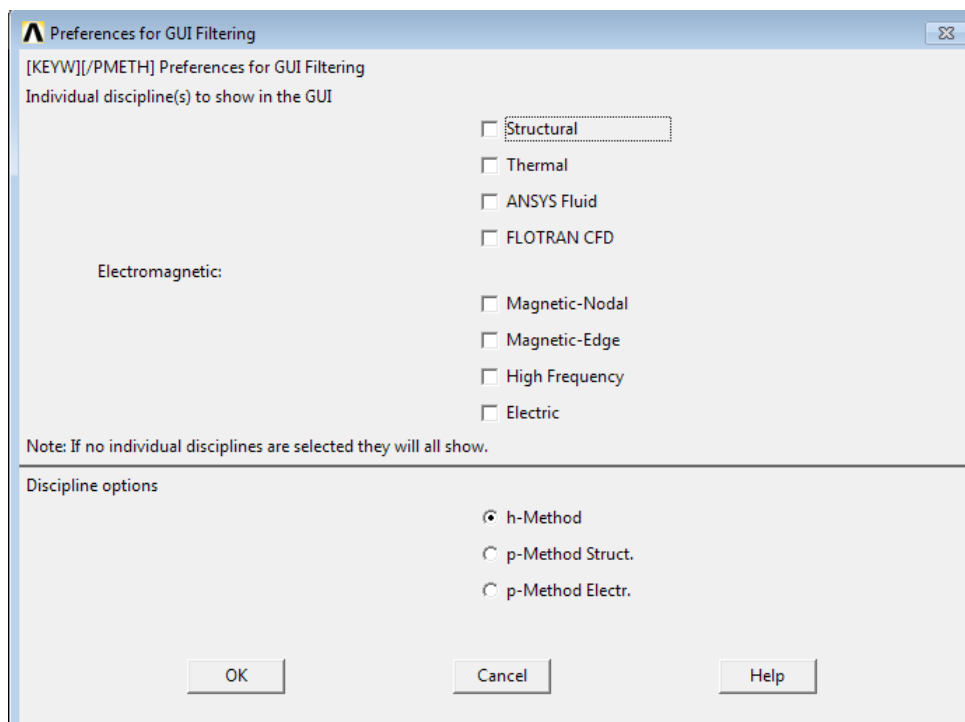


Figure 4.1 : Fenêtre de choix des domaines d'études.

b) Type d'analyse

Différents types d'analyses peuvent être assurées par ANSYS.

L'analyse structurale: 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

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.

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

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

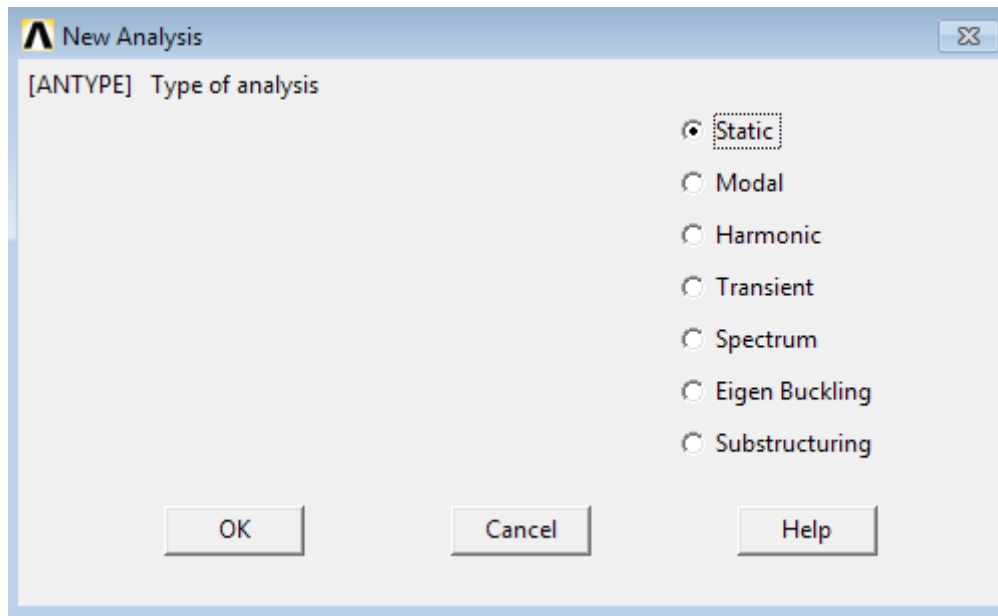


Figure 4.2 : Fenêtre de choix des types d'analyses.

DEMARCHE UTILISEE POUR LA CREATION D'UN MODELE ANSYS

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

- ♣ 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.

- ♣ A partir de l'icône préprocesseur :

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

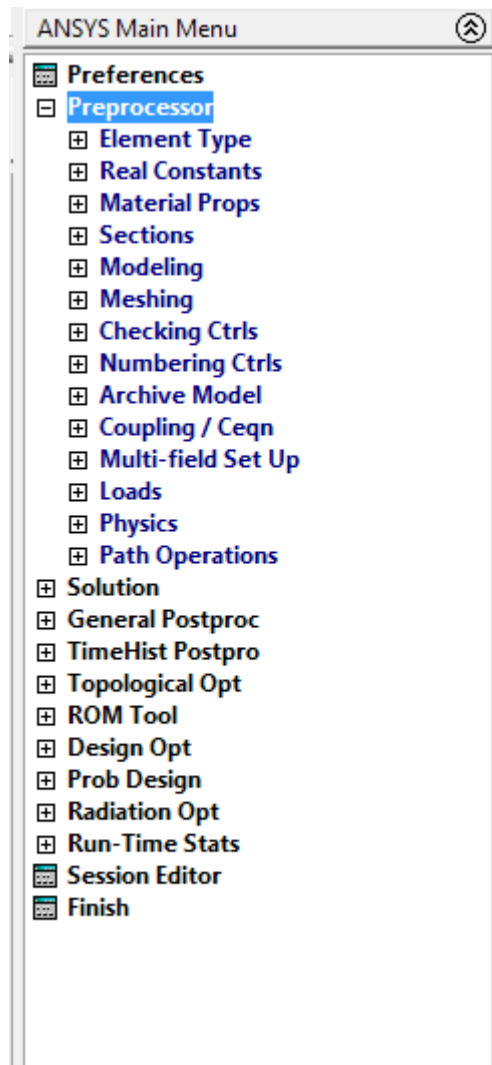


Figure 4.3 : Fonction de l'icône preprocessor.

- ✚ Dans l'icône « *Element Type* » on choisit le type d'élément à utiliser dans notre étude 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 de poisson ainsi que leurs modules d'élasticité.
- ✚ On trace 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.

- ✚ À 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 (9.81m/s^2) , le signal sismique et la pression hydrostatique.
- ♣ A partir de l'icône solution :

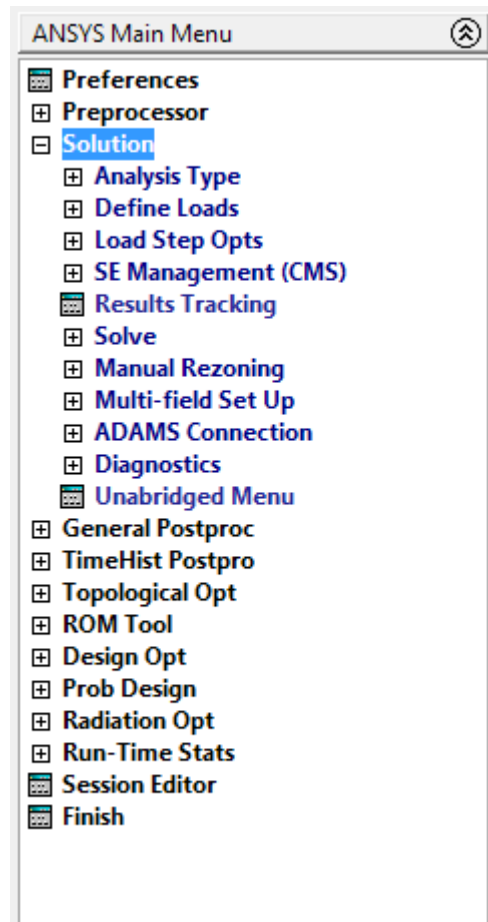


Figure 4.4 : Fonction de l'icône solution.

- ✚ 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.

- ♣ A partir de l'icône General Post proc :

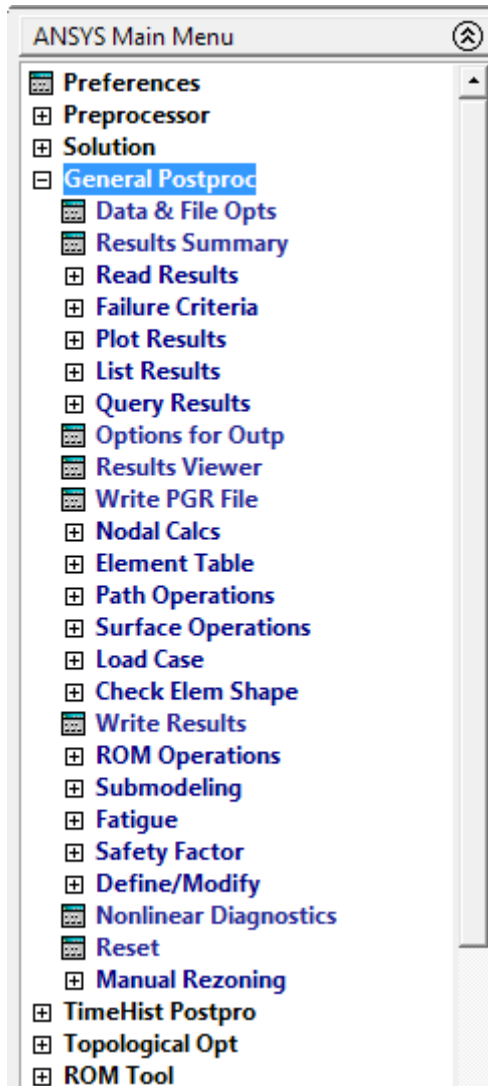


Figure 4.5 : Fonction de l'icône general postproc.

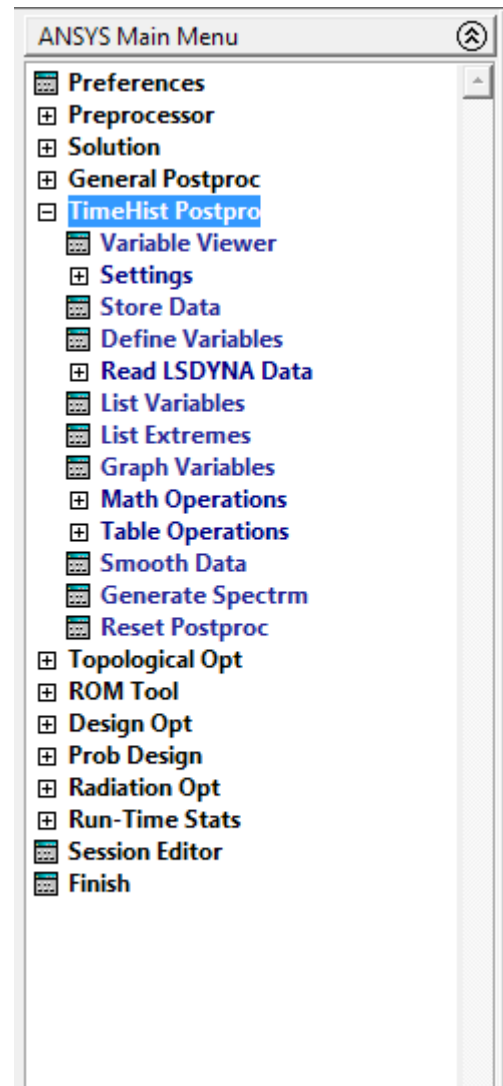


Figure 4.6 : Fonction de l'icône TimeHist postpro

- ✚ 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.

- ♣ Barre de commande ANSYS :



Figure 4.7 : 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 icônes sur la droite de la barre, servent à créer les éléments de contact ainsi que la variation du coefficient de contact.

CONCLUSION :

Ce chapitre est un apprentissage du code ANSYS et ses différentes méthodes d'analyse. L'application de cet apprentissage se fera dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 5 : Modélisation du Barrage à l'aide du code ANSYS.

I. INTRODUCTION

L'effet d'interaction sol-structure sur le comportement statique et dynamique, d'un barrage en béton fait l'objet de la première partie de ce document, alors que l'effet de contact traduit par le frottement sol-structure (corps de barrage) est étudié dans la deuxième partie.

Dans la littérature deux approches sont valables pour la modélisation du sol de fondation :

La première approche consiste à modéliser le sol en lui affectant sa masse, ce qui permet de prendre en considération l'effet inertiel de la masse du sol sur le phénomène d'interaction.

La deuxième approche consiste à modéliser le sol en négligeant sa masse, et par conséquent sa composante inertielle.

II. METHODOLOGIE :

a) **Modélisation d'INTERACTION SOL-STRUCTURE :**

Dans ce document trois modèles ont été choisis pour la représentation du sol de fondation à savoir :

- ✓ Barrage sans interaction sol-structure (sol modélisé par des encastrement).
- ✓ Barrage avec interaction sol-structure (sol modélisé en tenant compte de sa masse).
- ✓ Barrage avec interaction sol-structure (sol modélisé sans masse).

Pour chaque cas trois types d'analyse de structure ont été menés : Analyse Modale, analyse statique et analyse dynamique.

b) **Modélisation de l'interface de contact sol-structure :**

Dans la seconde partie de cette étude, l'interface sol-structure (pour le modèle du barrage avec sol) est modélisée par éléments de contact. Une étude paramétrique est faite sur l'effet du coefficient de frottement sur le comportement modal et statique du barrage.

Il est très important de signaler que ce cas d'étude correspond à une analyse non linéaire due au contact.

III. MAILLAGE DU MODEL :

On rappelle que les systèmes étudiés (barrage seul ou barrage avec sol) sont modélisés en deux dimensions (2D), car pour ce type d'ouvrage en est en présence des déformations planes.

L'élément PLANE42 disponible dans la bibliothèque du Code ANSYS présenté sur la figure 5.1 est utilisé comme élément de maillage des trois modèles étudiés.

a) Description de l'élément :

PLANE42 est utilisé pour la modélisation 2-D des structures solides. L'élément peut être utilisé soit comme un élément de plan (déformation plane) ou comme un élément de révolution.

L'élément est défini par quatre nœuds ayant deux degrés de liberté à chaque nœud: translation dans les directions X et Y. L'élément possède une plasticité, fluage, gonflement, une raideur, une grande flèche ainsi que et des capacités de déformations importantes.

La géométrie ; position des nœuds, et le système de coordonnées de cet élément sont indiqués à la figure 5.1. Les données d'entrée de l'élément comprennent quatre nœuds, une épaisseur et les propriétés des matériaux isotropes. Les charges sont décrits a partir des icônes *Node* et *Element*. Les pressions peuvent être entrées comme des charges de surface sur l'élément de face comme le montrent les chiffres encadrés sur la figure 5.1.

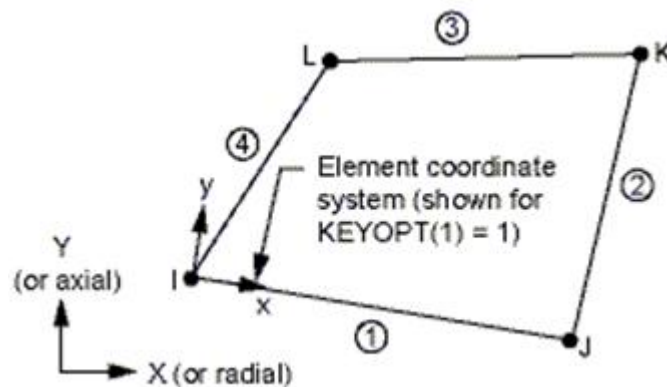


Figure 5.1 : la représentation d'un élément de PLANE42.

La figure 5.2 représente le maillage du premier model ; barrage sans sol.

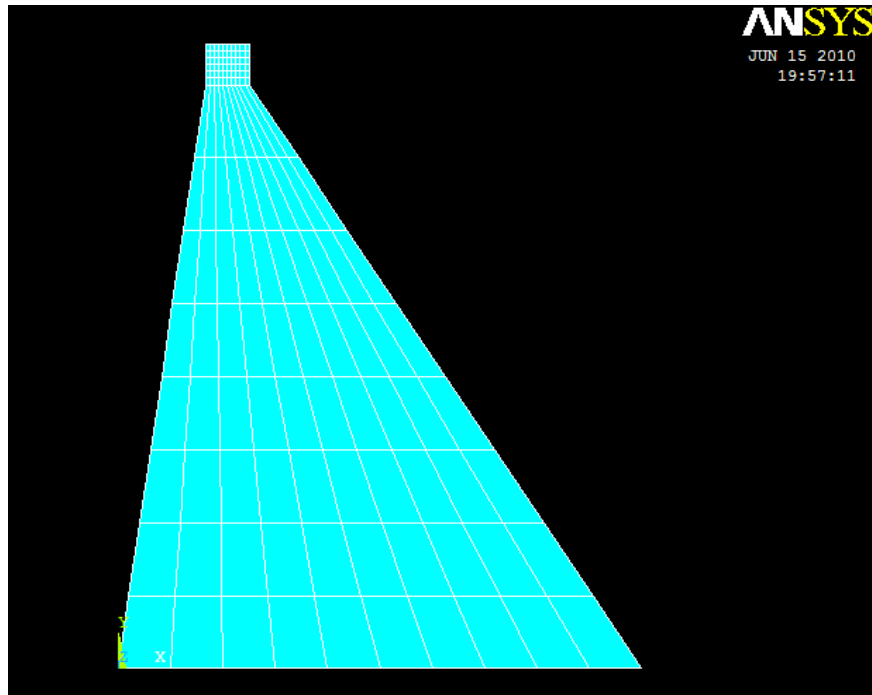


Figure 5.2. : Maillage du barrage en 2D

La figure 5.3 représente le maillage du modèle barrage avec sol de fondation, le maillage du modèle est structuré pour bien distinguer les déformations.

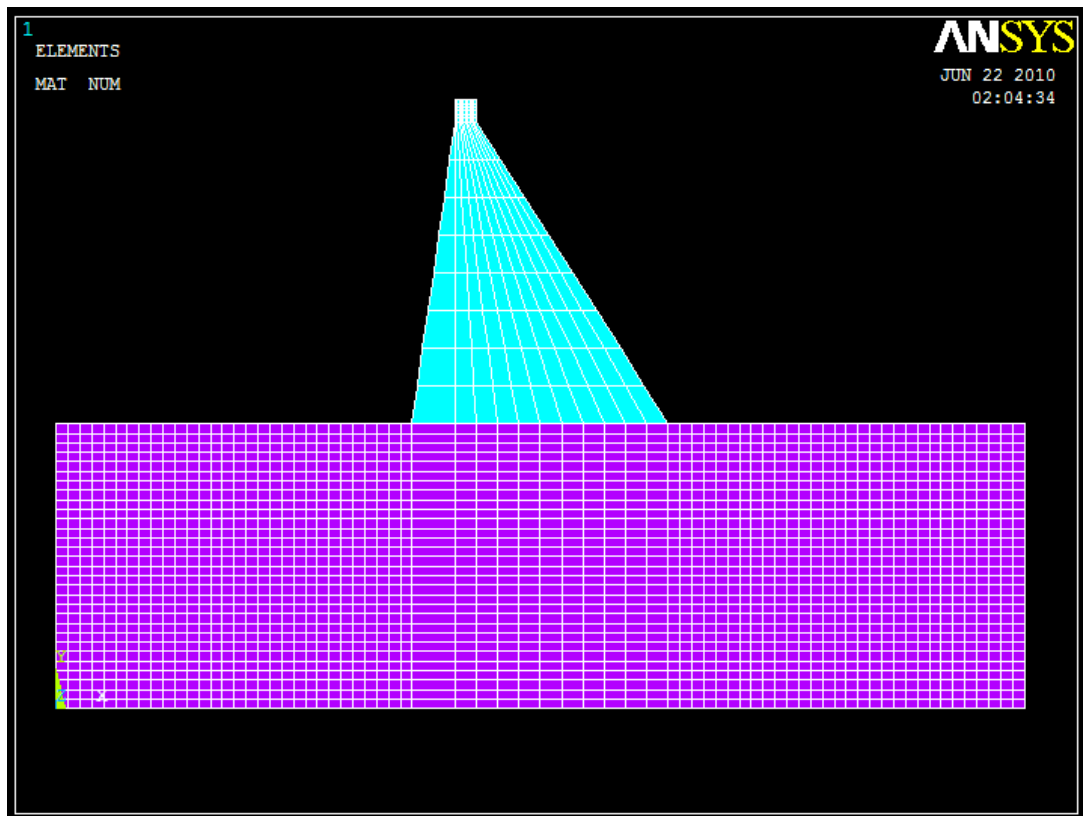


Figure 5.3. : Maillage du système barrage-sol de fondation

b) Définition des différents types d'analyse :**Analyse statique :**

Cette analyse permet de résoudre l'équation du comportement statique d'un système.

$$K U = F \quad (5.1) \quad \text{Où:}$$

U: Représente le vecteur déplacement par rapport à la base,

K: Matrice de rigidité.

F : Représente le vecteur force statique.

Analyse modale :

On utilise l'analyse modale pour déterminer les fréquences et modes propres d'une structure. Les fréquences et modes propres sont des paramètres importants dans la conception d'une structure pour les conditions de chargement dynamique. Ils sont également nécessaires si on veut faire une analyse de spectre ou une superposition mode d'analyse harmonique ou transitoire.

$$K.\phi - \omega^2 .M.\phi = 0 \quad (5.2)$$

K : Matrice rigidité.

ϕ : Représente un vecteur de valeurs de contrainte.

ω : Représente l'amplitude de vibrations.

M : Matrice masse.

Analyse transitoire :

L'analyse transitoire est une méthode de calcul de la réponse dynamique d'une structure sous l'action d'un chargement variant en fonction du temps. Ce type d'analyse permet de savoir l'historique dans le temps des différents types de sollicitations internes (ou efforts internes).

c) Donnée du problème :

Le tableau ci-dessous désigne les caractéristiques du matériau utilisé dans la conception et la modélisation du modèle.

Tableau 5.1 : Caractéristiques du modèle.

	Masse Volumique (Kg/m ³)	Module d'élasticité E (Pa)	Coefficient de Poisson ν
Béton	2500	$2.85 * 10^{10}$	0.2
Sol	2100	$1.425 * 10^{10}$	0.2

Les dimensions du corps du barrage sont comme suit :

Hauteur du barrage : 91m.

Largeur de la base du barrage : 72m.

Hauteur de la crête du barrage : 6m.

Largeur de la crête du barrage : 6m.

Fruit amont du barrage : 0.14

Fruit aval du barrage : 0.63

La géométrie du barrage objet de cette étude est illustrée sur la figure 5.4.

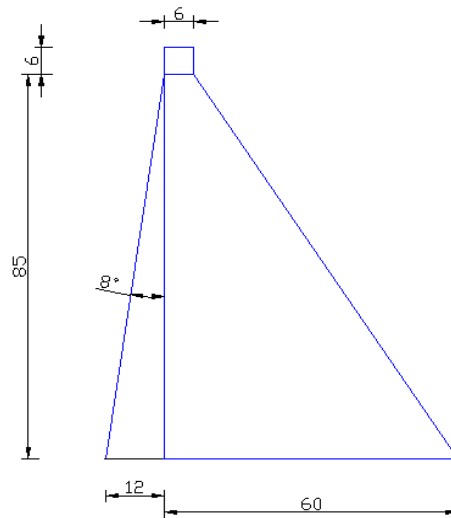


Figure 5.4 : géométrie et dimension du barrage.

IV. ETUDE DE SENSIBILITE:

Avant d'étudier l'effet d'interaction sol-structure sur le comportement du barrage, un choix judicieux de la dimension d'extension du sol de part et d'autre du barrage doit être fait. Cette extension doit être choisie de telle façon à ne pas affecter la réponse de la structure (corps du barrage).

L'étude de sensibilité a été abordée dans le but de fixer une dimension « fiable » du sol. Cette étude consiste à élargir à chaque fois les extensions du sol et de comparer les modes ainsi que les déplacements statiques de chaque modèle. Dès que les résultats ne sont pas influencés par les dimensions du sol, on les conserve (étude de la convergence).

a) Analyse modale :

La résolution de cette analyse se fait par la méthode de Lanczos, les détails du programme sont représentés avec la méthode de résolution.

- OPTION DE LA RESOLUTION :

Dimension de notre problème.....2-D.
 Degrés de liberté..... UX, UY
 Type d'analyse..... MODAL
 Méthode d'extraction..... Lanczos BLOCK.
 OPTION résolveur d'équation.....SPARSE
 Nombre de modes à extraire.....10
 MODES NORMALIZE à l'unité..... OUI
 GÉNÉRAL ASSEMBLEES MATRIX.....SYMETRIQUE

CARACTERISTIQUE GEOMETRIQUE :

- CENTRE DE GRAVITE, MASSE ET MOMENTS D 'INERTIE :

Centre de gravité : (par rapport à l'origine)

X_g : 134.80

Y_g : 51.048

Masse Totale du système : 54073 Tonnes/m.

Tableau 5.2 : Moment d'inertie par rapport à l'origine et au centre de gravité.

	Moment d'inertie par rapport à l'origine. (m ⁴)	Moment d'inertie par rapport au centre de gravité. (m ⁴)
IXX	0.2053E+12	0.6439E+11
IYY	0.1267E+13	0.2841E+12
IZZ	0.1472E+13	0.3485E+12
IXY	-0.3672E+12	0.4898E+10

Gamme de coefficients maximum des éléments de la matrice dans les coordonnées globales :

Maximum = $11.1601065552 \times 10^{11}$ à l'élément 2263.

Minimum = 7.681640625×10^9 à l'élément 1418.

Nombre d'équations = 4522.

- COEFFICIENT DE PARTICIPATION SUIVANT X :

Tableau 5.3 : présentation des résultats de l'analyse modale suivant X.

Modes	Fréquences (Hz)	Périodes (S)	Facteur de participation	Ratio	Masse effective (Kg).
1	3.26142	0.30661	3257.0	0.770531	0.106082E+08
2	5.78652	0.17282	-1826.7	0.432162	0.333698E+07
3	6.47647	0.15441	-4227.0	1.000000	0.178674E+08
4	9.27847	0.10778	2040.8	0.482793	0.416468E+07
5	10.4492	0.95701E-01	-254.13	0.060121	64582.9
6	11.0470	0.90522E-01	1100.5	0.260347	0.121105E+07
7	11.4318	0.87475E-01	135.30	0.032010	18307.2
8	13.3293	0.75023E-01	-1863.3	0.440810	0.347186E+07
9	14.1588	0.70627E-01	656.82	0.155387	431409
10	14.4509	0.69200E-01	-1202.0	0.284375	0.144491E+07

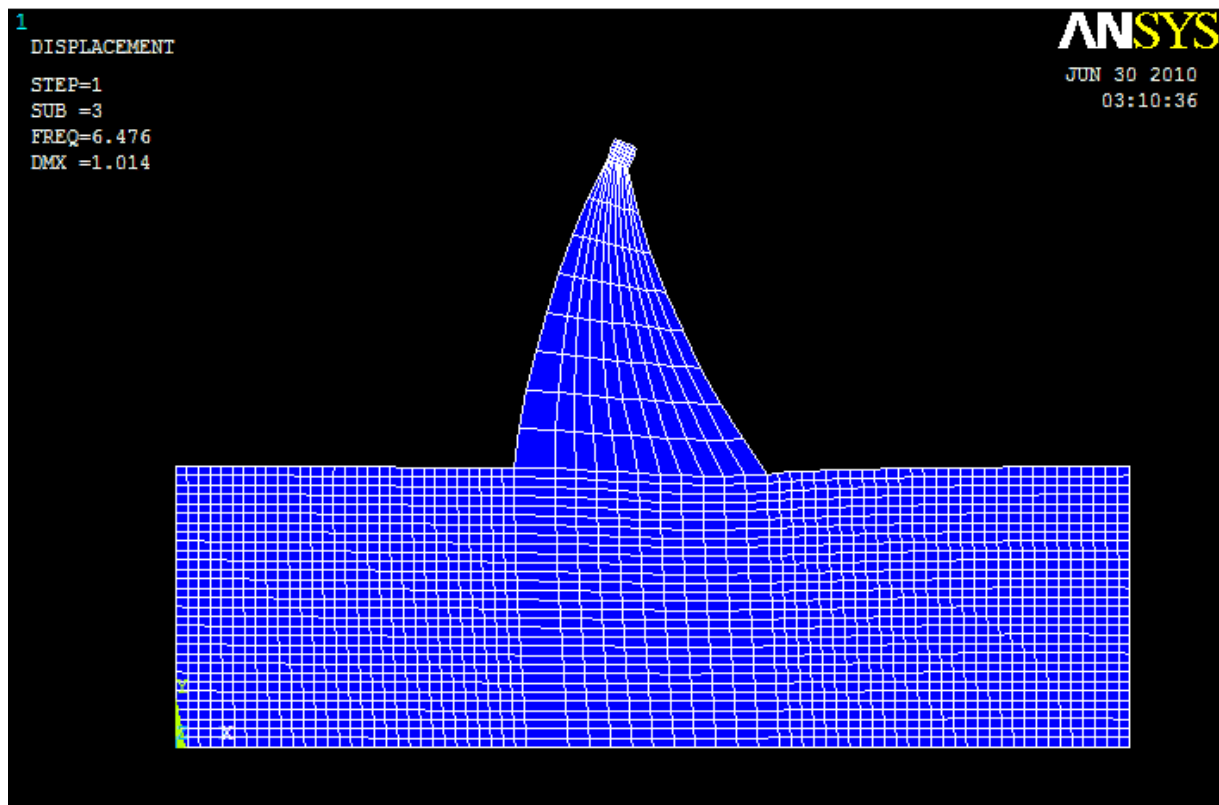


Figure 5.5 : Forme propre pour la fréquence fondamentale suivant X.

Coefficient de participation suivant Y :

Tableau 5.4 : Présentation des résultats de l'analyse modale suivant Y.

Modes	Fréquences (Hz)	Périodes (S)	Facteur de participation	Ratio	Masse effective (Kg).
1	3.26142	0.30661	410.02	0.090018	168113.
2	5.78652	0.17282	4554.8	1.000000	0.207462E+08
3	6.47647	0.15441	-1759.4	0.386282	0.309562E+07
4	9.27847	0.10778	225.40	0.049487	50806.4
5	10.4492	0.95701E-01	3804.5	0.835263	0.144739E+08
6	11.0470	0.90522E-01	-89.449	0.019638	8001.13
7	11.4318	0.87475E-01	1309.9	0.287590	0.171587E+07
8	13.3293	0.75023E-01	123.04	0.027013	15138.1
9	14.1588	0.70627E-01	36.663	0.008049	1344.20
10	14.4509	0.69200E-01	184.84	0.040581	34165.0

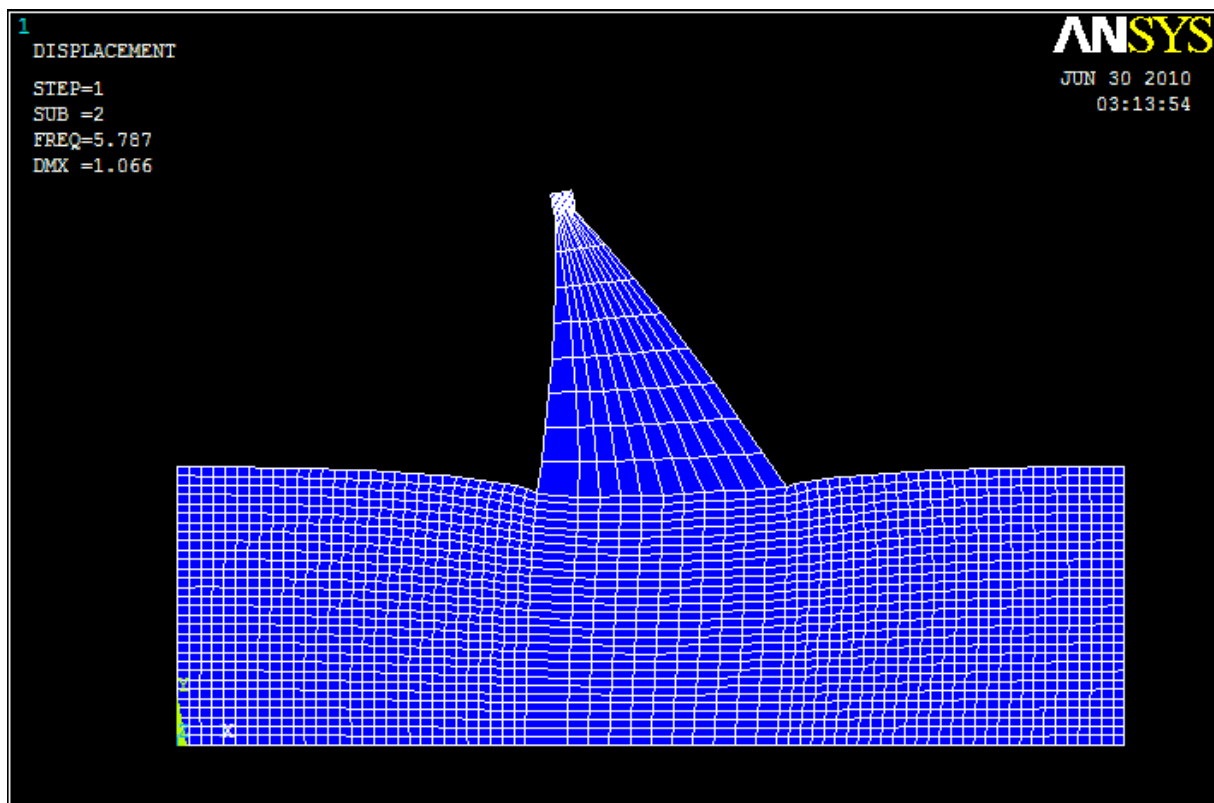


Figure 5.6 : Forme propre pour la fréquence fondamentale suivant Y.

Tableau 5.5 : Variation des fréquences propres en fonction des dimensions du sol.

	Profondeur du sol de fondation (Mètre)	Longueur du sol étendue de la fondation (Mètre)	Fréquence (Hertz)	Période (Seconde)
Model 1	80	20	8.47	0.118
Model 2	80	40	7.69	0.130
Model 3	80	60	7.14	0.140
Model 4	80	85	6.68	0.149
Model 5	80	100	6.47	0.154
Model 6	80	120	6.47	0.154

D'après le tableau 5.5, il est clair que pour 80 m de profondeur de sol et au-delà de 100 m d'extension de part et d'autre du corps du barrage, les fréquences restent constantes. Il y a convergence de la solution à partir des dimensions.

b) Analyse statique :

De même une étude statique de sensibilité a été menée pour confirmé les dimensions du sol de fondation, les figures 5.7 et 5.8 représentent la variation des résultats pour les trois dimensions géométriques du sol choisis.

Les trois dimensions de sol sont : model 4, model 5, model 6.

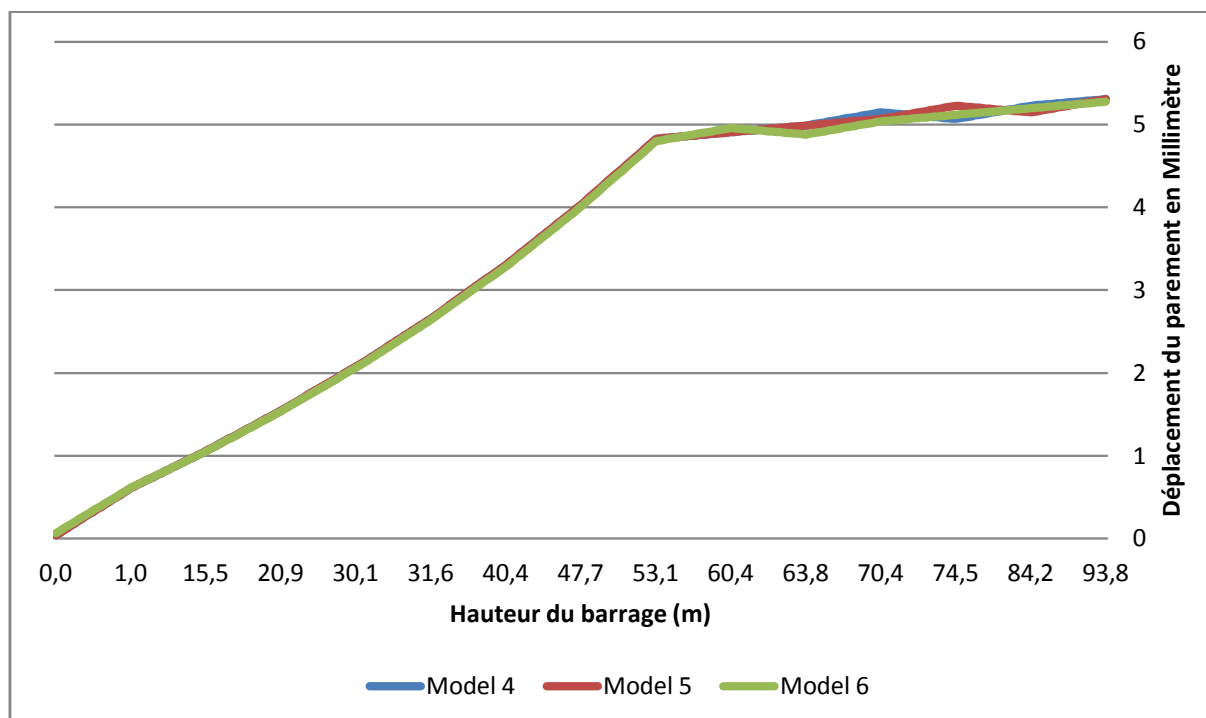


Figure 5.7 : Déplacement suivant X du parement amont pour les 3 modèles de dimension de sol.

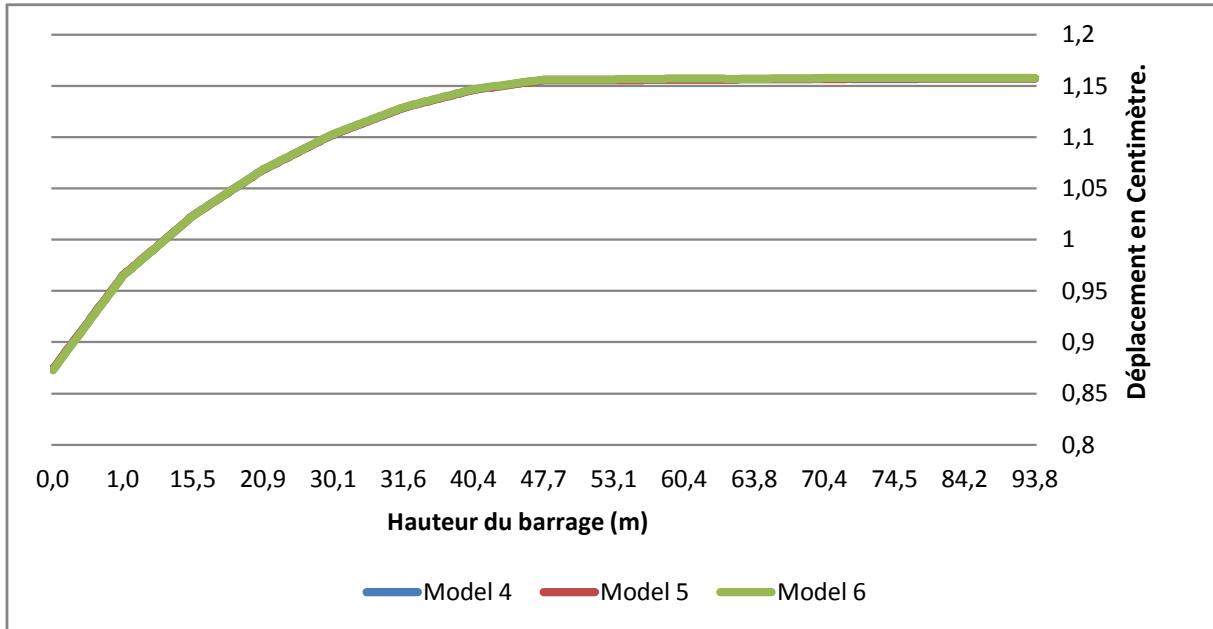


Figure 5.8 : Déplacement suivant Y du parement amont pour les 3 modèles de dimensions de sol.

On constate que les courbes se superposent, leurs allures sont identiques, c'est pour cela qu'on a choisie une profondeur du sol de 80 m et une longueur de 100 m la plus petite longueur (100m), ces dimensions sont choisies de tel façon à avoir un temps d'exécution réduit, avec un espace mémoire réduit.

La figure 5.9 donne la forme géométrique finale du modèle sol-structure.

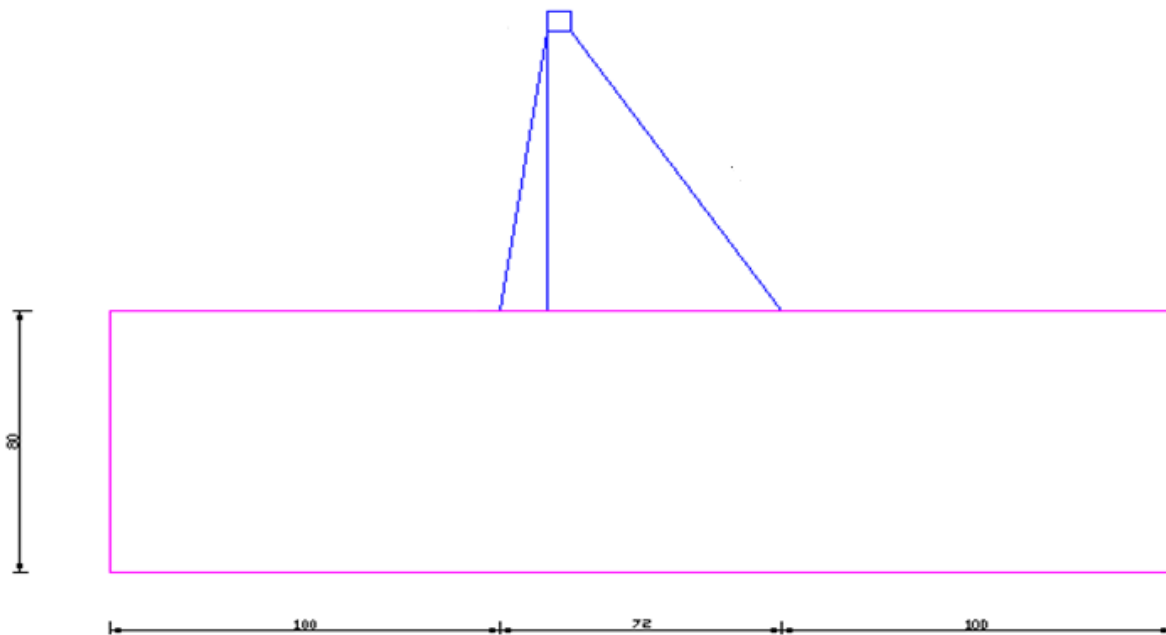


Figure 5.9 : Dimension finale du modèle.

V. MODELISATION DU CONTACT :

L'effet du contact sol-barrage sur le comportement modal et statique du barrage est l'objet de la deuxième partie de cette étude.

L'interface sol-barrage est modélisée par l'élément de contact disponible au niveau de la bibliothèque d'ANSYS.

a) Description de l'élément CONTA172

CONTA172 est utilisé pour représenter un contact ou un glissement en 2-D entre des surfaces "cibles" (TARGE169) et des surfaces de contact ou une surface déformable, définie par cet élément. L'élément est applicable aux 2-D structurelles et analyses couplées. Cet élément se trouve sur les surfaces de 2-D des éléments solides avec des nœuds (PLANE121, PLANE183, SHELL209, PLANE42...) Il a les mêmes caractéristiques géométriques que l'élément de face solide avec lequel il est connecté (voir la figure 5.10: "CONTA172 Geometry").

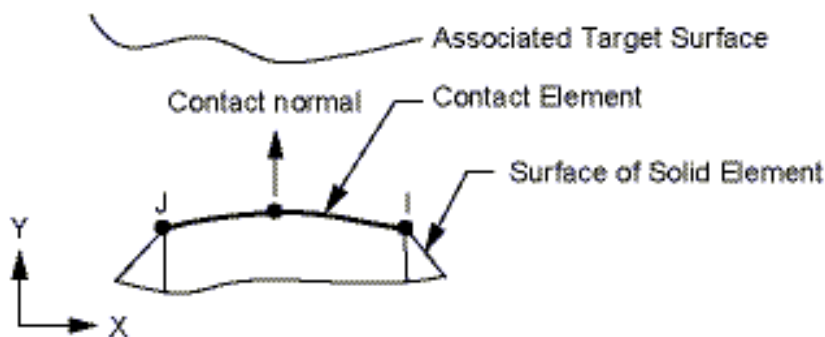


Figure 5.10 : Représentation de l'élément CONTA172.

b) Description de l'élément TARGE169

TARGE169 est utilisé pour représenter différents "cibles" en 2-D pour la surface des éléments de contact associés (CONTA171, CONTA172 et CONTA175). Les éléments de contact se superposent sur les éléments solides décrivant les limites d'un corps déformable et sont potentiellement en contact avec la surface de la cible, définie par TARGE169. Cette surface de la cible est discrétisée par un ensemble d'éléments segment cible (TARGE169) et va de pair avec sa surface de contact associée au moyen d'un ensemble partagé constant réelle.

Nous pouvons imposer un déplacement de translation ou de rotation, température, tension, et le champ magnétique sur l'élément segment cible. Nous pouvons aussi imposer des forces et des moments sur les éléments.

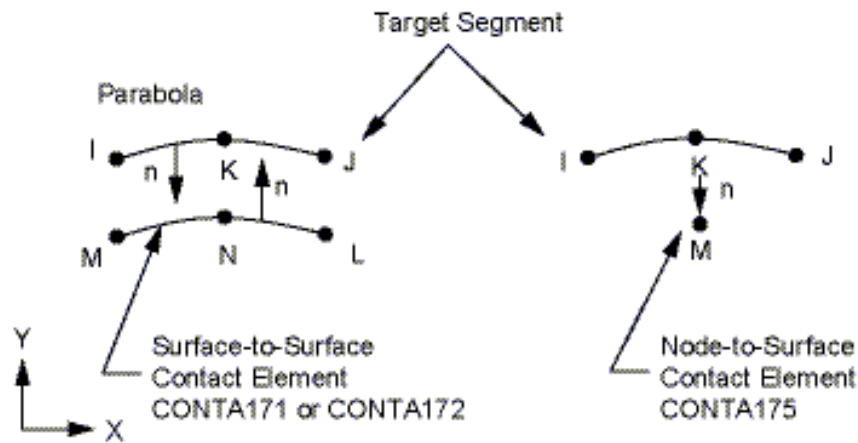


Figure 5.11 : Représentation de l'élément TARGE169.

On représente dans les images qui suivent, la représentation du contact avec le code ANSYS. La représentation des deux surfaces « surface cible » et « surface de contact » est représentée dans les figures qui suivent. La représentation des surfaces de contact se fait par ses normales qui sont opposé en direction.

On varie le coefficient de frottement de 0% à 25% avec un pas de 5% de telle sorte à avoir l'effet de contact sur le barrage.

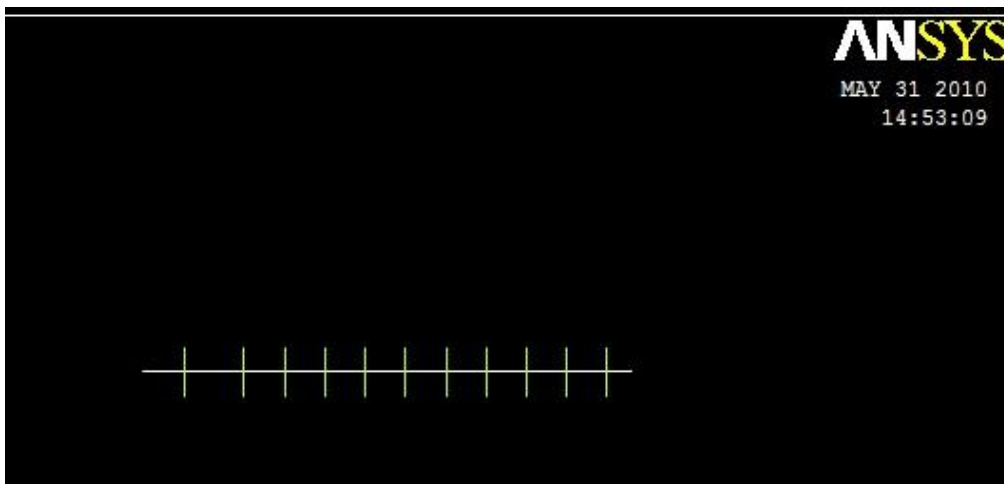


Figure 5.12 : Représentation des deux surfaces (cible et de contact).

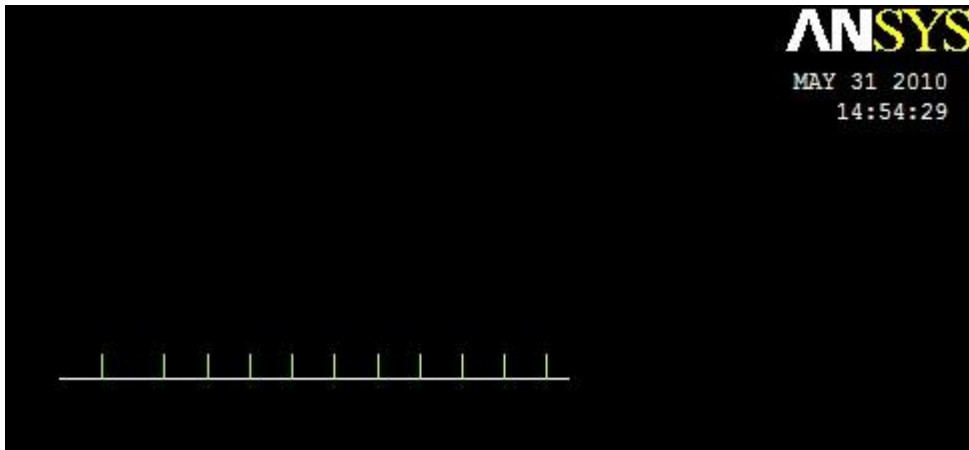


Figure 5.13 : Représentation de la surface de contact.

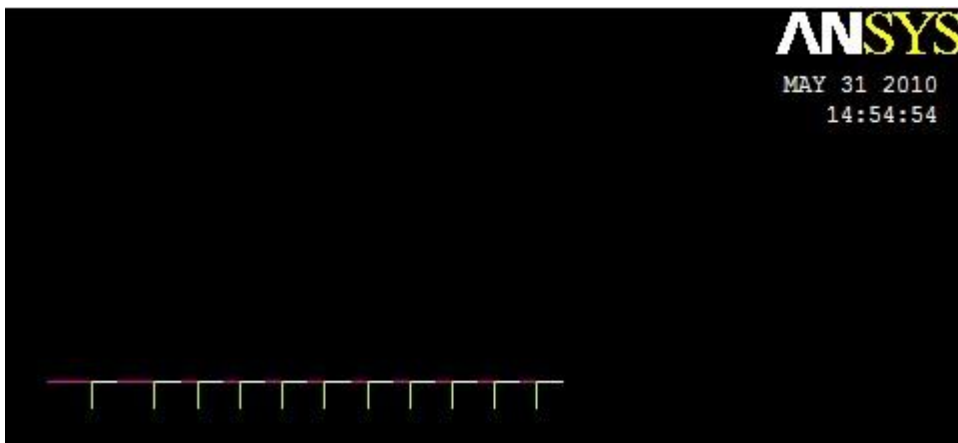


Figure 5.14 : Représentation de la surface cible.

VI. CONCLUSION :

Après avoir fixé les dimensions du barrage, et définie les différents types d'analyses ainsi que les éléments de contact. On conclue que le sol environnant du barrage doit être représentatif. L'effet de contact est pris en compte.

Dans le chapitre qui suit, on débutera l'analyse comparative des différents types d'interaction sol-structure ainsi que l'effet de contact avec la variation du coefficient de frottement.

CHAPITRE 6 : Applications des analyses et leurs résultats.

I. INTRODUCTION

Après avoir fixé les dimensions géométrique du model sol-barrage, différents types d'analyses vont être traité ; étude modale, statique et transitoire.

Dans un premier temps deux analyses modales seront faites, une pour les différents types d'interactions et la deuxième pour l'effet de contact.

L'analyse statique concernera les différents types d'interactions ainsi que le modèle avec effet de contact, puis on prenant en compte le réservoir du barrage (pression hydrostatique). On termine avec une analyse transitoire des types d'interactions sol-structure.

a) Analyse modale :

Le tableau ci dessous représente les dix premiers modes propres (fréquences) pour les trois types de modèles ;

Barrage sans Interaction-Sol-Structure noté **sISS** (sol modélisé par des encastrements)

Barrage avec Interaction-Sol-Structure noté **ISSsm** (sol modélisé sans masse)

Barrage avec Interaction-Sol-Structure noté ; **ISSm** (sol modélisé ayant une masse)

Tableau 6.1 : Les neuf premiers modes pour les trois modèles de barrage.

	Fréquences en (Hz)								
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8	Mode 9
Barrage sISS (Hz)	5.13818	11.6224	13.2177	19.9317	29.5786	30.6218	35.6649	37.9446	42.4588
Barrage ISSsm (Hz)	3.35415	6.86062	8.24489	14.4619	21.6349	23.4208	28.3376	31.9512	34.5467
Barrage ISSm (Hz)	3.26142	5.78652	6.47647	9.27847	10.4492	11.0470	11.4318	13.3293	14.1588

La fréquence en gras dans le tableau représente le mode fondamental c.à.d. le mode qui entraîne le maximum de masse.

On constate que les fréquences du barrage sans interaction sol-structure sont plus importantes que celles du barrage avec sol, ce qui montre que le barrage sans interaction sol-structure est plus rigide que le barrage avec sol.

Les fréquences diminues en ajoutant le sol de fondation, beaucoup plus si le sol est modélisé avec masse.

Les résultats obtenues sont évidente puisque la masse se trouve au dénominateur de la formule de calcul de fréquence ;

$$f = 2\pi \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (6.1)$$

Analyse modale sous l'effet de contact :

Pour ce cas on a pris un barrage avec interaction sol-structure en tenant compte de sa masse, puis on a varié le coefficient de frottement de 0% à 25%, les résultats sont donnés dans le tableau suivant

Tableau 6.2 : les neufs premiers modes pour différents coefficient de frottement.

	Fréquences en (Hz)								
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8	Mode 9
Coef 00	1.73 ^E -08	4.88239	5.81968	<u>7.16133</u>	9.62611	10.3076	10.9834	11.8980	13.7651
Coef 05	2.87388	<u>5.63422</u>	6.28400	8.71568	10.0767	10.3924	11.1396	12.4051	13.9243
Coef 10	3.02406	5.68755	<u>6.37037</u>	9.03884	10.3593	10.4833	11.2121	12.7147	13.9950
Coef 25	3.13462	5.73002	<u>6.42838</u>	9.19377	10.4166	10.7719	11.3008	13.0424	14.0692

On prend les neufs premiers mode, pour chaque coefficient. Le mode fondamental est en gras et souligner dans le tableau, pour les coefficients 10% et 25% on remarque que les fréquences sont très proches de la réalité, tant dises que pour le coefficient de 0% on à une fréquence élevé en réalité ce mode n'existe pas car on ne peut avoir un contact nul entre deux interfaces, pour le coefficient de 5% le mode fondamental est inférieur au mode de 10% et 25% car il y a un frottement entre le barrage et la fondation.

b) Analyse statique à vide :

Pour l'analyse statique on comparera les deux modèles d'interaction sol-structure avec celui sans interaction sol-structure, pour voir l'effet de la présence du sol de fondation sur le comportement statique du barrage. Les figure 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 représente respectivement le déplacement du parement amont suivant les directions X, Y et les contraintes suivant X, Y, XY.

Structure sur sol rigide (Interaction sol structure), et structure sur sol meuble ou l'interaction est significative.

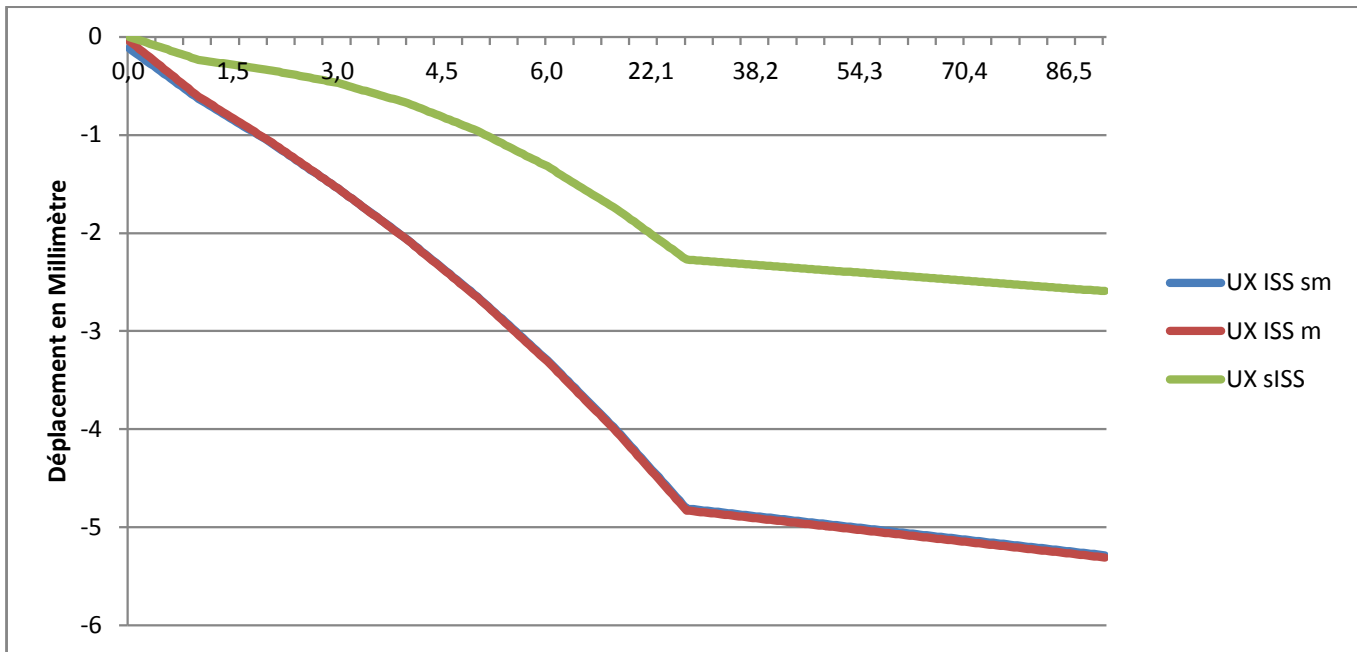


Figure 6.1 : Déplacement suivant X du parement amont des différents barrages.

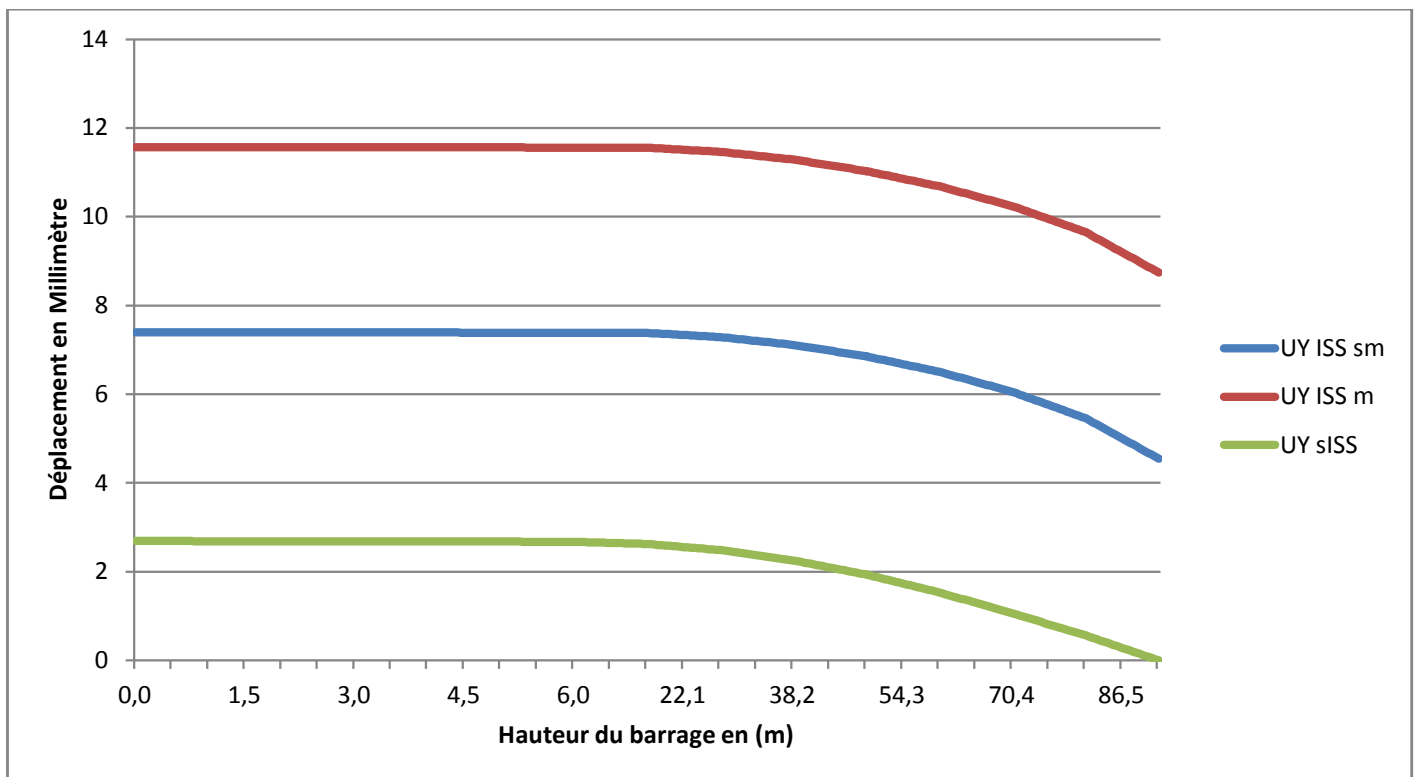


Figure 6.2 : Déplacement suivant Y du parement amont des différents barrages.

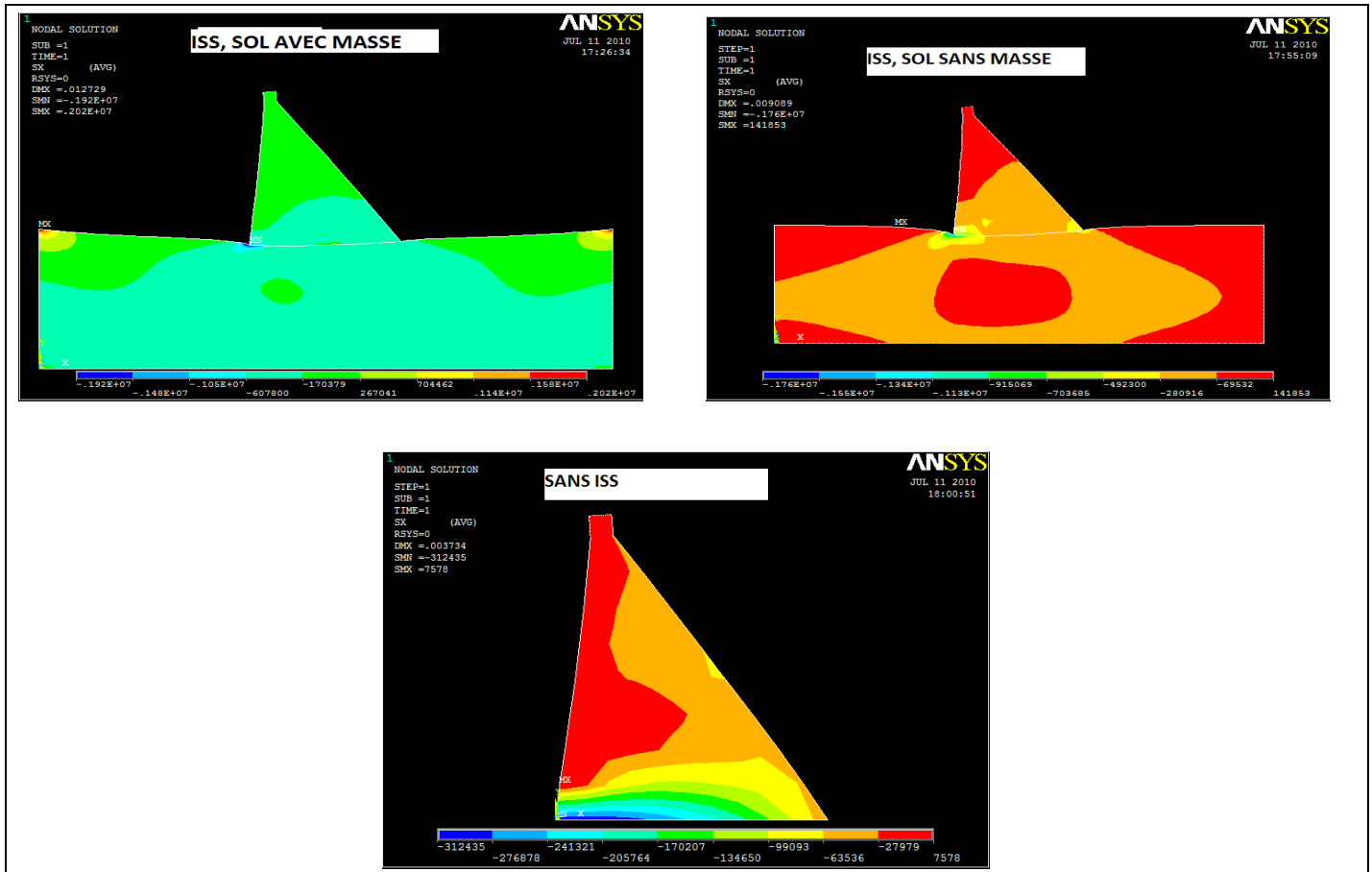


Figure 6.3 : Iso-Contrainte σ_x des différents barrages.

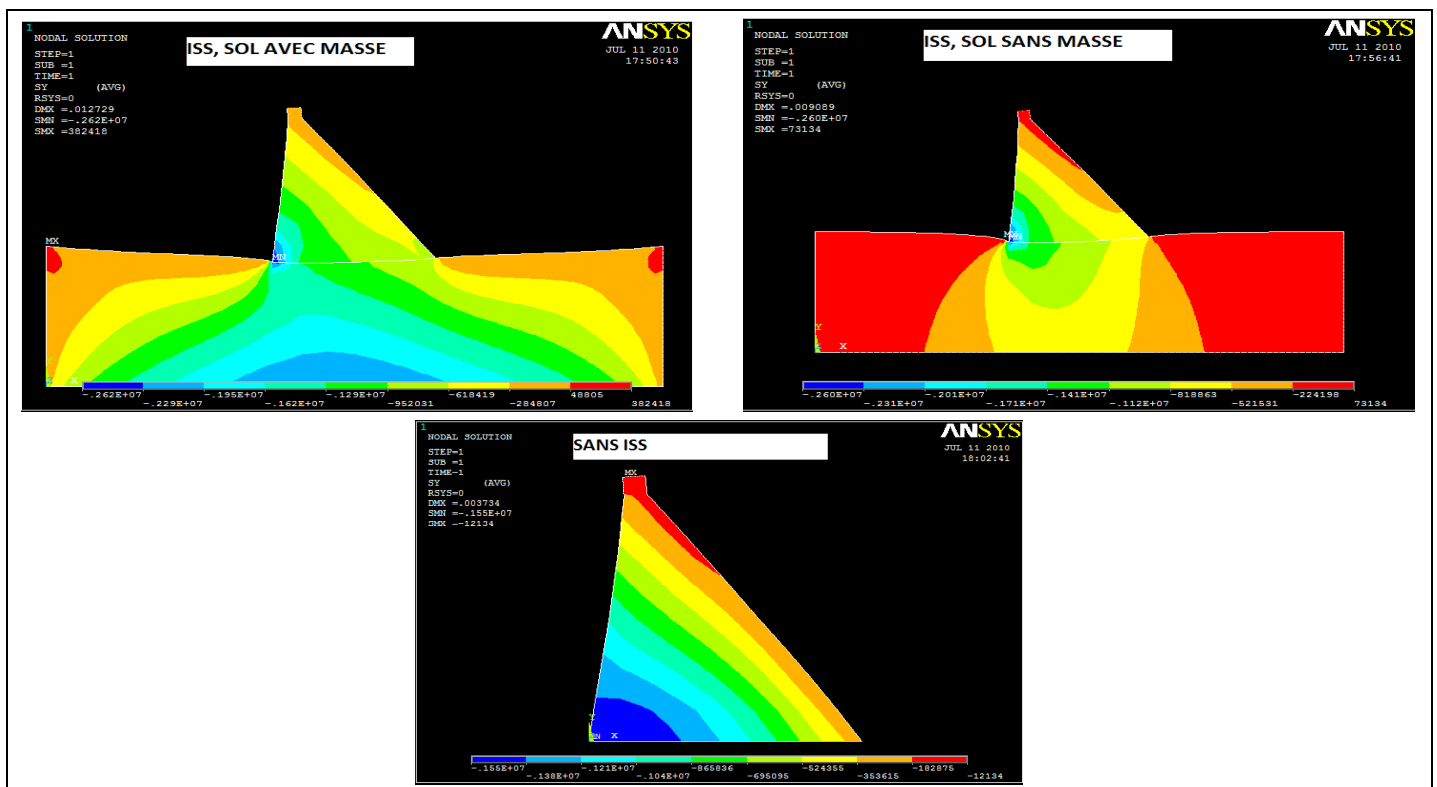


Figure 6.4 : Iso-Contrainte σ_y des différents barrages.

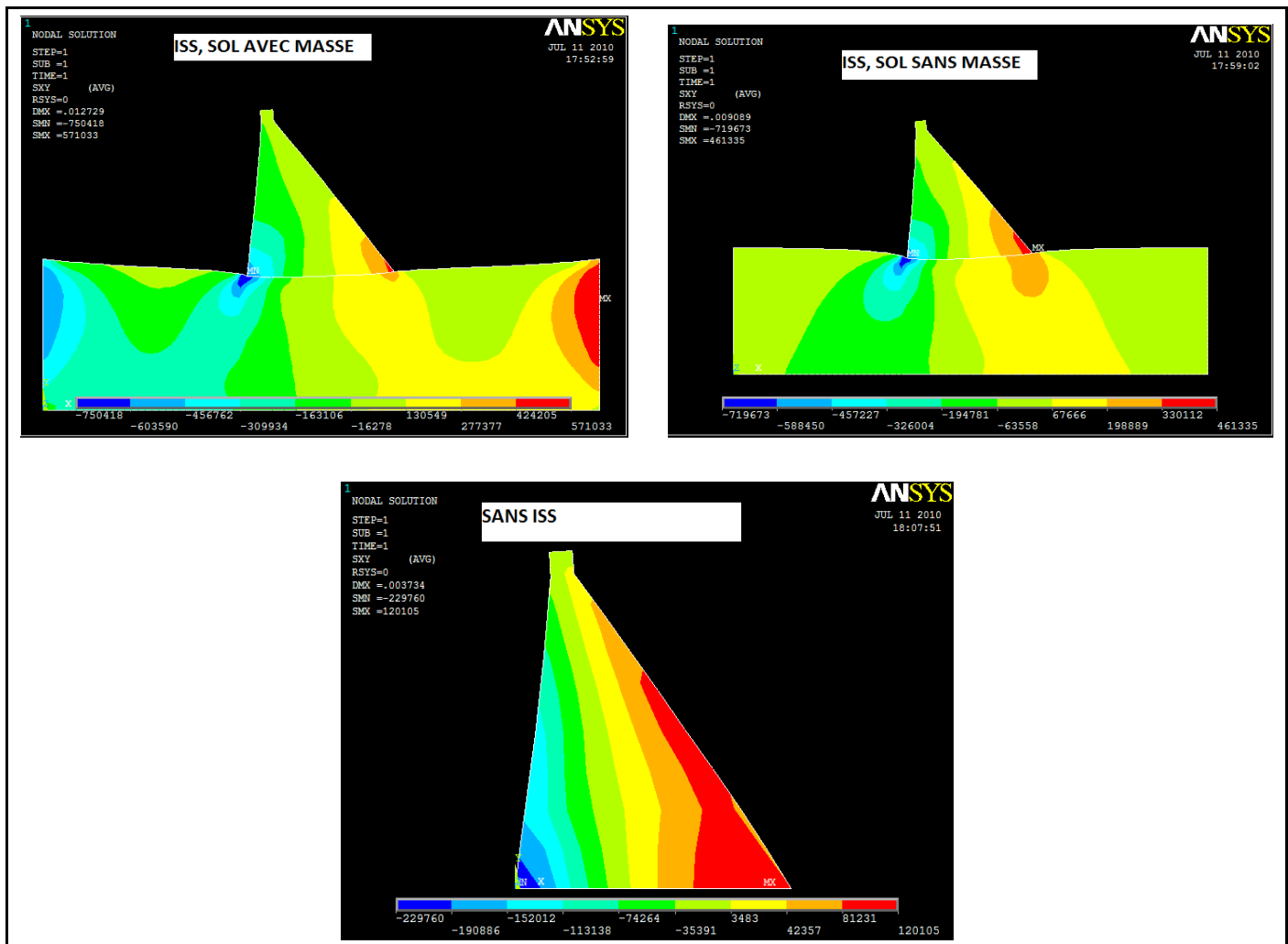


Figure 6.5 : Iso-Contrainte σ_{xy} des différents barrages.

D'après les graphes ci-dessus on distingue que le barrage sans Interaction sol-structure (**sISS**) donne des résultats sous estimés par rapport aux autres modèles du barrage avec interaction ; **Interaction sol-structure (avec et sans masse de sol)**.

On remarque que les résultats obtenus pour les modèles **interaction sol-structure avec masse de sol et interaction sol-structure sans masse**, sont identiques.

Analyse statique avec effet de contact :

Cette analyse permet de constater les différences de comportement de la structure pour les différents coefficients de frottement.

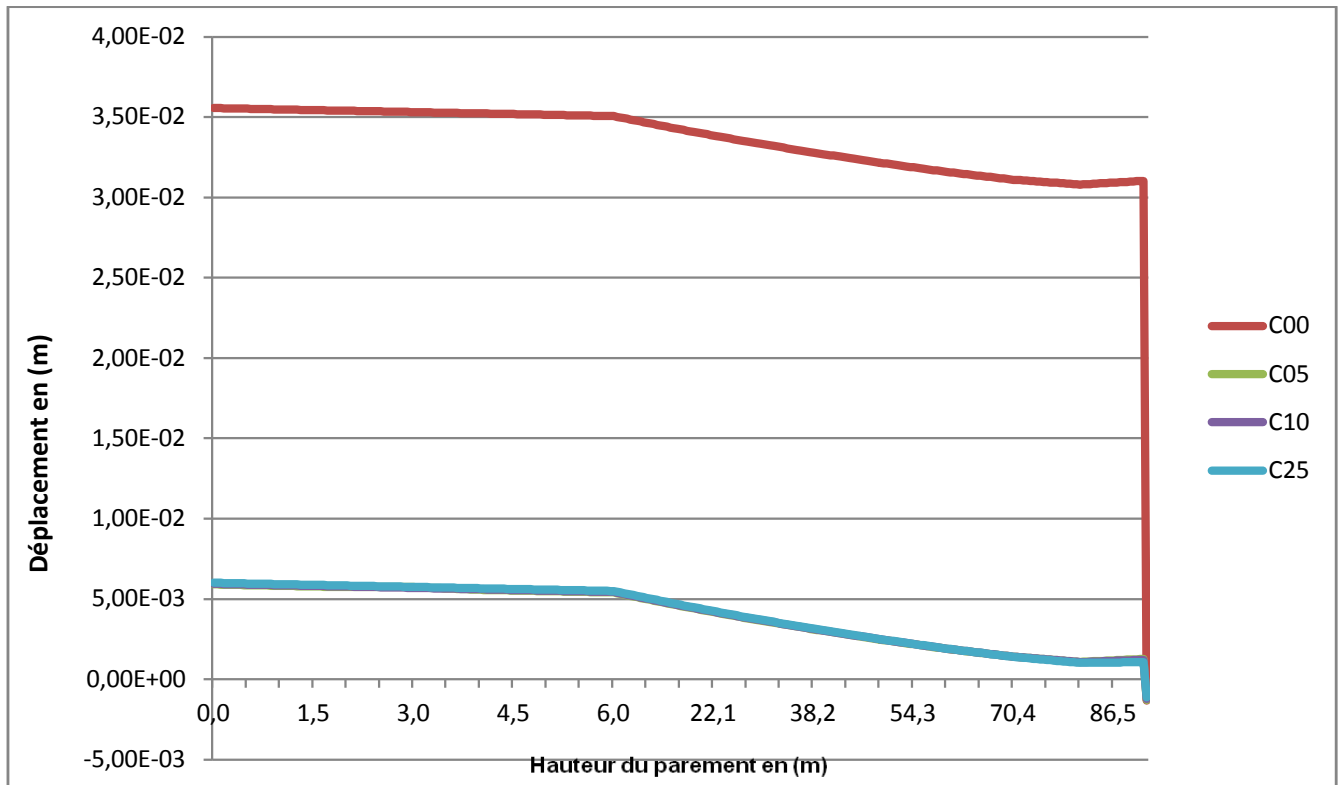


Figure 6.6 : Déplacement suivant X du parement amont pour différents coefficients de frottement.

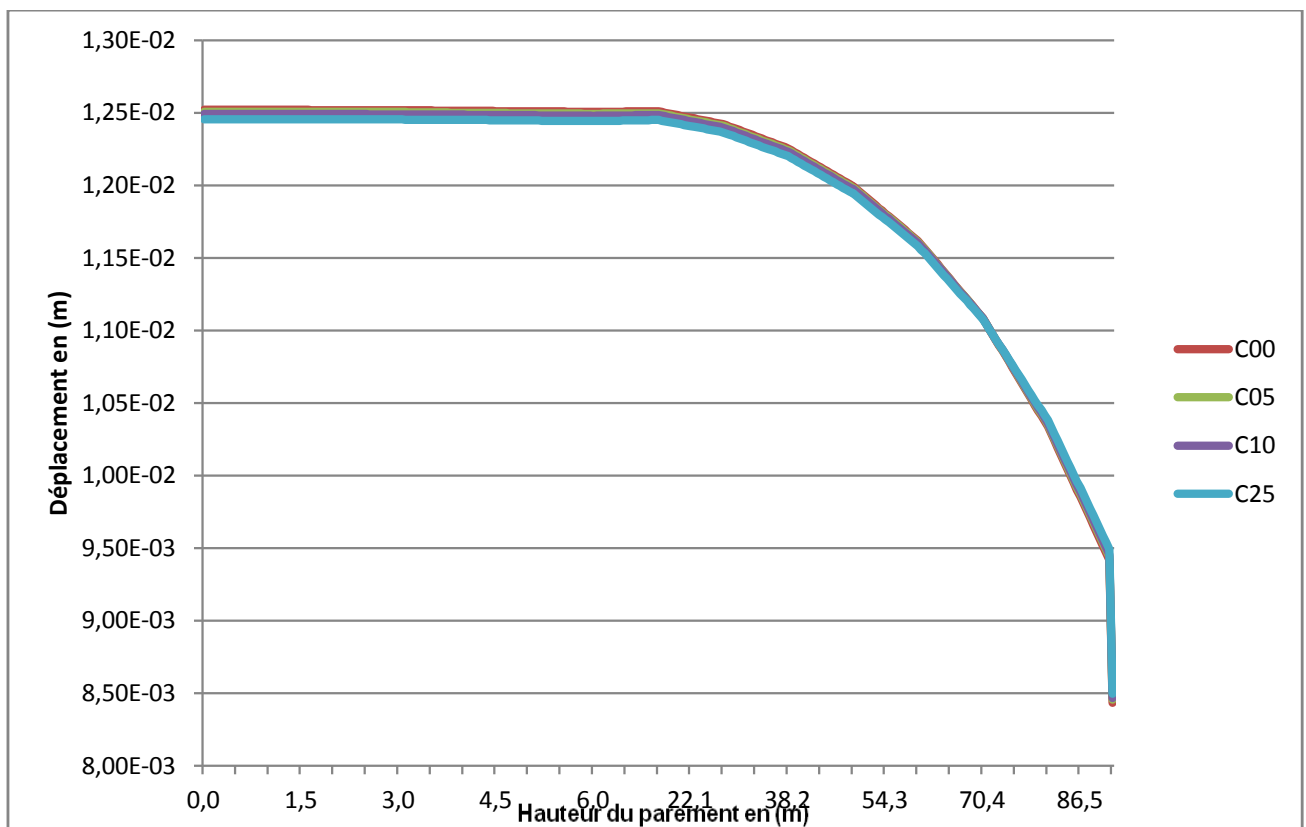


Figure 6.7 : Déplacement suivant Y du parement amont pour différents coefficients de frottement.

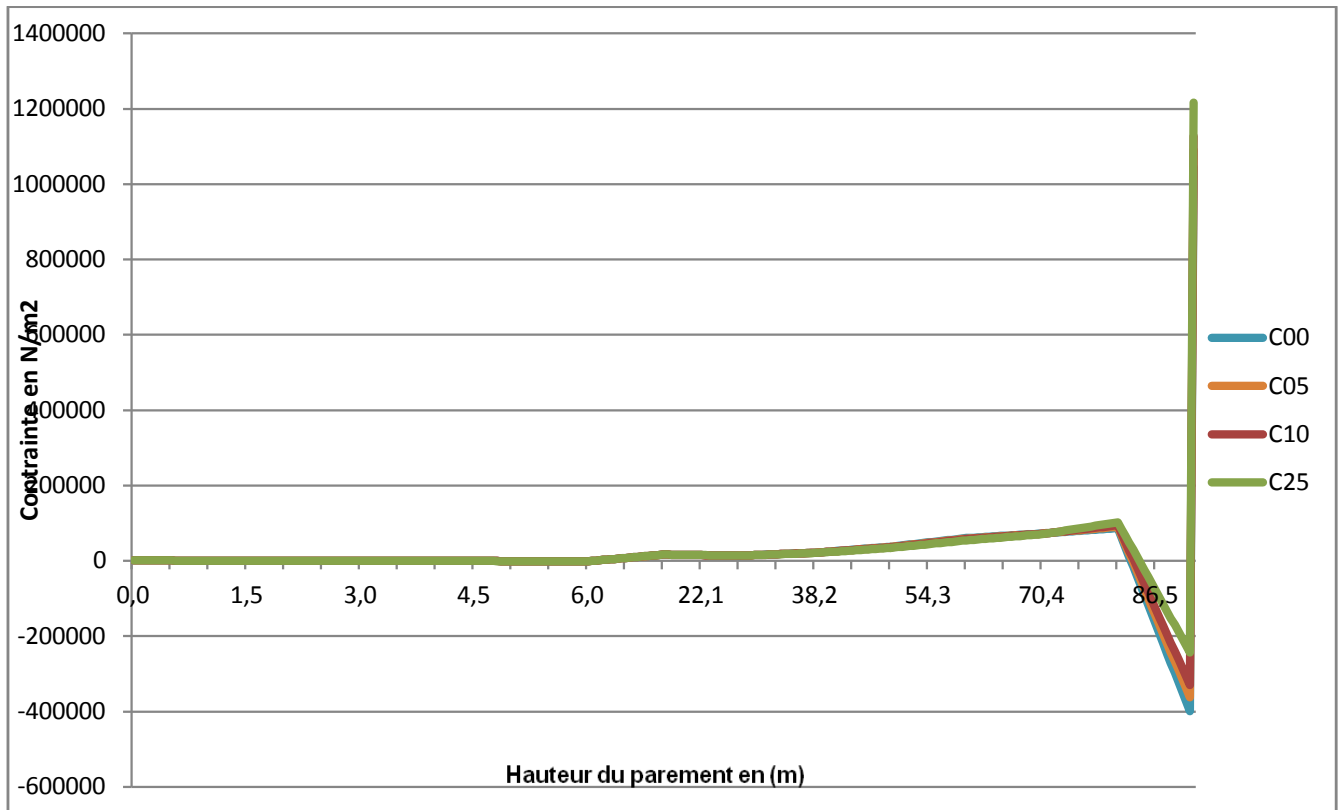


Figure 6.8 : Contraintes σ_x pour différents coefficients de frottement.

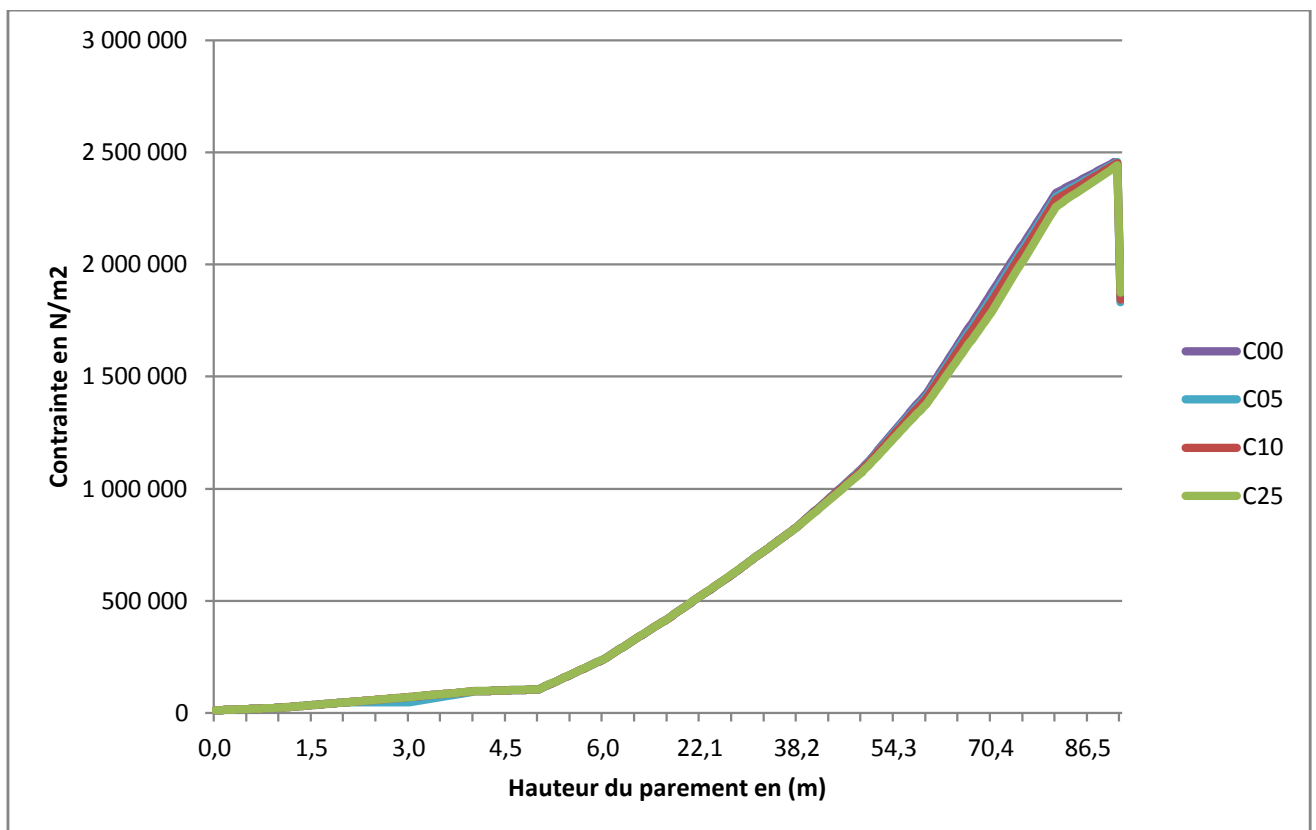


Figure 6.9 : Contraintes σ_y pour différents coefficients de frottement.

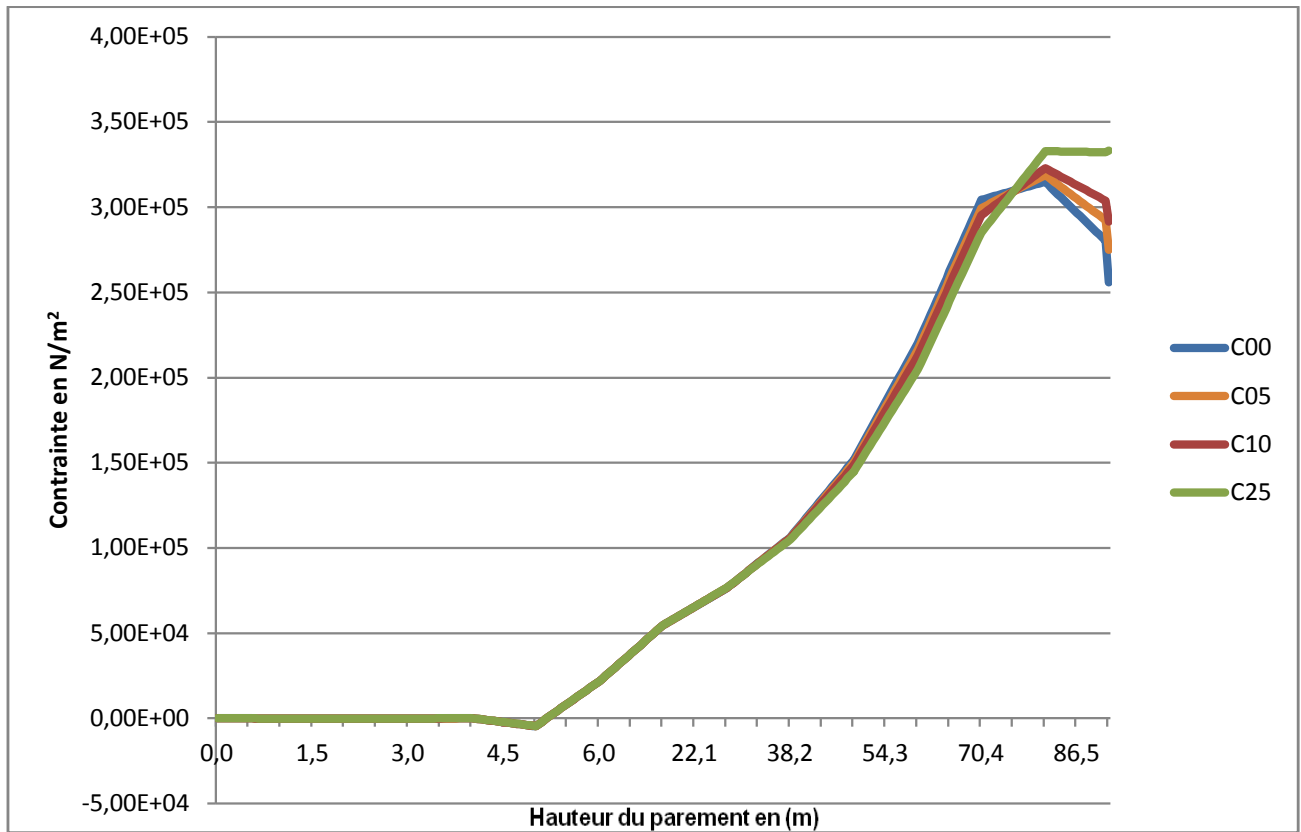


Figure 6.10: Contraintes σ_{xy} pour différents coefficients de frottement.

c) Analyse statique du barrage avec réservoir:

Pour mieux affiner nos résultats on lance une analyse statique, avec une pression hydrostatique, pour constater l'effet de la pression sur le comportement du barrage.

Les graphes ci-dessous représentent le déplacement suivant X et Y ainsi que les contraintes suivant X, Y et XY :

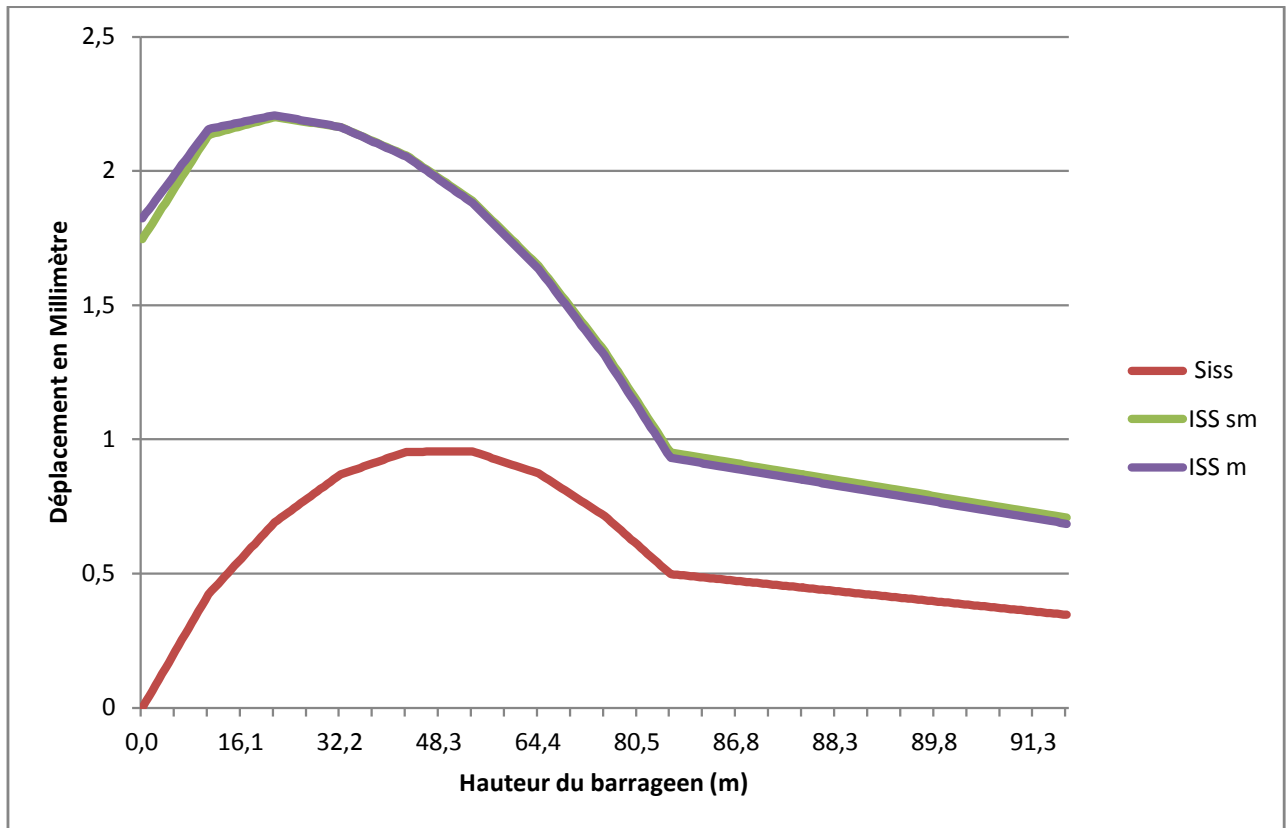


Figure 6.11 : Déplacement suivant X du parement amont des différents barrages.

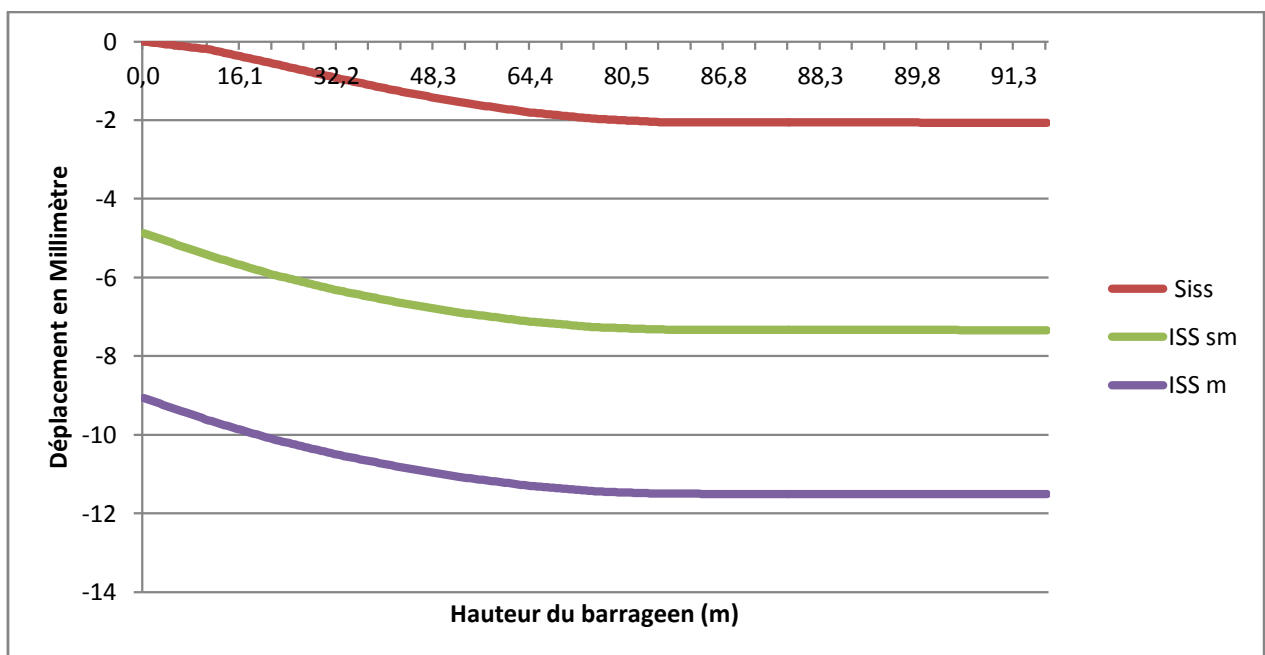


Figure 6.12 : Déplacement suivant Y du parement amont des différents barrages.

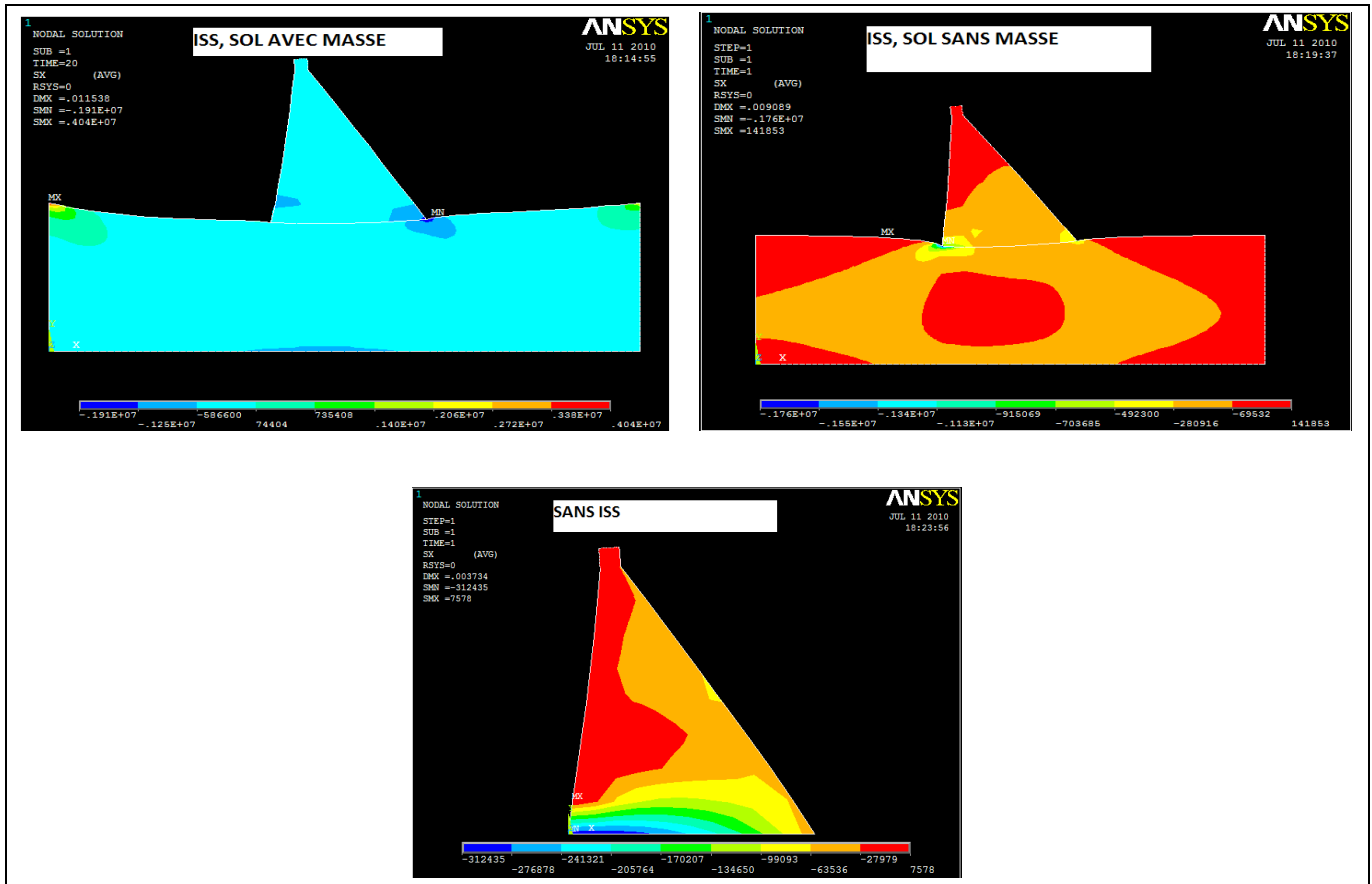


Figure 6.13 : Contraintes σ_x pour différents coefficients de frottement.

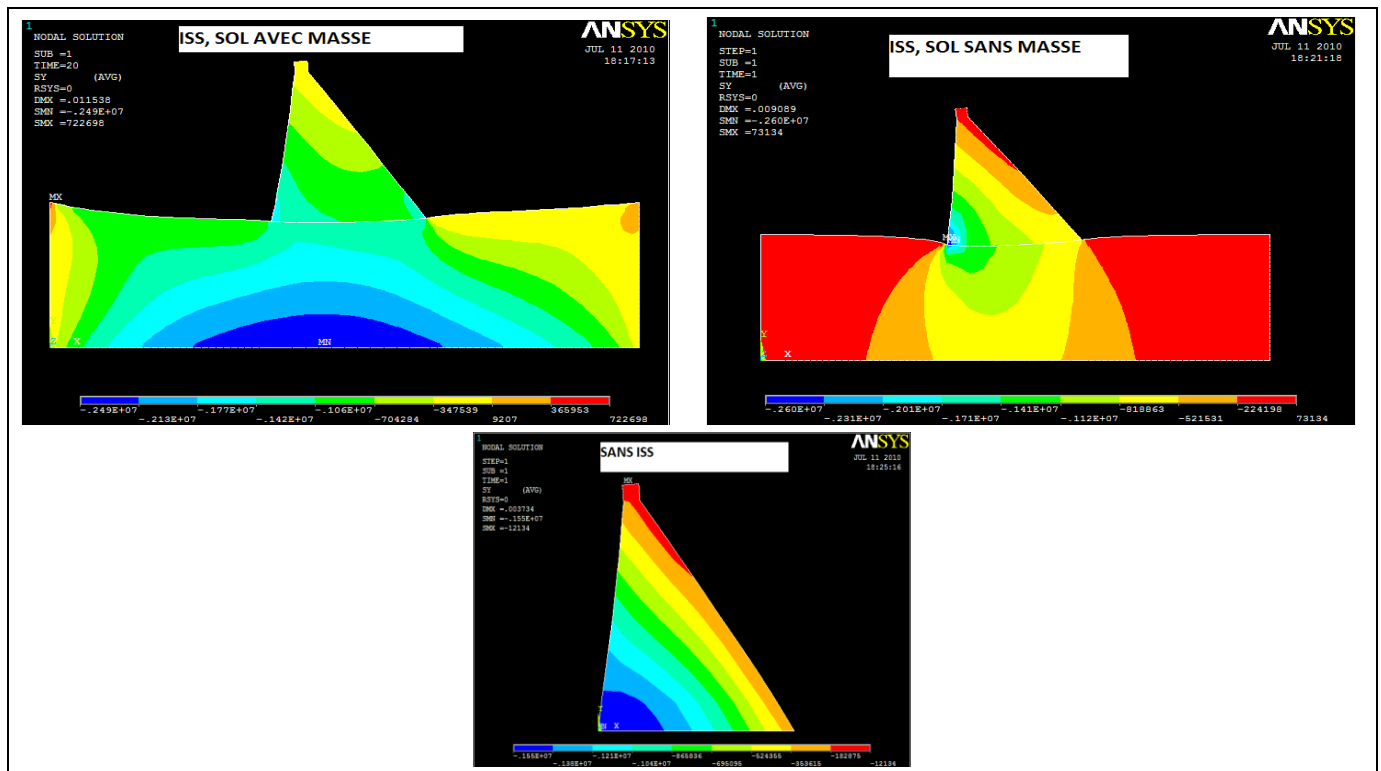


Figure 6.14 : Contraintes σ_y pour différents coefficients de frottement.

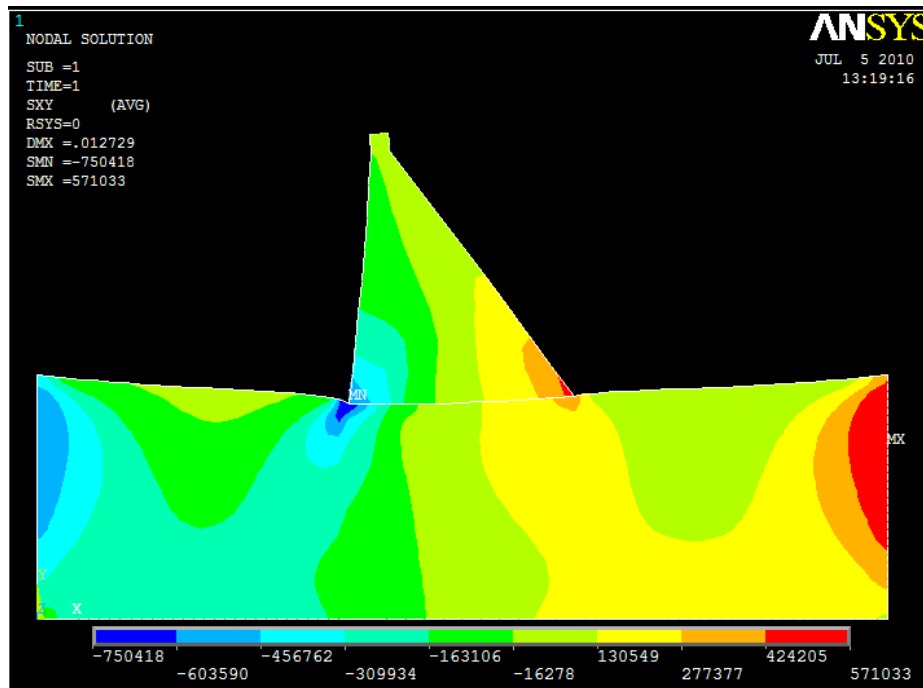


Figure 6.15 : Contrainte suivant XY du parement amont du barrage avec masse de sol.

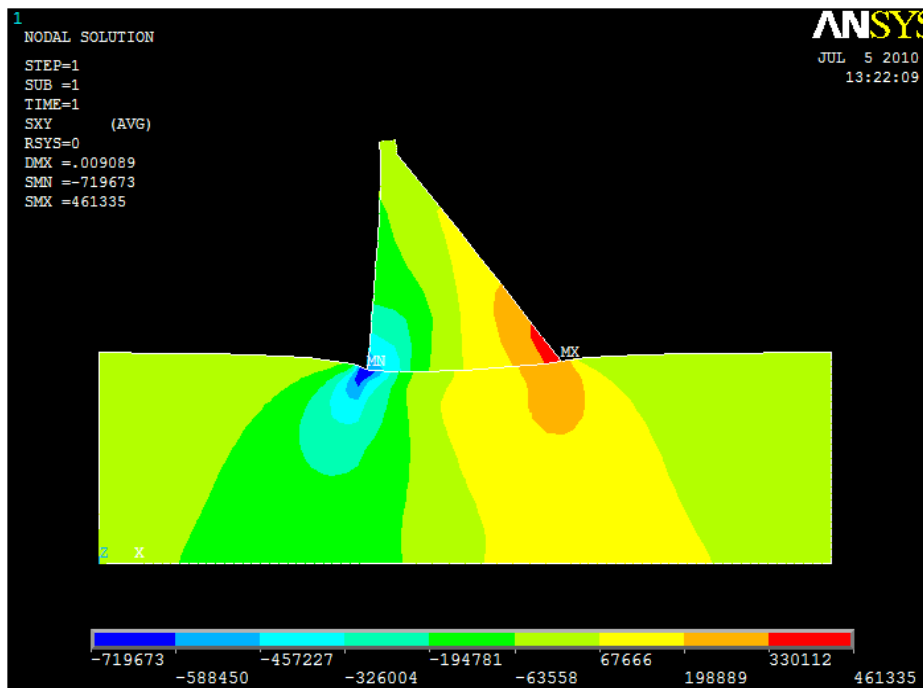


Figure 6.16 : Contrainte suivant XY du parement amont du barrage sans masse de sol.

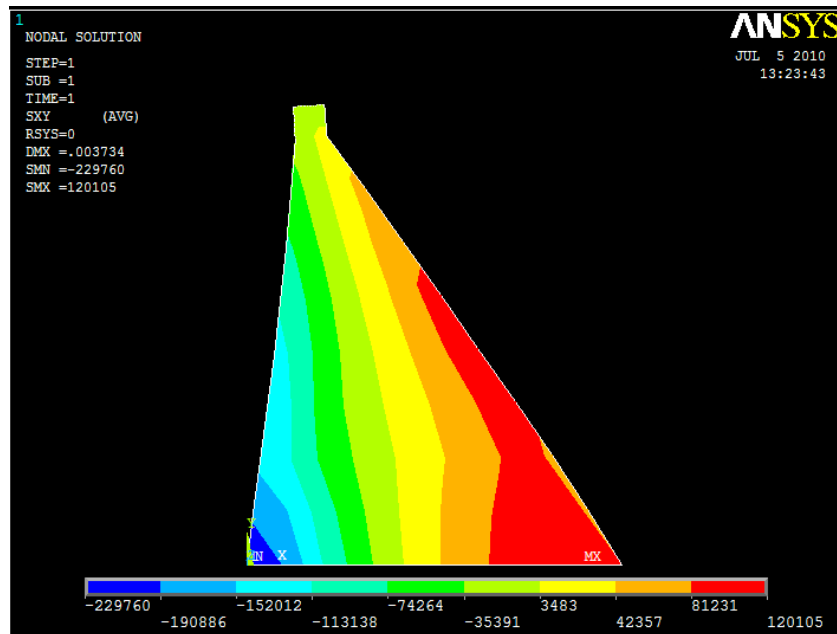


Figure 6.17 : Contrainte suivant XY du parement amont du barrage seul.

d) Analyse dynamique :

Pour voir l'effet d'interaction sol-structure sur le comportement dynamique du barrage, une étude transitoire sous chargement sismique a été menée pour les trois modèles ; **sans interaction sol-structure**, **interaction sol-structure sans masse de sol** et **interaction sol-structure avec masse de sol**.

Le signal sismique choisi est celui de ; « *El centro Earthquake* » (Figure 6.18).

La variation en fonction du temps des déplacements en crête du barrage suivant x, y ainsi que les contraintes suivant x, y, xy et celles de Von Mises sont représentées respectivement sur les figures ci-dessous (de la figure 6.19 jusqu'à la figure 6.24)

Le point choisi est le point situé sur la crête qui a le déplacement le plus important dans le barrage. On l'a pris comme point de référence et de comparaison de nos résultats.

Le signal sismique d'el centro :

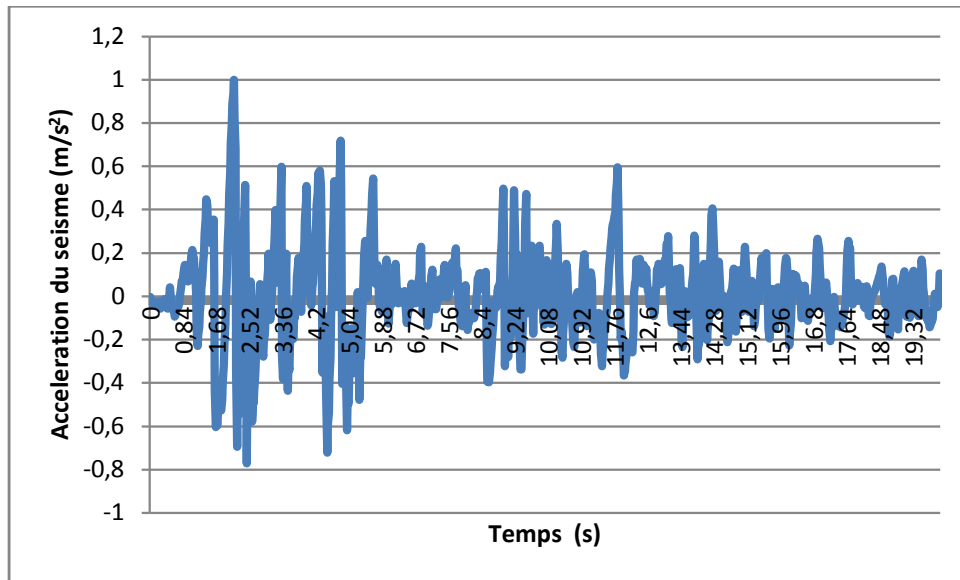


Figure 6.18 : Signal sismique d'El centro.

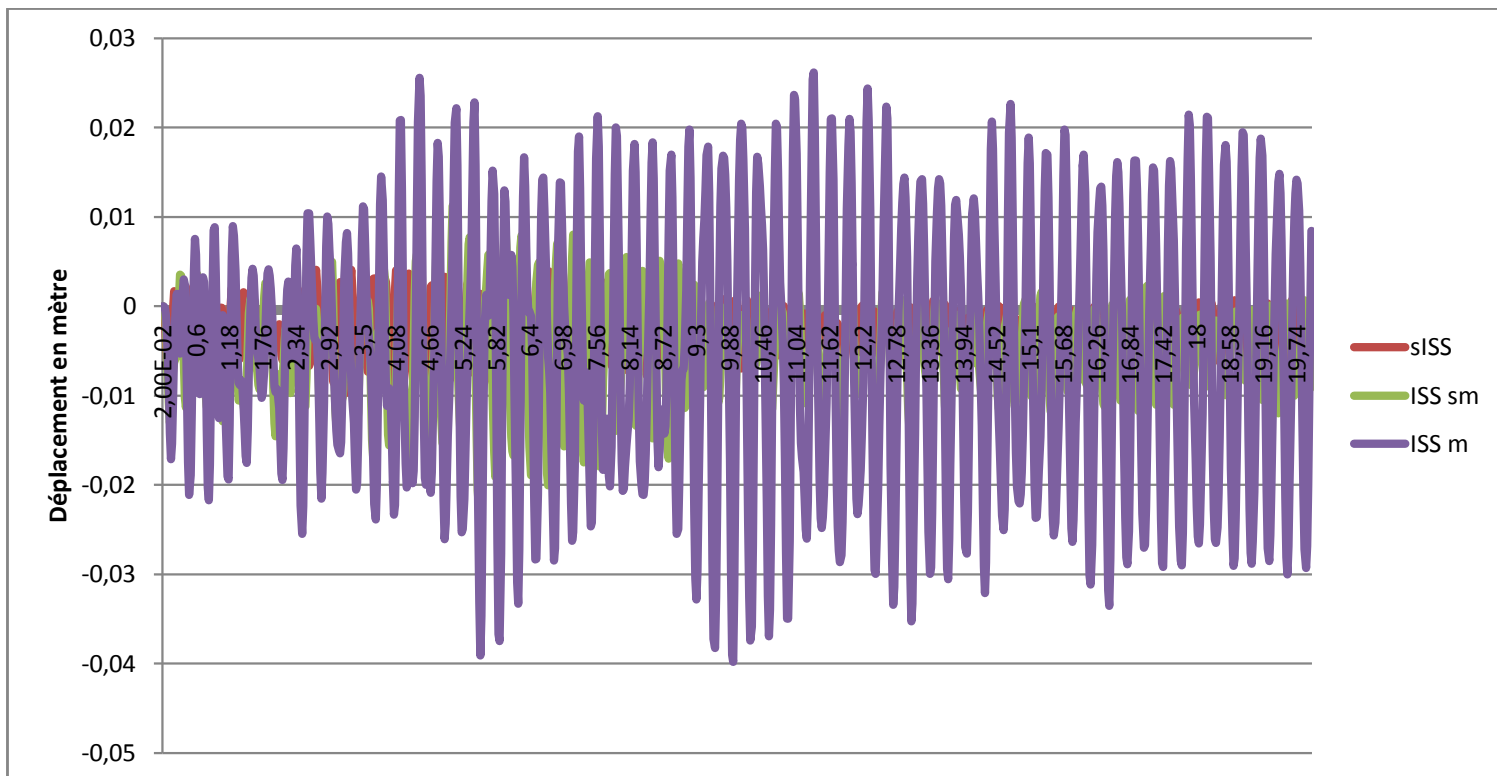


Figure 6.19 : Déplacement suivant X d'un point de la crête des différents barrages.

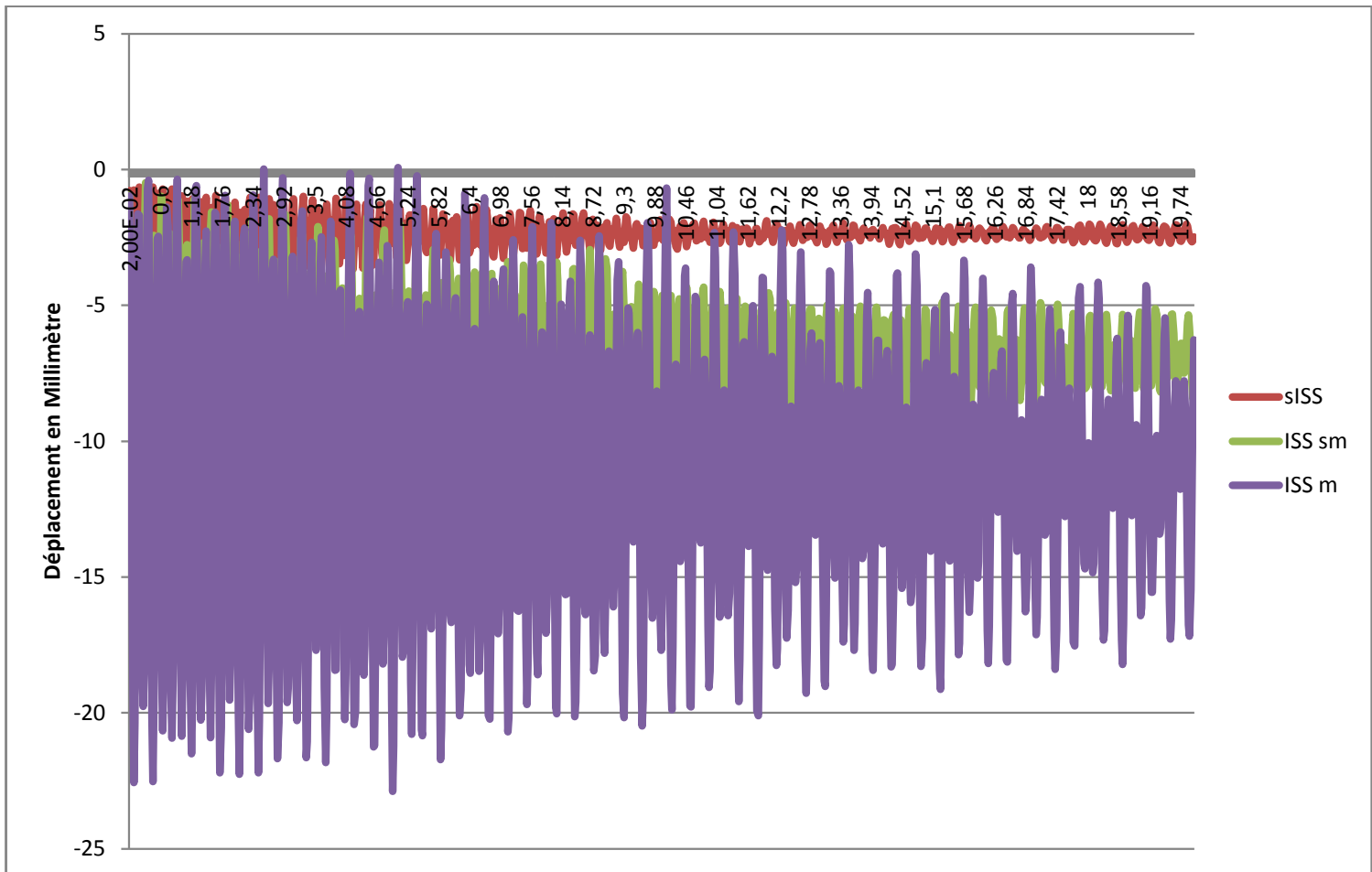


Figure 6.20 : Déplacement suivant Y d'un point de la crête des différents barrages.

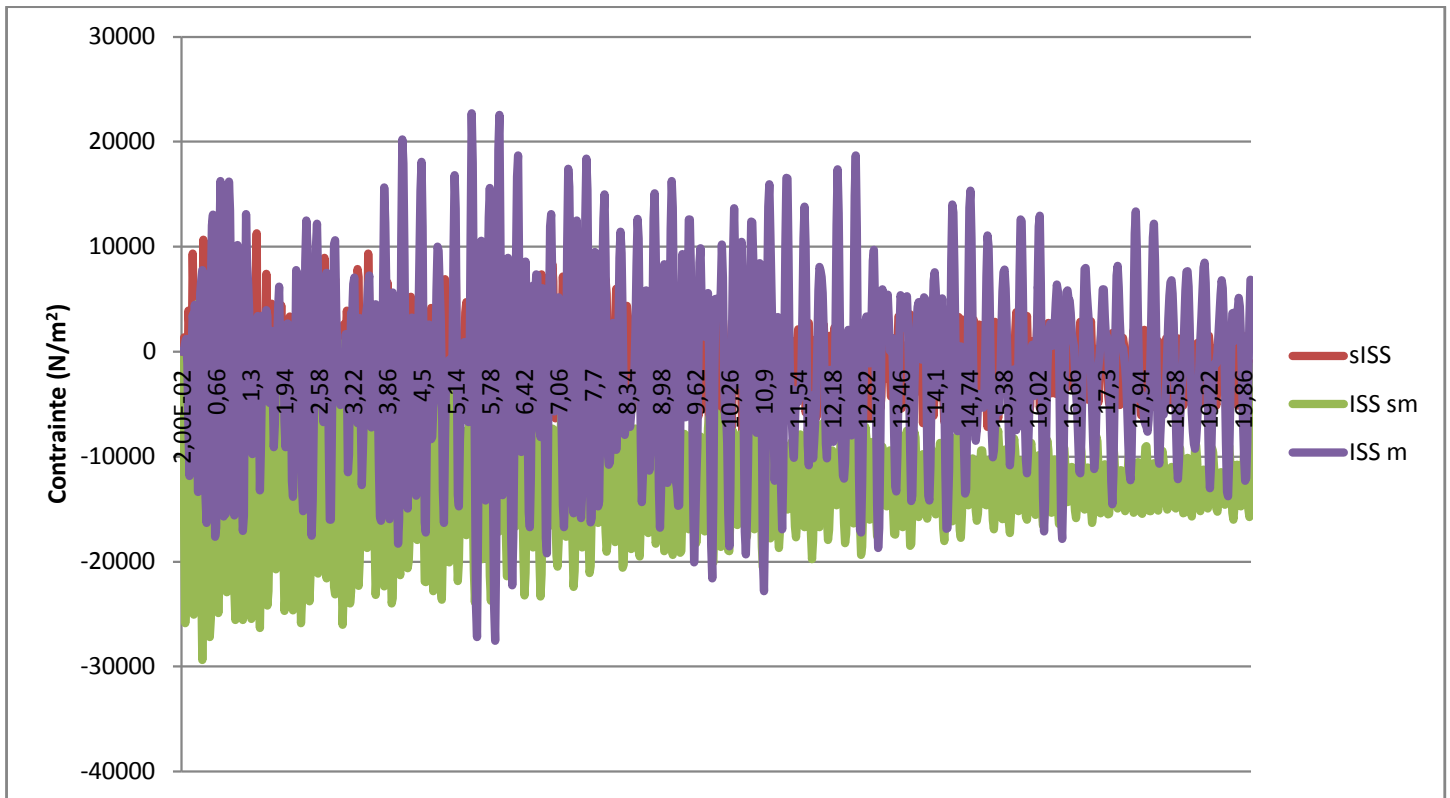


Figure 6.21 : Contraintes suivant X d'un point de la crête des différents barrages.

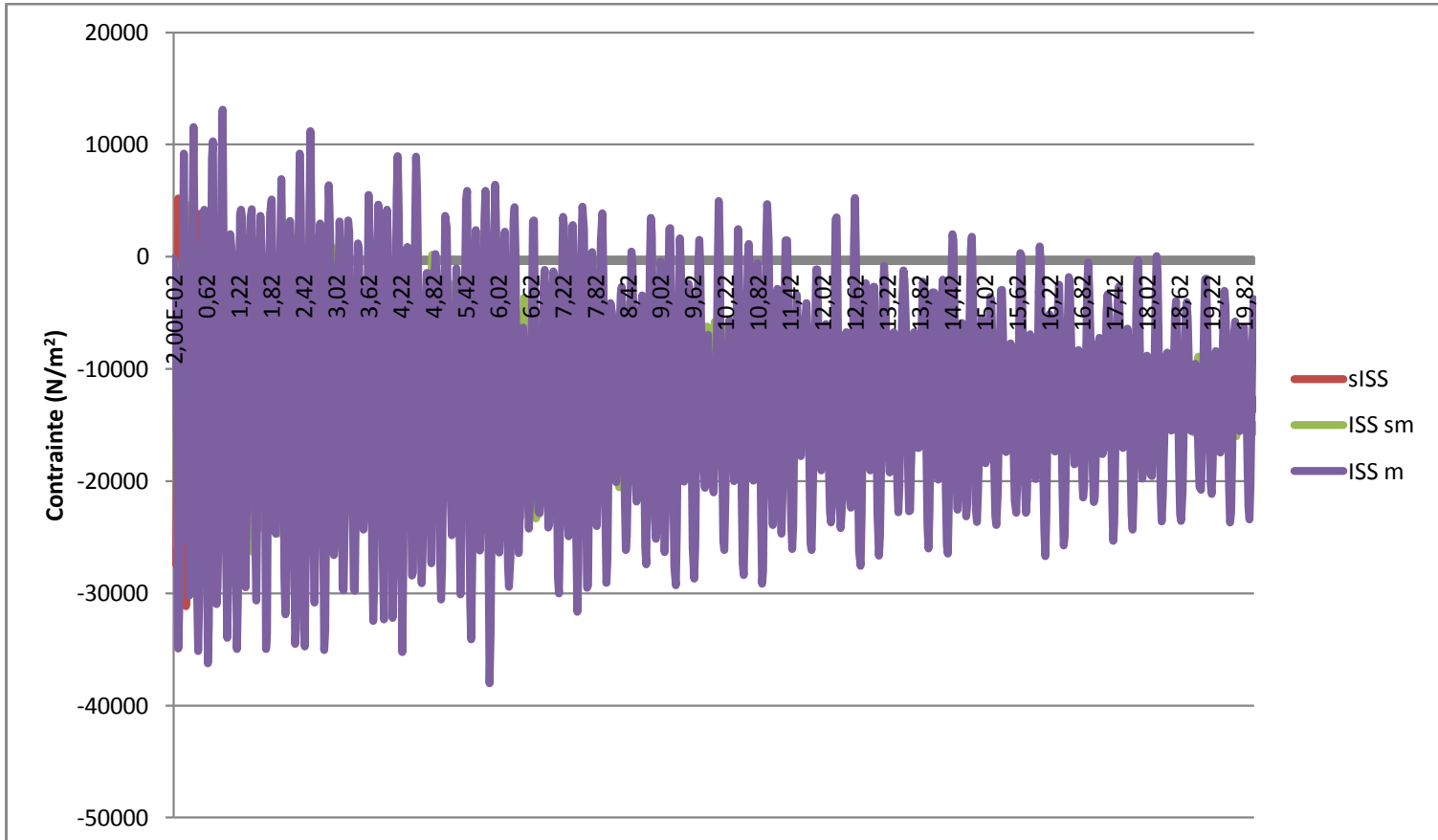


Figure 6.22 : Contraintes suivant Y d'un point de la crête des différents barrages.

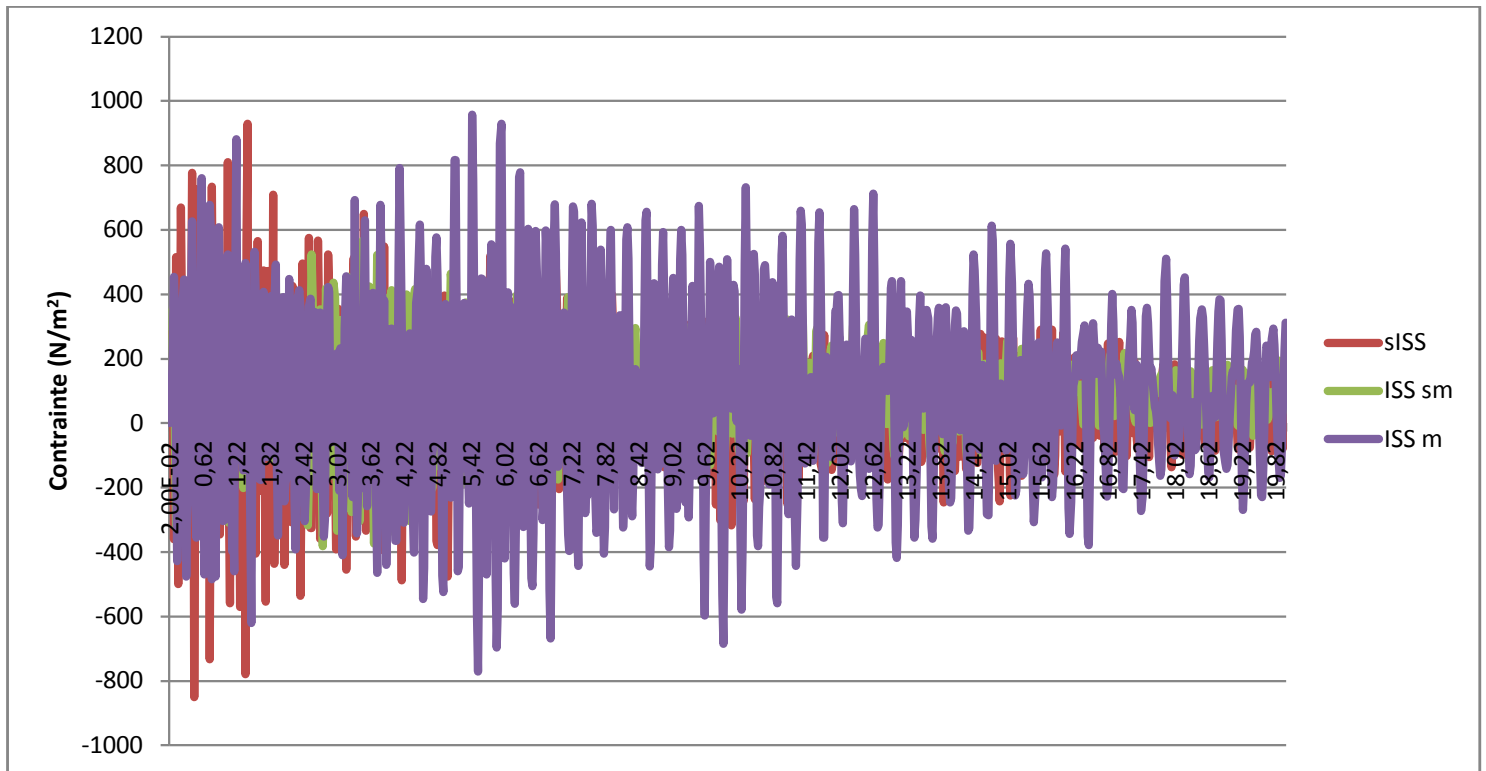


Figure 6.23 : Contraintes suivant XY d'un point de la crête des différents barrages.

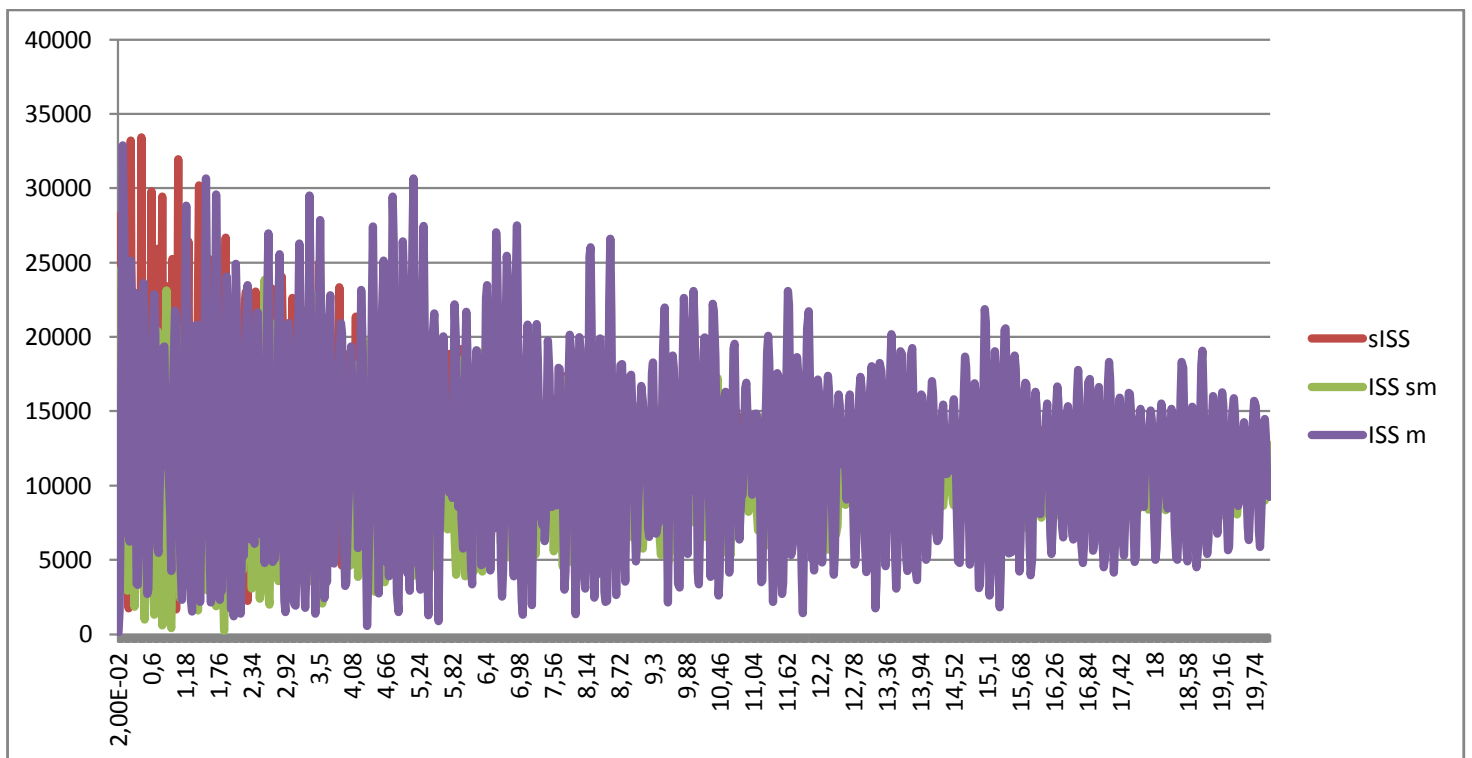


Figure 6.24 : Contraintes « Von Mises stress » d'un point de la crête des différents barrages.

Suites aux résultats obtenus, on remarque que le cas du barrage avec sol modélisé avec masse (**interaction sol-structure avec masse de sol**) est le plus défavorable par rapport aux barrages sans interaction sol-structure et pour le barrage modélisé sans masse de sol.

II. CONCLUSION :

On distingue clairement que d'après les résultats obtenus, le cas le plus défavorable est le cas d'interaction sol-structure prenant en compte la masse de sol.

Pour les différents types d'analyse un seule cas se distingue c'est le barrage avec interaction sol-structure avec masse de sol, l'effet de contact reste négligeable car pour un coefficient de frottement de 25% ou plus la structure est considéré comme collé à la fondation.

Pour la pression de l'eau on distingue clairement que le comportement de la structure change, il reste toujours défavorable pour le cas modélisé avec sol de fondation.

CONCLUSION GENERALE :

La réponse d'une structure pendant un tremblement de terre dépend des caractéristiques ; mouvements du sol, le sol environnant, et la structure elle-même. Dans le présent travail on a étudiée l'effet du sol environnant sur le comportement dynamique de la structure (interaction sol-structure).

Une étude approfondie a été menée pour étudier le comportement structural d'un barrage poids en béton sous des charges sismiques en négligeant l'effet de l'interaction sol-structure tout d'abord, puis en prenant en compte l'effet de l'interaction sol-structure.

La modélisation du barrage a été effectuée par le logiciel ANSYS en 2-D, qui est basé sur la méthode des éléments finis. D'après les résultats des trois analyses effectuées sur les différents barrages on conclue que :

La modélisation du barrage seule avec un encastrement à sa base donne des résultats sous-estimés (barrage sans interaction sol-structure).

Pour les barrages avec interaction sol-structure, le modèle avec masse de sol est le cas le plus défavorable dans cette étude, l'analyse transitoire nous a confirmé que ce cas de figure, ce qui implique que pour avoir de bon résultats la modélisation doit se faire en prenant en compte la masse du sol environnant. Pour le barrage modélise avec le sol environnant sans sa masse ce cas de figure donne des résultats moins défavorables par rapport au barrage modélisé avec masse de sol.

L'effet de contact a été traité dans notre étude, la variation du coefficient de frottement de (0% à 25%) nous a mené à conclure qu'au delà de 25% de valeur du coefficient de frottement le barrage est considéré comme collée au sol de par son poids.

En comparaison avec les études classiques (PFE Djebouri), le logiciel ANSYS prouve que les résultats obtenus sont très proche de la réalité.

ANNEXE :

Après avoir effectué nos calculs avec le logiciel ANSYS, et pour avoir la certitude que les résultats obtenus sont fiables, on prend un projet de fin d'études de Mr Djebouri Idir (2004) de l'école nationale polytechnique qui avait pour thème « *Etude des effets d'interaction dynamique sur un barrage poids en béton* » et on compare les résultats de son travail avec les résultats obtenus avec le logiciel ANSYS du même travail.

Le barrage pris pour l'application est celui Pine Flat (Californie), qui a pour Caractéristiques :

- Masse volumique : $\rho = 2640 \text{ (kg/m}^3\text{)}$.
- Coefficient de Poisson 0.2
- Module de Young : $E = 2600 \text{ (MPa)}$.
- Hauteur du barrage : $H_b : 101\text{m}$.
- Largeur du barrage : $L_b : 65.5 \text{ m}$
- Fruit amont : $f_a=0.1$
- Fruit aval : $f_v=0.55$

La comparaison se fait sur les résultats de l'analyse modale.

Les résultats que Mr Djebouri Idir a obtenus par le code de calcul sont comparés avec ceux obtenus par Mr A.Seghir sur le même barrage, qui a, lui même validé son code par des résultats obtenus par Chopra et Chakrabarti (Référence) avec un code appliqué au barrage de Pine Flat (Californie), ces résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau : les 5 modes propres du barrage avec leurs références.

Modes propres du barrage.	Périodes propres (sec)	Périodes propres (sec.) (Référence)
1	0.270	0.267
2	0.106	0.113
3	0.092	0.093
4	0.067	0.066
5	0.05	0.04

Les résultats obtenus pour une analyse modale avec le logiciel ANSYS sont décrits comme suit dans le tableau suivant :

Tableau : Résultats avec le logiciel ANSYS.

Modes	Fréquences (Hz).	Périodes (Seconde).	Ratio
1	3.77316	0.26503	1
2	9.04253	0.11059	0.791362
3	11.1209	0.089920	0.166401
4	15.7014	0.063689	0.551347
5	23.8274	0.041968	0.394881

CONCLUSION :

On remarque que les fréquences propres sont très proches en comparaison avec la référence du premier tableau, on conclue que le logiciel ANSYS donne de très bons résultats et avec une précision proche de la réalité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

Antar K. (2004), Prise en compte de l'interaction sol-structure dans la réponse des structures en béton armé, Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université des sciences et Technologie Mohamed Boudiaf U.S.T.O.M.B, Oran (Algérie).

Clough Ray w. & Penzien J. (1993), Dynamics of structures, Mcgraw-Hill College.

Djebouri Idir ,(2004) : Etude des effets d'interaction dynamique sur un barrage poids en béton, Projet de fin d'études Ecole nationale polytechnique.

Emilio Rosenblueth (1980), Design of earthquake resistant structures, Design (BNB/ PRECIS).

Encyclopédie Larousse ; Larousse.fr (définition d'un barrage).

Grange S., Kotromis P. & Mazars J. (2008), Modèle simplifié 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique, XXVI^{eme} rencontre universitaires de génie civil, Laboratoire 3S-R et structure Federative Vor, Université Grenoble (France).

Kramer Steven L (1996), Geotechnical earthquake engineering, Serie in Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Washington (USA).

Kutanis M & Elmas M. (2000), Non linear Seismic soil-structure interaction analysis based on the substructure method in the time domaine, Turk J Engin Environ Sci, (617-626).

Lefebvre D. Theroux S. Interaction sol-structure pour le design de bâtiments sur fondations superficielles, soil Dynamics and Earthquake Engineering 24, (379-388).

Oudjene M., Meghlat M. & Bouafia Y. (2005), Influence de la catégorie de site sur le comportement sismique des structures rigide, 7^{eme} colloque national en calcul des structures.

Shakib H. & Fuladgar A. (2004), Dynamic soil-structure interaction effects on the seismic response of asymmetric buildings, Departement of Civil Engineering, Tarbiat Madarres University, Tahrans (Iran).

Tahar Berrabah Amina. (2007): Dynamic soil structure interaction – a case study in Algeria (brezina concrete arch dam), Thèse de magistère Faculty of Graduate studies The University of Jordan.