

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Laboratoire de Génie Sismique & Dynamique des Structures



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du Master en Génie Civil

Présenté par :

Imad Eddine MAALI

Intitulé :

Analyse dynamique transitoire des pressions hydrodynamiques dans les systèmes fluide-barrage en présence d'un fluide compressible et visqueux : Effets des paramètres géométriques

Soutenu publiquement le **16 Juin 2015** devant le jury composé de :

Président :	M. HAMMOUTENE	Professeur	ENP
Encadreurs :	B. TILIOUINE	Professeur	ENP
	A. TADJADIT	M.A.A	ENP
Examineurs :	D. CHERID	M.A.A	ENP
	H. MOHABEDDINE	M.A.A	ENP

ENP 2015

Ecole Nationale Polytechnique. 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger, Algérie
Tel : +213 21 52 53 01/03 – Fax : +213 21 52 29 73
www.enp.edu.d

Remerciements

((اللهم اجعلنا من الشاكرين والمشكورين))

Je me prosterne devant mon dieu sacré qui m'a permis d'effectuer ce mémoire qui symbolise le fruit d'un travail de recherche effectué au sein du laboratoire de Génie Sismique et de Dynamique des Structures de l'Ecole Nationale Polytechnique sous la direction du professeur Boualem. TILIOUINE.

Je remercie infiniment mes chers parents pour m'avoir encouragé et soutenu par tous les moyens tout le long de ma formation et ma vie.

Le suivi de mon promoteur, son immense expérience, sa modestie et sa générosité, sa pédagogie et sa rigueur dans le travail m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je tiens à lui présenter mes remerciements les plus sincères et à lui témoigner ma profonde reconnaissance pour son encadrement, ces conseils et tout le savoir qu'il nous a transmis.

D'autre part, je tiens à adresser un remerciement particulier et un témoignage de reconnaissance à M. Abdelmadjid. TADJADIT pour son soutien effectif et ses précieuses observations.

Je remercie le Pr. HAMMOUTENE qui a bien voulu examiner ce travail et m'honorer par sa participation en tant que président du jury de soutenance.

Enfin, je rends hommage à toutes personnes ayant contribué à ma formation et mon bien-être, de près ou de loin, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Dédicaces

Je dédie cette thèse à ma mère et mon père

À mes grands-parents

À mes tantes, mes cousins, mes cousines, mes oncles

À toute ma famille

À tous mes amis

À toutes personnes ayant contribuées de loin ou de près

À tous mes collèges spécialement ceux de la promotion 2015

À tous ceux qui m'aiment

ملخص

إن تحليل الضغوطات الهيدروديناميكية المطبقة على وجه المنبع من سد صلب معرض لزلزال يشكل خطوة حاسمة خلال تصميم السدود.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثيرات بعض العناصر الهندسية على الضغوطات الهيدروديناميكية المطبقة على السطح البيني سد-خزان خلال الإثارات الزلزالية. خلال هذه الدراسة سيتم استعمال طريقة العناصر المنتهية و طريقة تحليلية لإيجاد حل للإشكالية.

إن تحليل النتائج المحصل عليها سيسمح لنا باستيعاب الظاهرة بشكل جيد، ويمكننا من اختيار العناصر المثالية خلال مرحلة تصميم السد للحصول على هيكل اقتصادي وآمن.

الكلمات المفتاحية: سد خرساني، عناصر منتهية، ضغوطات هيدروديناميكية، استجابة زلزالية، انضغاطية، لزوجة.

Résumé

L'analyse des surpressions hydrodynamiques exercées sur le parement amont d'un barrage rigide soumis à un séisme constitue une étape capitale lors de la conception des barrages.

Cette étude a pour objectif d'évaluer les effets de quelques paramètres géométriques sur les surpressions hydrodynamiques qui s'exercent sur l'interface fluide-structure lors des excitations sismiques. La méthode des éléments finis et une méthode analytique sont utilisées pour trouver une solution au problème.

L'analyse des résultats trouvés permettrait de comprendre mieux le phénomène et de pouvoir choisir les paramètres optimaux lors de la conception pour avoir une structure économique et sûre.

Mots clés : barrage poids en béton, éléments finis, surpressions hydrodynamiques, réponse sismique, Compressibilité, viscosité.

Abstract

Analysis of the hydrodynamic overpressures on the upstream face of a rigid dam subjected to earthquake constitutes a crucial step in the design of dams.

This study aims to evaluate the effects of some geometrics parameters on hydrodynamic pressures exerted on the fluid-structure interface during seismic excitations. The finite element method and an analytical method are used to find a solution to the problem.

Analysis of the results will help to better understand the phenomenon and to choose the optimal parameters when designing for an economical and safe structure.

Key words: Concrete gravity dam, finite elements, hydrodynamic pressures, seismic response, compressibility, viscosity.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I Séismes et barrages	2
I.1. Séismes.....	2
I.1.1. Introduction.....	2
I.1.2. Les ondes sismiques	2
I.1.3. Sismographe	4
I.2. Barrage	7
I.2.1. Introduction.....	7
I.2.2. Types de barrages.....	7
I.2.2.1. Les barrages- poids	8
I.2.3.2. Les barrages-voûte	10
I.2.3.3. Le barrage à contreforts	11
I.2.4. Les forces agissant sur un barrage :	12
I.2.4.1. Poids propre	12
I.2.4.2. Poussée de l'eau :	12
I.2.4.3. Sous pression :	12
I.2.4.4. Forces sismiques :	12
I.2.4.5. Forces dues à la température :	13
I.2.4.6. Forces dues au gel :	13
I.2.4.7. Forces liées aux crues :	13
I.3. Conclusion	13
Chapitre II Formulation du problème	14
II.1. Introduction.....	14
II.2. Modélisation du réservoir	14
II.2.1. Condition aux limites	15
II.2.1.1. Conditions de type Dirichlet	15
II.2.1.2. Conditions de type Neumann	15
II.5. conclusion	16
Chapitre III Approche analytique.....	17

III.1. Equation gouvernante	17
III.2. Application numérique	19
III.3. Excitation sismique.....	22
III.3.1. Décomposition du signal à l'aide de la transformée de Fourier	23
Chapitre IV Etude paramétrique	26
IV.1. Introduction	26
IV.2. Effet de la limite de rayonnement.....	26
IV.3. Effet de la hauteur du barrage	28
IV.4. Effet du fruit du barrage.....	29
IV.4.1 Parement totalement incliné (fruit simple)	30
IV.4.2 Parement partiellement incliné (fruit composé)	31
IV.5. Conclusion.....	35
Conclusion générale	36
Bibliographie	

Liste des figures

Figure I-1: Ondes de type p	2
Figure I-2: Ondes de type S	3
Figure I-3: L'effet des ondes de RAYLEIGH sur les milieux traversé	4
Figure I-4: L'effet des ondes de LOVE sur les milieux traversé	4
Figure I-5 : Sismographe d'East Han	5
Figure I-6 : Sismographe classique	6
Figure I-7 : Sismogrammes	6
Figure I-8: Barrage poids	9
Figure I-10: barrage-voûte	11
Figure I-12: Barrage de Roselend, contreforts du Méraillet	12
Figure II-1 : Barrage à fruit composé	14
Figure III-1 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $x=0, t=0$, $\omega=95\% \omega_1$ (a), $\omega= \omega_1$ (b), $\omega=105\% \omega_1$ (c)	19
Figure III-2 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $x=5H, t=0$, $\omega = 95\% \omega_1$ (a), $\omega = \omega_1$ (b), $\omega = 105\% \omega_1$ (c)	20
Figure III-3 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $t=0, \omega=\omega_1$, $x=0$ (a), $x = 3H$ (b), $x=7H$ (c)	21
Figure III-4 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $t=0, \omega=2\omega_1$, $x=0$ (a), $x = 3H$ (b), $x=7H$ (c)	22
Figure III-5 : (a) Accélérogramme du séisme El Centro, (b) Transformée de Fourier de l'accélérogramme	24
Figure III-6 : (a) Fonction de transfert, (b) Réponse de la structure	25
Figure IV-1 : Variation de C_p en fonction de la limite de rayonnement pour un fluide incompressible	27
Figure IV-2 : Variation de C_p en fonction de la limite de rayonnement pour un fluide compressible	28
Figure IV-3 Variation de C_p en fonction de la hauteur du barrage	29
Figure IV-4 : Barrage rigide à fruit irrégulier ($\beta = 45$)	29
Figure IV-5 : Variation de C_p en fonction du fruit du barrage pour un fluide incompressible	30
Figure IV-6 : Variation de C_p en fonction du fruit du barrage pour un fluide compressible	31
Figure IV-7 : Variation de C_p en fonction du fruit composé ($\beta = 45$) du barrage pour un fluide incompressible	32
Figure IV-8 : Variation de C_p en fonction du fruit composé ($\beta = 45$) du barrage pour un fluide compressible	33
Figure IV-9 : Variation de C_p en fonction du fruit composé ($\beta = 30$) du barrage pour un fluide incompressible	34
Figure IV-10 : Variation de C_p en fonction du fruit composé ($\beta = 30$) du barrage pour un fluide compressible	35

Liste des tableaux

Tableau IV-1 : Influence de la limite de rayonnement pour un fluide incompressible	26
Tableau IV-2 : Influence de la limite de rayonnement pour un fluide compressible	27
Tableau IV-3 : Influence de la hauteur du barrage pour un fluide compressible	28
Tableau IV-4 : Influence du fruit simple pour un fluide incompressible	30
Tableau IV-5 : Influence du fruit simple pour un fluide compressible	30
Tableau IV-6 : Influence du fruit composé ($\beta = 45$) pour un fluide incompressible	32
Tableau IV-7 : Influence du fruit composé ($\beta = 45$) pour un fluide compressible.....	32
Tableau IV-8 : Influence du fruit composé ($\beta = 30$) pour un fluide incompressible	33
Tableau IV-9 : Influence du fruit composé ($\beta = 30$) pour un fluide compressible.....	34

Liste des symboles utilisés

c : Fraction de la hauteur du liquide dans le réservoir.

μ : Viscosité dynamique du fluide.

ω : Pulsation d'excitation.

PGA : Valeur maximale de l'accélération du sol.

C_p : Coefficient des pressions hydrodynamiques.

K : Nombre d'onde.

Hf : Hauteur du fruit.

Hr : Hauteur du réservoir.

λ^c : Module lamé complexe.

λ : Longueur d'onde.

Δ : Poids spécifique du béton.

g : Accélération gravitationnelle.

H : Hauteur du fluide dans le réservoir.

K : Coefficient d'élasticité du fluide.

n : La normale à l'interface barrage-réservoir.

p : Pression hydrodynamique.

t : Temps.

θ : Angle entre la normale au parement amont et la direction des x .

ω_n : Pulsation propre du réservoir

Ω_F : Domaine du réservoir.

Δ : Opérateur Laplacien.

∇ : Opérateur gradient.

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

Y : La profondeur considérée.

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

S1 : La partie inclinée de l'interface barrage-réservoir.

S2 : La partie verticale de l'interface barrage-réservoir.

S3 : La surface libre du liquide dans le réservoir.

S4 : La frontière limite du réservoir.

S5 : Le fond du réservoir.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les barrages sont des ouvrages d'arts hydrauliques très complexes dont le but est de soulever le niveau d'eau pour créer des réserves d'eau pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable, pour régulariser une voie de navigation ou pour produire de l'énergie. Ils existent depuis la préhistoire (réserve d'eau potable, d'irrigation viviers, piscicultures et autres), les premiers barrages construits étaient en Jordanie et en Egypte environs 3000 ans avant J-C. Plus tard, les besoins en eaux se sont accrus surtout avec l'industrie moderne, notamment les centrales thermoélectriques et les usines hydroélectriques ; ceci a fait que les techniques des barrages ont enregistrées de grands progrès et les experts se sont approfondis dans les recherches jusqu'à obtenir aujourd'hui des barrages exceptionnels tel que le barrage de Nourek en Tadjikistan, le plus haut au monde avec une hauteur de 304m, et le barrage des trois gorges en Chine qui a la plus grande centrale hydroélectrique du monde avec une puissance de 22500 MégaWatts.

Les barrages sont des ouvrages d'art dont la conception et la construction demeurent très complexes. Ils constituent des points économiques et stratégiques très importants. Cependant leur rupture peut engendrer des conséquences dévastatrices pour les populations avoisinantes. Donc il est primordial pour l'ingénieur d'étudier le comportement dynamique des barrages en modélisant le problème correctement afin d'avoir de bonnes estimations en vue de l'évaluation de leurs performances, leurs stabilité et leurs sécurité.

La réalisation des structures telles que les barrages peut atteindre des prix stratosphériques. L'analyse des résultats obtenus par des études comme celle-ci pourrait permettre de comprendre mieux le phénomène et de pouvoir choisir les paramètres optimaux lors de la conception pour avoir une structure économique et sure.

Ce travail consiste à lever l'ombre sur une partie fort-intéressante de l'étude de ces structures concernant l'analyse du comportement du barrage face aux sollicitations sismiques. L'objectif principal étant d'établir la distribution des surpressions hydrodynamiques à l'interface fluide-barrage en supposant que le fluide contenu dans le réservoir est compressible et visqueux afin de pouvoir déterminer l'effet de la compressibilité et de la viscosité sur la distribution de ces dernières.

Dans le premier chapitre nous donnerons un aperçu sur la sismologie et les barrages. Le second chapitre sera consacré à la formulation du problème. Le troisième chapitre traitera une approche analytique du problème. Le dernier chapitre fera l'objet d'une étude paramétrique, et en guise de finition nous donnerons des conclusions et des recommandations qui achèveront notre travail.

CHAPITRE I
SEISMES ET BARRAGES

Chapitre I Séismes et barrages

I.1. Séismes

I.1.1. Introduction

Les séismes sont des secousses du sol résultant de la libération brusque d'énergie due à la rupture d'une roche en profondeur le long d'une faille. Ils représentent un véritable danger qui peut engendrer d'énormes pertes humaines et matérielles et causer un véritable désastre.

I.1.2. Les ondes sismiques

I.1.2.1. Ondes de volumes

I.1.2.1.1. Les ondes primaires (P)

Sont des ondes longitudinales de compression et de dilatation. Elles se propagent parallèlement par rapport à leur direction de propagation.

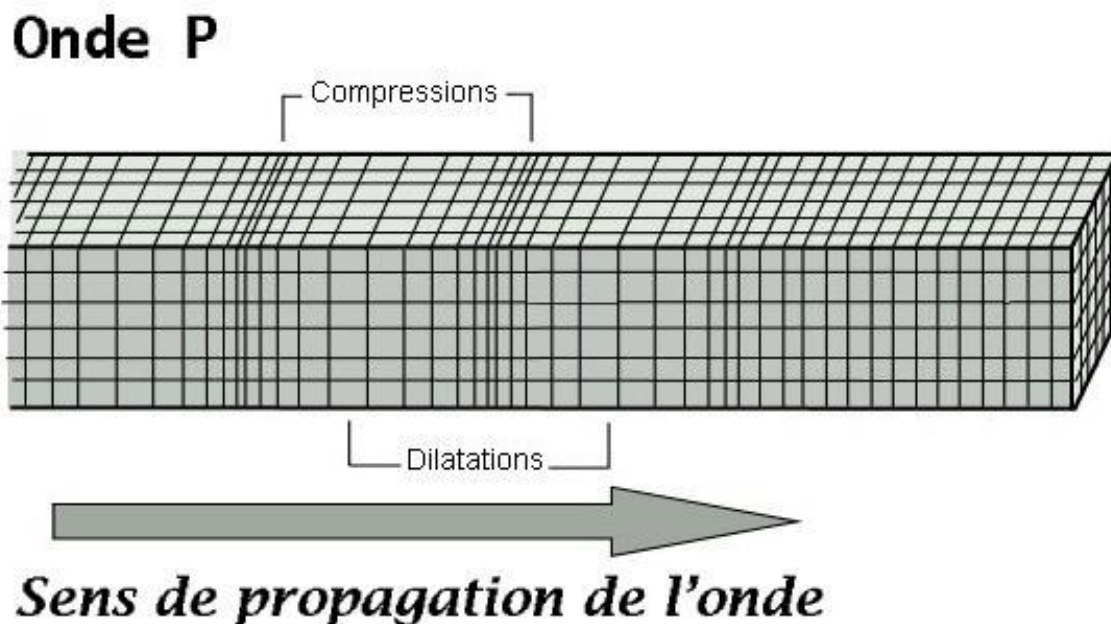


Figure I-1: Ondes de type p

Ces ondes sont les plus rapides leur vitesse peut atteindre les 14Km/s. Elles sont enregistrées sur la composante verticale du sismographe.

I.1.2.1.2. Les ondes secondaires (S)

Sont des ondes transversales de cisaillement. Elles se propagent perpendiculairement à leur direction de propagation.

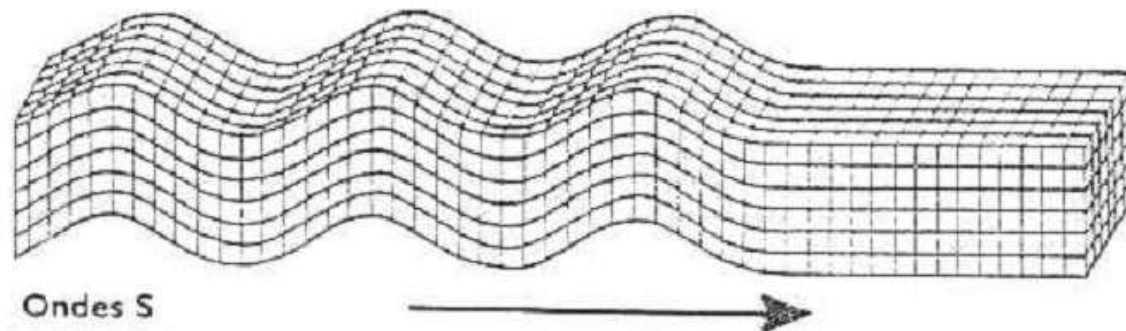


Figure I-2: Ondes de type S

Ces ondes ne se propagent que dans les milieux solides car il est impossible de modifier un liquide par cisaillement. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P. Elles surviennent en second position sur les sismogrammes.

Remarque

Connaissant la différence des temps d'arrivée des ondes P et S et leur vitesse de propagation, on peut estimer l'éloignement du séisme, ainsi en comparant les résultats de plusieurs stations, on peut alors localiser l'épicentre du séisme.

I.1.2.2. Les ondes de surface

Lorsque les ondes de volume sont réfléchies sur les différentes discontinuités du globe terrestre, elles se modifient et deviennent des ondes de surface. Ces ondes se propagent dans la *croûte* et le manteau supérieur. On distingue deux types d'ondes de surface : les ondes de RAYLEIGH et les ondes LOVE.

I.1.2.2.1. Les Ondes de RAYLEIGH

Elles se propagent au voisinage de la surface de milieux homogènes et non homogènes. Elles résultent d'interférences entre les composantes verticales des ondes P et S. Comme le montre le schéma on peut les enregistrer sur les trois composantes d'un sismographe et pendant une durée de temps qui peut aller à plusieurs minutes.

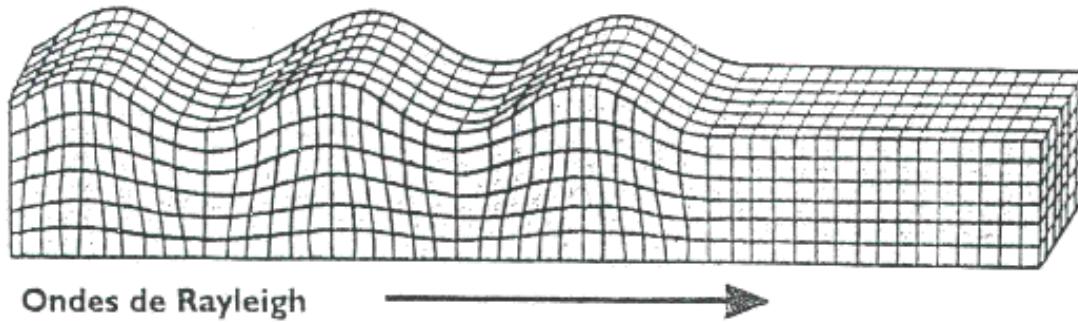


Figure I-3: L'effet des ondes de RAYLEIGH sur les milieux traversé

I.1.2.2.2. Les ondes de LOVE

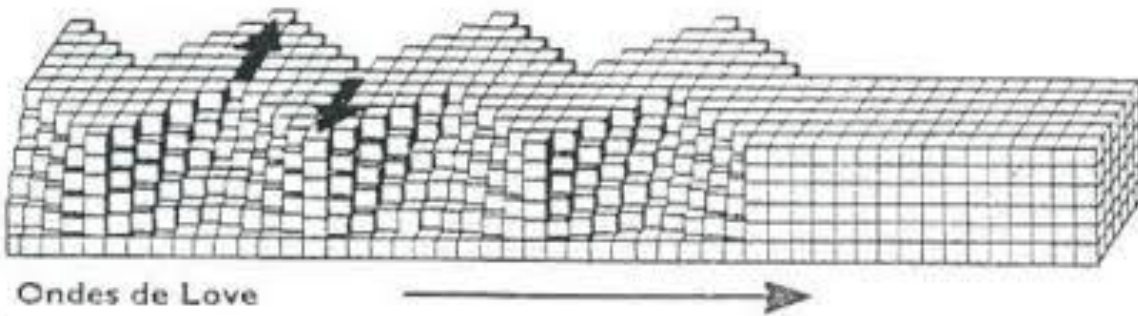


Figure I-4: L'effet des ondes de LOVE sur les milieux traversé

Elles ne se propagent pas dans les milieux liquides. Ce sont des ondes transversales polarisées dans le plan horizontal. Leurs déplacements sont principalement les mêmes que ceux des ondes S mais sans mouvement vertical. Les ondes de LOVE favorisent un ébranlement horizontal qui est l'origine de nombreux dégâts aux fondations des différentes constructions.

Remarque

La vitesse de propagation des ondes de LOVE est d'environ 4 Km/s, elles sont plus rapides que les ondes de RAYLEIGH. Les ondes de RAYLEIGH et de LOVE subissent un faible amortissement c'est pour cela qu'on les reçoit avec des amplitudes supérieures à celles des ondes de volume.

I.1.3. Sismographe

Vu l'importance des séismes et leurs impacts, il est impératif de pouvoir les détecter et les enregistrer. Les instruments qui permettent d'enregistrer les ondes d'un séisme sont les sismographes.

Zhang Heng, fut le premier à créer un sismographe en 132. Ce sismographe se présentait sous la forme d'un récipient en bronze (d'environ deux mètres de diamètre), contenant un poids suspendu (figure).



Figure I-5 : Sismographe d'East Han

L'apparition des sismographes a permis de montrer que la source des séismes, se trouve à l'intérieur de la Terre à des centaines de kilomètres au-dessous de l'épicentre (foyer).

Un sismographe comprend une feuille de papier associée à un support solidaire du sol et un stylo suspendu par un ressort et au contact avec le papier. Le stylo dessine les vibrations sur le papier qui vibre quand le sol vibre (le stylo restant immobile au-dessus du papier). On obtient ainsi un enregistrement du mouvement du sol.

L'enregistrement obtenu est appelé un sismogramme, Il permet de renseigner les géophysiciens sur la magnitude du séisme et les coordonnées de son foyer.

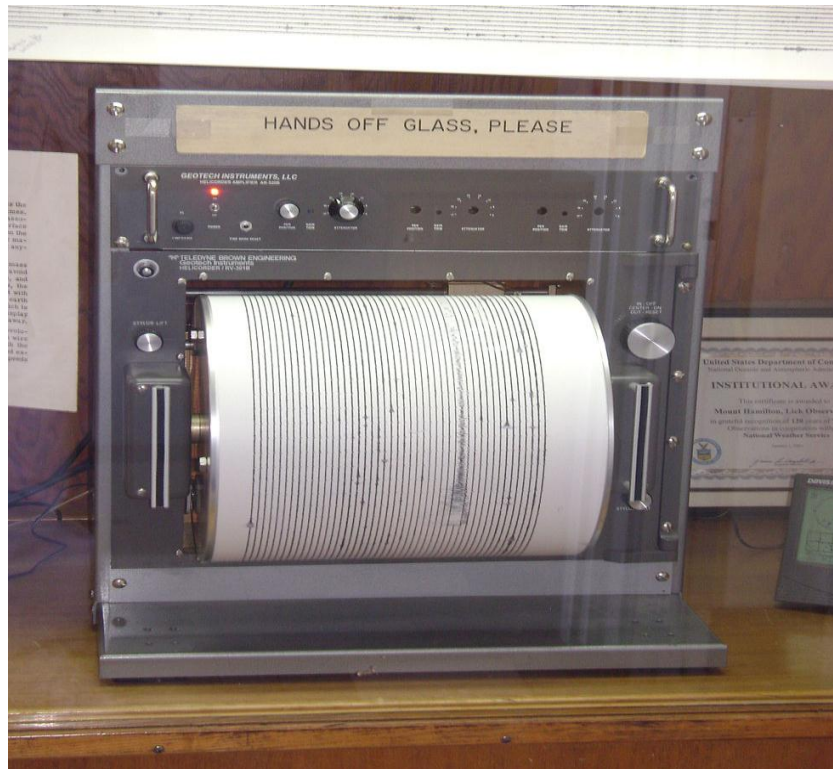


Figure I-6 : Sismographe classique

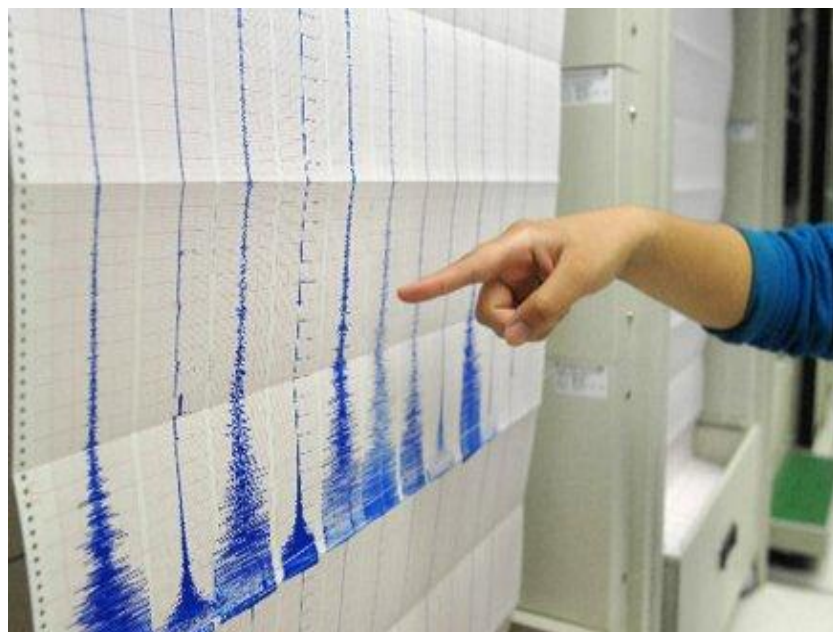


Figure I-7 : Sismogrammes

I.2. Barrage

I.2.1. Introduction

Un barrage est un ouvrage d'art placé en travers d'un cours d'eau d'une rivière, d'un oued, des précipitations des périodes hivernales et des fontes des neiges afin d'en relever le niveau pour créer une chute ou une réserve destinée à l'alimentation en eau, régulation des crues, l'irrigation des cultures ou la production d'énergie.

On peut également citer d'autres utilisations secondaires tel que les usages industriels (rétention d'effluents boueux), navigation, création de polders, de plan d'eaux. Ces ouvrages permettent même de participer à l'aménagement du pays par :

- les développements touristiques et loisir
- la recharge et l'assainissement des nappes phréatiques
- la régularisation en vue de la navigation
- la lutte contre la sécheresse
- la création de plages artificielles et le développement d'activités nautiques
- l'alimentation en eaux potable ou industrielle...

Les barrages font partie des constructions les plus anciens du monde, ils ont vu leur développement s'accroître avec les évolutions démographiques et économiques qui imposent des réservoirs de plus en plus grands, ainsi que l'épuisement des réserves pétrolières et la pollution atmosphérique. Les avancées de la connaissance et des techniques ont permis d'élever progressivement la taille de ces ouvrages jusqu'aux records actuels (304m de hauteur en Tadjikistan).

Pour remplir ses fonctions, un barrage nécessite un certain nombre d'ouvrages annexes :

- Un évacuateur de crue (également appelé déversoir pour les petits ouvrages), qui protège l'ouvrage des risques de submersion en cas de crue
- une vidange destinée à vider la retenue
- une ou plusieurs prises d'eau pour remplir ses missions : production d'énergie hydroélectrique, alimentation d'un réseau d'irrigation ou d'un canal de transport, fourniture d'eau potable...

I.2.2. Types de barrages

Les barrages peuvent être classés selon plusieurs critères :

- Suivant leur fonction, sachant qu'un même ouvrage peut en avoir plusieurs :
 - Accumulation d'eau restituée pour la production d'énergie, l'alimentation en eau ou l'irrigation.
 - Régulation d'une voie d'eau pour la navigation ou la gestion des crues et des étiages.

- Suivant leurs caractéristiques géométriques :
 - Barrages réservoirs, de grande hauteur.
 - Barrages au fil de l'eau, sur le cours d'une rivière.
- Suivant leur conception :
 - Barrages poids, pour lesquels c'est la masse de l'ouvrage qui s'oppose à la pression d'eau.
 - Barrages voûtes, pour lesquels la pression de l'eau est transmise par l'ouvrage sur les parois latérales.
- Suivant le type de matériaux utilisé :

Le choix de la terre ou du béton aura des conséquences tant sur sa forme que sur la technique employée pour évacuer les trop-pleins etc...

On distingue :

 - Les barrages en remblai (en terre ou en enrochement).
 - Les Barrages en béton.

Dans notre étude nous nous intéresserons plutôt aux barrages poids et plus précisément aux barrages en béton.

Les barrages en béton sont de trois types selon leurs modes de résistance à la pression de l'eau.

I.2.2.1. Les barrages- poids

Les barrages poids sont les barrages les plus répandus dans le monde, ce sont des massifs épais et lourds qui nécessitent beaucoup de matières premières (béton), leur profil a la forme d'un triangle classique, rectangle ou triangle rectangle car l'ouvrage doit être plus épais à la base qu'au sommet à cause des pressions qui y sont plus grandes. Ce type de barrage résiste par son propre poids à la poussée de l'eau qui cherche à le faire glisser sur sa base ou à la faire basculer. Ils sont réalisés en maçonnerie, en béton ou plus récemment en béton compacté au rouleau (BCR).

Les barrages en BCR sont construits par couches successives mises en place par des engins de terrassement et compactées avant de passer à la couche suivante. Les barrages sont ainsi construits très rapidement, ce qui apporte pour les chantiers un intérêt économique certain.

On distingue :

- Les barrages poids précontraint (tirants d'acier dans la masse de béton, ancrés dans la fondation et tendus)
- Les barrages poids évidés (évidement ménagé dans le corps par rapport au profil triangulaire pur)
- Les barrages poids mobiles (constitué essentiellement par des vannes qui reportent les efforts dus à la pression de l'eau sur des piles et des radiers.

Ces barrages conviennent le plus dans les vallées très larges avec des fondations rocheuses résistantes capable de supporter le barrage.

- **Avantages :**

- Faibles contraintes dans le béton.
- Faibles contraintes transmises par la fondation au rocher.
- Les variations de températures ne produisent que de faibles variations de contraintes.
- L'évacuateur de crue peut facilement combiner avec le barrage (diriger les crues directement par dessous).
- Le gradient des sous-pressions à travers la fondation est faible.

- **Inconvénients :**

- Les sous-pressions sont importantes dans la fondation.
- Risque moyen de tassement.
- Le volume du béton est important (pour le barrage-poids évidé, il est plus faible).
- Le volume d'excavation de la fouille est important.
- Fragilité au séisme (si les joints entre les blocs ne sont pas faits par injections).
- L'échauffement du béton par la prise du ciment est assez problématique

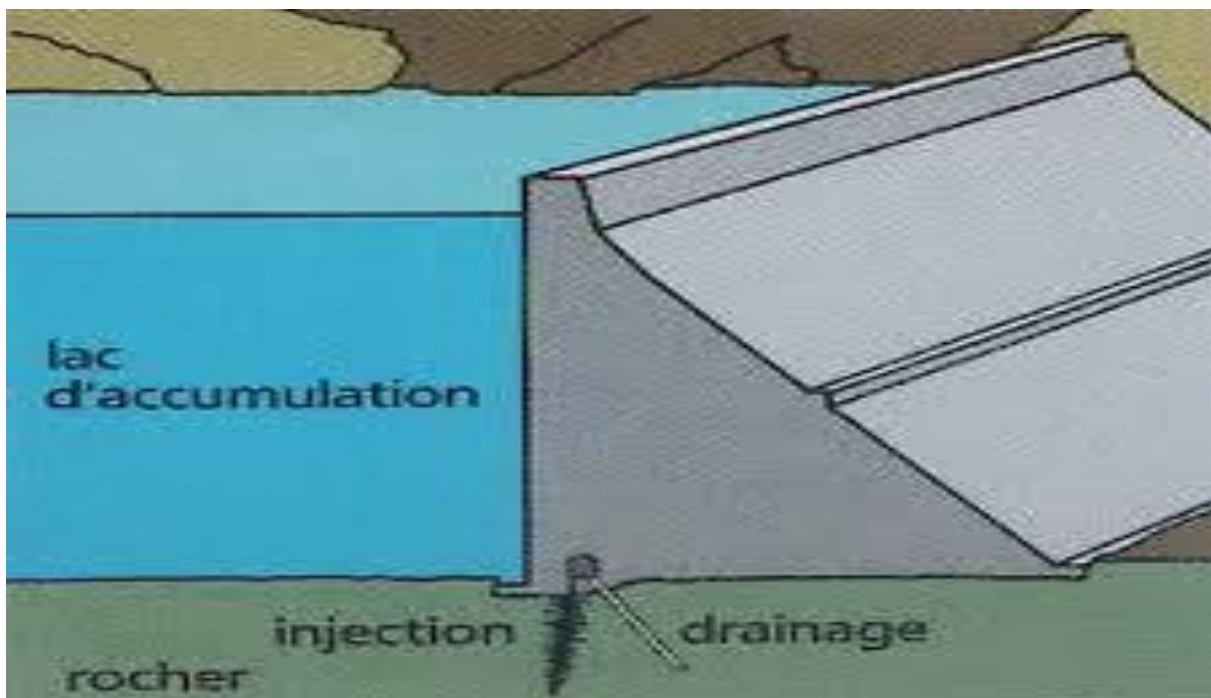


Figure I-8: Barrage poids

I.2.3.2. Les barrages-voûte

Ce type de barrage résiste à la pression d'eau par l'effet de la voûte qui transmet les charges directement aux rives rocheuses (flancs de la vallée) mais ces dernières qui sont très sollicitées exigent un rocher de bon qualité pour rester dans le domaine élastique.

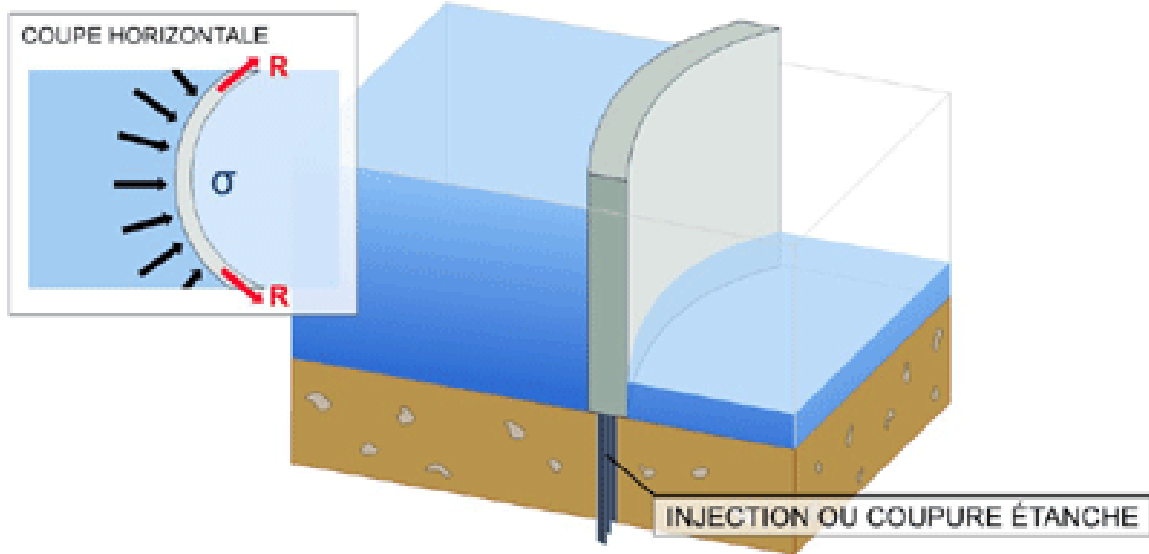
Ils sont plus adaptés aux vallées étroites, profondes et de forme assez régulière ou dans le cas où la largeur de la gorge ne dépasse pas 5 à 6 fois la hauteur du barrage projetée.

Ce type de barrage utilise une quantité de matière première (béton) nettement inférieure à celle des autres types de barrages ce qui permet de faire des économies de volume d'au moins 30% par rapport aux barrages poids.

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.

On distingue plusieurs types selon la forme de la voûte qui vont du simple vers le sophistiqué :

- Des cylindres : tous les arcs sont identiques et superposés, avec un rayon et une épaisseur constante (réservé aux petits ouvrages, moins de 20 m de hauteur).
- Des cylindres-cônes : rayon amont uniforme, le parement amont est un cylindre, l'épaisseur des arcs croît linéairement de haut en bas : les sections verticales sont donc toutes égales à un trapèze.
- Des simples courbures : ainsi nommées car leur parement amont est encore un cylindre, mais l'épaisseur des arcs n'est plus constante et croît de la clé vers les appuis, le parement aval n'est en général pas une surface réglée.
- Des voûtes à double courbure : pour lesquelles les deux parements sont des surfaces à double concavité dirigée vers l'aval. En général, l'épaisseur croît de haut en bas et du centre vers les appuis.

BARRAGE EN BÉTON - TYPE VOÛTE**Figure I-9: barrage-voûte****I.2.3.3. Le barrage à contreforts**

Ils sont de formes variées, ils sont constitués d'un voile à l'amont qui reporte la poussée de l'eau sur les contreforts.

Il comprend une série de murs parallèles de forme triangulaire généralement, plus ou moins espacés et plus ou moins épais (contreforts).

La stabilité de ces barrages sous l'effet de la pression de l'eau est assurée par leurs poids et leurs formes. Les pressions d'eau sont transmises aux contreforts à l'aide de bouchures constituées soit d'une dalle en béton, d'un élargissement du contrefort vers l'amont, d'une voûte de faible portée...

Lors de la construction de ce type de barrage les contreforts sont construits côtes à côtes et séparés par des joints verticaux ce qui permet une réduction du volume de béton par rapport à un barrage poids équivalent, cependant les grandes surfaces des contreforts nécessitent un coffrage plus important et une mise en œuvre plus délicate.

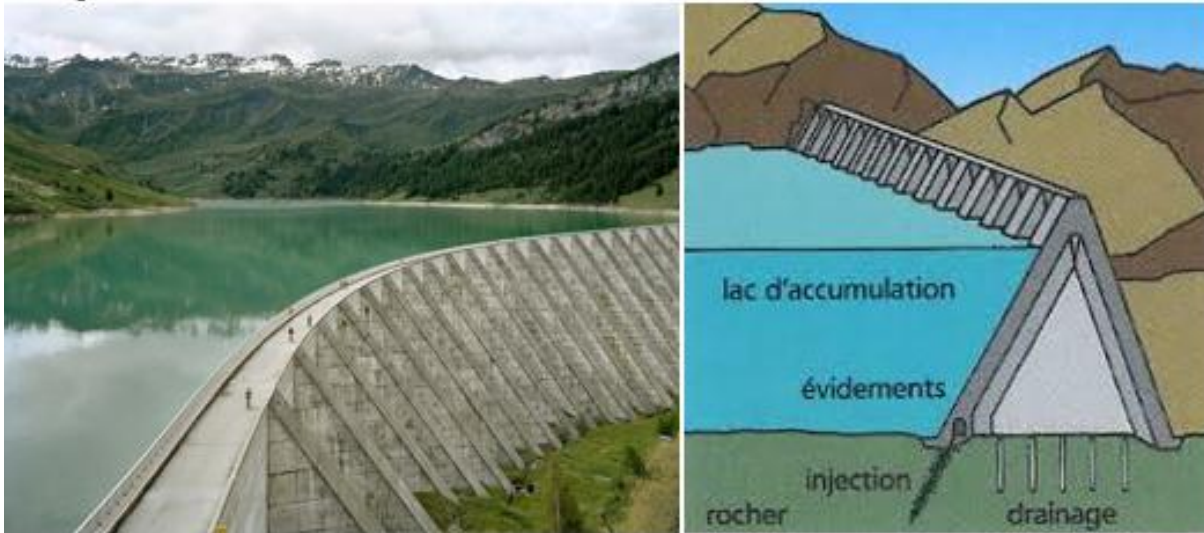


Figure I-10: Barrage de Roselend, contreforts du Mérailllet

I.2.4. Les forces agissant sur un barrage :

I.2.4.1. Poids propre

Le poids propre du barrage dépend de la quantité du béton et des matériaux constitutifs ainsi que de la qualité (compacité, poids spécifique des grains solides, la dimension des agrégats,...) Il constitue un facteur essentiel de stabilité du barrage.

I.2.4.2. Poussée de l'eau :

Elle s'exerce sur le parement en contact avec l'eau (amont du barrage) et agit perpendiculairement aux surfaces du parement. Son intensité croît proportionnellement avec la profondeur ce qui lui donne une répartition linéaire sur la hauteur du parement. Dans le cas où il y a un envasement, il y a lieu de changer la masse volumique de l'eau par celle de l'eau chargée (matériaux en suspension) ou d'ajouter une poussée de terre (vase en dépôt).

I.2.4.3. Sous pression :

Elles proviennent des infiltrations d'eau qui échappent aux dispositions d'étanchéité et s'infiltrent à travers toutes les structures, d'argile comme de béton, en imprégnant les barrages et leurs fondations, et en exerçant des effets insidieux qui peuvent s'avérer de lourdes conséquences. Elles représentent un vrai danger car il y a risque de compromettre la sécurité et la stabilité du barrage en créant des forces, agissant sur la base du barrage, qui tendent à le soulever.

I.2.4.4. Forces sismiques :

Dans le cas d'un séisme, il y a naissance de forces supplémentaires dues à l'accélération du sol dont les dégâts peuvent être énormes bien qu'elles ne sont que passagères.

Les secousses créent des forces alternées rapides qui agissent sur le barrage et créent en plus des surpressions hydrodynamiques sur l'amont du barrage.

I.2.4.5. Forces dues à la température :

Les variations de la température dues aux températures externes ou à la chaleur dégagée par le béton lors de la prise, créent des contraintes dans le barrage.

I.2.4.6. Forces dues au gel :

En hiver il se peut qu'une couche de glace se crée à la surface de l'eau, cette dernière peut engendrer des contraintes sous certaines conditions.

I.2.4.7. Forces liées aux crues :

Dans le cas où la retenue du barrage dépasse son niveau d'exploitation normale à cause des précipitations intenses et des conditions optimales, ce dépassement de niveau engendre une sollicitation supplémentaire.

I.3. Conclusion

Les confusions provoquées par les séismes sont un témoignage absolu de la complexité des comportements des structures engendrés par ce phénomène. Ce qui implique la nécessité d'effectuer des études sismiques afin de déterminer les caractéristiques des secousses, la position des centres d'ébranlement et peut être prévoir le tremblement de terre avant qu'il y ait lieu.

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques très importants dont la conception et la construction demeurent très complexes. Ils constituent des points économiques et stratégiques très importants. Cependant leur rupture peut engendrer des conséquences dévastatrices pour les populations avoisinantes, ce qui implique la nécessité d'étudier le comportement dynamiques de ces structures surtout face aux séismes.

Tous ces facteurs les rendent très délicats du point de vue de leurs conceptions, leurs réalisations et leurs exploitations, ils requièrent donc un suivie permanent.



CHAPITRE II
FORMULATION DU PROBLEME

Chapitre II Formulation du problème

II.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la modélisation du système barrage-réservoir en décrivant toutes les conditions aux limites dans les différents domaines d'étude ainsi que les équations qui gouvernent notre problème.

II.2. Modélisation du réservoir

On supposera que le réservoir est composé de plusieurs parties décrites sur la figure ci-dessus.

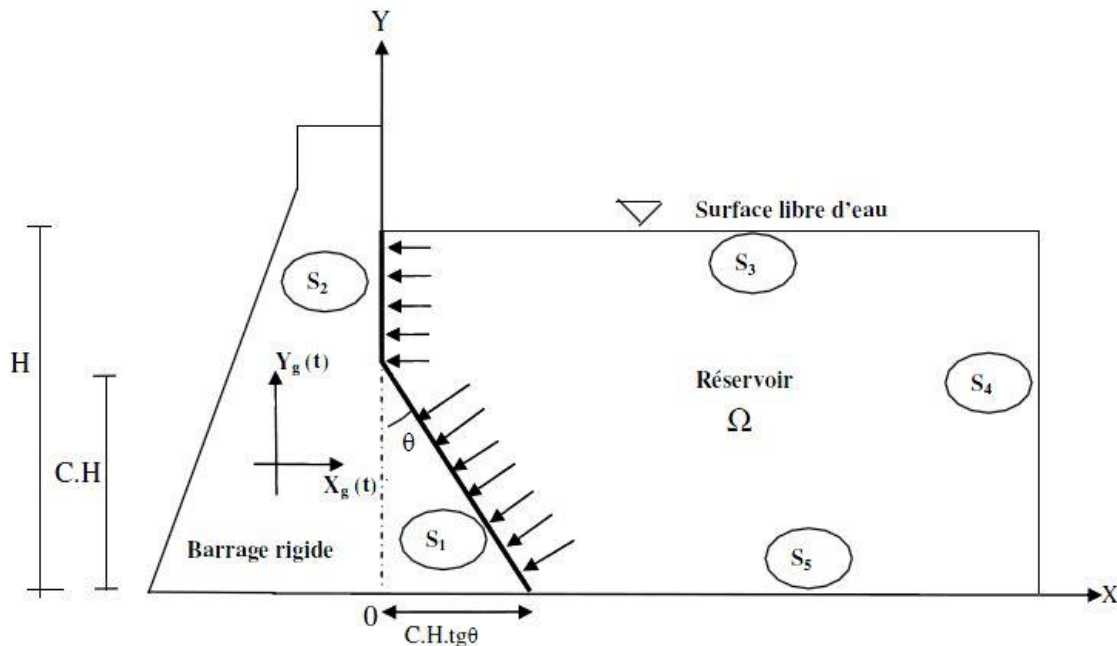


Figure II-1 : Barrage à fruit composé

Avec :

- S1 : La partie inclinée de l'interface barrage-réservoir.
- S2 : La partie verticale de l'interface barrage réservoir.
- S3 : La surface libre du liquide dans le réservoir.
- S4 : La frontière limite du réservoir.
- S5 : Le fond du réservoir.
- $S=S1+S2+S3+S4+S5$: Contour total du reservoir.

Dans notre étude le barrage est considéré infiniment rigide avec un fruit irrégulier. L'origine des coordonnées se trouve à la base du réservoir et $y = H$ correspond là la surface libre.

II.2.1. Condition aux limites

Il est indispensable de définir les conditions aux limites si on ne veut pas rencontrer le problème de valeurs propres nulles. Pour cela deux types de conditions aux limites sont imposés pour résoudre l'équation aux dérivées partielles régissant le système.

II.2.1.1. Conditions de type Dirichlet

Ce type de condition s'applique lorsque la condition, imposée à une équation différentielle ou à une équation aux dérivées partielles, à satisfaire est fonction de l'inconnu c.-à-d. lorsque l'on spécifie les valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières du domaine. (Limites S_3 et S_4)

- Domaine S_3 et S_4

Ces deux domaines sont considérés comme étant des limites de troncature du domaine limitant le réservoir dont lesquelles l'effet de la pression et de la radiation des ondes est négligé.

$$P = 0$$

II.2.1.2. Conditions de type Neumann

Ce type de condition s'applique lorsque la condition, imposée à une équation différentielle ou à une équation aux dérivées partielles, à satisfaire est fonction de la dérivée de l'inconnu c.-à-d. lorsque l'on spécifie les valeurs des dérivées que la solution doit vérifier sur les frontières du domaine (Limites S_1 , S_2 et S_5).

- Domaine S_1

Dans la partie amont du barrage (S_1), les particules fluides sont supposées parfaitement solidaires avec les particules solides du barrage, ce qui nous permet d'écrire que la dérivée de l'inconnu u est égale à :

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n} = -\rho \cdot \ddot{U}_n \cdot \cos(\theta) \quad (\text{II.1})$$

- Domaine S_2

C'est la même condition que dans le domaine S_1 avec un angle $\theta = 0$.

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n} = -\rho \cdot \ddot{U}_n \quad (\text{II.2})$$

- Domaine S_5

On suppose que les particules fluides sont parfaitement solidaires avec les particules solides du barrage et que le fond du réservoir est horizontal et rigide, ce qui nous permet de considérer que la composante verticale de la vitesse de ces particules est nulle :

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (\text{II.3})$$

L'écriture mathématique du système en tenant compte des conditions aux limites est :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \nabla^2 P + \frac{\mu}{K} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 P) = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad |\Omega \\
 \frac{\partial P}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n} = -\rho \cdot \ddot{U}_n \cdot \cos(\theta) \quad |S1 \\
 \frac{\partial P}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial n} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n} = -\rho \cdot \ddot{U}_n \quad |S2 \\
 P = 0 \quad |S3 \\
 P = 0 \quad |S4 \\
 \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad |S5
 \end{array} \right. \quad (\text{II.4})$$

II.5. conclusion

La modélisation est une étape nécessaire qui consiste en la conception d'un modèle simplifié de ce qui se passe en réalité, qui reproduit presque les mêmes effets que dont le cas réel. Elle consiste à définir un domaine d'étude, à introduire les conditions aux limites pour chaque frontière du domaine ainsi que l'équation qui gouverne le domaine considéré.

Cette modélisation sera utilisée dans les chapitres à venir.

CHAPITRE III
APPROCHE ANALYTIQUE

Chapitre III Approche analytique

III.1. Equation gouvernante

En utilisant l'équation de Navier stokes et de continuité, l'équation qui gouverne le domaine du réservoir d'un barrage poids en béton peut s'écrire comme suit dans le domaine temporel :

$$\nabla^2 P + \frac{\mu}{K} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 P) = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (\text{III.1})$$

Tel que μ, P, K, C représentent respectivement la viscosité, la pression hydrodynamique, le module de compressibilité et la célérité de l'onde.

Cette équation à comme conditions aux limites :

- 1) $P(x, 0, t) = 0$
- 2) $\frac{\partial P}{\partial y}(x, h, t) = 0$
- 3) $\frac{\partial P}{\partial x}(0, y, t) = -\rho \alpha g e^{i\omega t}$
- 4) $P(\infty, y, t) = 0$

Avec :

- α facteur sismique
- h la hauteur du réservoir

En supposant que la réponse P s'écrit sous la forme suivante :

$$P(x, y, t) = \bar{P}(x, y, \omega) e^{i\omega t} \quad (\text{III.2})$$

On aboutit à une équation gouvernant le domaine du réservoir du barrage dans le domaine fréquentiel.

$$\nabla^2 \bar{P} + S^2 \bar{P} = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Avec : } S^2 = \frac{\omega^2}{\left(C^2 + \frac{i\mu\omega}{\rho}\right)}$$

En utilisant la séparation des variables et en remplaçant dans l'équation (III.3), ensuite en appliquant les conditions aux limites (1) et (4) dans la relation on aboutit à :

$$\bar{P}(x, y, \omega) = G * e^{-\sqrt{\lambda^2 - S^2} * x} \sin(\lambda * y) \quad (\text{III.4})$$

Soit :

$$\bar{P}(x, y, \omega) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} G_n * e^{-\sqrt{\lambda_n^2 - S^2} * x} \sin(\lambda_n * y) e^{i\omega t} \quad (\text{III.5})$$

Avec : $\lambda_n = \frac{n\pi}{2H}$

En appliquant la condition aux limites (3) on trouve :

$$G_n = \frac{2g\rho\alpha}{h\lambda_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_n^2 - S^2}} \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant G_n dans l'équation (III.4), la réponse finale peut être décrite par :

$$\bar{P}(x, y, \omega) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} G_n * e^{-\sqrt{\lambda_n^2 - S^2} * x} \sin(\lambda_n * y) e^{i\omega t} \quad (\text{III.7})$$

Après simplification on trouve :

$$p(x, y, t) = \frac{8g\rho\alpha h}{\pi^2} e^{i\omega t} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2 \sqrt{1 - \frac{S^2}{\lambda_n^2}}} e^{-\frac{n\pi}{2h} * \sqrt{1 - \frac{S^2}{\lambda_n^2}}} \sin(\lambda_n y) \quad (\text{III.8})$$

Etant donné que le phénomène de résonance apparaît lorsque la pression est maximale ce qui implique que :

$$\sqrt{1 - \frac{S^2}{\lambda_n^2}} = 0 \quad \rightarrow \quad T_{res} = -\frac{\mu\pi}{\rho C^2} i \pm \frac{\sqrt{-\mu^2\pi^2 + 16\rho^2 C^2 h^2}}{\rho C^2} \quad (\text{III.8})$$

En absence de la viscosité on retrouve la période de résonance de Chopra :

$$T_{res} = \frac{4h}{nC}$$

La relation (III.8) indique que la partie réelle de la période de résonance est identique à celle d'un fluide non visqueux, tandis que la partie imaginaire de cette dernière a une influence très petite.

On en déduit donc que la viscosité influence la période de résonance du fluide.

III.2. Application numérique

La réponse d'un fluide visqueux pour différentes viscosités est représentée sur les figures ci-dessous ; spécifiquement, $\mu_1 = \mu_{\text{wat}}$, $\mu_2 = 10 \mu_{\text{wat}}$, $\mu_3 = 100 \mu_{\text{wat}}$, sont représentées par visc1, visc2 et visc3 respectivement. Les résultats sont obtenus pour des fréquences d'excitations égales à la fréquence de résonance, plus grandes et plus petites pour $t=0$.

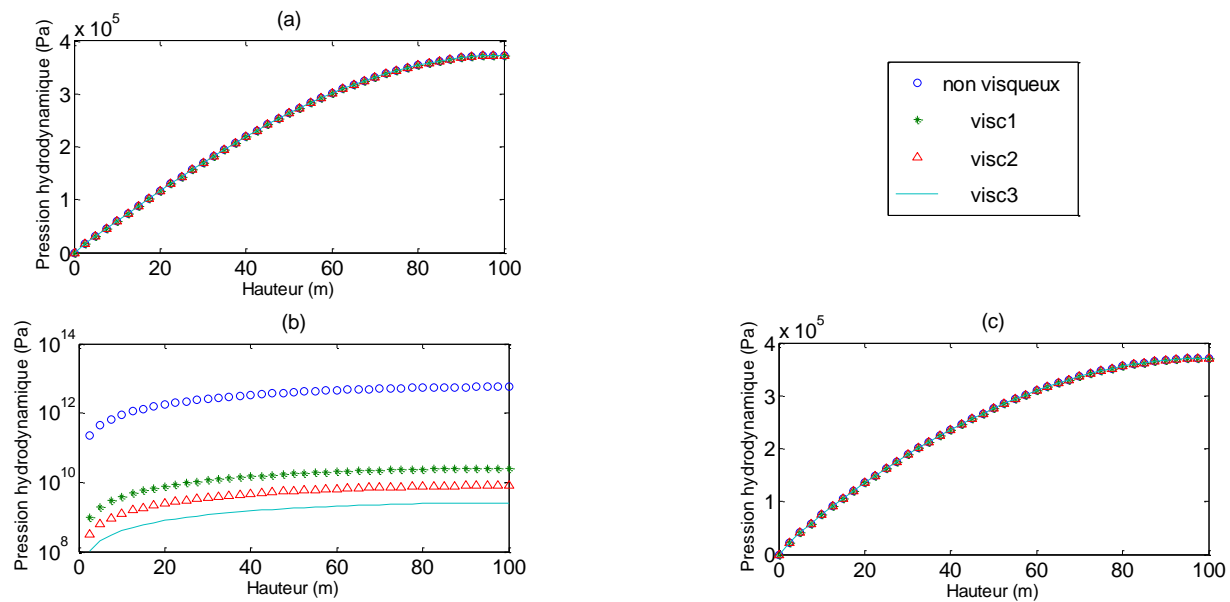


Figure III-1 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $x=0$, $t=0$, $\omega=95\% \omega_1$ (a), $\omega= \omega_1$ (b), $\omega=105\% \omega_1$ (c)

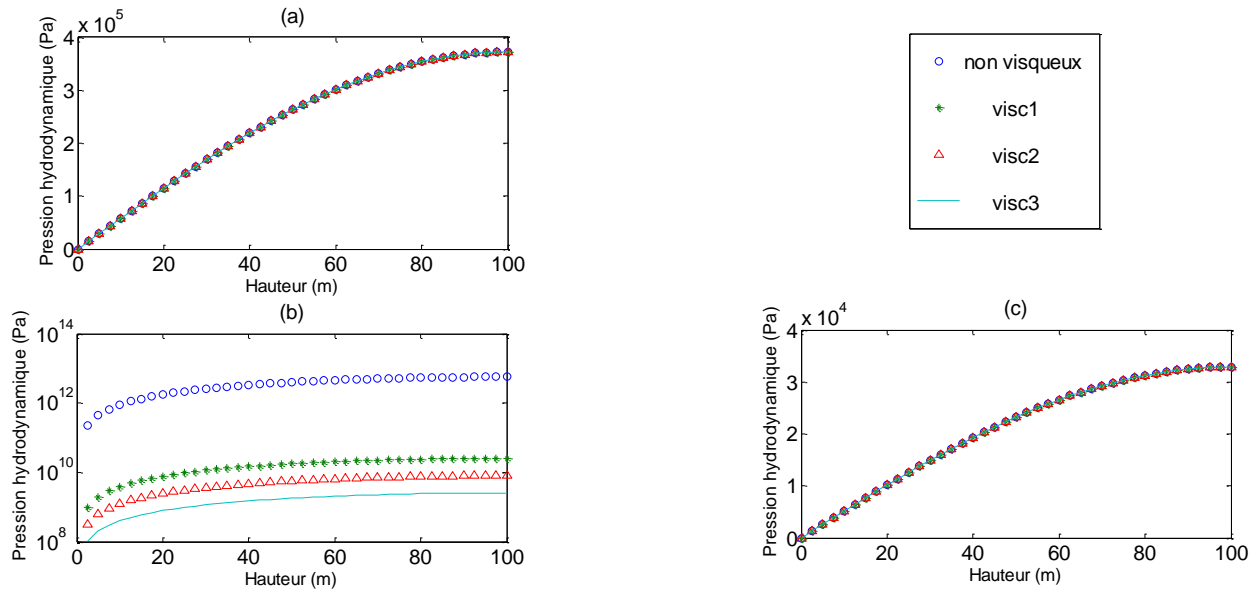


Figure III-2 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $x=5H$, $t=0$, $\omega = 95\% \omega_1$ (a), $\omega = \omega_1$ (b), $\omega = 105\% \omega_1$ (c)

On remarque que pour $x=0$ et $x=5H$ on obtient pratiquement les mêmes résultats. Pour $\omega = 95\% \omega_1$ l'effet de la viscosité n'apparaît pas, par contre on peut observer une légère baisse de la pression entre $x=0$ et $x=5H$ égale à 100 Pa. Les mêmes remarques peuvent être faites pour $\omega = 105\% \omega_1$ à part que l'abaissement de pression est de $3.3842 \cdot 10^5$ Pa. Pour $\omega = \omega_1$, une diminution de pression est enregistrée pour les fluides visqueux par rapport au fluide non visqueux, pour $x=0$ et $t=0$ la pression passe de $5.69 \cdot 10^{12}$ Pa pour un fluide non visqueux à $2.554 \cdot 10^{10}$ Pa pour visc1, à $8.075 \cdot 10^9$ Pa pour visc2 et à $2.554 \cdot 10^9$ Pa pour visc3. On constate aussi que plus nous nous éloignons de l'amont du barrage plus l'effet de la viscosité s'intensifie et la pression diminue par exemple pour $\omega = \omega_1$ la pression diminue de 1 MPa entre $x=0$ et $x=5H$ pour un fluide ayant 100 fois la viscosité de l'eau.

D'après les résultats obtenus par cette approche analytique on s'aperçoit que pour des fréquences d'excitation différentes de la fréquence propre du réservoir la viscosité n'a pratiquement pas d'effet. En comparant les pressions d'un fluide non visqueux avec deux autres ayant 10 fois et 100 fois la viscosité de l'eau respectivement, aucun changement n'est observé, les trois courbes se superposent. Par contre pour une fréquence d'excitation égale à celle du réservoir l'effet de la viscosité apparaît et provoque la diminution des surpressions hydrodynamiques néanmoins l'effet de la viscosité n'est pas assez puissant pour baisser les pressions hydrodynamiques qui tendent vers l'infinie à la résonance (absence de tous amortissements). Ceci est dû à l'absence d'un écoulement dans le barrage par contre ce n'est pas du tout le cas pour d'autre domaine dont il y a un régime d'écoulement tel que l'aéronautique.

Si on veut faire apparaître l'effet de la viscosité sur la pression d'un point de vue purement théorique, on supposera des fluides ayant de grandes viscosités. On prendra un fluide non visqueux et trois autres visqueux tel que :

- $\text{visc1} = 10^5 \text{p}$
- $\text{visc2} = 10^6 \text{p}$
- $\text{visc3} = 10^7 \text{p}$

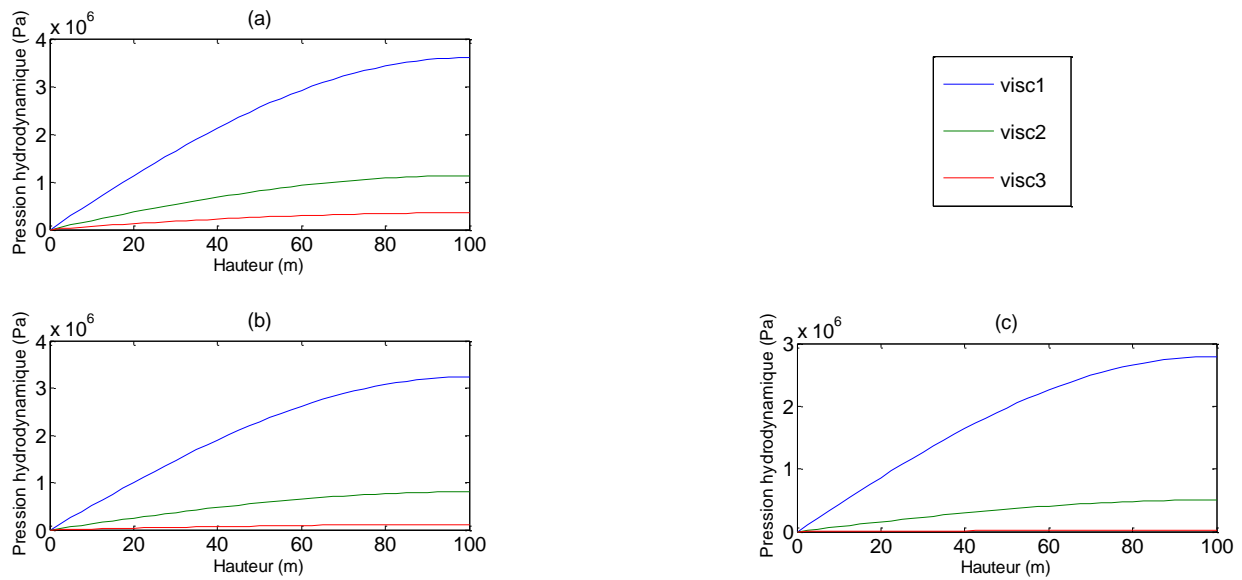


Figure III-3 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $t=0$, $\omega=\omega_1$, $x=0$ (a), $x = 3H$ (b), $x=7H$ (c)

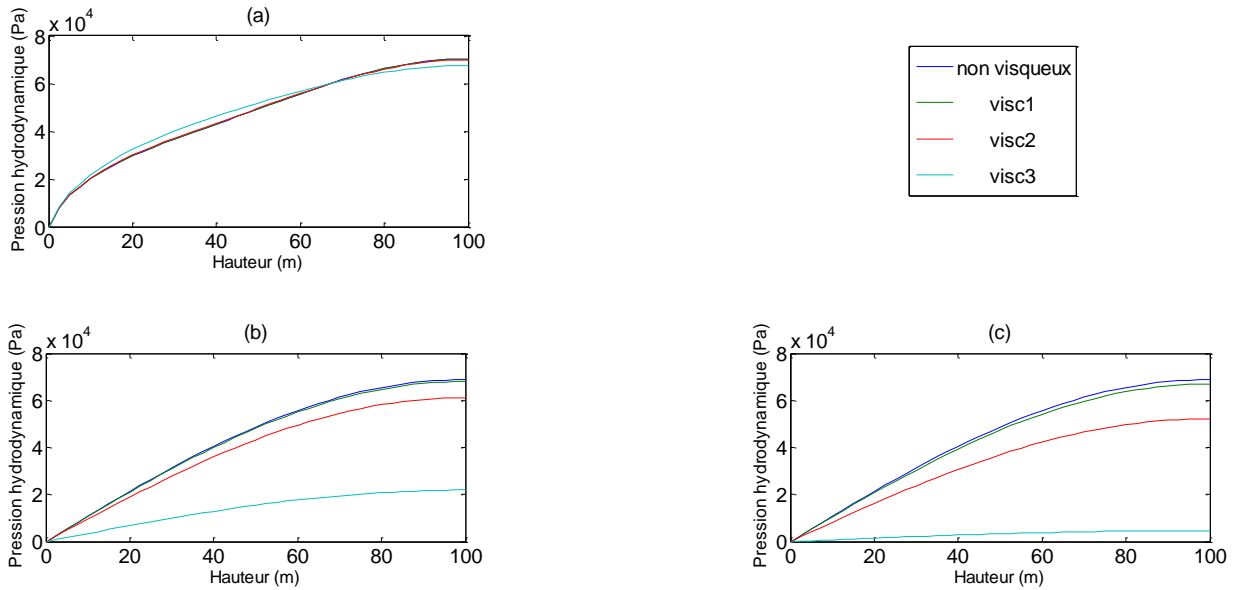


Figure III-4 : Comparaison des pressions pour des fluides de différentes viscosités pour $t=0$, $\omega=2\omega_1$, $x=0$ (a), $x = 3H$ (b), $x=7H$ (c)

On peut observer nettement d'après nos différentes simulations que l'augmentation en terme de viscosité conduit à une réduction des pressions, ceci indique que l'énergie d'amortissement et l'énergie de dissipation sont intensifiées par les grandes viscosités. En plus ces pressions sont encore plus atténuées lorsqu'elles s'éloignent de l'amont du barrage.

On déduit que pour des fluides ayant de grandes viscosités, les pressions exercées sur eux subissent une réduction importante qui peut contrer l'amplification de la réponse due à la résonance. On constate également une légère réduction des pressions pour des fréquences différentes de la fréquence de résonance.

On remarque que l'effet de la viscosité apparaît même en dehors de la résonance, la figure (III-4) montre que pour $\omega = 2\omega_1$ la pression s'atténue de 2610 Pa pour $x=0$ et de 47000 Pa pour $x=3H$ pour le fluide visc3.

Cependant, rencontrer des fluides ayant d'aussi grandes viscosités est peu probable surtout dans le cas des barrages, cette hypothèse étant irréaliste, ce qui explique pourquoi on néglige souvent la viscosité dans l'étude des barrages.

III.3. Excitation sismique

Dans cette partie on va simuler une excitation sismique (séisme d'El Centro par exemple) sur un barrage rigide et vertical. On évaluera les pressions hydrodynamiques à la base du barrage en considérant un fluide compressible et visqueux.

III.3.1. Décomposition du signal à l'aide de la transformée de Fourier

La réponse à une sollicitation transitoire, comme celle définie par le séisme considéré dans cette étude (El Centro) est obtenue à partir de la réponse à une onde monochromatique stationnaire par résolution du problème dans le domaine fréquentiel. Pour cela, on décompose l'onde incidente en ondes harmoniques à l'aide d'une transformée de Fourier. La transformée de Fourier $F(\omega)$ du séisme $\ddot{Y}(t)$ vérifie :

$$\ddot{Y}(t) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

Où Re désigne la partie réelle.

La fonction de $F(\omega)$ complexe est donnée par :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{Y}(t) e^{-i\omega t} dt$$

Physiquement $\frac{1}{2\pi} |F(\omega)| d\omega$ représente l'amplitude du mouvement attaché à la fréquence $f = \omega/(2\pi)$. Le module du produit de la fonction de transfert $T^*_{j,N+1}(\omega)$ par la transformée de Fourier $F(\omega)$ donne alors l'amplitude du mouvement attaché à la fréquence f dans la couche j . $F(\omega)T^*_{j,N+1}(\omega)$ représente la transformée de Fourier de l'accélération à la surface de la couche j ; l'accélération, fonction du temps, est obtenue par une transformée de Fourier inverse :

$$\ddot{Y}_j(t) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) T^*_{j,N+1}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

La procédure décrite ci-dessus est illustrée sur la figure (III-5) qui donne : l'accélérogramme $\ddot{Y}(t)$ correspondant au séisme considéré (figure III-5a), la transformée de Fourier de l'accélérogramme (figure III-5b), la fonction de transfert $F(\omega)$ (figure III-6a) et la réponse du barrage dans le domaine temporel (figure III-6b).

L'étape la plus longue est l'obtention des fonctions de transferts. Une fois celles-ci obtenus le calcul peut se faire aisément et rapidement (1).

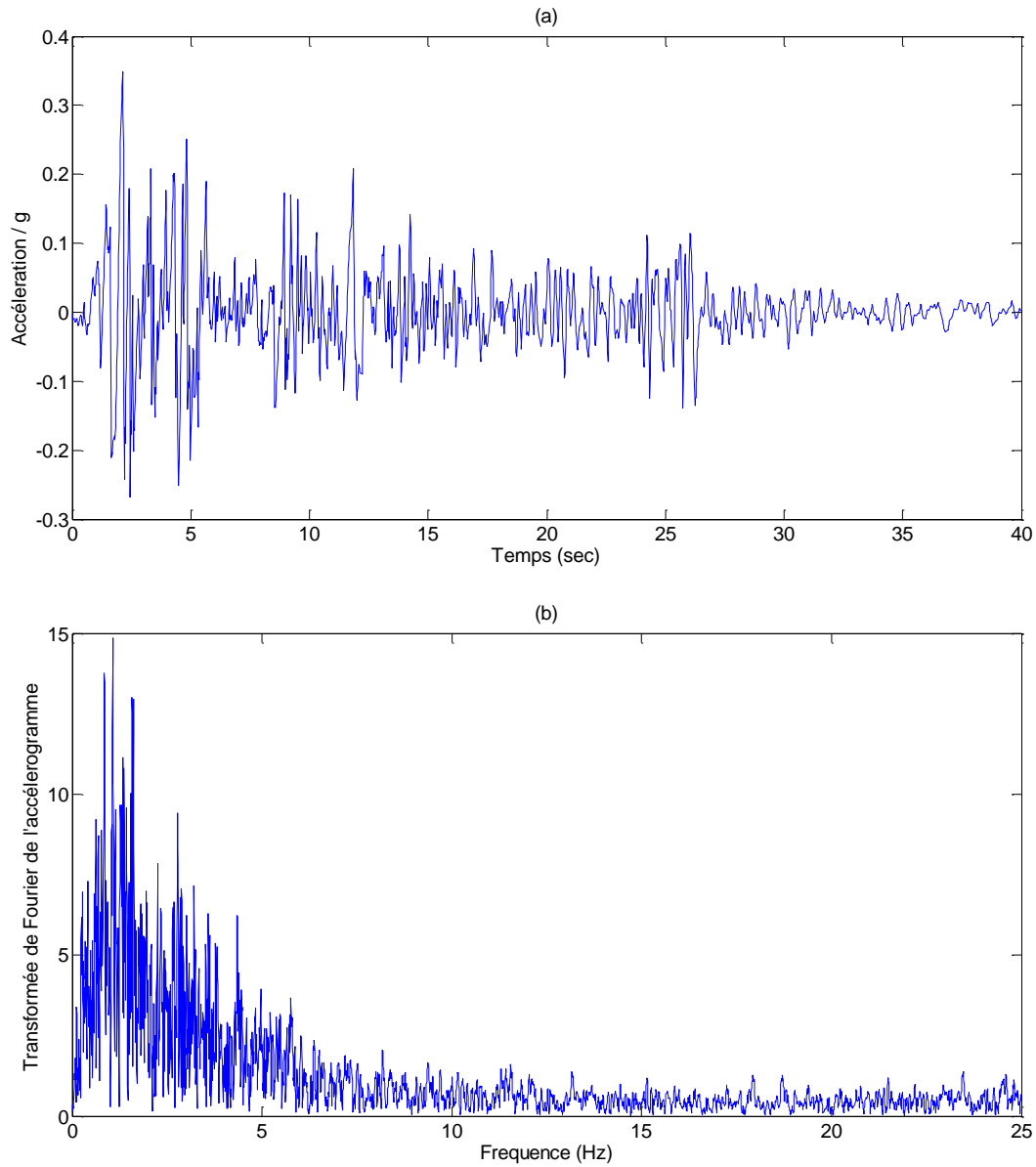


Figure III-5 : (a) Accélérogramme du séisme El Centro
(b) Transformée de Fourier de l'accélérogramme

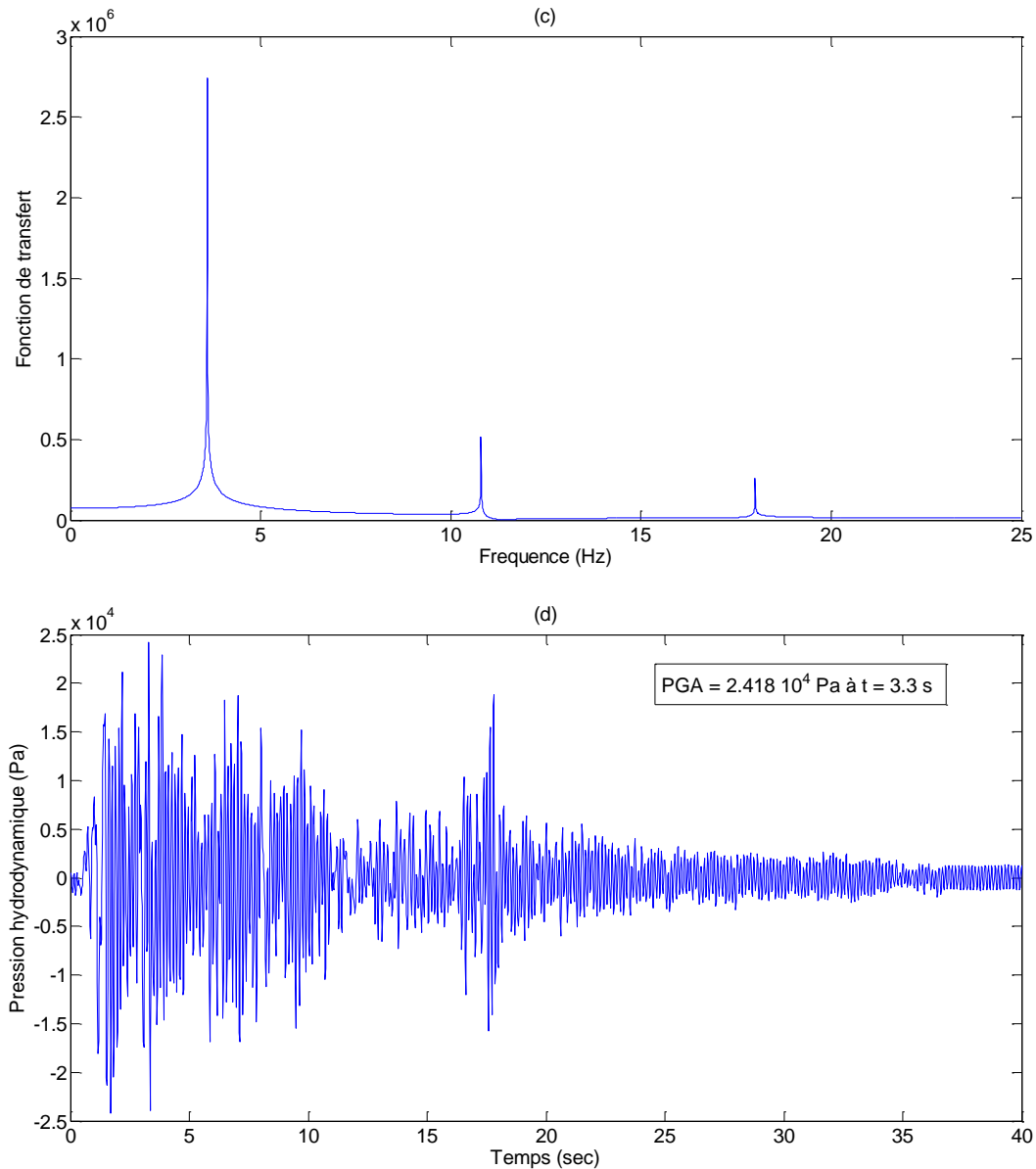


Figure III-6 : (a) Fonction de transfert
(b) Réponse de la structure

On constate d'après la figure (III-6b) que la réponse dynamique a une forme similaire à celle de l'excitation avec une pression maximale égale à $2.42 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ enregistré à $t = 3.3 \text{ s}$, on remarque également un déphasage de 1.18 s entre le pic de la réponse et le pic de l'excitation cela est dû à la compressibilité et la viscosité du fluide qui ralentissent la réaction de ce dernier à l'excitation.



CHAPITRE IV
ETUDE PARAMETRIQUE

Chapitre IV Etude paramétrique

IV.1. Introduction

L'effet des surpressions hydrodynamiques exercées sur les parements amont de barrages rigides soumis aux mouvements sismiques des sols étant un élément essentiel dans la conception des barrages en région sismique, l'ingénieur concepteur doit faire une analyse précise de la distribution de ces dernières et être vigilant vis-à-vis de la formulation du problème et des conditions aux limites.

Pour mieux comprendre le phénomène étudié et appréhender l'effet de plusieurs facteurs géométriques sur la distribution des surpressions hydrodynamiques, une étude paramétrique a été effectuée sur ces différents paramètres géométriques tels que la hauteur du barrage, le fruit du barrage et la limite de rayonnement.

IV.2. Effet de la limite de rayonnement

Pour pouvoir estimer l'effet de la limite de rayonnement on va varier la longueur du barrage sur une fourchette allant de $L=H$ à $L=7H$, en considérant un barrage rigide vertical soumis à une excitation harmonique (2).

Pour un fluide incompressible :

Tableau IV-1 : Influence de la limite de rayonnement pour un fluide incompressible

L/H	$C_{p_{max}}$
1	0.675
1.5	0.722
2	0.738
2.5	0.741
3	0.7423
5	0.7424
7	0.7424
10	0.7424

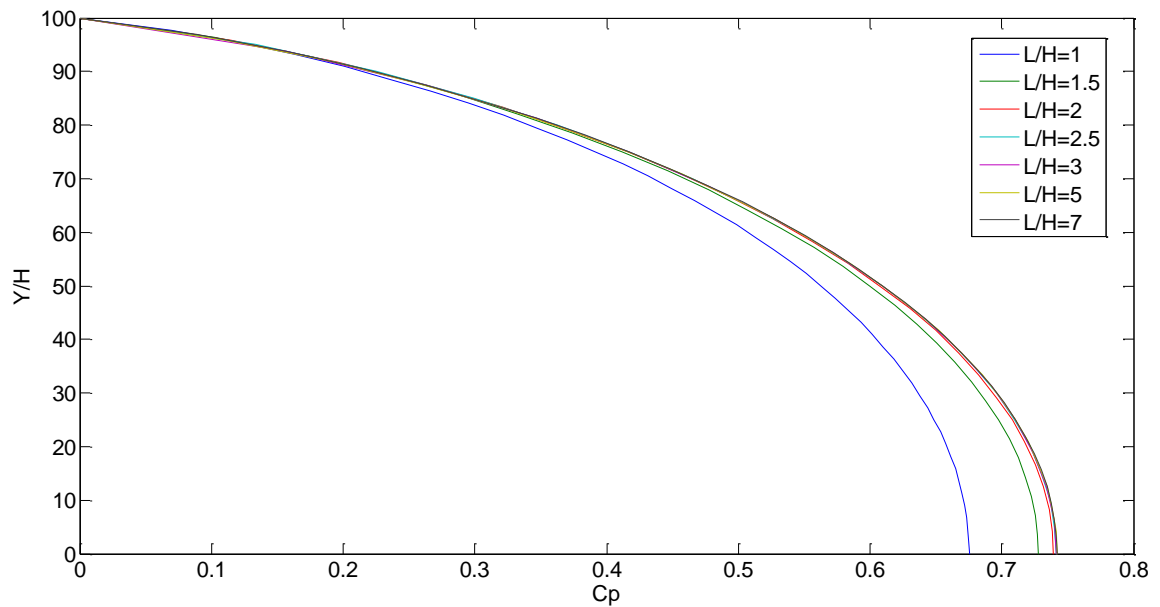


Figure IV-1 : Variation de C_p en fonction de la limite de rayonnement pour un fluide incompressible

Pour un fluide compressible

Tableau IV-2 : Influence de la limite de rayonnement pour un fluide compressible

L/H	$C_{p_{\max}}$
1	0.8105
1.5	0.8734
2	0.8867
2.5	0.8901
3	0.8917
5	0.8924
7	0.8924
10	0.8924

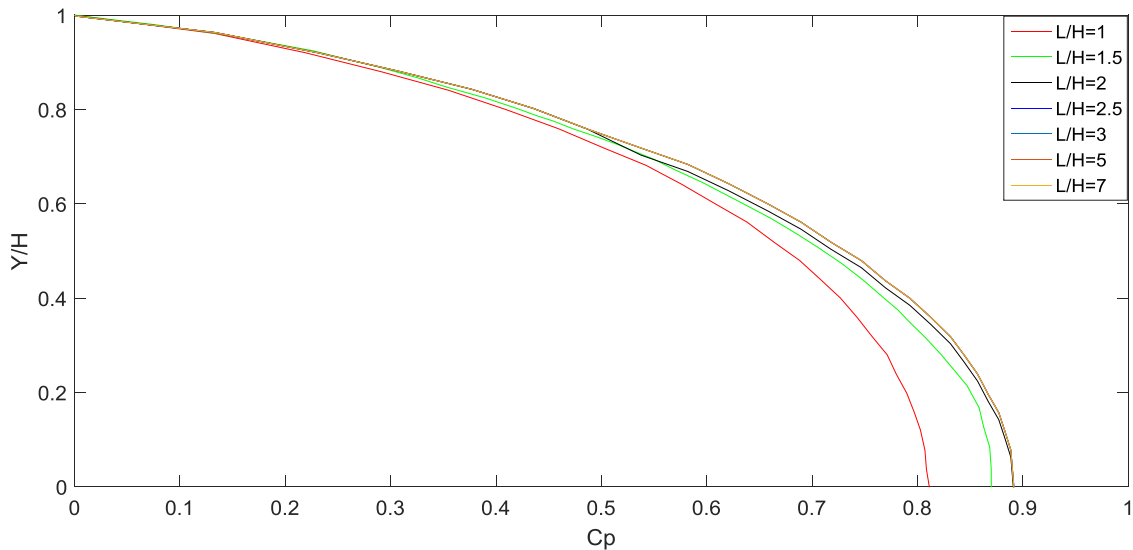


Figure IV-2 : Variation de C_p en fonction de la limite de rayonnement pour un fluide compressible

Interprétation des figures

Les figures (IV-1 et IV-2) représentent la variation du coefficient des pressions hydrodynamiques en fonction de la limite de rayonnement. On remarque que les surpressions hydrodynamiques s'amplifient en augmentant la limite de rayonnement. On passe de 0.675 pour $L=H$ à 0.742 pour $L=3H$ pour un fluide incompressible tandis que pour un fluide compressible on passe de 0.81 à 0.891. Les résultats montrent que la limite de rayonnement n'engendre aucun effet au-delà de 3 fois la hauteur du barrage.

IV.3. Effet de la hauteur du barrage

Pour pouvoir estimer l'effet de la hauteur du barrage on va varier la hauteur de ce dernier sur une fourchette allant de $H=50\text{m}$ à $H=250\text{m}$, en considérant un barrage rigide vertical soumis à une excitation harmonique.

Tableau IV-3 : Influence de la hauteur du barrage pour un fluide compressible

Hauteur (m)	$C_{p_{\max}}$
50	1.244
100	1.384
150	1.393
200	1.411
250	1.461

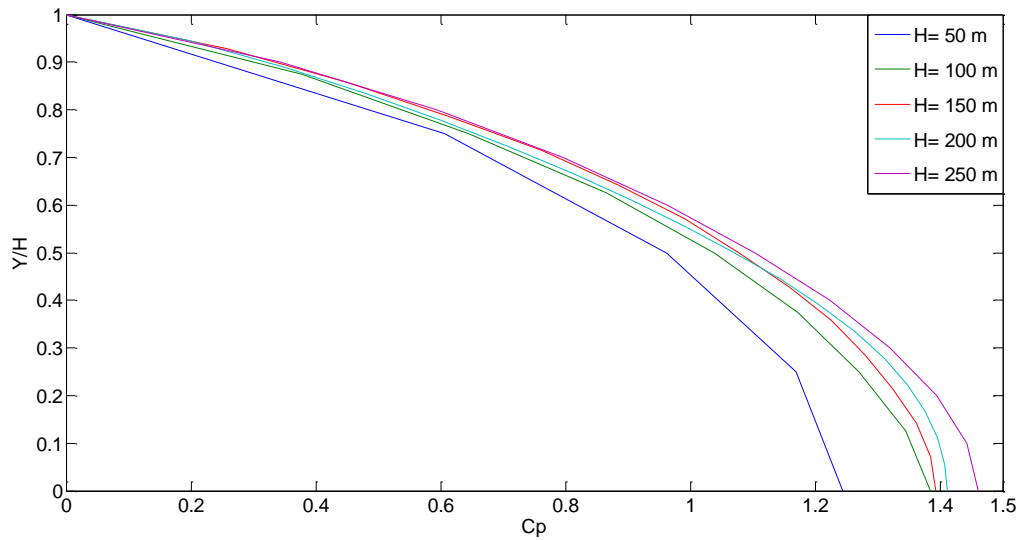


Figure IV-3 Variation de C_p en fonction de la hauteur du barrage

Interprétation de la figure

La figure (IV-3) représente la variation du coefficient de pression hydrodynamique pour différentes hauteurs du barrage considéré rigide avec un parement amont vertical soumis à une excitation dynamique horizontale. On remarque que l'augmentation de la hauteur engendre une augmentation de la pression hydrodynamique ce qui est logique étant donné que les pressions sont proportionnelles à la hauteur du barrage.

IV.4. Effet du fruit du barrage

Le but de cette étude est de déterminer l'effet de l'angle du fruit de l'amont du barrage sur la distribution des pressions hydrodynamiques sur ce dernier.

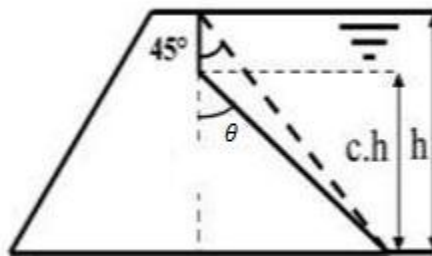


Figure IV-4 : Barrage rigide à fruit irrégulier ($\beta = 45$)

On supposera un barrage rigide et on étudiera les deux types de parements suivant :

IV.4.1 Parement totalement incliné (fruit simple)

Pour pouvoir estimer l'effet du fruit du barrage on va varier l'angle d'inclinaison de l'amont du barrage sur une fourchette allant de 0% à 10%, en considérant un barrage rigide vertical soumis à une excitation harmonique (23).

Tableau IV-4 : Influence du fruit simple pour un fluide incompressible

Angle du fruit (%)	$C_{p_{max}}$	C_p base du barrage
0	0.7417	0.7417
2.5	0.7265	0.7264
5	0.7132	0.7123
10	0.6895	0.6859

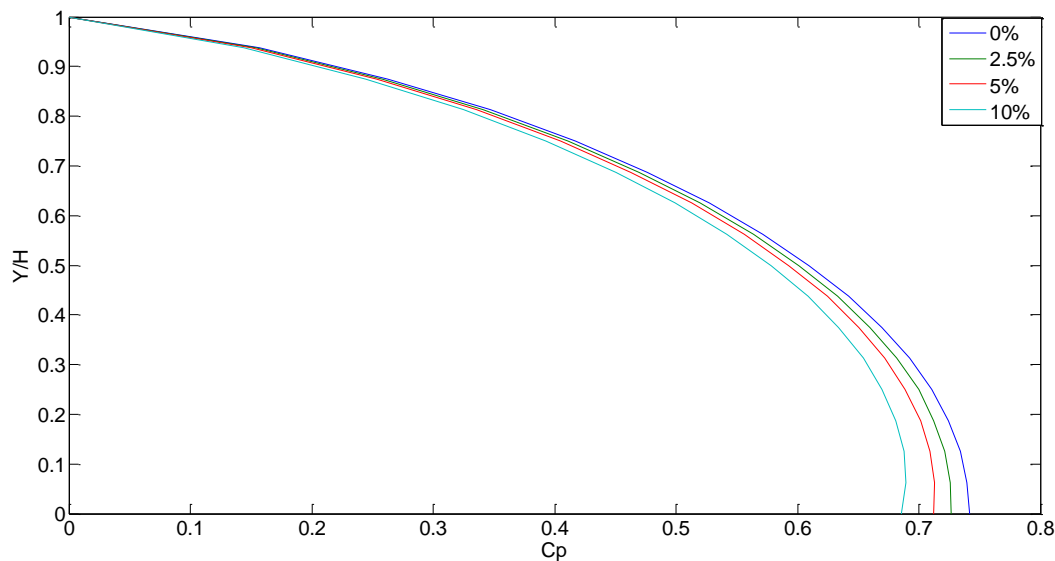


Figure IV-5 : Variation de C_p en fonction du fruit du barrage pour un fluide incompressible

Tableau IV-5 : Influence du fruit simple pour un fluide compressible

Angle du fruit (%)	$C_{p_{max}}$	C_p base du barrage
0	0.8904	0.8904
2.5	0.8767	0.8767
5	0.8528	0.8528
10	0.8210	0.8204

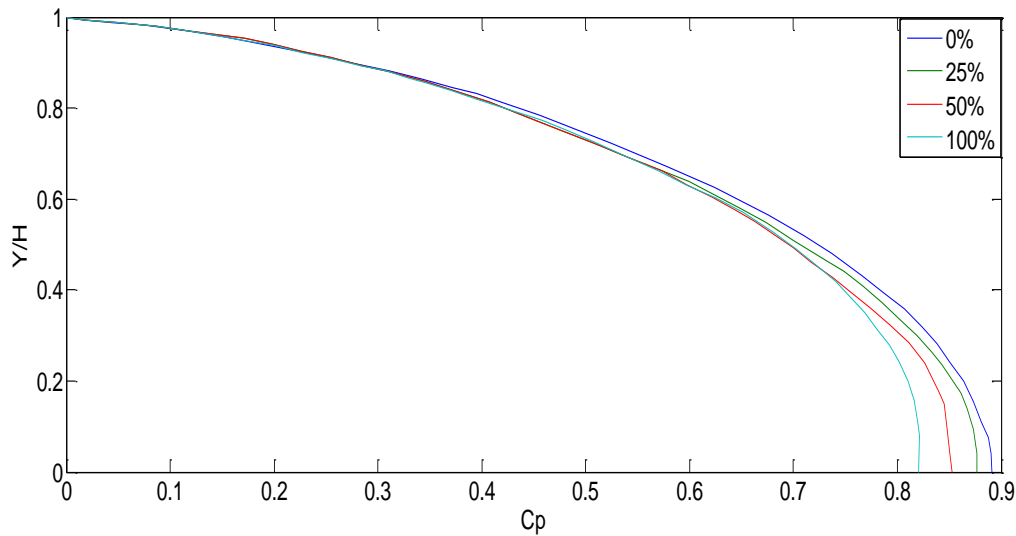


Figure IV-6 : Variation de C_p en fonction du fruit du barrage pour un fluide compressible

Interprétation des figures

Les figures (IV-5 et IV-6) représentent la variation du coefficient de pression hydrodynamique C_p pour différents angles d'inclinaison du parement amont d'un barrage rigide à fruit simple sous excitations dynamiques horizontales. On remarque que la pression hydrodynamique maximale n'est pas enregistrée au niveau du fond du réservoir sauf pour le cas d'un parement vertical ou $C_{p\max}=0.74$ pour un fluide incompressible et $C_{p\max}=0.89$ pour fluide compressible.

On aperçoit également que l'augmentation de l'angle d'inclinaison du parement amont réduit d'une manière considérable la suppression hydrodynamique partout dans le réservoir notamment à l'interface réservoir-barrage. Cette diminution est due à une dissipation d'énergie dans la direction verticale dans le cas d'un parement incliné, par contre dans le cas d'un parement vertical l'énergie est transmise en totalité au fluide du réservoir.

IV.4.2 Parement partiellement incliné (fruit composé)

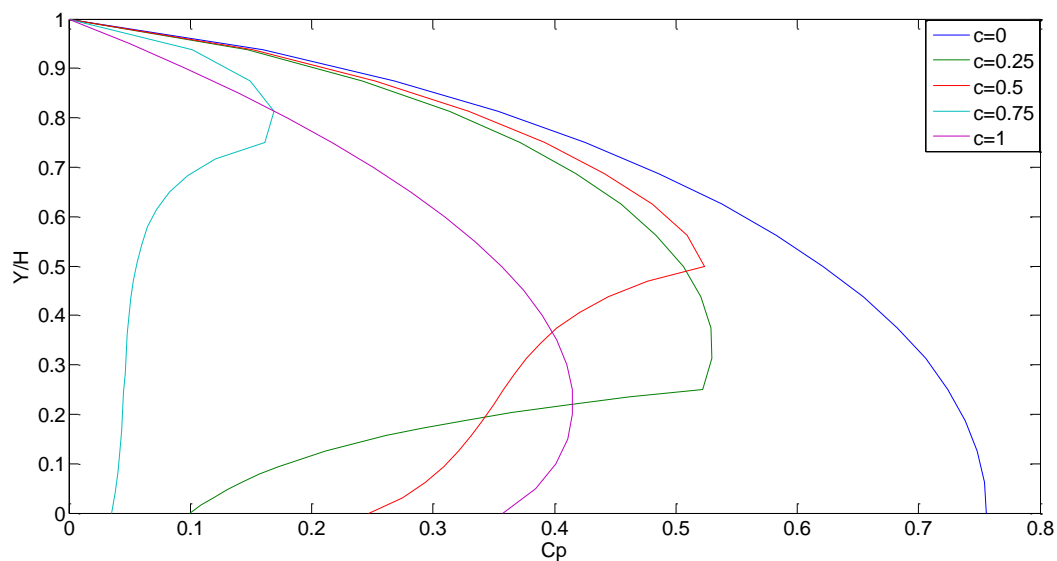
Pour évaluer l'effet d'un fruit composé sur la distribution des pressions hydrodynamiques on prendra les deux cas suivants :

IV.4.2.1. Angle de 45°

Pour un fluide incompressible :

Tableau IV-6 : Influence du fruit composé ($\beta = 45$) pour un fluide incompressible

C	Cp max	Cp base
0	0.745	0.745
0.25	0.5297	0.0996
0.5	0.5239	0.2471
0.75	0.169	0.0349
1	0.415	0.357

**Figure IV-7 : Variation de Cp en fonction du fruit composé ($\beta = 45$) du barrage pour un fluide incompressible**

Pour un fluide compressible :

Tableau IV-7 : Influence du fruit composé ($\beta = 45$) pour un fluide compressible

C	Cp max	Cp base
0	0.89	0.89
0.25	0.7928	0.2375
0.5	0.6153	0.2938
0.75	0.4351	0.3577

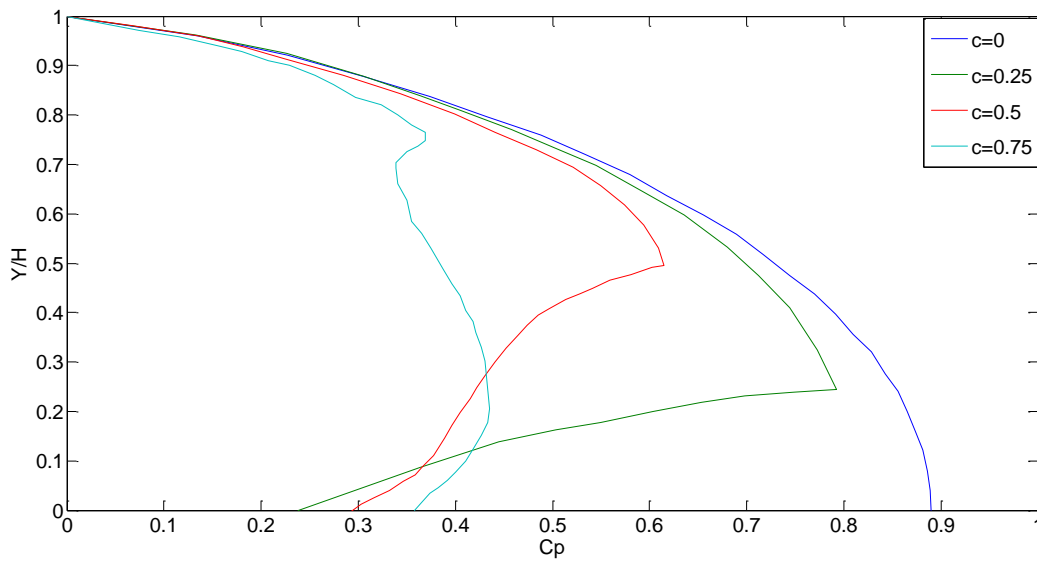


Figure IV-8 : Variation de C_p en fonction du fruit composé ($\beta = 45$) du barrage pour un fluide compressible

IV.4.2.2. Angle de 30°

Pour un fluide incompressible :

Tableau IV-8 : Influence du fruit composé ($\beta = 30$) pour un fluide incompressible

C	C_p max	C_p base
0	0.745	0.745
0.25	0.6903	0.3503
0.5	0.5669	0.384
0.75	0.4794	0.4265
1	0.5152	0.4759

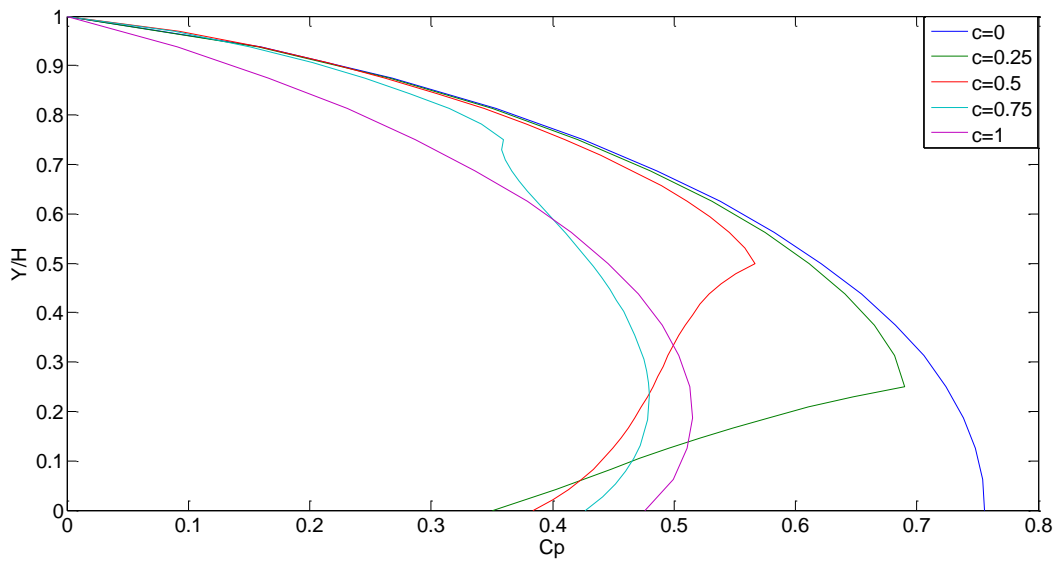


Figure IV-9 : Variation de C_p en fonction du fruit composé ($\beta = 30$) du barrage pour un fluide incompressible

Pour un fluide compressible :

Tableau IV-9 : Influence du fruit composé ($\beta = 30$) pour un fluide compressible

C	C_p max	C_p base
0	0.89	0.89
0.25	0.809	0.4101
0.5	0.6925	0.4869
0.75	0.5667	0.5032

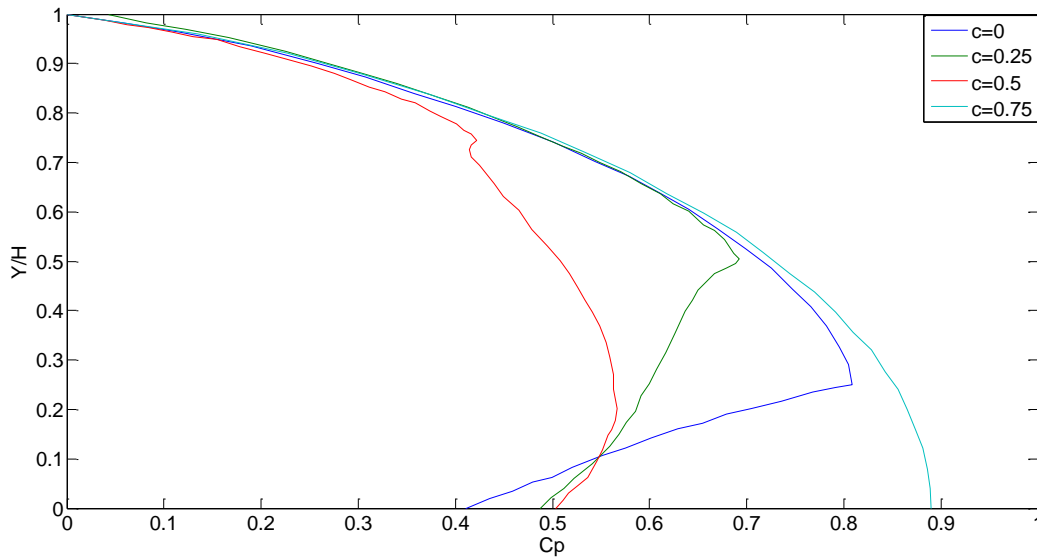


Figure IV-10 : Variation de C_p en fonction du fruit composé ($\beta = 30$) du barrage pour un fluide compressible

Interprétation des figures

Les courbes illustrées dans les figures (IV-7, IV-8, IV-9 et IV-10) montrent que l'augmentation de la hauteur de la partie verticale engendre une augmentation de la valeur du coefficient de pression hydrodynamique.

Ceci est dû au fait que la zone inclinée favorise la dissipation de l'énergie dans la direction verticale, donc plus cette zone est grande plus les pressions sont réduites.

Cette valeur devient encore plus grande si on augmente l'angle de la partie inclinée.

On remarque également que l'écart entre les pressions maximales et les pressions à la base du réservoir augmente au fur et à mesure que la partie inclinée s'agrandit.

IV.5. Conclusion

D'après les résultats obtenus lors de cette étude, on constate que la géométrie du barrage (la hauteur, la forme du parement amont, la limite de rayonnement) a un effet très important sur l'intensité et la distribution des pressions hydrodynamiques. L'ingénieur concepteur doit tenir compte de ces critères très importants pour pouvoir choisir les paramètres les plus optimaux lors de la construction des barrages.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les séismes représentent un danger majeur pour tout type de construction notamment les barrages qui sont des structures très complexes nécessitant une analyse très précise de la réponse à une excitation dynamique pour éviter que des désastres aient lieu.

A travers ce modeste travail nous avons pu lever l'ombre sur une partie fort-intéressante de l'étude du comportement dynamique des barrages qui est l'évaluation de l'effet de la compressibilité et de la viscosité sur la réponse d'un barrage à une excitation dynamique (sismique).

La géométrie du barrage a un effet très important sur l'intensité et la distribution des pressions hydrodynamiques. L'ingénieur concepteur doit tenir compte de ces critères très importants pour pouvoir choisir les paramètres les plus optimaux lors de la construction des barrages.

Les conclusions les plus importantes qui peuvent être retenus de ce travail sont :

- La réponse dynamique des barrages face aux excitations sismiques est affectée par les caractéristiques géométriques du barrage, ainsi que par les caractéristiques et le niveau du fluide contenu dans le réservoir.
 - Pour un barrage rigide à fruit simple ou double, l'augmentation de l'inclinaison de l'amont du barrage conduit à une diminution des surpressions hydrodynamiques à l'interface fluide-structure.
 - Pour un barrage rigide, l'augmentation de la hauteur du réservoir engendre une amplification des surpressions hydrodynamiques à l'interface fluide-structure.
 - La limite de rayonnement n'a pratiquement aucun effet au-delà d'une longueur égale à trois fois la hauteur du barrage.
 - Pour un barrage rigide à amont vertical la pression hydrodynamique maximale est enregistrée au fond du réservoir, par contre si ce dernier est à fruit simple ou composé la pression hydrodynamique maximale est enregistrée à une fraction de la hauteur du réservoir située à une certaine distance du fond.
- **Dans le cas d'un fluide incompressible et compressible non visqueux :**
 - Pour un barrage rigide vertical considérant un fluide incompressible le coefficient des pressions maximales $C_{p_{max}} = 0.74$ au fond du réservoir.
 - Le fait de négliger la compressibilité et considérer que le fluide est incompressible conduit à des erreurs relativement importante, donc il est recommandé de ne pas prendre en considération cette hypothèse pour approcher au mieux le phénomène qui se passe réellement.

Conclusion

- Pour un barrage à fluide incompressible soumis à une excitation sismique il n'y a pas de déphasage entre les pics de la réponse et de l'excitation par contre pour un fluide compressible on remarque un certain déphasage dû à la compressibilité du fluide.
- Si on considère un barrage à fluide compressible non visqueux et on l'anime avec une excitation harmonique à la fréquence de résonance le phénomène de battement apparaîtra dans la réponse de ce dernier.
- La compressibilité du fluide conduit à une augmentation des surpressions hydrodynamiques et une amplification des périodes du barrage.
- **Dans le cas d'un fluide visqueux :**
 - L'effet de la viscosité sur les surpressions hydrodynamiques n'apparaît qu'à la résonance.
 - En comparant un fluide compressible non visqueux avec un autre fluide compressible visqueux on constaterait que la viscosité cause la réduction des surpressions hydrodynamiques de plus cette diminution est intensifiée lorsqu'on s'éloigne de l'amont du barrage.
 - L'effet de la viscosité (viscosité de l'eau) dans le cas d'un barrage rigide sous excitations dynamiques est insignifiant, c'est pourquoi dans la plupart des études sur les barrages on néglige l'effet de cette dernière.

Bibliographie

1. **BOUDJOURAF F.** *Investigation d'effets conjugués transitoires de séismes lors de l'interaction barrage-réservoir.* Département Hydraulique, Ecole nationale polytechnique. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2014. p. 104, Mémoire de Master.
2. **Hammouda R. B.** *Notions De Mécanique Des Fluides.* Tunis : Centre de publication universitaire, 2008.
3. **Nekrassov B.** *Cours d'hydraulique.* Moscou : Ed.en langues étrangères (Moscou), 1978.
4. **Carlier M.** *Hydraulique générale et appliquée.* Paris : Eyrolles, 1980.
5. **Le Pourhiet A.** *Résolution numérique des équations aux dérivées partielles (une première approche).* Toulouse : CEPADUES, 1988.
6. **HASSAIM M.M. et SOUISSI M.J.** *Analyse dynamique du barrage d'oued fouda compte tenu de l'effet du site.* Département de Génie Civil, Ecole nationale polytechnique . Alger, 1995. p. 94, Mémoire de fin d'études.
7. **Timoshenko S. P.** *Théorie de l'élasticité,* Librairie Polytechnique Ch. Béranger, 1948.
8. **Westergaard H. M.** *Water pressures on dams during earthquakes,* Transactions, ASCE, 1933.
9. **Chopra A. K.** *Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes,* Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1967.
10. **Zangar C. N.** *Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquakes,* Proceedings of the society on Experimental Stress Analysis, 1953.
11. **Sharan S. K.** *Finite element analysis of unbounded and incompressible fluid domains,* International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1985.
12. **Liu P. L. F.** *Hydrodynamic pressures on rigid dams during earthquakes,* Journal of Fluid Mechanics, 1986.
13. **Avilés J. and Sanchez-Sesma, F. J.** *Hydrodynamic pressures on dams with nonvertical upstream face,* Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1986.
14. **Tsai C. S.** *Semi-analytical solution for hydrodynamic pressures on dams with arbitrary upstream face considering water compressibility,* Computers and Structures, 1992.
15. **Zienkiewicz O. C.** *The Finite Element Method,* McGraw-Hill, 1989.
16. **Pecker Alain.** *Dynamique Des Sols,* Presses de l'école nationale des Ponts chaussées, 1984.

17. **Tiliouine B., Seghir A.** *Influence de l'interaction fluide-structure sur le comportement sismique du barrage de Oued-Foda (Nord-Ouest Algérien)*. Damas, Syrie : Actes du 1er congrès Arabe de mécanique, 1997.
18. **Tiliouine B., Seghir A.** *Fluid-structure models for dynamic studies of dam-water systems*. Paris, France : Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, 1998.
19. **Neya B. N., Ardeshir M. A.** *An analytical solution for hydrodynamic pressure on dams considering the viscosity and wave absorption of the reservoir*, Arab J Sci Eng, 2013.
20. **Aviles J., Li X.** *Analytical-numerical solution for hydrodynamic pressures on dams with sloping face considering compressibility and viscosity of water*. Morelos, Mexico : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997.
21. **Tadjadit A.** *Pressions hydrodynamiques sur barrages rigides à fruits irréguliers sous excitations sismiques*. Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Memoire de Magister, 2010.
22. **Davidovici V.** *La construction en zone sismique*. Paris : le Moniteur, 1998.
23. **Penzien J. Clough, R. W.** *Dynamique des structures*. Berkeley, USA : PLUSRALIS, 1975.
24. **Timoshenko S. P.** *Résistance des matériaux*. Paris : DUNOD, 1968.
25. **Tiliouine B., Seghir A.** *A numerical model for time domain analysis of dams including fluid-structure interaction*. Edinburgh Scotland : CST 98 International conference, 1998.
26. **Moussaoui S. D.** *Investigation du comportement sismique des systèmes sols-barrages par la technique des vecteurs de Ritz*. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 1995.
27. **Belhadj O.** *Investigation Numérique et Expérimentale des Surpressions Hydrodynamiques sur Parements Amont des Barrages Rigides, à Fruits Composés*. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
28. **Maali I. Adel A.** *Investigation des effets de compressibilité et de viscosité sur les pressions Hydro-sismiques s'exerçant à l'interface des systèmes fluides-barrages par la Méthode des Eléments Finis*. Département Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Mémoire de projet de fin d'études, 2015.