

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RÉPONSE DYNAMIQUE D'UN BARRAGE EN BÉTON INCLUANT
L'INTERACTION GLACE-STRUCTURE

MARC-ANTOINE CHAGNON

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉS

(GÉNIE CIVIL)

AVRIL 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-29219-8

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-29219-8

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

RÉPONSE DYNAMIQUE D'UN BARRAGE EN BÉTON INCLUANT
L'INTERACTION GLACE-STRUCTURE

présenté par : CHAGNON Marc-Antoine

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. FUAMBA Musandji, Ph.D., président

M. BOUAANANI Najib, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. LÉGER Pierre, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

La présente étude a été effectuée sous la direction de monsieur Najib Bouaanani, professeur au Département des génies civil, géologique et des mines à l'École Polytechnique de Montréal. Le professeur Bouaanani a fourni un appui constant et constructif à ce projet, en plus d'y apporter sa valeureuse expertise et le suivi nécessaire à sa réussite.

Mes remerciements vont aussi à tous les intervenants qui ont contribué à la réalisation de ce projet et aux stagiaires Rida Hariri et Pierre-Jean Vabre, qui m'ont fourni assistance durant ce travail de recherche.

Je tiens également à souligner le support financier du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

Enfin, l'auteur exprime sa gratitude envers son épouse, Marie Andrée, pour son aide et sa compréhension.

RÉSUMÉ

De nombreux barrages ont été construits dans des régions du Nord où l'activité sismique est non négligeable et où les réservoirs sont généralement couverts de glace durant de longues périodes annuelles. Au Canada, beaucoup de barrages sont en service depuis plus de 50 ans, et leurs critères de conception initiale peuvent ne pas satisfaire aux normes de sécurité actuelles. Récemment, beaucoup d'efforts ont été déployés afin de comprendre le phénomène d'interaction dynamique des systèmes glace-barrage-réservoir. Le présent travail de recherche est un pas de plus pour mieux cerner ce phénomène complexe. Il propose une approche par la méthode des éléments finis pour tenir compte des interactions dynamiques dans les systèmes glace-barrage-réservoir lors d'une excitation sismique. Le modèle numérique obtenu est utilisé pour étudier l'influence des couverts de glace sur le comportement sismique des barrages-poids. Une attention particulière est attribuée à : (i) l'effet de la taille du barrage, (ii) l'effet des caractéristiques du séisme, (iii) l'effet de la composante verticale, et (iv) l'effet de la compressibilité de l'eau dans le réservoir.

Le système considéré comprend un barrage à parement amont vertical, reposant sur une fondation rigide, et retenant un réservoir de profondeur constante, couvert d'une couche de glace. La modélisation du couvert de glace par éléments finis permet de mieux tenir compte du comportement vibratoire du couvert de glace et de son interaction avec le réservoir. L'utilisation des éléments finis fluides reproduit plus fidèlement la distribution de la pression hydrodynamique au sein du réservoir. Les analyses dynamiques linéaires par pas de temps utilisent des accélérogrammes correspondant aux caractéristiques séismiques de l'ouest et de l'est de l'Amérique du Nord, compatibles avec un spectre cible de la région étudiée. L'influence des couverts de glace est étudiée par le biais d'analyses paramétriques bidimensionnelles de système glace-barrage-réservoir de différentes dimensions variant de 21 m de hauteur à 90 m.

L'interprétation des résultats de ces analyses sera effectuée à partir des déplacements et des accélérations à la crête du barrage, de l'évaluation des contraintes et du potentiel de fissuration illustré par les enveloppes des contraintes maximales dues à la combinaison des charges statiques et dynamiques.

ABSTRACT

Many dams are located in Northern regions where seismic activity is significant and where dam reservoirs are covered with ice sheets during long annual periods. In Canada, many dams have been in service over 50 years, and their initial design may fail to meet modern safety criteria. Recently, many efforts have been devoted to understand the dynamic ice-dam-reservoir interaction. The present study is a step further in the understanding of this complex system. The finite element method has been used to take into account the dynamic interactions occurring in the ice-dam-reservoir system during a seismic excitation. The dynamic characteristics of these models have been determined to highlight the effect of the ice-cover for different sizes of ice-dam-reservoir systems. The present paper particularly consider: i) the dam size effect, iii) the earthquake characteristics effect iii) the vertical component effect, and iv) the water compressibility effect in the reservoir.

The studied system includes a vertical upstream face dam, supported on a rigid foundation and impounding ice-covered water reservoir. The finite element modeling of the ice sheet allows to take into consideration the vibratory behaviour of the ice sheet and its interaction with the reservoir. The use of fluid finite element reproduces the distribution of the hydrodynamic pressures within the reservoir. The linear dynamic analyses by time-history, use ground acceleration corresponding to the seismic characteristics of Western and Eastern regions North America, compatible with a target spectre of the studied region. The dynamic characteristics of these models are determined to highlight the effect of the ice-cover for different sizes of ice-dam-reservoir systems.

The results have been interpreted in terms of displacements and accelerations of dam crests and tension maximum principal stresses. The different analyses conclude that the effect of ice covers can be important irrespective of the dam size.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique et contexte de l'étude	1
1.2 Cadre et objectifs de la recherche	4
1.3 Recherches antérieures.....	5
1.4 Structure du document	5
CHAPITRE 2 REVUE DES PROPRIÉTÉS DE LA GLACE ET DES RECHERCHES ANTÉRIEURES.....	6
2.1 Introduction.....	6
2.2 Revue des propriétés de la glace	6
2.2.1 Structure de la glace	7
2.2.2 Mécanismes de formation de la glace.....	7
2.2.3 Propriétés mécaniques de la glace	8
2.2.4 Mode de rupture.....	9
2.2.5 Masse volumique	11
2.2.6 Module d'élasticité	11
2.2.7 Coefficient de Poisson	12
2.3 Recherches antérieures.....	12
2.3.1 Interaction glace-structure	12

2.3.2 Influence de la composante verticale.....	15
CHAPITRE 3 CARACTÉRISTIQUES DE L'EXCITATION SISMIQUE.....	17
3.1 Généralités	17
3.2 Caractéristiques définissant un séisme.....	19
3.2.1 Durée et intensité du séisme	19
3.2.2 Contenu fréquentiel des mouvements anticipés	20
3.2.3 Période de récurrence	20
3.3 Sélection des accélérogrammes.....	21
3.3.1 Accélérogrammes historiques.....	21
3.3.2 Accélérogrammes artificiels d'Atkinson	23
3.4 Accélérations verticales	26
3.5 Spectre de calcul	27
3.6 Compatibilité des accélérogrammes avec le spectre de calcul.....	27
3.7 Paramètres des accélérogrammes (SMD)	30
3.8 Paramètres des accélérogrammes (SMP).....	35
CHAPITRE 4 ANALYSE PARAMÉTRIQUE	41
4.1 Introduction.....	41
4.2 Principes du calcul dans le domaine du temps.....	42
4.3 Conditions aux limites et choix des éléments	43
4.3.1 Conditions aux frontières du réservoir	44
4.3.2 Conditions aux frontières à l'extrémité amont du couvert de glace	46
4.3.3 Conditions aux frontières à l'interface barrage-fondation.....	47
4.3.4 Conditions aux frontières à l'interface glace-barrage.....	47
4.4 Modélisation du système glace-barrage-réservoir	47
4.4.1 Sous-structures modélisées.....	47
4.4.2 Modélisation du barrage	48
4.4.3 Modélisation du réservoir.....	51
4.4.4 Modélisation du couvert de glace.....	51
4.5 Modèles d'éléments finis et ingrédients de l'analyse temporelle	52

4.5.1 Maillages	52
4.5.2 Amortissement.....	55
4.6 Modèle numérique	56
4.7 Analyse paramétrique	56
4.7.1 Paramètres de l'étude.....	56
4.7.2 Géométrie et maillage du système à l'étude.....	57
4.7.3 Influence de la profondeur du réservoir et du nombre de nœuds par élément.....	57
4.7.4 Effet de la compressibilité de l'eau	59
4.7.5 Conditions aux limites à l'extrémité amont du couvert de glace	61
4.7.6 Effet du module d'élasticité de la glace.....	63
4.7.7 Effet de l'épaisseur du couvert de glace	66
4.8 Résumé.....	69
CHAPITRE 5 ANALYSE COMPARATIVE.....	70
5.1 Objectif du chapitre.....	70
5.2 Introduction.....	70
5.3 Excitation sismique	71
5.3.1 Conditions initiales, réponses statique et temporelle.....	72
5.4 Discussion des résultats	73
5.5 Effet des séismes de récurrence SMD.....	74
5.5.1 Déplacement à la crête du barrage.....	75
5.5.2 Accélération à la crête du barrage	76
5.5.3 Évaluation des contraintes et du potentiel de fissuration	77
5.6 Réponse temporelle.....	83
5.7 Analyse comparatoire.....	88
5.7.1 Légende et nomenclature des graphiques.....	88
5.7.2 Analyse du déplacement en crête	89
5.7.3 Analyse des contraintes principales à la face amont du barrage	91
5.7.4 Analyse des contraintes principales de la face aval du barrage.....	96
5.8 Résumé.....	102

CHAPITRE 6 CONCLUSION	103
------------------------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE.....	106
---------------------------	------------

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Structure élémentaire de la glace (Bouaanani, 2002).	7
Figure 2.2 : Courbes Contrainte-Déformation (Bouaanani, 2002).	9
Figure 3.1 : Sismicité de l'Est de l'Amérique du Nord.	18
Figure 3.2 : Accélérogrammes historiques horizontaux.	24
Figure 3.3 : Accélérogrammes historiques verticaux.	25
Figure 3.4 : Accélérogrammes artificiels d'Atkinson.	26
Figure 3.5 : Spectres UHS d'accélération horizontaux ($\xi=5\%$).	28
Figure 3.6 : Spectres UHS d'accélération verticaux ($\xi=5\%$).	29
Figure 3.7 : Spectres UHS d'accélération horizontaux en (a) et verticaux en (b) des accélérogrammes artificiels d'Atkinson ($\xi=5\%$).	29
Figure 3.8 : Spectres UHS d'accélération horizontale historiques (SMD) ($\xi=5\%$).	32
Figure 3.9 : Accélérogrammes historiques modifiés horizontaux.	32
Figure 3.10 : Spectres UHS d'accélération verticale historiques (SMD) ($\xi=5\%$).	33
Figure 3.11 : Accélérogrammes historiques modifiés verticaux.	33
Figure 3.12 : Spectres UHS d'accélération des accélérogrammes artificiels modifiés, composante horizontale en (a) et verticale en (b) pour une de récurrence SMD ($\xi=5\%$).	34
Figure 3.13 : Accélérogrammes artificiels modifiés.	35
Figure 3.14 : Spectres UHS d'accélérations horizontales historiques (SMP) ($\xi=5\%$).	37
Figure 3.15 : Accélérogrammes historiques modifiés horizontaux.	37
Figure 3.16 : Spectres UHS d'accélérations verticales historiques (SMP) ($\xi=5\%$).	38
Figure 3.17 : Accélérogrammes historiques modifiés verticaux.	38

Figure 3.18 : Spectres UHS d'accélération des accélérogrammes artificiels modifiés, composante horizontale en (a) et verticale en (b) pour une de récurrence SMP ($\xi=5\%$).	39
Figure 3.19 : Accélérogrammes artificiels modifiés.	40
Figure 4.1 : Système glace-barrage-réservoir à l'étude : (a) barrage 21 m d'hauteur; (b) barrage 35 m d'hauteur; (c) barrage 60 m d'hauteur; (d) barrage 90 m d'hauteur.	41
Figure 4.2 : Frontières du système glace-barrage-réservoir (adapté de Ghrib, Léger et Tinawi, 1996).	43
Figure 4.3 : Illustration des interfaces et des types d'éléments formant les sous-systèmes.	44
Figure 4.4 : Modélisation des interfaces des éléments fluides (Vittecoq 2005).	46
Figure 4.5 : Système glace-barrage-réservoir (Adaptée de Bouaanani, 2002).	48
Figure 4.6 : Élément à déformation plane typique.	49
Figure 4.7 : Dimensions géométriques des barrages-poids à l'étude : (a) 21 m d'hauteur, (b) 35 m d'hauteur, (c) 60 m d'hauteur, (d) 90 m d'hauteur (Adaptée de Léger et Leclerc, 1996).	50
Figure 4.8 : Modèles d'éléments finis des systèmes glace-barrage-réservoir.	54
Figure 4.9 : Maillage du système glace-barrage-réservoir.	57
Figure 4.10 : Sensibilité des modèles éléments finis et l'effet de la longueur du réservoir.	58
Figure 4.11 : Effet de la compressibilité de l'eau, séisme du Saguenay, SMD (sans glace).	59
Figure 4.12 : Effet de la compressibilité de l'eau, séisme du Saguenay, SMD (avec glace).	61
Figure 4.13 : Contraintes principales de traction (MPa) du barrage 21m : a) condition frontière d'encastrement; b) condition frontière, libre en X; c) condition frontière, libre en Y.	63
Figure 4.14 : Légende des points à l'étude et paramètre des sous-systèmes.	64

Figure 4.15 : Déplacement en crête du barrage.....	64
Figure 4.16 : Contraintes principales de traction de la face amont du barrage.....	65
Figure 4.17 : Contraintes principales de traction de la face aval du barrage.	66
Figure 4.18 : Contraintes principales de traction de la face amont du barrage.....	68
Figure 4.19 : Contraintes principales de traction de la face aval du barrage	69
Figure 5.1: Système glace-barrage-réservoir à l'étude : (a) barrage 21 m d'hauteur; (b) barrage 35 m d'hauteur; (c) barrage 60 m d'hauteur; (d) barrage 90 m d'hauteur.	70
Figure 5.2 : Chargement statique et dynamique sans effet du couvert de glace.	71
Figure 5.3 : Chargement statique et dynamique avec effet du couvert de glace.....	72
Figure 5.4 : Pression hydrostatique pour le modèle 21 m d'hauteur.	73
Figure 5.5 : Modèle d'élément finis avec les différents points à l'étude.	74
Figure 5.6 : Points de calcul, nomenclature des barrages et numérotation des séismes.....	75
Figure 5.7 : Déplacements horizontaux au point A.....	76
Figure 5.8 : Accélération horizontale au point A.....	77
Figure 5.9 : Contrainte principale maximale obtenue de différents points sur la face amont.	79
Figure 5.10 : Contrainte principale maximale obtenue de différents points sur la face aval.....	81
Figure 5.11 : Points analysés avec nom et composante du chargement.....	83
Figure 5.12 : Déplacements à la crête pour les barrages-poids de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m (Point A) sans et avec couvert de glace.....	85
Figure 5.13 : Contrainte principal à la base amont des barrages-poids de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m (Point E) sans et avec couvert de glace.....	86
Figure 5.14 : Contrainte principal (Point F) des barrages-poids de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m sans et avec couvert de glace.....	87
Figure 5.15 : Points de calcul, nomenclature des barrages et numérotation des séismes.....	89

Figure 5.16 : Déplacement maximum obtenue au point A en crête des barrages- poids.	90
Figure 5.17 : Contrainte principale maximale obtenue au point C de la face amont.	92
Figure 5.18 : Contrainte principale maximale obtenue au point D de la face amont.	94
Figure 5.19 : Contrainte principale maximale obtenue au point E au pied amont du barrage.	95
Figure 5.20 : Contrainte principale maximale obtenue au point F de la face aval.	97
Figure 5.21 : Contrainte principale maximale obtenue au point G de la face aval.	98
Figure 5.22 : Contrainte principale maximale obtenue au point H de la face aval.	100
Figure 5.23 : Contrainte principale maximale obtenue au point I au pied du barrage aval.	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Valeurs du module d'élasticité dynamique (E_d) en fonction de la température de la glace (θ_i) (Michel, 1978)	12
Tableau 3.1 : Caractéristiques des accélérogrammes historiques.	22
Tableau 3.2 : Paramètres des accélérogrammes.....	23
Tableau 3.3: Paramètres des accélérogrammes, (SMD).	30
Tableau 3.4 : Paramètres des accélérogrammes, (SMP).	36
Tableau 4.1 : Données des quatre modèles d'éléments finis.	52
Tableau 4.2 : Résumé des périodes fondamentales des sous-systèmes et du système global.	53

Chapitre 1

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le projet de recherche en posant la problématique et en définissant le contexte de l'étude. Le cadre et les objectifs de la recherche sont identifiés. La structure du document est présentée à la fin de ce chapitre.

1.1 Problématique et contexte de l'étude

Les interactions entre la glace et les structures sont, depuis la fin du 19^e siècle, sujet de préoccupations. À cette époque, il était question de concevoir des brise-glace afin de pouvoir naviguer sur les rivières du nord de l'Europe. Au début du 20^e siècle, les ingénieurs canadiens s'intéressent à ce phénomène lorsque certaines centrales hydro-électriques sont obstruées par la glace (Cammaert & Muggeridge, 1988). Dans les années soixante-dix, motivés par l'exploitation des ressources pétrolifères dans le nord du Canada, des recherches sont entreprises pour évaluer les forces exercées par un couvert de glace en mouvement sur les plates-formes de forage (Michel, 1978). Des recherches sur les mêmes structures ont aussi été réalisées dans les années quatre-vingt pour étudier les effets combinés d'un séisme et d'un couvert de glace (Croteau, 1983; Miura *et al.*, 1988). En effet, la plupart des séismes enregistrés dans l'est de l'Amérique du Nord se sont produits en automne ou en hiver. Le rapprochement du soleil de la terre pendant cette période serait à l'origine de ce phénomène. L'augmentation du champ d'attraction gravitationnelle occasionnée par ce

rapprochement contribuerait grandement à l'accroissement de l'activité sismique (Chagnon, 1992).

Toutefois, peu de recherches se sont penchées sur les conséquences d'un séisme sur l'interaction dynamique glace-barrage. Pourtant, on sait que sur les réservoirs des régions du Nord, il se forme durant la saison hivernale un couvert de glace qui peut atteindre jusqu'à 2 mètres d'épaisseur par endroit. L'Association Canadienne des Barrages (ACB, 1999), qui constitue le principal organisme de référence canadien en matière de sécurité des barrages, recommande aux concepteurs de prêter une attention particulière à la détermination des charges appliquées par la glace et des charges sismiques pour analyser la stabilité des barrages et de leur fondation. L'ACB reconnaît toutefois la grande incertitude relative à ce type de chargement. En ce sens, le Centre de recherche en génie parasismique et en dynamique des structures de l'Université de Sherbrooke (CRGP) a effectué, en collaboration avec Hydro-Québec, des essais à grande échelle sur le barrage-poids Outardes 3 situé au Nord du Québec, en été et en hiver de l'année 1994. Ces essais ont permis de comparer les résultats et d'obtenir une première évaluation expérimentale de l'effet de la présence du couvert de glace sur le comportement dynamique de ce barrage-poids (Proulx *et al.*, 1994; Bouaanani *et al.*, 2002).

Il devient donc intéressant d'étudier l'influence d'un séisme se produisant en hiver sur le comportement structural des barrages-poids en béton au Québec puisque Hydro-Québec possède un parc de barrages considérable. Sur la base du répertoire des barrages à la fin de 1992, le nombre de barrages exploités par Hydro-Québec est de 512 dont 111 sont en béton et 401 en remblai. De cet ensemble, 291 ont une hauteur comprise entre 0 et 10 m, 71 entre 10 et 15 m, 131 entre 15 et 60 m et 19 ont plus de 60 m (Hydro-Québec, 2003). De plus, en ce qui concerne les barrages en béton, 62 ont plus de 50 ans et les effets sismiques ont été considérés de manière minimale lors de leur conception, compte tenu des critères et les outils de calculs de l'époque. En tenant

compte de ces différences au niveau de la taille des barrages et de leur modèle de conception, la présente étude prend tout son sens.

Des recherches portant sur les analyses dynamiques incluent rarement la composante verticale d'un séisme. L'effet de la composante verticale d'un tremblement de terre sur une structure conventionnelle a été considéré habituellement sans importance en comparaison avec la réponse d'une structure chargée sous la composante horizontale. Les contraintes causées par la composante verticale du séisme sont habituellement une petite fraction de celles sous les charges statique normale agissant sur la structure. Toutefois la composante verticale pourrait être non négligeable sur le comportement. Les recherches de Chopra et Chakrabarti (1973), portent sur l'analyse du barrage Koyna soumis au tremblement de terre Koyna du 11 décembre 1967, ont démontré qu'il y a une augmentation de 10 à 20% des contraintes principales causé par la composante verticale du séisme. L'influence de la composante verticale d'un séisme sur la réponse d'un barrage ayant un couvert de glace est donc prise en considération dans cette étude.

La période de récurrence des séismes est représentée par deux définitions de séismes devant être considérés lors du dimensionnement ou de la vérification d'un barrage, soit le Séisme Maximum de Dimensionnement (SMD) et le Séisme Maximum Probable (SMP). Le SMD, dont la probabilité de dépassement est de 2% en 50 ans, correspond à une période de récurrence de 2500 ans. Au Canada, l'Association Canadienne de Barrages (ACB), Ontario Hydro et BC Hydro entre autres, recommandent une période de récurrence de 10 000 ans pour le SMP. Pour les besoins de cette recherche, ces deux périodes de récurrence, le Séisme Maximum de Dimensionnement et le Séisme Maximum Probable, caractérisent l'intensité des séismes.

1.2 Cadre et objectifs de la recherche

L'objectif de ce mémoire consiste à déterminer l'influence d'un couvert de glace sur la réponse dynamique des barrages-poids en béton. Afin d'étudier cette influence sur l'ensemble des barrages que l'on retrouve au Québec, différentes hauteurs sont considérés, soit 21 m, 35 m, 60 m et 90 m. Certains paramètres pouvant modifier la réponse temporelle sont considérés dans cette étude:

- i. l'influence de l'intensité des séismes : SMD, SMP;
- ii. l'influence de la composante verticale des séismes;
- iii. l'influence des séismes représentatifs de l'est de Canada versus un séisme représentatif de l'ouest canadien.

Dans le cadre de la présente étude, des modèles constitués d'éléments finis bidimensionnels 2D qui tiennent compte des tailles mentionnées précédemment sont élaborés. L'utilisation d'un modèle en 2D dans le cadre de recherches réalisées antérieurement (Bouaanani *et al.*, 2002) confirme que les moyens mis en œuvre pour l'atteinte des objectifs de la présente étude sont adéquats. Ces modèles sont constitués de sous-systèmes : soit le couvert de glace, le réservoir et le barrage. On porte un intérêt particulier au développement des conditions aux limites de tels modèles. Des analyses sismiques linéaires dans le domaine du temps sont effectuées sur ces modèles. Leurs réponses temporelles est analysée en détail sous différentes conditions dont le comportement en contrainte et le déplacement en crête des ouvrages.

1.3 Recherches antérieures

Dans la littérature, différentes recherches ont traité des propriétés physiques et mécaniques de la glace et de l'interaction de celle-ci avec certaines structures dont les plates-formes de forage. D'autres recherches ont étudié l'effet de la composante verticale d'un tremblement de terre sur une structure. Une revue détaillée de la littérature est présentée au chapitre 2.

1.4 Structure du document

Ce mémoire comporte six chapitres. Dans ce premier chapitre, le sujet de recherche, la problématique, les objectifs et l'état des connaissances ont été présentés.

Le chapitre 2 présente une revue détaillée des propriétés de la glace et des recherches antérieures.

Le chapitre 3 décrit les caractéristiques des excitations sismiques utilisées pour fin de cette étude.

Le chapitre 4 analyse la sensibilité des modèles en fonction de certaines propriétés agissant dans la réponse dynamique des barrages-poids et des conditions aux limites des sous-systèmes.

Le chapitre 5 présente une analyse comparative des réponses temporelles des modèles des barrages-poids avec et sans couvert de glace.

Finalement, la conclusion présente une synthèse de l'étude et propose des axes de recherche à plus long terme.

Chapitre 2

Revue des propriétés de la glace et des recherches antérieures

2.1 Introduction

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude des propriétés de la glace. D'abord la structure de la glace est étudiée, suivi des propriétés mécaniques de la glace, puis du mode de rupture. Ensuite, la masse volumique est présentée ainsi que le module d'élasticité et cette partie se termine avec le coefficient de Poisson.

La deuxième partie de ce chapitre est quant à elle consacrée aux principales études antérieures du phénomène d'interaction dynamique glace-structure. L'expérience dans ce domaine étant très limitée au niveau des barrages, les recherches faites sur les plates-formes de forage servent à amorcer l'étude de ce problème. Cette dernière partie se termine par l'influence de la composante verticale des séismes sur la réponse dynamique des barrages-poids.

2.2 Revue des propriétés de la glace

Il est nécessaire de bien comprendre les propriétés de la glace pour élaborer le plus fidèlement possible un modèle qui reflète son comportement.

2.2.1 Structure de la glace

La glace se présente en une structure élémentaire sous la forme d'un tétraèdre composé de 4 atomes d'oxygène distribués de façon symétrique autour d'un atome d'oxygène central, comme l'illustre la figure 2.1. Les bases de ces tétraèdres élémentaires sont disposées de façon à former une surface hexagonale plane que l'on appelle communément un plan basal. La direction perpendiculaire à ce plan se nomme l'axe optique. La cohésion de ce réseau est assurée par les liens d'hydrogène. La nature anisotrope du comportement de la glace s'explique par l'existence d'un plus grand nombre de liens hydrogènes dans la direction de l'axe optique qui augmente la probabilité qu'une fracture du réseau cristallin apparaisse le long du plan basal.

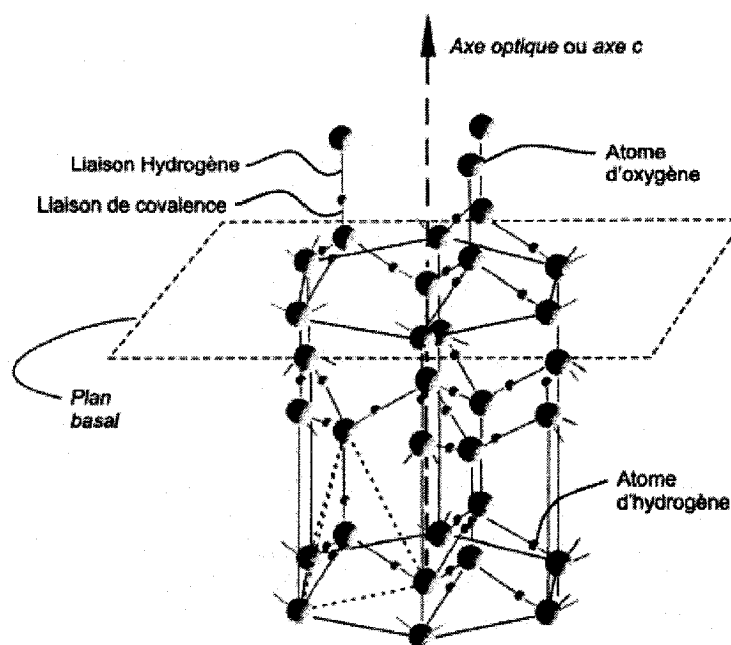


Figure 2.1 : Structure élémentaire de la glace (Bouaanani, 2002).

2.2.2 Mécanismes de formation de la glace

Un grand nombre de facteurs interviennent lors de la formation et de la croissance de la glace, donc il s'avère difficile de parler d'un couvert de glace typique. La formation

d'un couvert de glace varie selon le milieu auquel il est soumis. Cela peut se présenter en eau agitée telle une rivière ou en eau calme tel un lac ou un réservoir. Pour fin de cette étude, seul la formation d'un couvert de glace en eau calme est présentée.

Le processus de formation d'un couvert de glace débute lorsque la température de l'eau s'abaisse en dessous de 0°C , eau sans salinité du sel dissous. À ce moment, de minces cristaux de glace se forment à la surface de l'eau et finissent par constituer une couche primaire de glace granulaire qui porte le nom de glace de type primaire (P). Ensuite une couche de glace de type secondaire (S), de nature colonnaire, se forme dans une direction verticale. Ce qui augmente l'épaisseur du couvert de glace. L'orientation préférentielle des axes optiques de ces cristaux peut être verticale (S1) ou horizontale (S2 ou S3). La glace est dite de type S2 si l'orientation des axes optiques, dans le plan horizontal, est aléatoire. Pour plus de détails sur la structure des couverts de glace, il est recommandé de consulter Michel et Ramseier (1969). Dans le paragraphe suivant (2.2.3), l'étude est concentrée sur la glace de type S2 puisqu'elle représente la partie la plus importante du couvert de glace sur un réservoir d'eau douce.

2.2.3 Propriétés mécaniques de la glace

Des études (Mellor, 1980) ont révélé que les essais de résistance à un taux de déformation constant décrivent mieux le phénomène d'écrasement d'un couvert de glace contre une structure. Les paramètres qui permettent de déterminer les propriétés mécaniques du matériau sont donc examinés à l'aide de ce type d'essai.

De manière générale, le comportement de la glace peut être qualifié de visco-plasto-élastique (Michel, 1964), caractérisé notamment par une grande ductilité aux faibles vitesses de déformation et une fragilité aux vitesses élevées. La figure 2.2 montre de façon schématique différentes formes de courbes contraintes-déformations en fonction du taux de déformation appliqué. À des taux de déformation bas, le matériau est

ductile et les fissures n'apparaissent pas généralement (courbes a). À des taux de déformation moyens, il y a apparition des fissures et le matériau est fragile en traction, mais ductile en compression (courbes b). À des taux de déformation élevés, il y a apparition des fissures et le matériau devient fragile en compression et en traction (courbes c) (Schulson, 1999).

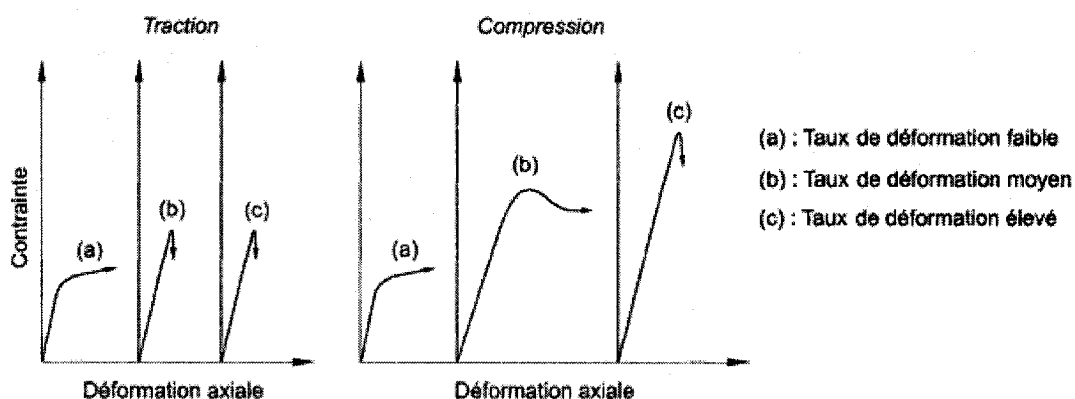


Figure 2.2 : Courbes Contrainte-Déformation (Bouaanani, 2002).

2.2.4 Mode de rupture

Notons que l'étude de l'interaction dynamique structure-couvert de glace passe inévitablement par une investigation des modes de rupture possibles de ce dernier. Il est généralement admis que la rupture d'un couvert de glace peut se produire selon quatre modes : par formation d'amas de blocs, par flexion, par flambement ou par écrasement (Kry. 1980). Dans le cas des barrages, seuls les trois derniers modes peuvent généralement avoir lieu. La rupture par flexion peut se produire lors d'un mouvement vertical causé par un séisme ou par les fluctuations du niveau du réservoir. La rupture par flambement a peu de chance de se produire sauf pour des couverts de glace très minces. En cas d'excitation horizontale, la rupture se fait généralement par écrasement. La contrainte développée par l'écrasement de la glace sur un obstacle dépend de sa vitesse relative par rapport à la structure. Dans le cas d'un séisme

(vitesse relative importante), le couvert de glace commence généralement par subir une déformation élastique suivie d'une rupture soudaine.

Des études expérimentales ont montré que la résistance d'un échantillon de glace est sensible à plusieurs facteurs, notamment :

- son mode de rupture : flexion, cisaillement, écrasement ou compression;
- le type de rupture : fragile ou ductile;
- la présence ou non de fissures;
- la technique de mesure utilisée.

Résistance à la compression : C'est la contrainte maximum que peut subir un couvert de glace soumis à une charge appliquée dans son plan. Ce cas se présente notamment lorsque le couvert de glace rentre en contact avec une structure verticale. La résistance à la compression dépend essentiellement de la taille des cristaux, du taux du chargement du confinement et de la température de la glace. Pour de la glace colonnaire, à -10°C et pour un taux de chargement élevé, des valeurs entre 8 et 10 MPa sont généralement admises. En se basant sur des résultats expérimentaux Michel (1978) propose l'équation suivante pour estimer la résistance à la compression de la glace :

$$\sigma = 9,4 \times 10^5 \left(d^{-1/2} + 3|\theta|^{0,78} \right) \quad (2.1)$$

où σ est la résistance à la compression en Pa, d la taille du cristal en cm et θ la température en degré Celcius. Pour une glace colonnaire de type S2, d varie de 0,5 cm environ (couche supérieure du couvert de glace) à 2,5 cm environ (face inférieure), ce qui conduit, d'après l'équation 2.1, à des résistances allant de 5,4 MPa à 13,3 MPa à l'approche de 0°C .

Résistance à la traction : De la même façon, Michel a développé une équation pour évaluer la résistance à la traction d'une glace colonnaire en eau douce dont la rupture est fragile. Selon l'équation suivante, la résistance en traction pour une glace moyenne à -10°C se situerait donc entre 0,5 et 1,1 MPa :

$$\sigma_t = 0,079 \sqrt{\frac{1 - 0,0009\theta}{d}} \quad (2.2)$$

où σ_t est la résistance à la compression en (MPa).

2.2.5 Masse volumique

À une température de 0°C , la masse volumique de la glace pure est estimée à $916,8 \text{ kg/m}^3$. Comme la plupart des matériaux, la masse volumique de la glace augmente avec une diminution de la température. Ainsi, à une température de -30°C , la masse volumique de la glace est de $920,6 \text{ kg/m}^3$. Notons cependant que la masse volumique de la glace est affectée par les impuretés, notamment les inclusions d'air et d'eau. Les premières tendant à diminuer la masse volumique, alors que les deuxièmes l'augmentent. Malheureusement, aucune étude scientifique n'a réussi jusqu'à présent à quantifier la contribution de ces impuretés dans la masse volumique de la glace. Dans la littérature, des valeurs de masse volumique entre 910 à 920 kg/m^3 sont généralement proposées.

2.2.6 Module d'élasticité

Il a été démontré précédemment qu'à un taux élevé de déformation, la glace se comporte comme un matériau élastique et fragile. Michel (1978) a proposé l'utilisation d'un module d'élasticité dynamique, E_d , applicable si le taux de déformation excède 10^{-1} s^{-1} . Le tableau 2.1 présente les valeurs du module dynamique telles que proposées par Michel.

Tableau 2.1 : Valeurs du module d'élasticité dynamique (E_d) en fonction de la température de la glace (θ_i) (Michel, 1978)

Type de glace	Orientation de l'axe optique	Module d'élasticité dynamique en 10^9 Pa
S2	horizontale	$9,27 [1-1,36 \times 10^{-3} \theta_i]$
	verticale	$9,62 [1-1,07 \times 10^{-3} \theta_i]$

La valeur de 9500 MPa est généralement considérée comme étant une bonne approximation pour de la glace relativement dense.

2.2.7 Coefficient de Poisson

Les auteurs s'entendent généralement pour dire que le coefficient de Poisson peut prendre des valeurs entre 0,30 et 0,36 (Michel, 1978).

2.3 Recherches antérieures

2.3.1 Interaction glace-structure

Quelques auteurs ont analysé l'interaction dynamique glace-structure. Ces recherches s'avèrent nécessaires dans le cas où une structure en contact avec un couvert de glace est soumise à un tremblement de terre. On retrouve à titre d'exemple, Croteau (1983), Miura *et al.* (1988), McCullough *et al.* (1996), Sun (1993), Le Centre de Recherche en Génie Parasismique et en Dynamique des Structures de l'Université de Sherbrooke (CRGP) (1994) et Bouaanani (2002). Un résumé de leurs travaux est présenté dans cette section.

Croteau (1983) a étudié l'interaction dynamique entre un couvert de glace et une plateforme de forage. Dans sa recherche, il propose un modèle à masses concentrées et les effets hydrodynamiques sont représentés par des masses ajoutées concentrées aux nœuds concernés. Le fluide est hypothétiquement incompressible. Le point de contact

entre le couvert de glace, supposé rigide, et la structure est modélisé par un élément fini unidimensionnel et non-linéaire. Croteau simule l'écrasement du couvert de glace contre la structure, en proposant une rigidité adéquate à l'élément de contact. Ensuite, il applique un chargement extérieur associé à des séismes de fortes amplitudes et de courtes durées pour procéder à l'analyse dynamique. Le résultat démontre que la présence du couvert de glace améliore le comportement de la structure en limitant les déplacements, les accélérations et les efforts tranchants à la base.

En utilisant un modèle d'éléments finis en deux dimensions 2D, Miura *et al.* (1988) ont étudié le phénomène d'interaction dynamique sol-structure-glace lors d'un tremblement de terre. Ce modèle représentait une plate-forme de forage conçue pour l'océan Arctique. Les auteurs ont supposé que la glace se comporte de façon élastique. La pression hydrodynamique a été représentée par des masses ajoutées appliquées aux nœuds. En conclusion, les auteurs mentionnent que le comportement de la structure en présence d'un couvert de glace est amélioré par l'amortissement que procure celui-ci.

La recherche de McCullough *et al.* (1996) étudie l'interaction dynamique entre un barrage et un couvert de glace. Dans cette étude, la présence du couvert de glace se traduit essentiellement par une masse, une rigidité et un amortissement ajoutés comme le propose Croteau (1983). En s'inspirant également des travaux de Sun (1993), qui a étudié le phénomène des effets d'une couche de glace sur la distribution de la pression hydrodynamique sur une plate-forme de forage lors d'un séisme, les auteurs tiennent compte d'une amplification hydrodynamique à l'interface glace-barrage qui proviendrait du couvert de glace. Dans sa recherche, Sun considère la compressibilité de l'eau et il en résulte que la présence d'un couvert de glace affecte la distribution de la pression hydrodynamique sur la plate-forme particulièrement au droit de l'interface glace-eau.

McCullough *et al.* (1996), en supposant que le comportement d'une plate-forme de forage peut se reporter sur un barrage, ont déterminé deux étapes pour la distribution

de la pression hydrodynamique sur le barrage. Premièrement, en appliquant les masses de Westergaard, formule qui a pour hypothèse que le barrage est rigide et que l'eau est incompressible. En second lieu, en se fiant aux données numériques compilées par Sun, les auteurs modifient la distribution de la pression hydrodynamique à l'interface glace-réservoir. Trois modèles de calcul simplifiés sont proposés en tenant compte de deux niveaux de chargements sismiques et trois longueurs différentes de couverts de glace. Ceux-ci ont été comparés en fonction des périodes de vibration obtenues, des déplacements à la crête du barrage, des distributions des contraintes principales en traction et enfin du facteur de sécurité au glissement. En conclusion, l'influence d'un couvert de glace est considérée non-négligeable sur l'interaction sismique glace-barrage.

De son côté, Le Centre de Recherche en Génie Parasismique et en Dynamique des Structures de l'Université de Sherbrooke (CRGP) a réalisé des essais à grande échelle. Les essais ont eu lieu sur le barrage de 84 mètres Outardes 3 en été et en hiver pour construire une base de données expérimentale sur les effets d'un couvert de glace sur le comportement dynamique des barrages. Dans leurs études, Bouaanani (2002), Proulx *et al.* (1994) se sont servis de cette base de données pour créer des modèles numériques appropriés susceptibles de reproduire les comportements enregistrés.

Bouaanani (2002) a développé une formulation incluant les effets dus au couvert de glace, de la compressibilité de l'eau, de l'absorption au fond du réservoir et de la flexibilité de la fondation. Il a ensuite programmé et incorporé cette méthode dans un logiciel d'éléments finis spécialisé dans l'analyse sismique des barrages. À l'aide d'un modèle d'éléments finis bidimensionnel, une étude paramétrique a été entreprise. Les résultats numériques obtenus ont été comparés à la base de données du CRGP mentionné ci-haut permettant ainsi d'évaluer la contribution de plusieurs facteurs à la réponse dynamique globale du système et également comprendre le comportement des réservoirs couverts de glace.

2.3.2 Influence de la composante verticale

Plusieurs chercheurs ont étudié l'influence de la composante verticale sur la réponse sismique de diverses structures.

Dans la recherche de Léger et Leclerc (1996), l'influence des caractéristiques de l'excitation sismique sur la fissuration des barrages-poids en béton est étudié. Pour étudier la composante verticale, ils ont réduit par un facteur de $2/3$ l'accélération horizontale. L'étude a démontré que l'addition des accélérations verticales aux accélérations horizontales n'influence pas significativement les réponses sismiques comparativement aux mêmes analyses ne considérant que la composante verticale. Néanmoins, les auteurs mentionnent que la composante verticale n'est pas critique au niveau de la propagation des fissures, mais demeure très significative pour la stabilité de parties structurales dont la fissuration a provoqué une séparation avec le barrage.

Quant à Christopoulous *et al.* (2003), ils ont étudié l'effet de l'accélération verticale d'un séisme historique en analysant la sécurité au glissement d'un barrage-poids. Le barrage-poids a été soumis à une gamme de séismes historiques séparée en deux groupes définissant la distance source-emplACEMENT. Les caractéristiques de l'accélération verticale sont fortement dépendantes de la distance source-emplACEMENT. L'analyse a démontré que l'incidence de l'accélération verticale sur la réponse au glissement du barrage-poids est plus significative près de la source que loin de la source. En outre, pour définir l'accélération verticale, l'utilisation du facteur de réduction de l'accélération horizontale par $2/3$ demeure une bonne approximation de la valeur moyenne, mais sous-estime le ratio V/H spécialement lorsque l'enregistrement est près de la source.

Lupien (1998) a, pour sa part, comparé des contraintes de tension maximales obtenues lors d'un tremblement de terre pour différents modèles 2D et 3D. Il en conclut que la participation de la composante verticale d'un tremblement de terre est non négligeable

lorsque le réservoir est plein. Une augmentation des contraintes se situant entre 10% et 40% a pu être observée.

Dans l'étude proposée par Kido *et al.* (1997) la performance du barrage Hitokura durant le séisme de Kobe en 1995 est étudiée. Les résultats les plus logiques du comportement de la structure étaient obtenus par simulation en incluant les composantes verticales et horizontales du tremblement de terre. Cependant, l'accélération verticale n'a pas affecté significativement les résultats concernant les contraintes dans le barrage durant le séisme.

Enfin, Chopra et Chakrabarti (1973) ont étudié la réponse d'un barrage-poids en béton incluant l'interaction barrage-réservoir sous chargement de la composante verticale d'un tremblement de terre. En considérant un réservoir plein et en variant la valeur du module élastique du béton, ils en concluent que la réponse du barrage causée par la composante verticale est comparable avec celle de la composante horizontale.

Chapitre 3

Caractéristiques de l'excitation sismique

3.1 Généralités

Ce chapitre traitera des caractéristiques des excitations sismiques utilisées pour les analyses dynamiques de la présente étude. L'Est de l'Amérique du Nord demeure une zone où les relevés sismiques sont peu nombreux. Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer la sismicité de cette région. En effet, comme le montre la figure 3.1, l'Est de l'Amérique du Nord est une zone sismique importante où des tremblements de terre de moyenne à forte magnitude se sont produits par le passé. On estime qu'à chaque année, l'Est du Canada est le siège d'environ 450 séismes, dont quatre en moyenne dépassent la magnitude 4 (REF – SÉISMES CANADA). Hydro-Québec compte plus de 450 barrages sur son territoire, dont 25% de ces aménagements sont des barrages-poids en béton. Par ailleurs, plusieurs barrages existants en béton ont été dimensionnés, il y a plusieurs décennies, avec des considérations minimales concernant l'action possible de séismes importants. La vulnérabilité sismique des barrages-poids en béton au Québec est donc présente. Un séisme de forte intensité et d'assez longue durée peut produire de sérieux dommages structuraux sur ces barrages-poids. Le barrage-poids de Koyna constitue un des cas les mieux documentés concernant les dommages structuraux pouvant être induit par un séisme. Des dommages structuraux tels que la fissuration de plusieurs monolithes sur les faces amont et aval ainsi qu'un mouvement relatif le long des joints verticaux entraînant d'importante fuite d'eau ont été observés.

Lors de l'étude de la réponse sismique d'un barrage construit ou à construire sur un site donné, il faut porter une attention particulière au choix et au nombre des tremblements de terre à utiliser dans l'analyse. L'objectif étant d'une part de reproduire le plus fidèlement possible les conditions particulières du site, et d'autre part de disposer de suffisamment de résultats représentatifs du comportement structural de l'ouvrage. Léger et Leclerc (1996) ont étudié l'influence des caractéristiques de l'excitation sismique sur la fissuration des barrages-poids en béton. Les résultats de leur étude démontrent que les calculs dynamiques non linéaires des barrages-poids sont très sensibles à la variabilité des paramètres décrivant l'excitation sismique. Ainsi des paramètres, tels que le contenu fréquentiel, l'intensité du mouvement du sol, la durée et la magnitude ont une influence sur la réponse des ouvrages.

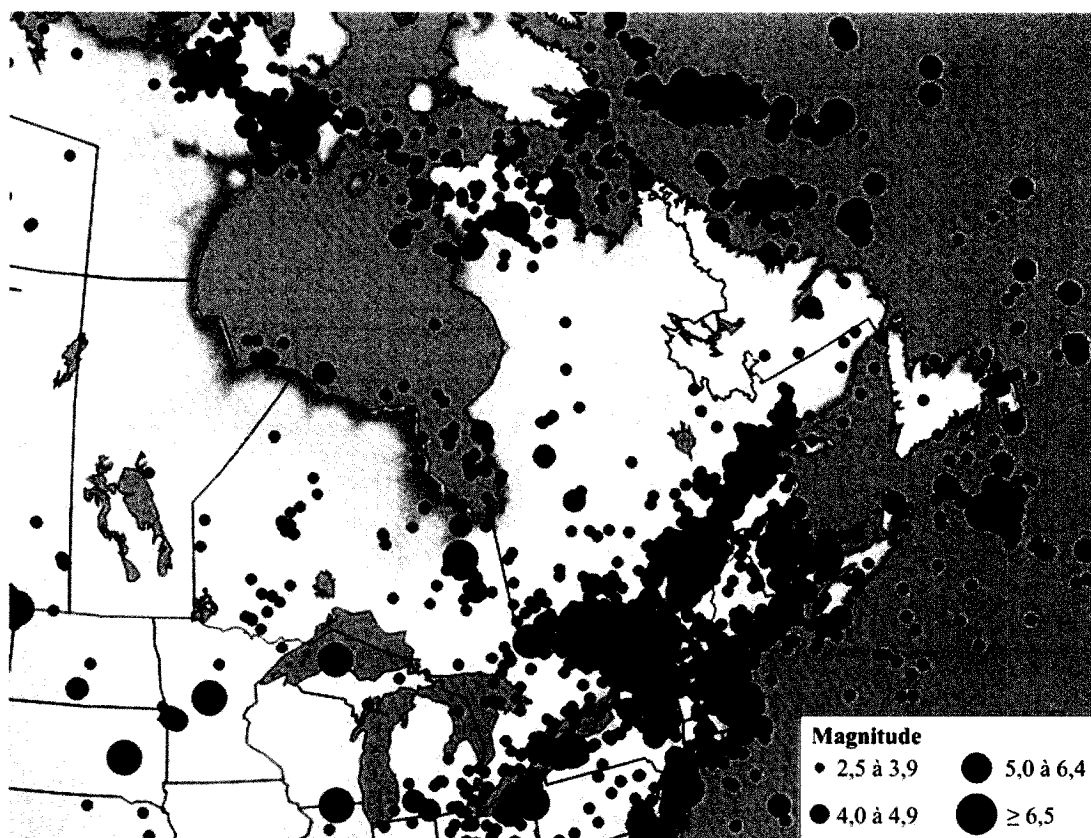


Figure 3.1 : Sismicité de l'Est de l'Amérique du Nord.

3.2 Caractéristiques définissant un séisme

Pour les besoins de cette recherche, les caractéristiques de base pour définir les séismes anticipés sur le site d'un barrage sont :

- i. L'intensité des secousses au sol,
- ii. la durée des secousses de fortes intensités,
- iii. le contenu fréquentiel,
- iv. la période de récurrence des séismes à utiliser et à définir en fonction d'un niveau de dommages potentiels donné.

3.2.1 Durée et intensité du séisme

La durée d'une excitation sismique peut être déterminée selon plusieurs méthodes, dont deux ont été retenues dans le cadre de la présente recherche. La première approche utilise la durée totale D_1 de l'accélérogramme. La seconde méthode consiste à définir la durée D_2 comme le temps nécessaire pour emmagasiner entre 5 et 95% d'énergie (Trifunac et Brady 1975). Cette énergie est déterminée par la somme des accélérations au carré, selon l'équation suivante :

$$AI = \int a^2 dt \quad (3.1)$$

AI : Intensité du séisme ($g^2 \cdot \text{sec}$);

a : accélération de l'accélérogramme (g);

t : temps, (s).

Dans le cadre de cette recherche, la durée D_2 sera définie par la période de temps comprise entre 0% et 95% de l'énergie produite par l'accélérogramme, ainsi nous tenons compte de la totalité des ondes primaire et secondaire.

3.2.2 Contenu fréquentiel des mouvements anticipés

Le contenu fréquentiel d'un accélérogramme est un paramètre représentatif des caractéristiques sismiques d'une région donnée. Le ratio a/v , où a est l'accélération de pointe au sol exprimé en g et v la vitesse maximale du sol exprimée en cm/s , est un indicatif important du contenu fréquentiel d'un accélérogramme. Par exemple, des valeurs a/v élevées sont caractéristiques des séismes de l'Est canadien, tandis que les valeurs a/v moyennes et faibles représentent des événements de l'ouest du pays. On considère généralement que les accélérogrammes typiques de l'Est canadien ont un ratio a/v supérieur à 1,2. L'évaluation du contenu fréquentiel sert à déterminer entre autres, si un accélérogramme est représentatif soit de l'Est ou de l'Ouest canadien.

3.2.3 Période de récurrence

La période de récurrence des séismes est représentée par trois définitions de séismes devant être considérés lors du dimensionnement ou de la vérification d'un barrage, soit le Séisme Maximum Probable (SMP), le Séisme Maximum de Dimensionnement (SMD) et le Séisme de Base d'Exploitation (SBE).

Le sous-groupe sismicité d'Hydro-Québec (Hydro-Québec 2003) propose, pour l'évaluation de la sécurité sismique, les trois périodes de récurrence de tremblement de terre présenté précédemment dépendant de l'étude visée. Le séisme maximum de dimensionnement (SMD) est représenté par la plus forte secousse sismique considérée pour la conception ou pour la réévaluation de la sécurité de l'ouvrage, pour lequel le barrage et les structures connexes essentielles doivent résister aux secousses sismiques induites par le SMD sans libérer les eaux du réservoir. Le SMD, dont la probabilité de dépassement est de 2% en 50 ans, correspond à une période de récurrence de 2500 ans. Le séisme de base d'exploitation (SBE) représente le niveau maximal de secousses sismiques susceptible de se produire durant la vie de l'ouvrage et pour lequel le barrage doit demeurer dans le domaine élastique. La grandeur du SBE correspond à

une probabilité annuelle de dépassement d'environ 1/145 ans. Le séisme maximum probable (SMP), est égal au SMD dont la période de récurrence est de 2500 ans. Au Canada, l'Association Canadienne de Barrages (ACB), Ontario Hydro et BC Hydro, entre autres, recommandent une période de récurrence de 10 000 ans pour le SMP. Pour les besoins de cette recherche, une période de récurrence de 10 000 ans caractérisera le SMP.

3.3 Sélection des accélérogrammes

Il existe très peu d'enregistrements de tremblements de terre de magnitude supérieure à 5 survenus dans l'Est de l'Amérique du Nord. La magnitude et le contenu fréquentiel élevés, sont deux paramètres typiques de l'Est canadien. De plus, il est préférable que les enregistrements soient obtenus sur le rocher à une distance épacentrale relativement près du site considéré ($R=20$). Étant donné que nous pouvons retenir peu d'enregistrements correspondant à ces critères, nous devons générer ou utiliser des accélérogrammes artificiels.

3.3.1 Accélérogrammes historiques

Le tableau 3.1 présente les caractéristiques des accélérogrammes historiques considérés dans cette recherche. Les données numériques des accélérogrammes retenus proviennent de banque de données diverses, dont deux du site des ressources naturelles du Canada et du site COSMOS Virtual Data Center.

Tableau 3.1 : Caractéristiques des accélérogrammes historiques.

Nom	Enregistrement	Distance épacentrale	Date	Magnitude
Saguenay	Site 16, Chicoutimi-Nord	43.2 km	1988	5.9
Nahanni	Site 2, Slide Mountain	7.4 km	1985	6.9
El Centro	Imperial Valley	12.2 km	1940	6.9

Les trois accélérogrammes historiques sélectionnés pour les applications numériques, sont ceux provenant des tremblements de terre du Saguenay, de Nahanni et d'El Centro. Le 25 novembre 1988, un tremblement de terre de magnitude (moment) 5.9 secouait une grande partie du Québec. Le séisme a été baptisé le séisme du Saguenay, son épicentre fut localisé à 36 km au sud de Chicoutimi, agit en tant que premier séisme de forte intensité enregistré dans l'est de l'Amérique du Nord. Avec un ratio a/v de 5.1, figurant au tableau 3.2, ce séisme démontre bien le contenu en hautes fréquences et les impulsions rapprochées qui sont caractéristiques des séismes de l'Est du Canada. Le second accélérogramme provient de la région de la Nahanni, située dans les Territoires du Nord-Ouest. Le 23 décembre 1985, cette région fut ébranlée par un séisme de magnitude 6,9, surnommé le séisme de Nahanni. Les vibrations se sont faites ressentir dans les Territoires du Nord-Ouest, au Yukon, en Alberta, en Saskatchewan, en Colombie-Britannique et dans le sud-est de l'Alaska. Étant donné que les caractéristiques sismiques de cet accélérogramme sont représentatives de l'Est canadien, il sera utilisé pour évaluer les contraintes de tension dans le barrage se situant au Québec. Le dernier accélérogramme historique est tiré du séisme d'El Centro. Survenu à El Centro, en Californie, en 1940, ce séisme reflète bien les caractéristiques de l'Ouest canadien et servira pour les analyses comparatives de l'effet du contenu fréquentiel sur l'évaluation des contraintes de tension dans le barrage-poids.

3.3.2 Accélérogrammes artificiels d'Atkinson

Étant donné le manque d'enregistrement représentatif de l'Est canadien, la génération d'accélérogramme est une méthode utilisée pour effectuer les analyses. Pour les analyses de cette recherche, quatre accélérogrammes artificiels (A1, A2, A3 et A4) sont fournis par Atkinson et proviennent d'une méthode qui générant un accélérogramme par un modèle aléatoire de vibration sismique.

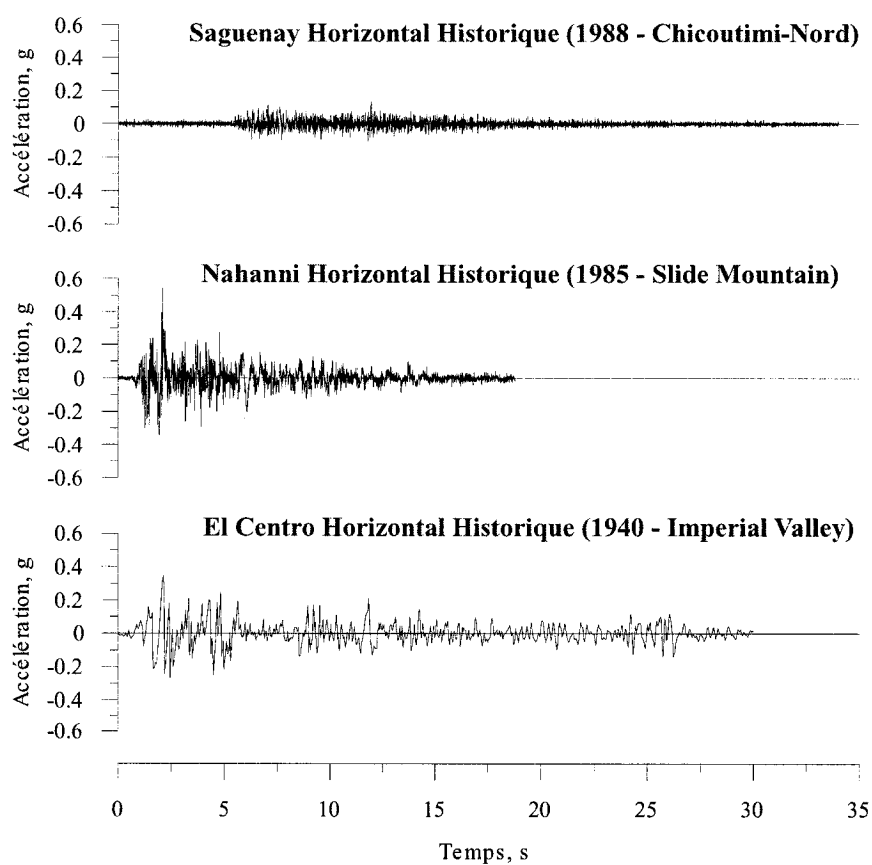
Le tableau 3.2 présente les paramètres sismiques de chacun des accélérogrammes historiques et artificiels. Les caractéristiques des composantes horizontales et verticales des accélérogrammes historiques sont présentées dans cette étude. L'accélération de pointe au sol (APS) ou PGA en anglais, et la vitesse de pointe au sol (VPS) ou PGV en anglais, caractérisent les accélérogrammes et permettent de déterminer le ratio a/v. Les durées D1 et D2 ainsi que l'incrément de temps de l'enregistrement des séismes sont aussi présentés dans cette étude.

Tableau 3.2 : Paramètres des accélérogrammes.

		PGA	PGV	a/v	D ₁	D ₂	Incrément de temps
		(g)	(cm/s)	(g.s/cm)	(s)	(s)	(s)
<i>Accélérogrammes historiques, composante horizontale</i>							
Saguenay	(1988-Chicoutimi-Nord)	0.131	2.558	5.1	34.0	23.5	0.005
Nahanni	(1985-Slide Moutain)	0.545	32.981	1.7	18.8	11.4	0.005
El Centro	(1940-Imperial Valley)	0.348	38.141	0.9	53.8	26.1	0.020
<i>Accélérogrammes historiques, composante verticale</i>							
Saguenay	(1988-Chicoutimi-Nord)	0.102	1.988	5.1	34.0	23.0	0.005
Nahanni	(1985-Slide Moutain)	0.394	33.803	1.2	18.8	11.0	0.005
El Centro	(1940-Imperial Valley)	0.210	13.829	1.5	53.8	19.1	0.020

Tableau 3.2 suite : Paramètres des accélérogrammes.

	PGA	PGV	a/v	D ₁	D ₂	Incrément de temps
	(g)	(cm/s)	(g.s/cm)	(s)	(s)	(s)
<i>Accélérogrammes artificiels d'Atkinson</i>						
Atkinson (A1) (M6.0, R=20)	0.224	7.333	3.1	7.1	5.4	0.010
Atkinson (A2) (M6.0, R=20)	0.312	12.498	2.5	7.1	5.4	0.010
Atkinson (A3) (M7.0, R=20)	0.257	13.839	1.9	15.3	11.6	0.010
Atkinson (A4) (M7.0, R=20)	0.254	11.783	2.2	15.3	12.0	0.010

**Figure 3.2 : Accélérogrammes historiques horizontaux.**

La figure 3.2 illustre les accélérogrammes historiques horizontaux. Il est à noter que les axes verticaux de tous les accélérogrammes présentés dans ce chapitre sont uniformisés et varient entre $-0,6g$ et $0,6g$ (accélération), et l'axe horizontal (temps) s'arrête à 35 sec. Dans une mesure de comparaison, la durée de l'accélérogramme d'El Centro présentée est de 30 sec, correspondant à la durée de 0 à 95 % de l'énergie de l'accélérogramme. La figure 3.3 illustre les accélérogrammes historiques verticaux.

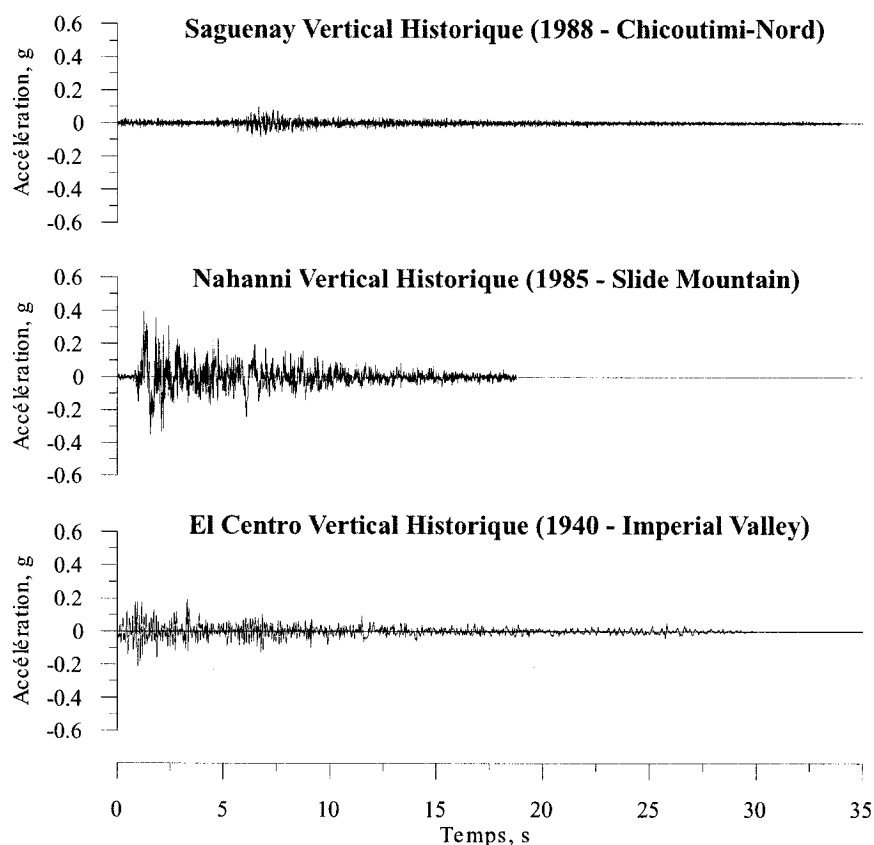


Figure 3.3 : Accélérogrammes historiques verticaux.

La figure 3.4 présente les quatre accélérogrammes artificiels (A1, A2, A3 et A4) retenus pour réaliser les analyses numériques. Les accélérogrammes A1 et A2 ont une magnitude de 6, une distance épacentrale de 20 km et d'une durée similaire de 7.1 sec. Les accélérogrammes A3 et A4 ont une magnitude de 7, une distance épacentrale de 20 km et d'une durée similaire de 15.3 sec.

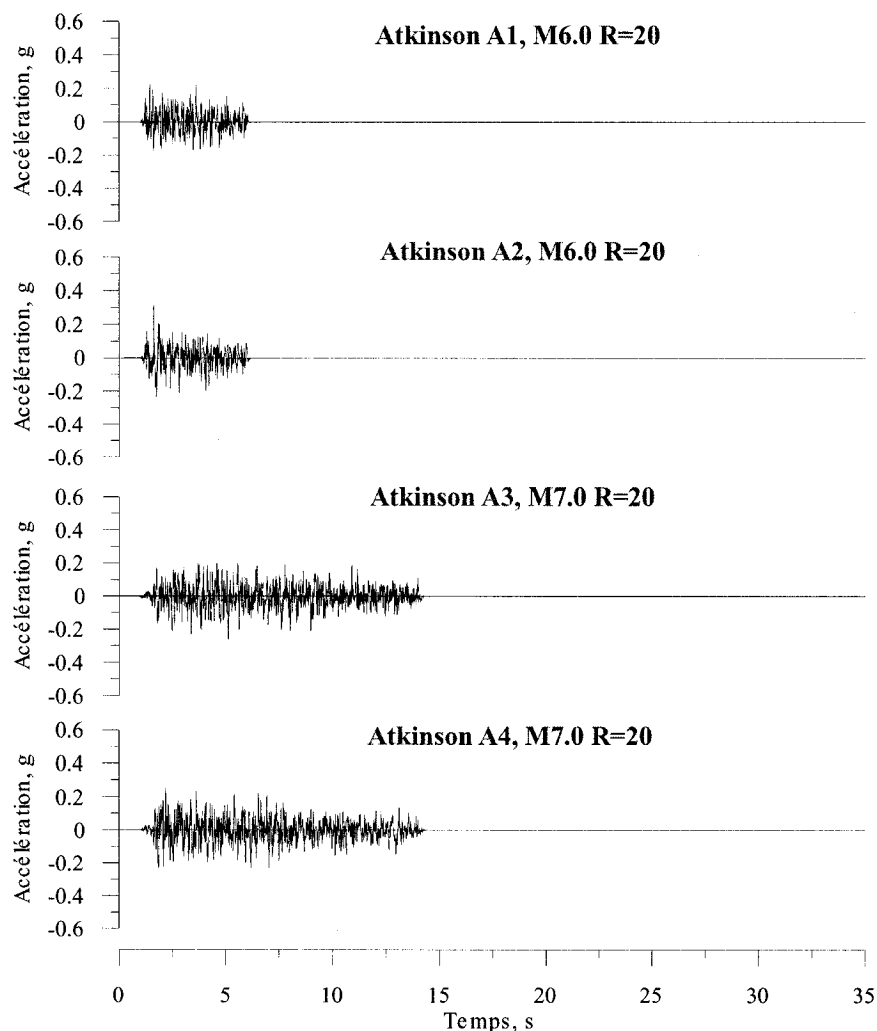


Figure 3.4 : Accélérogrammes artificiels d'Atkinson.

3.4 Accélérations verticales

La composante verticale peut jouer un rôle important sur la réponse structurale en fonction du synchronisme des impulsions horizontales et verticales de fortes intensités. Le Code national du bâtiment canadien propose d'utiliser comme composante verticale une accélération qui correspond entre $(2/3 - 3/4)$ de l'accélération maximale des mouvements horizontaux. Pour éviter la simultanéité des ou de la combinaison des composantes horizontales et verticales, qui peut sous ou surestimer grandement la

réponse (Christopolous 2003), les accélérogrammes artificiels A2 et A4 serviront de composante verticale aux accélérogrammes A1 et A3.

3.5 Spectre de calcul

L'envergure des mouvements sismiques pouvant affecter les ouvrages est représentée principalement par deux paramètres, l'accélération et la vitesse. Ces deux paramètres expriment le niveau d'activité sismique pour un site donné. L'illustration de cette activité sismique est délimitée sur des cartes de zonage sismique. Pour les besoins de cette recherche, le spectre choisi est représentatif d'une zone du Québec où la sismicité est très active.

Nous déterminons le spectre de calcul horizontal à partir des cartes du Guide pour la Sélection des Paramètres Sismiques (Hydro-Québec 2001). Les valeurs des pseudo-accélérations spectrales PAS (T, ξ), en fonction de la période T et du coefficient d'amortissement ξ retrouvés sur ces cartes, décrivent le spectre de calcul à probabilité de dépassement uniforme pour 1/2500 ans. Les valeurs médianes pour un coefficient de dépassement ξ de 5% sont disponibles pour quatre périodes, T , PAS (0,05, 5%), PAS (0,1, 5%), PAS (0,2, 5%) et PAS (1,0, 5%). Les spectres sont illustrés sur les figures 3.5 et 3.6 ci-dessous.

Le spectre de calcul vertical est dérivé des ordonnées spectrales du spectre de calcul horizontal multiplié par un facteur de réduction de (2/3).

3.6 Compatibilité des accélérogrammes avec le spectre de calcul

Lors de l'évaluation du comportement dynamique d'un barrage, les analyses doivent être basées sur des accélérogrammes compatibles à un spectre lisse de réponse,

représentatif du site considéré. Afin d'obtenir la compatibilité recherchée avec le spectre lisse de réponse, le logiciel RSPMATCH (Abrahamson 1998) est utilisé.

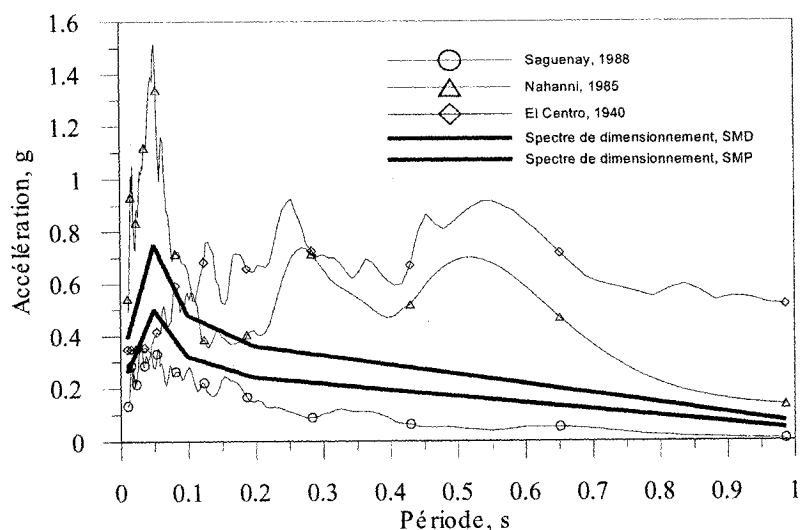


Figure 3.5 : Spectres UHS d'accélération horizontaux ($\xi=5\%$).

La figure 3.5 illustre les spectres horizontaux des accélérogrammes historiques. Il est à noter que l'axe de période varie entre 0 et 1 sec. La plage des courtes périodes (0,1s-0,5s) est représentative des modes fondamentaux pour les structures analysées dans cette étude. Deux spectres lisses de récurrence (SMD), et (SMP) provenant du spectre de calcul horizontal, sont illustrés sur les figures 3.5 et 3.6. Le spectre de calcul de récurrence (SMP) est dérivé à partir des ordonnées spectrales du spectre de calcul horizontal (SMD) multipliées par un facteur d'amplification de 1.5.

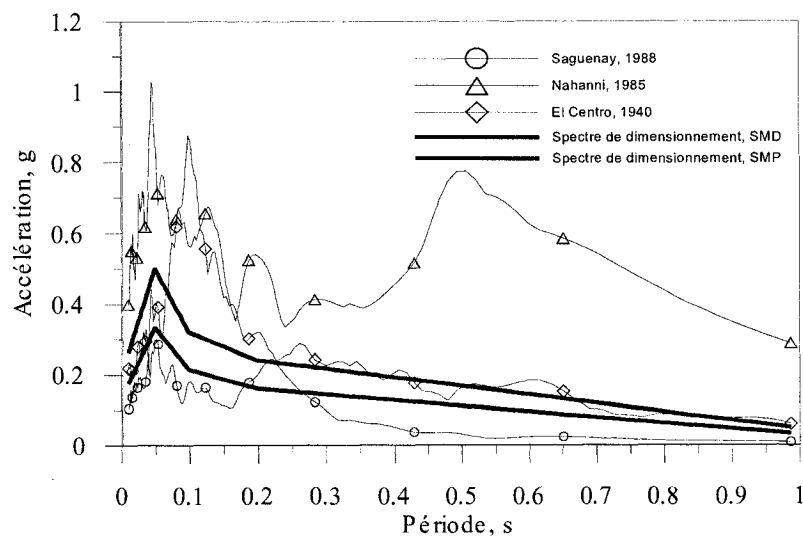
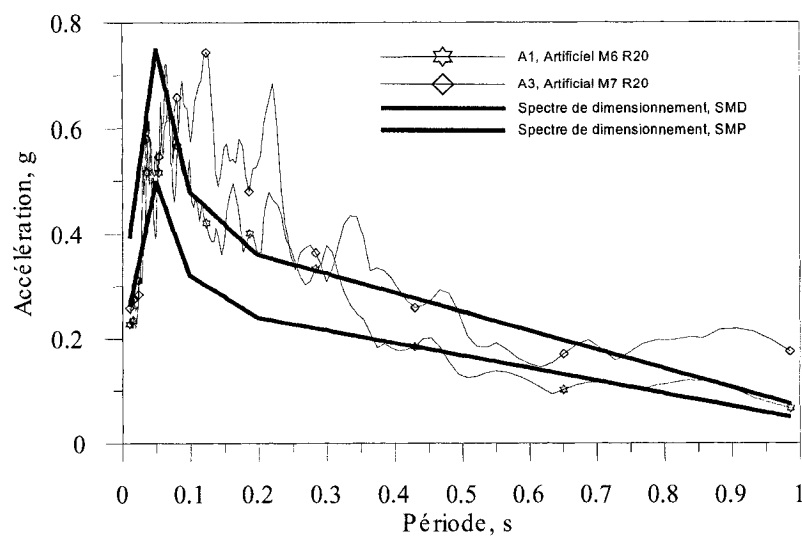


Figure 3.6 : Spectres UHS d'accélération verticaux ($\xi=5\%$).

La figure 3.7 présente les spectres d'accélération pour les accélérographes artificiels d'Atkinson et les spectres de dimensionnement pour des récurrences (SMD) et (SMP).



(a)

Figure 3.7 : Spectres UHS d'accélération horizontaux en (a) et verticaux en (b) des accélérographes artificiels d'Atkinson ($\xi=5\%$).

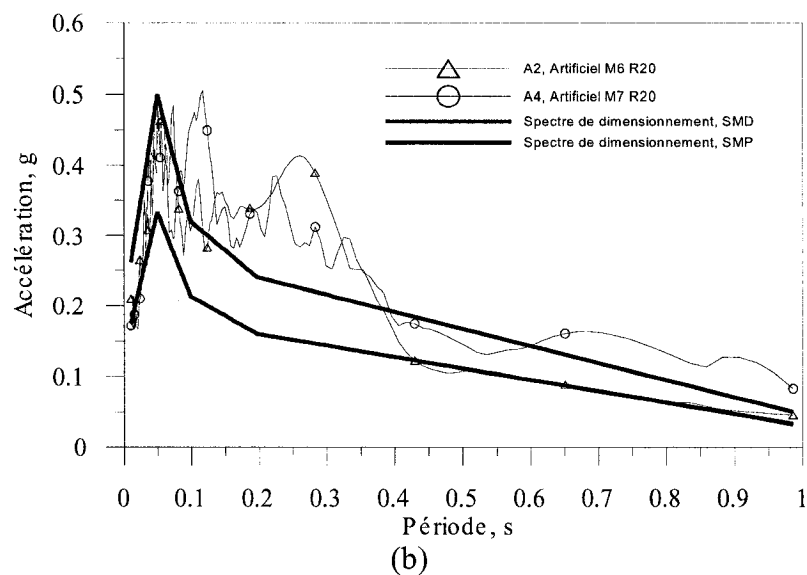


Figure 3.7 suite: Spectres UHS d'accélération horizontaux en (a) et verticaux en (b) des accélérographes artificiels d'Atkinson ($\xi=5\%$).

3.7 Paramètres des accélérographes (SMD)

Les paramètres des accélérographes modifiés, et générés à partir des spectres compatibles pour une récurrence (SMD), sont identifiés au tableau 3.3.

Tableau 3.3: Paramètres des accélérographes, (SMD).

	PGA	PGV	a/v	D ₁	D ₂	Incrément de temps
	(g)	(cm/s)	(g.s/cm)	(s)	(s)	(s)
<i>Accélérographes historiques modifiés horizontaux</i>						
Saguenay modifié	0.157	6.725	2.3	34.0	20.5	0.005
Nahanni modifié	0.257	8.290	3.1	18.8	13.6	0.005
El Centro modifié	0.274	17.307	1.6	53.8	29.9	0.020

Tableau 3.3 suite: Paramètres des accélérogrammes, (SMD).

	PGA	PGV	a/v	D ₁	D ₂	Incrément de temps
	(g)	(cm/s)	(g.s/cm)	(s)	(s)	(s)
<i>Accélérogrammes historiques modifiés verticaux</i>						
Saguenay modifié	0.128	4.228	3.0	34.0	21.2	0.005
Nahanni modifié	0.171	9.265	1.8	18.8	14.8	0.005
El Centro modifié	0.153	7.067	2.2	53.8	24.5	0.020
<i>Accélérogrammes artificiels modifiés horizontaux d'Atkinson</i>						
Atkinson (A1) modifié	0.261	13.739	1.9	7.1	5.9	0.010
Atkinson (A3) modifié	0.260	10.749	2.4	15.3	12.8	0.010
<i>Accélérogrammes artificiels modifiés verticaux d'Atkinson</i>						
Atkinson (A2) modifié	0.159	10.352	1.5	7.1	5.8	0.010
Atkinson (A4) modifié	0.174	8.532	2.0	15.3	12.5	0.010

Nous retrouvons, illustré sur les figures 3.8 et 3.10, les spectres horizontaux et verticaux compatibles avec le spectre de calcul de récurrence (SMD). Les figures 3.9 et 3.11 illustrent les accélérogrammes modifiés provenant des enregistrements historiques pour les composantes horizontales et verticales.

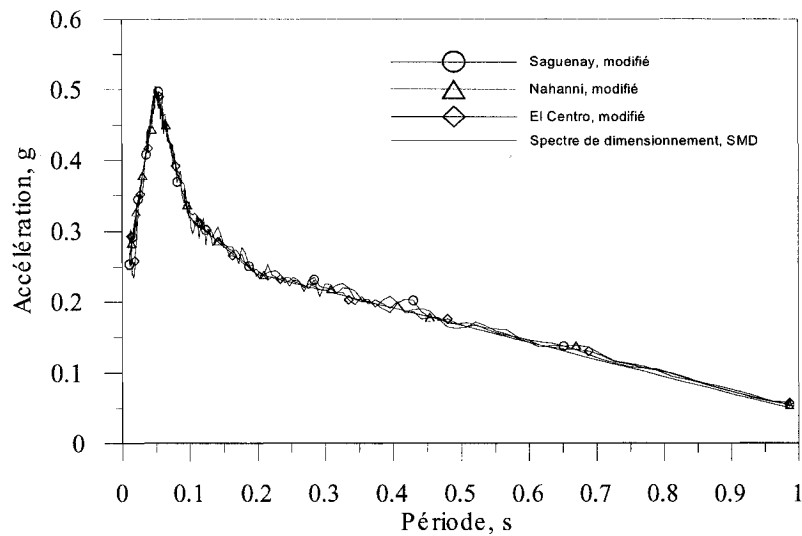


Figure 3.8 : Spectres UHS d'accélération horizontale historiques (SMD) ($\xi=5\%$).

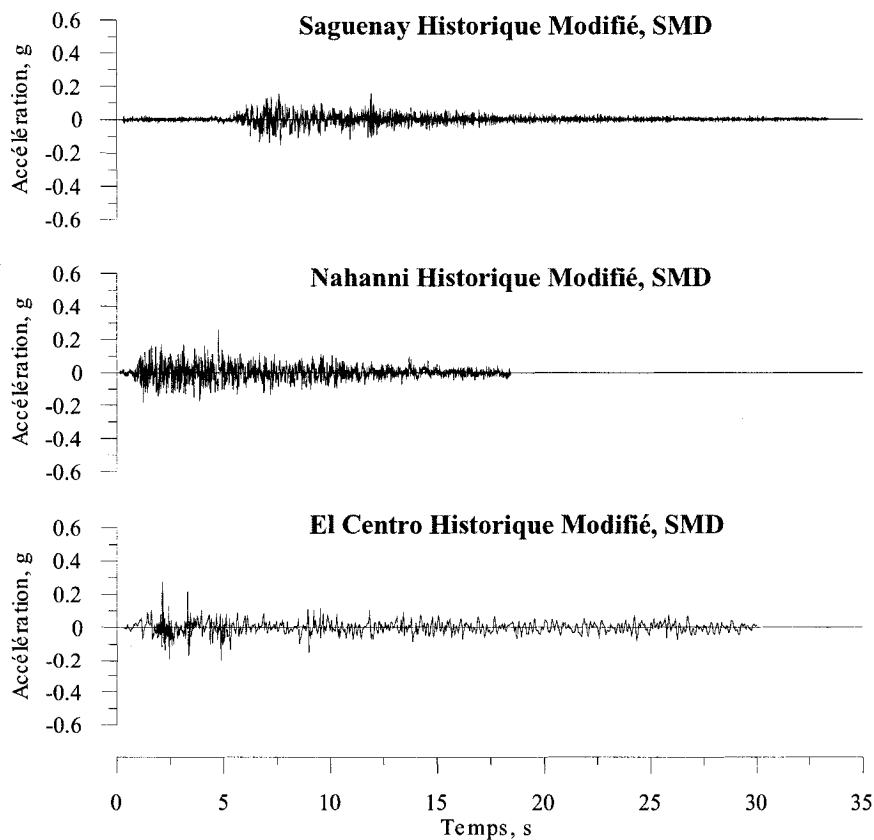


Figure 3.9 : Accélérogrammes historiques modifiés horizontaux.

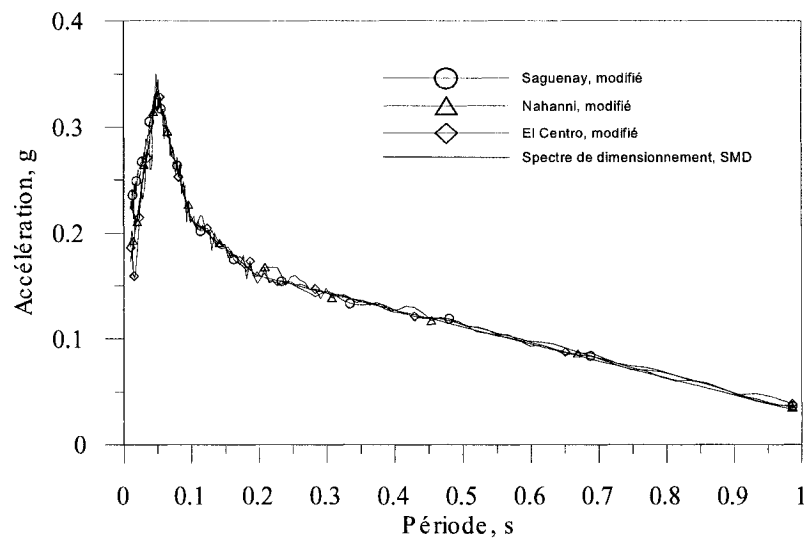


Figure 3.10 : Spectres UHS d'accélération verticale historiques (SMD) ($\xi=5\%$).

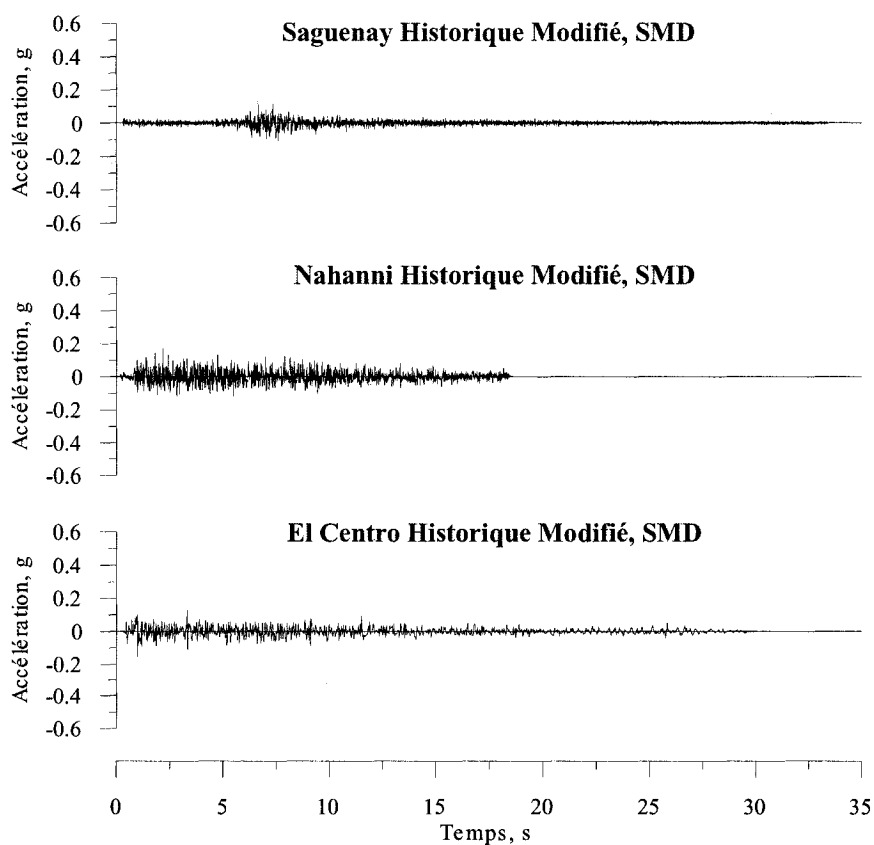


Figure 3.11 : Accélérogrammes historiques modifiés verticaux.

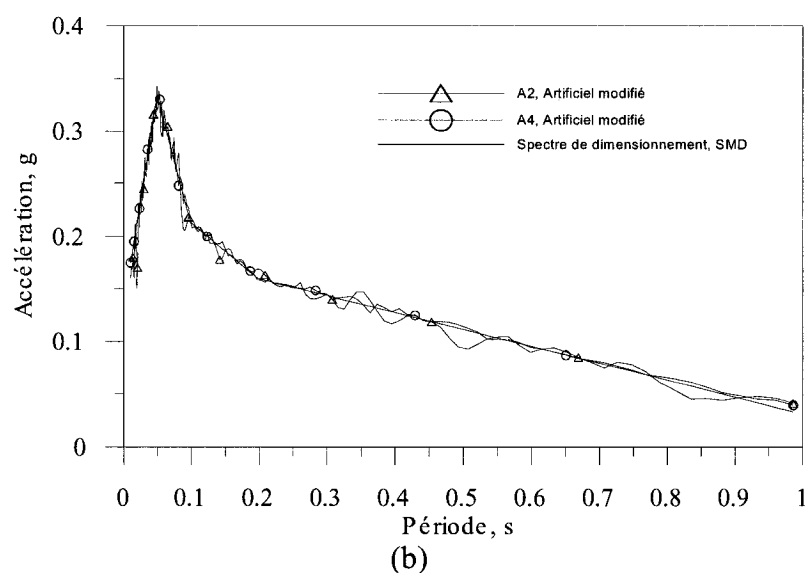
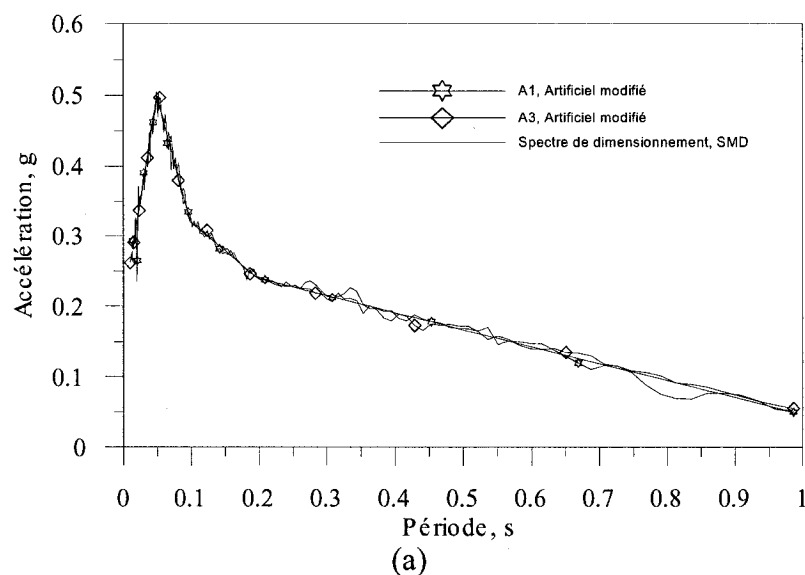


Figure 3.12 : Spectres UHS d'accélération des accélérogrammes artificiels modifiés, composante horizontale en (a) et verticale en (b) pour une de récurrence SMD ($\xi=5\%$).

Les figures 3.12 et 3.13 illustrent les spectres et accélérogrammes artificiels modifiés pour les composantes horizontales et verticales. Notez que sur la figure 3.12, entre les combinaisons d'accélérogrammes A1 et A2 et entre A3 et A4, qu'il n'y a pas simultanéité des accélérations de pointe des composantes horizontales et verticales.

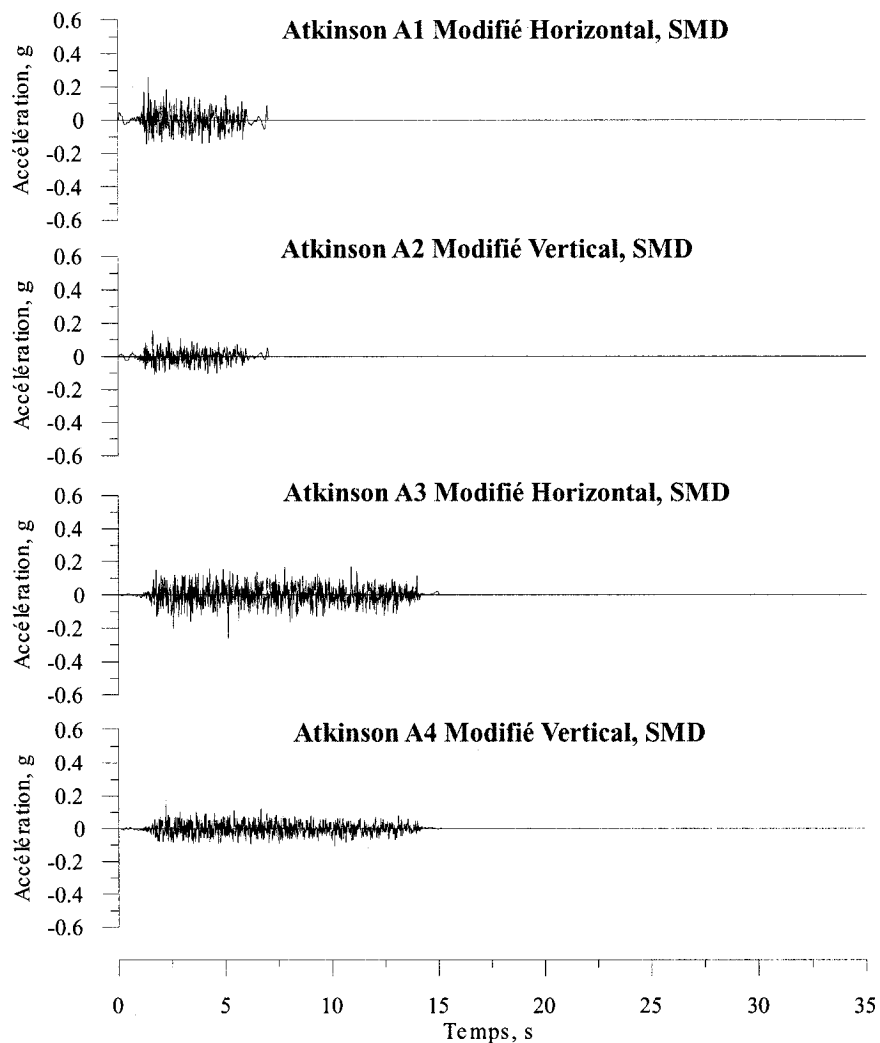


Figure 3.13 : Accélérogrammes artificiels modifiés.

3.8 Paramètres des accélérogrammes (SMP)

Les paramètres des accélérogrammes modifiés, générés à partir des spectres compatibles pour une récurrence (SMP), sont identifiés au tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Paramètres des accélérogrammes, (SMP).

	PGA	PGV	a/v	D ₁	D ₂	Incrément de temps
	(g)	(cm/s)	(g.s/cm)	(s)	(s)	(s)
<i>Accélérogrammes historiques modifiés, composante horizontale</i>						
Saguenay modifié	0.297	8.299	3.6	34.0	18.0	0.005
Nahanni modifié	0.374	14.607	2.6	18.8	12.4	0.005
El Centro modifié	0.314	18.461	1.7	53.8	27.6	0.020
<i>Accélérogrammes historiques modifiés, composante verticale</i>						
Saguenay modifié	0.178	4.892	3.6	34.0	18.5	0.005
Nahanni modifié	0.256	9.680	2.6	18.8	13.7	0.005
El Centro modifié	0.205	8.254	2.5	53.8	21.7	0.020
<i>Accélérogrammes artificiels modifiés d'Atkinson, composante horizontale</i>						
Atkinson (A1) modifié	0.338	10.651	3.2	7.1	6.1	0.010
Atkinson (A3) modifié	0.381	15.887	2.4	15.3	12.4	0.010
<i>Accélérogrammes artificiels modifiés d'Atkinson, composante verticale</i>						
Atkinson (A2) modifié	0.255	10.093	2.5	7.1	6.7	0.010
Atkinson (A4) modifié	0.260	10.050	2.6	15.3	12.5	0.010

Nous retrouvons, illustré sur les figures 3.14 et 3.16, les spectres horizontaux et verticaux compatibles avec le spectre de calcul de récurrence (SMP). Les figures 3.15 et 3.17 illustrent les accélérogrammes modifiés provenant des enregistrements historiques pour les composantes horizontales et verticales.

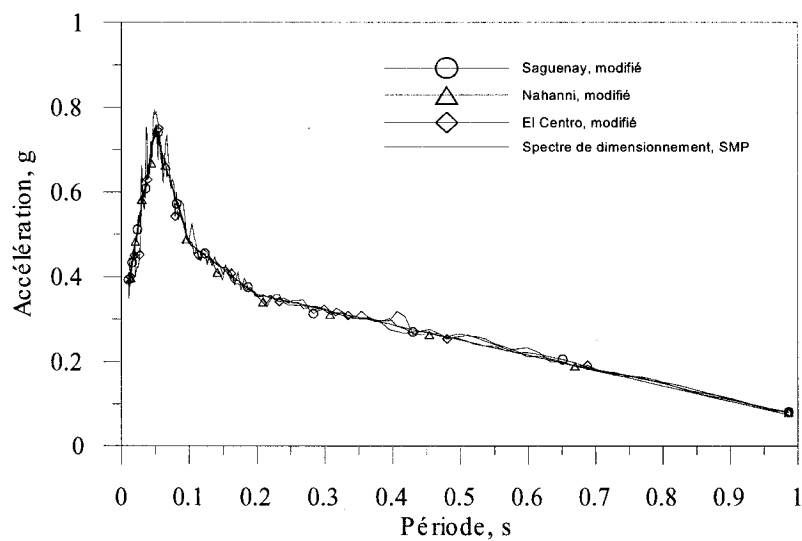


Figure 3.14 : Spectres UHS d'accélérations horizontales historiques (SMP) ($\xi=5\%$).

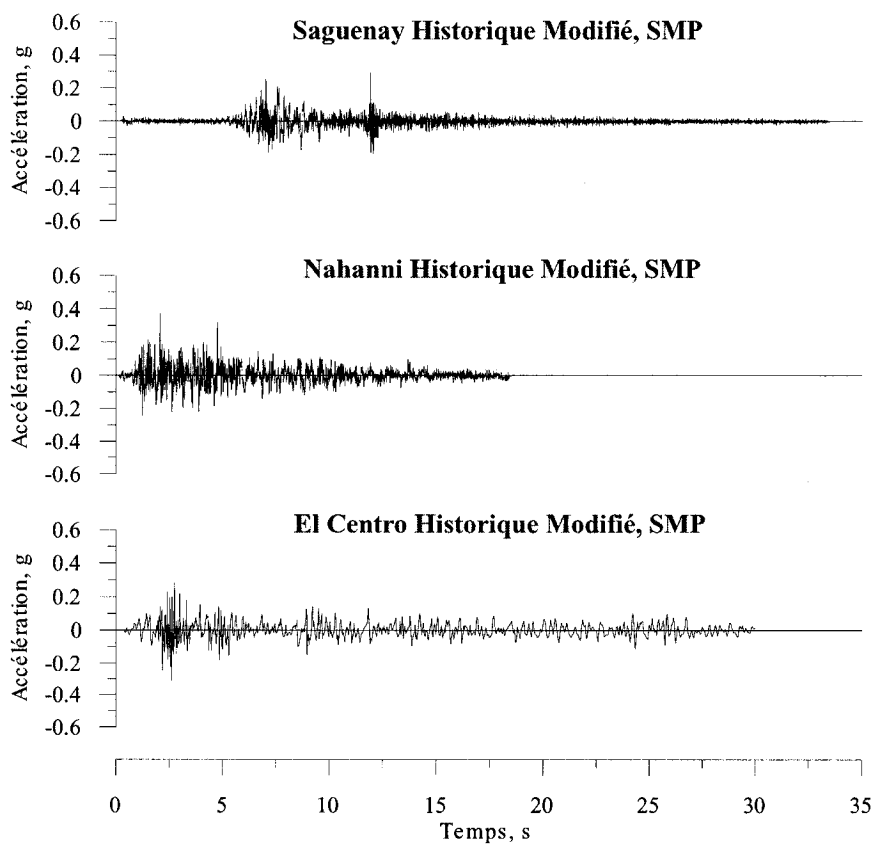


Figure 3.15 : Accélérogrammes historiques modifiés horizontaux.

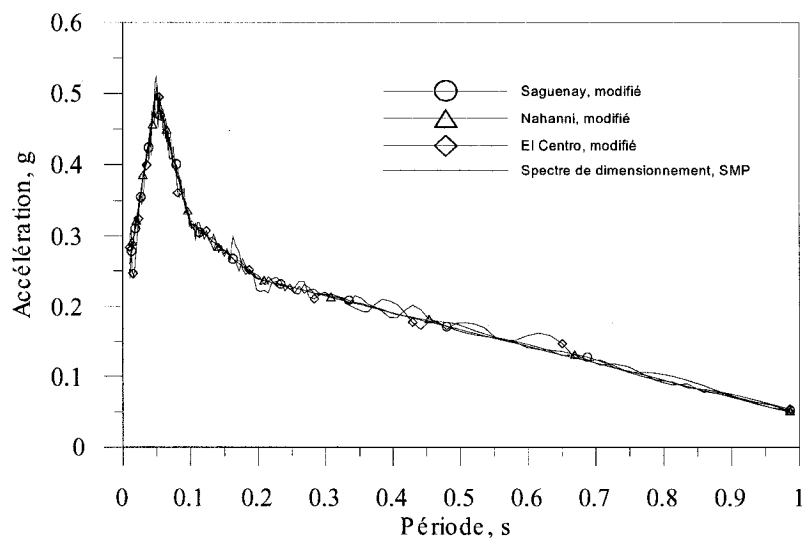


Figure 3.16 : Spectres UHS d'accélérations verticales historiques (SMP) ($\xi=5\%$).

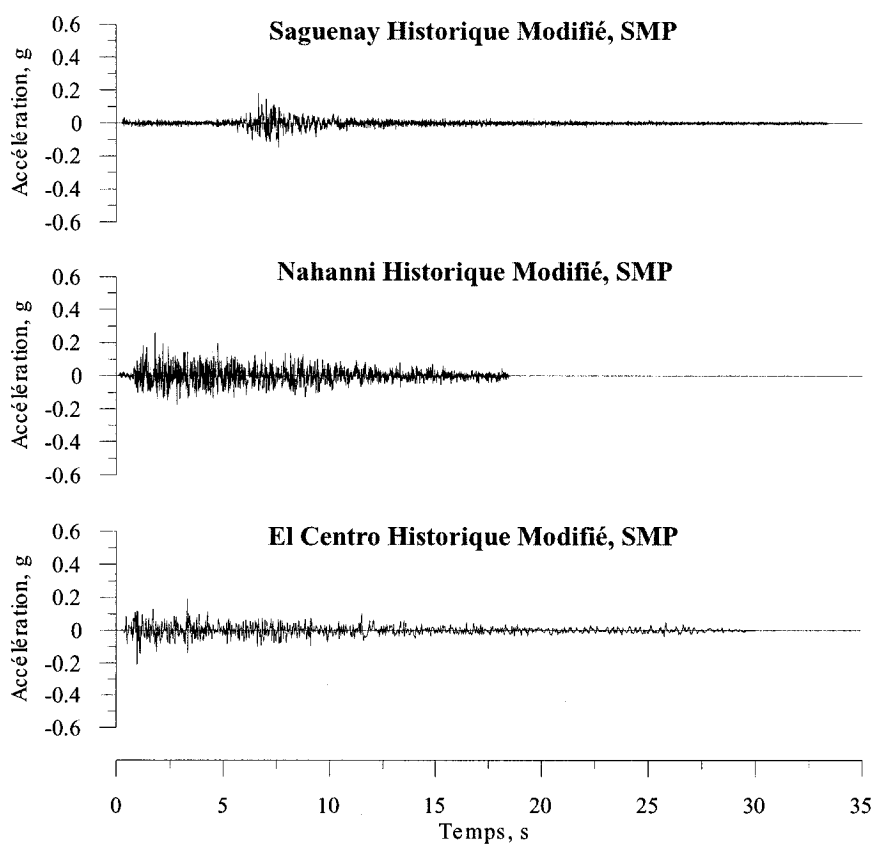


Figure 3.17 : Accélérogrammes historiques modifiés verticaux.

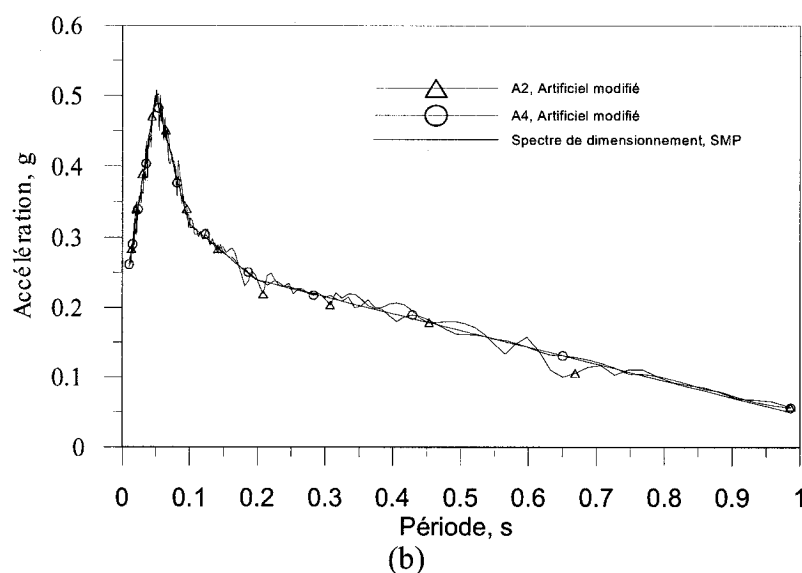
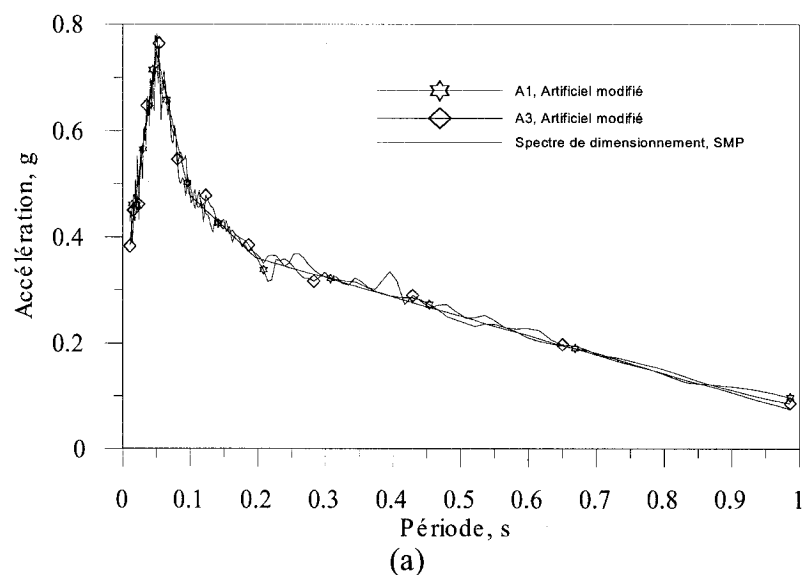


Figure 3.18 : Spectres UHS d'accélération des accélérogrammes artificiels modifiés, composante horizontale en (a) et verticale en (b) pour une de récurrence SMP ($\xi=5\%$).

Les figures 3.18 et 3.19 illustrent les spectres et accélérogrammes artificiels modifiés pour les composantes horizontales et verticales. Notez que sur la figure 3.19, entre les combinaisons d'accélérogrammes A1 et A2 et entre A3 et A4, il n'y a pas simultanités des accélérations de pointe des composantes horizontales et verticales.

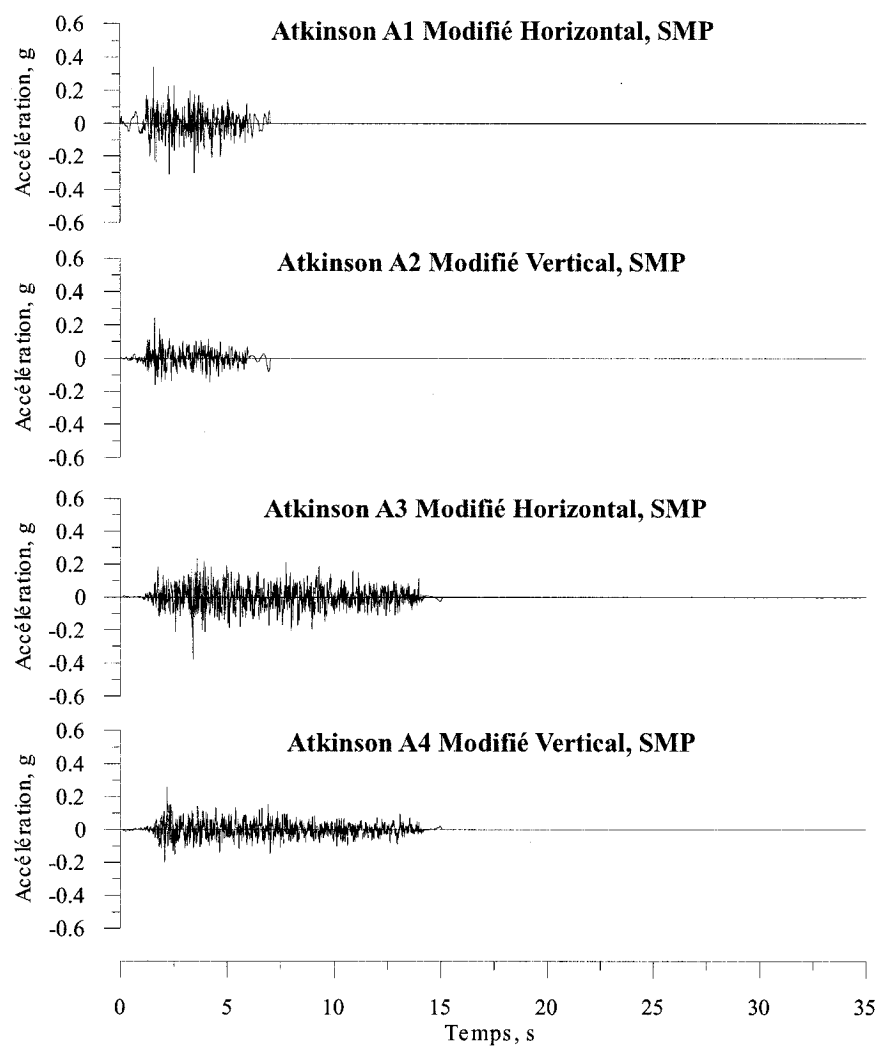


Figure 3.19 : Accélérogrammes artificiels modifiés.

Chapitre 4

Analyse paramétrique

4.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse sur l'effet de la variabilité des paramètres principaux intervenant dans la réponse dynamique du système glace-barrage-réservoir. Les résultats de cette analyse sont discutés et exploités pour évaluer l'importance de ces paramètres. Quatre barrages de hauteurs respectives de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m sont considérés. Ces barrages sont illustrés, sur la figure 4.1. Les dimensions de ces ouvrages sont représentatives des barrages généralement rencontrés au Québec (Léger et Leclerc, 1996).

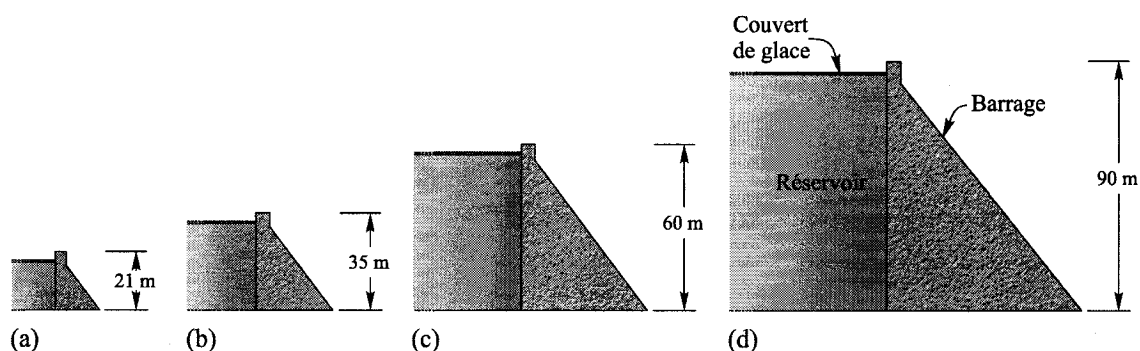


Figure 4.1: Système glace-barrage-réservoir à l'étude : (a) barrage 21 m d'hauteur; (b) barrage 35 m d'hauteur; (c) barrage 60 m d'hauteur; (d) barrage 90 m d'hauteur.

La première partie de ce chapitre présente un bref exposé des techniques de modélisation du réservoir et de la glace. Les conditions aux frontières à appliquer aux interfaces fluides structures y sont décrites.

La seconde partie présente une analyse pour évaluer l'effet des paramètres intervenant dans la réponse dynamique du système glace-barrage-réservoir.

4.2 Principes du calcul dans le domaine du temps

L'analyse du système glace-barrage-réservoir dans le domaine du temps pose plusieurs difficultés aussi bien d'ordre théorique que pratique. La complexité de la modélisation d'un tel système est principalement reliée à la présence des phénomènes d'interaction entre les trois composantes du système ainsi que la nature semi-infinie du réservoir.

La figure 4.1 illustre un barrage typique retenant un réservoir couvert de glace. La modélisation numérique de ce système implique la modélisation de trois sous-structures, i.e. le barrage, le réservoir et le couvert de glace, ainsi que la définition des conditions aux frontières agissant aux interfaces entre les sous-structures. On distingue deux types de frontières : les frontières physiques réelles et les frontières fictives.

Tel qu'illustré à la figure 4.2, les frontières physiques réelles sont : la frontière barrage-fondation (F_{bf}), la frontière barrage-réservoir (F_{br}), la frontière réservoir-fondation (F_{rf}), la frontière barrage-glace (F_{bg}), la frontière réservoir-glace (F_{rg}) et la frontière glace-extrémité amont (F_{ge}).

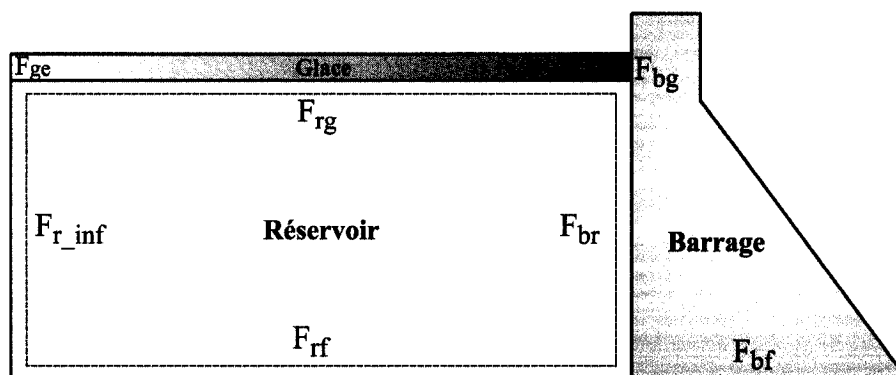


Figure 4.2 : Frontières du système glace-barrage-réservoir (adapté de Ghrib, Léger et Tinawi, 1996).

On considère que le réservoir est un milieu semi-infini vers le sens amont. La condition frontière à l'extrémité amont F_{r_inf} du réservoir est une condition fictive simulant l'effet de la propagation des ondes impulsives à l'infini. Cette condition est modélisée ici par des éléments infinis (Olson et Bathe, 1985).

4.3 Conditions aux limites et choix des éléments

La modélisation de la frontière barrage-réservoir dépend du type de modèle du réservoir. D'une manière générale on distingue deux types de formulation d'éléments fluides : la formulation Lagrangienne (éléments fluides à base de déplacement) et la formulation Eulerienne (éléments fluides à base de potentiel). Ces deux formulations sont disponibles dans le logiciel ADINA.

La formulation Lagrangienne des éléments fluides consiste à utiliser les déplacements comme degrés de liberté à l'instar des éléments solides. L'intérêt de cette approche est qu'elle ne nécessite pas le recours à des éléments d'interface fluide-structure particuliers. Dans la formulation Eulerienne, les degrés de liberté des éléments fluides

sont les potentiels de vitesse ou les pressions. À l'opposé de la formulation Lagrangienne, la formulation Eulerienne nécessite le développement d'une interface fluide-structure particulière pour assurer la compatibilité à l'interface barrage-réservoir (Calayir, Dumanoglu, Bayraktar, 1996). La formulation Eulerienne est utilisée pour les modèles à l'étude dans les chapitres 4 et 5. La figure 4.3 montre un maillage typique d'un système glace-barrage-réservoir, ainsi que les interfaces considérées.

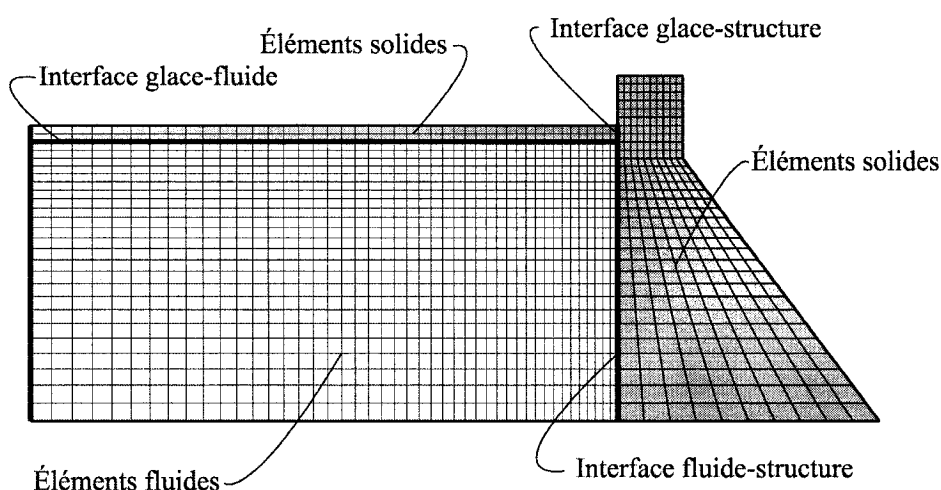


Figure 4.3 : Illustration des interfaces et des types d'éléments formant les sous-systèmes.

4.3.1 Conditions aux frontières du réservoir

Les détails des éléments d'interface de la bibliothèque ADINA qui sont utilisés aux différentes frontières du réservoir modélisé avec les éléments fluides à base de potentiel (ADINA, 2002) sont présentés ci-dessous.

Éléments de surface libre : ces éléments d'interface sont créés sur la frontière correspondant à la surface libre du réservoir, i.e. en absence du couvert de glace. Ce sont des éléments lignes à deux ou trois nœuds. Chaque nœud possède un degré de

liberté de type potentiel de vitesse ϕ et deux degrés de liberté de type déplacement selon les axes X et Y. Ces éléments d'interface incorporent une condition frontière d'une pression imposée, dans ce cas-ci la pression atmosphérique en surface libre. Ils sont utilisés ici uniquement pour les modèles n'incluant pas le couvert de glace.

Éléments infinis : les éléments fluides infinis sont placés à la frontière amont du réservoir pour simuler un domaine fluide semi-infini. Ces éléments ne possèdent qu'un seul degré de liberté de type potentiel de vitesse ϕ . L'hypothèse d'un type d'onde planaire est utilisée dans ADINA pour cet élément afin de tenir compte du fait que les pressions et les vitesses de propagation dissipées aux limites du modèle soient constantes, jusqu'à l'infini et donc sans réflexion (Olson et Bathe 1985).

Éléments d'interface fluide-structure : ils sont utilisés à l'interface entre le parement amont du barrage et le réservoir, ainsi qu'à l'interface entre le réservoir et le couvert de glace. Les deux nœuds de chacun de ces éléments d'interface sont indépendants et doivent être compatibles avec ceux de la structure du barrage et du réservoir.

Les éléments de type paroi rigide : ces éléments sont utilisés pour modéliser l'interface entre le fond du réservoir et la fondation. Ce sont les éléments utilisés par défaut dans ADINA et leurs caractéristiques sont similaires à celles des éléments d'interface fluide-structure.

La figure 4.4 illustre comment ces éléments s'intercalent aux interfaces des frontières dans un modèle en 2D.

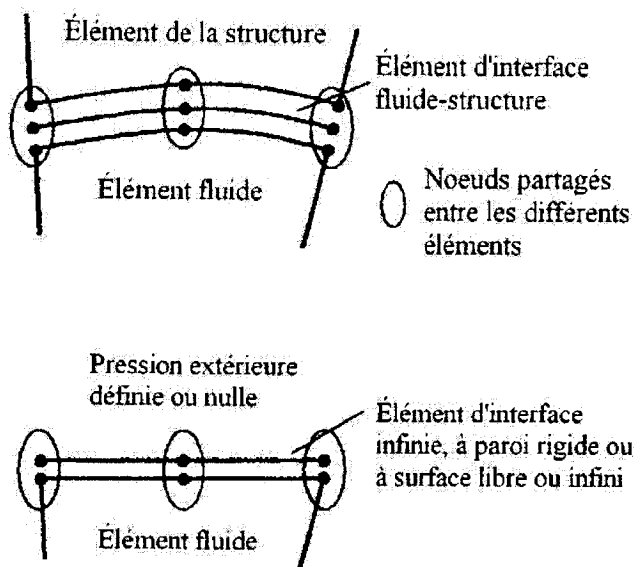


Figure 4.4 : Modélisation des interfaces des éléments fluides (Vittecoq 2005).

4.3.2 Conditions aux frontières à l'extrémité amont du couvert de glace

Comme il a été mentionné précédemment, on considère que le réservoir et le couvert de glace se prolongent à l'infini vers l'amont. Cependant, la modélisation du couvert de glace par éléments finis impose le choix d'une condition aux frontières à son extrémité amont. Cette condition devrait reproduire l'influence des rives du réservoir à l'amont. Elle est très difficile à déterminer dans le cas général car elle dépend de la morphologie des rives et de la caractérisation de l'interaction dynamique entre le couvert de glace et les rives. L'analyse fréquentielle des systèmes glace-barrage-réservoir sous vibrations forcées a démontré que l'effet de cette condition est négligeable lorsqu'elle est placée suffisamment loin de la paroi amont du barrage, soit à au moins deux fois la hauteur du réservoir (Bouaanani, 2002).

4.3.3 Conditions aux frontières à l'interface barrage-fondation

Il est admis que l'interaction barrage-fondation a tendance à dissiper une partie de l'énergie sismique et à allonger la période du mode fondamental de vibration. Afin d'isoler les effets du couvert de glace et du réservoir, l'hypothèse d'une fondation rigide est adoptée ici. Les degrés de liberté des nœuds du modèle appartenant à l'interface barrage-fondation sont donc bloqués.

4.3.4 Conditions aux frontières à l'interface glace-barrage

L'interaction entre le couvert de glace et le barrage dépend de l'intensité des forces d'arrachement se développant près de l'interface glace-béton lors de l'excitation sismique. La rupture éventuelle peut se produire à l'interface entre les deux matériaux ou à l'intérieur du couvert de glace. Ce mécanisme dépend notamment : (i) des caractéristiques du contact glace-béton, (ii) de la stratification et de la pureté de la glace, (iii) de l'épaisseur du couvert de glace, (iv) des résistances à la flexion et au cisaillement de la glace, (v) et de la température (Ministère des travaux publics du Canada, 1973 ; Frederking, 1979). Dans le présent mémoire, nous faisons hypothèse que le contact glace-barrage reste intact suite au chargement sismique. Cette hypothèse simplificatrice est justifiée dans le cadre d'une analyse linéaire qui vise essentiellement à étudier le comportement global du système.

4.4 Modélisation du système glace-barrage-réservoir

4.4.1 Sous-structures modélisées

Comme illustré sur la figure 4.5, le système considéré comprend un barrage à parement amont vertical reposant sur une fondation rigide. Le barrage retient un réservoir de profondeur constante H , couvert d'une couche de glace d'épaisseur moyenne h_{ice} . Le réservoir et le couvert de glace sont supposés s'étendre à l'infini vers

l'amont. Toutefois, une longueur finie, L_{ice} , du couvert de glace est considérée pour les besoins de l'étude. Comme l'indique la figure, les coordonnées des nœuds sont définies par rapport aux axes globaux X et Y , et les translations dans les directions X et Y constituent les deux degrés de liberté associés à chaque nœud du modèle. Le barrage et le couvert de glace sont modélisés par des éléments finis solides, et le réservoir par des éléments finis fluides. L'interaction entre le réservoir et les deux autres sous-structures se fait par le biais de forces hydrodynamiques calculées en vertu de la compatibilité des déplacements et des pressions aux interfaces.

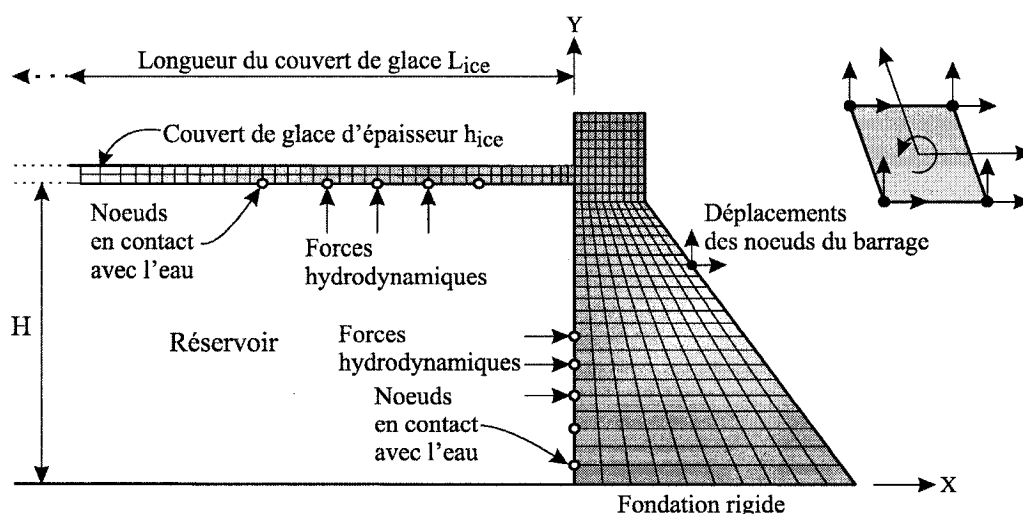


Figure 4.5 : Système glace-barrage-réservoir (Adaptée de Bouaanani, 2002).

4.4.2 Modélisation du barrage

Les barrages étudiés dans ce mémoire sont composés d'éléments finis solides bidimensionnels isoparamétriques à quatre nœuds. La formulation de ces éléments inclut des modes de déformation incompatibles afin d'assurer un meilleur comportement de l'élément en cisaillement (Wilson *et al.*, 1973, Bouaanani, 2004). L'analyse étant effectuée en deux dimensions, le choix d'une hypothèse de contraintes planes, ou de déformations planes s'impose. La validité de l'une ou l'autre des deux

hypothèses pour la modélisation bidimensionnelle des barrages a été largement discutée dans la littérature (Fenves et Chopra, 1984; Bouaanani, 2004). Nous supposons que les plots des barrages et le couvert de glace vibrent de façon monolithique sous l'effet des séismes considérés. Notons que l'hypothèse de contraintes planes serait plus adaptée au comportement dynamique indépendant des plots des barrages en hiver. Cependant des études antérieures ont montrées que cet effet est généralement négligeable. L'hypothèse de déformations planes a alors été adoptée ici en vue d'inclure l'effet de la fondation dans les études futures (Figure 4.6).

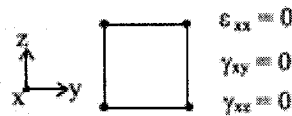


Figure 4.6 : Élément à déformation plane typique.

Afin d'évaluer l'effet de la taille des barrages sur leur réponse dynamique, l'influence de quatre sections typiques de barrages-poids sont étudiées. La forme et les dimensions des sections sont représentatives des géométries des barrages-poids rencontrés au Québec (Léger et Leclerc, 1996). La figure 4.7 présente les quatre géométries des barrages-poids considérés pour les fins de l'analyse. Ils ont pour hauteurs 21 m, 35 m, 60 m, et 90 m.

Le type de matériau utilisé dans les analyses pour modéliser le béton est un matériau isotrope, linéaire élastique et les propriétés sont : module d'élasticité $E_c = 27960$ MPa, module de Poisson, $\nu_c = 0,2$ et la masse volumique, $\rho_c = 2400$ kg/m³.

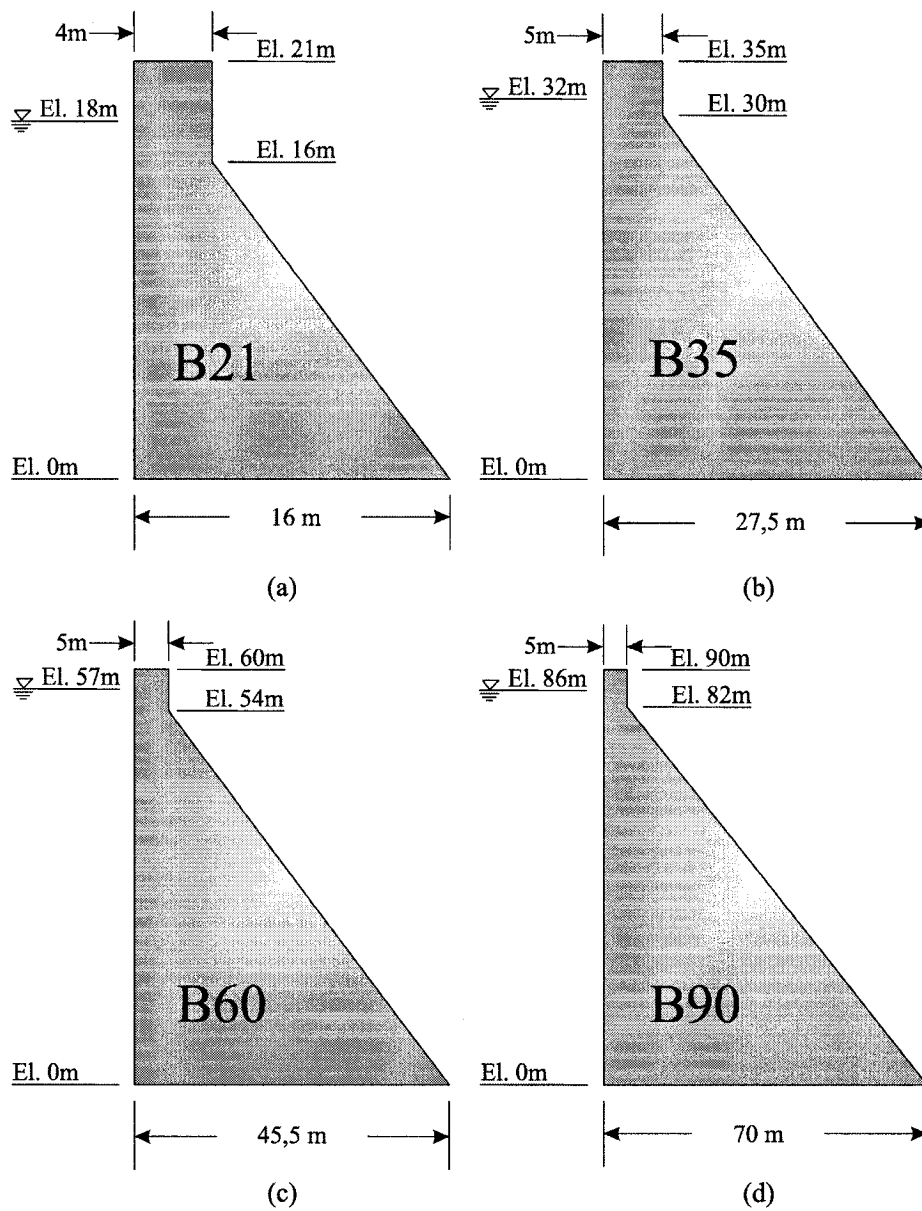


Figure 4.7 : Dimensions géométriques des barrages-poids à l'étude : (a) 21 m d'hauteur, (b) 35 m d'hauteur, (c) 60 m d'hauteur, (d) 90 m d'hauteur (Adaptée de Léger et Leclerc, 1996).

4.4.3 Modélisation du réservoir

Le réservoir est modélisé par des éléments fluides isoparamétriques à quatre nœuds. Tel que mentionné précédemment, la formulation de ces éléments est basée sur une approche Eulerienne (section 4.3). Un raffinement du maillage à la partie supérieure du réservoir est réalisé pour assurer la compatibilité avec le couvert de glace. La hauteur du réservoir sans le couvert de glace est illustrée à la figure 4.7 pour chacun des modèles à l'étude. La longueur du réservoir est égale à 2 fois sa hauteur. Ce ratio hauteur/longueur représente une valeur généralement acceptée pour les modèles par éléments finis des réservoirs de barrages. Ce ratio est étudié et validé à la fin de ce chapitre.

La masse volumique de l'eau est de $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ et son module de compressibilité μ_w est défini par

$$\mu_w = \rho_w c^2 \quad (4.1)$$

où $c=1476 \text{ m/s}$ est la vitesse du son dans l'eau. Un module de compressibilité $\mu_w = 2,18.10^9 \text{ kPa}$ est considéré dans le présent travail (Bouaanani, 2002).

4.4.4 Modélisation du couvert de glace

À l'instar du barrage, le couvert de glace est modélisé par des éléments finis solides bidimensionnels isoparamétriques à quatre nœuds. Tel que mentionné précédemment, l'hypothèse des déformations planes est utilisée. L'épaisseur du couvert de glace est un paramètre important du modèle. Celle-ci varie en général en fonction des conditions météorologiques et des transferts thermiques entre la glace et le milieu environnant (air, eau, neige). Des données statistiques sur l'épaisseur des couverts de glace et de la neige ont été compilées par le Service canadien des glaces entre 1947 et 2002 (SCG, 2006). Des mesures similaires ont été rapportées par Comfort *et al.* (2003) sur une

période moins longue de 9 ans. À la lumière de ces données, une épaisseur moyenne de 1 m du couvert de glace est considérée dans ce mémoire. L'effet de la neige n'est pas inclus dans l'analyse. La longueur du couvert de glace est égale à deux fois la profondeur du réservoir $2H$.

La glace est modélisée par un matériau isotrope, linéaire élastique avec des propriétés représentatives d'une glace columnaire de type S2 à une température ambiante de -10°C (Croteau, 1983; McCullough *et al.*, 1996 ; Bouaanani, 2002). Les propriétés suivantes sont considérées pour la glace : une masse volumique de $\rho_{ice} = 910 \text{ kg/m}^3$, un module d'élasticité $E_{ice} = 9500 \text{ MPa}$ et un module de Poisson $\nu_{ice} = 0,3$.

4.5 Modèles d'éléments finis et ingrédients de l'analyse temporelle

4.5.1 Maillages

Tel que mentionné précédemment, quatre modèles d'éléments finis du système glace-barrage-réservoir sont construits pour évaluer l'effet de la taille sur la réponse sismique. Le tableau 4.1 présente le nombre d'éléments et de nœuds constituant les modèles éléments finis des systèmes glace-barrage-réservoir. Nous utilisons les mêmes propriétés du béton, du fluide et de la glace pour les quatre systèmes lors des analyses.

Tableau 4.1 : Données des quatre modèles d'éléments finis.

Modèles d'éléments finis des systèmes glace-barrage-réservoir				
	21 m hauteur	35 m hauteur	60 m hauteur	90 m hauteur
Nombre d'éléments finis du barrage	320	320	400	460
Nombre d'éléments finis du couvert de glace	90	210	264	348
Nombre d'éléments finis du réservoir	1080	1155	1892	2842
Nombre total d'éléments finis	1490	1685	2556	3650
Nombre total de nœuds	1578	1798	2695	3823

Au tableau 4.2, les périodes fondamentales sont présentées dans le but d'analyser l'ajout des sous-systèmes au système global.

Tableau 4.2 : Résumé des périodes fondamentales des sous-systèmes et du système global.

	Barrage seul (B)	Barrage-Réservoir (BR)	Glace-Barrage- Réservoir (GBR)
Hauteur, m	Périodes, sec	Périodes, sec	Périodes, sec
21 m	0,057	0,062	0,096
35 m	0,086	0,098	0,112
60 m	0,140	0,171	0,197
90 m	0,198	0,251	0,271

Les valeurs du tableau 4.2 démontrent que l'ajout des sous-systèmes diminue la rigidité du système globalement. L'effet de masse du réservoir augmente la flexibilité du sous-système barrage-réservoir. L'influence du couvert de glace est plus manifeste sur le barrage de 21 m de hauteur. Cela a pour effet d'augmenter de façon significative la flexibilité du système global.

La figure 4.8 illustre les quatre modèles glace-barrage-réservoir étudiés.

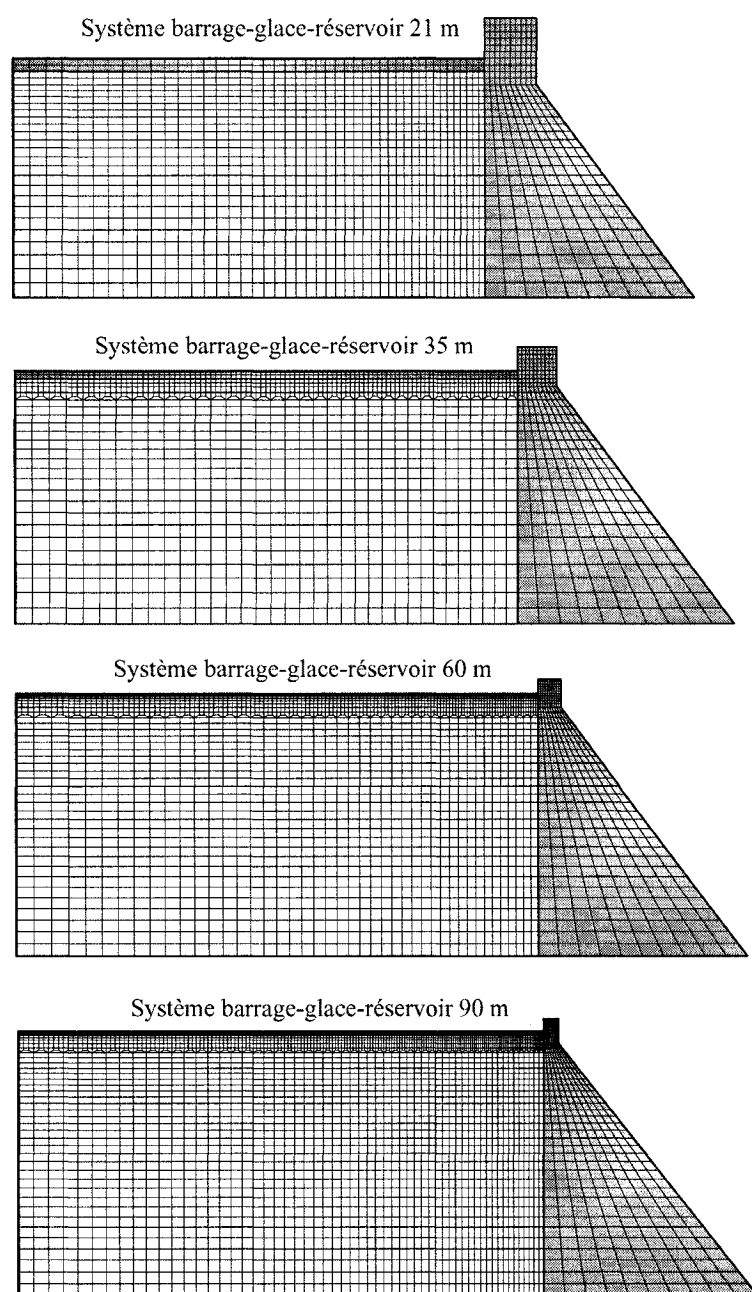


Figure 4.8 : Modèles d'éléments finis des systèmes glace-barrage-réservoir.

4.5.2 Amortissement

L'amortissement est un paramètre important à considérer lors de l'étude de la réponse sismique des barrages. On peut distinguer trois sources principales de dissipation de l'énergie dans les systèmes glace-barrage-réservoir : (i) par amortissement hystérétique au sein du barrage et du couvert de glace, (ii) par radiation des ondes dans le réservoir, et (iii) par réflexion ou absorption des ondes aux frontières du réservoir, soit aux interfaces réservoir-fondation, glace-réservoir, barrage-réservoir, et à l'extrémité amont à l'infini. Bien entendu, ces deux effets se combinent à celui de la fondation lorsqu'elle est incluse dans l'analyse. Il est très difficile de séparer la contribution de chacune des sous-structures à l'amortissement global du système. Dans une analyse temporelle, un amortissement visqueux de type Rayleigh est couramment utilisé. Sous cette hypothèse, la matrice d'amortissement $\mathbf{C}$ est une combinaison linéaire des matrices de masse $\mathbf{M}$ et de rigidité $\mathbf{K}$ du système : $\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$. On démontre alors que le coefficient d'amortissement ξ_i correspondant au mode i est donné par

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (5.2)$$

où ω_i est la fréquence naturelle en rad/s du mode i et où α et β sont des coefficients dits de Rayleigh (Paultre, 2005). Ces coefficients sont calculés en spécifiant les coefficients d'amortissement correspondant à deux modes. La représentativité de cette approche pour modéliser l'amortissement dans les structures est encore un sujet de débat actif parmi les chercheurs. Dans cette étude, nous avons adopté un modèle simplifié d'amortissement proportionnel à la masse. Un coefficient d'amortissement ξ_1 d'une valeur arbitraire de 5% est considéré. Le coefficient α est donné dans ce cas par l'expression :

$$\alpha = 2\omega_1\xi_1 \quad (5.3)$$

où ω_1 est la première fréquence angulaire du barrage.

4.6 Modèle numérique

Le logiciel ADINA (2002) est employé pour construire les modèles d'éléments finis bidimensionnels des systèmes de glace-barrage-réservoir. ADINA a été choisi en faveur des autres logiciels d'éléments finis principalement en raison de la richesse de sa bibliothèque d'élément finis, et de la robustesse de son traitement de l'interaction fluide-structure.

4.7 Analyse paramétrique

Cette section présente une analyse sur l'effet de la variabilité des paramètres principaux intervenant dans la réponse dynamique du système glace-barrage-réservoir. Les résultats de cette analyse sont discutés et exploités pour évaluer l'importance de ces paramètres.

4.7.1 Paramètres de l'étude

Dans le but d'apprécier l'influence de différents facteurs sur le comportement dynamique du système glace-barrage-réservoir, les effets de plusieurs paramètres attribués à différentes sous-structures du système ont été étudiés séparément. Les effets des paramètres suivants sont présentés dans ce chapitre :

- i. l'influence de la longueur du réservoir, L_R , dans le domaine fréquentiel;
- ii. la convergence des éléments isoparamétriques à 4 et 9 nœuds du système glace-barrage-réservoir, dans le domaine fréquentiel;
- iii. l'influence de la compressibilité de l'eau;
- iv. l'influence de la condition à la limite de l'extrémité amont du couvert de glace;

- v. l'influence du module d'élasticité du couvert de glace;
- vi. l'influence de l'épaisseur du couvert de glace.

4.7.2 Géométrie et maillage du système à l'étude

La figure 4.9 illustre le système glace-barrage-réservoir et les paramètres tels que : la longueur du réservoir L_R , l'épaisseur du couvert de glace h_{ice} , le nombre de nœuds par éléments pouvant modifier la réponse dynamique des systèmes glace-barrage-réservoir.

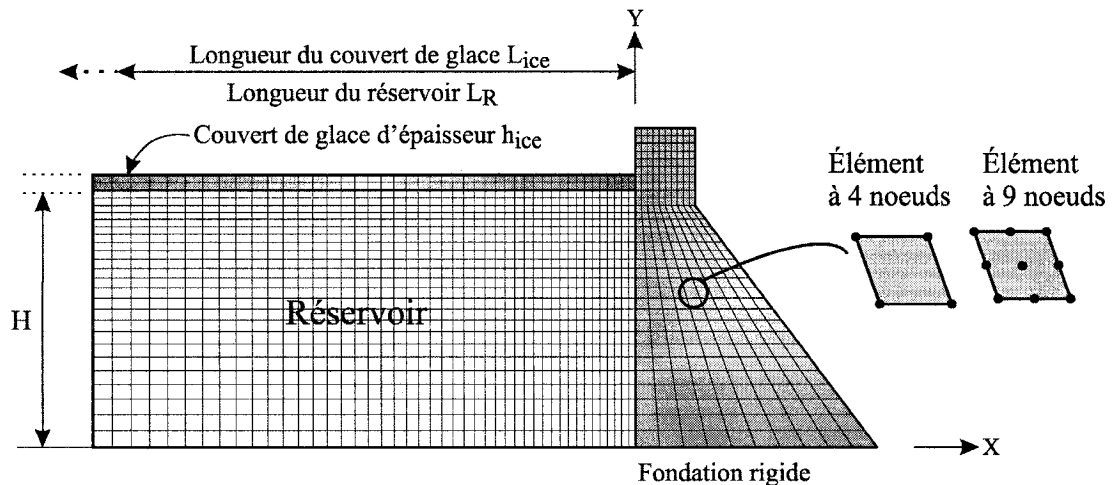


Figure 4.9 : Maillage du système glace-barrage-réservoir.

4.7.3 Influence de la profondeur du réservoir et du nombre de nœuds par élément

La détermination des caractéristiques dynamiques des systèmes de glace-barrage-réservoir est un aspect important pour en étudier la réponse sismique. Une analyse dans le domaine fréquentiel est effectuée pour les quatre modèles d'éléments finis illustrés à la figure 4.8. Comme mentionné avant, la longueur de troncation du réservoir est changée pour évaluer son influence sur la réponse dynamique. Comme le

démontre la figure 4.10, les calculs prouvent que lorsque les variations de L_R ($0,5H$, $1,0H$, $1,5H$, $2,0H$, $4,0H$, $6,0H$) sont plus hautes que $2H$ les propriétés dynamiques du système entier demeurent constantes. Une étude de convergence est également entreprise pour évaluer la sensibilité des modèles d'éléments finis pour entériner la densité et le nombre de nœuds par élément. Les résultats démontrent que l'utilisation d'éléments finis à 4 nœuds rend les systèmes légèrement plus rigides que les systèmes composés de 9 nœuds par élément.

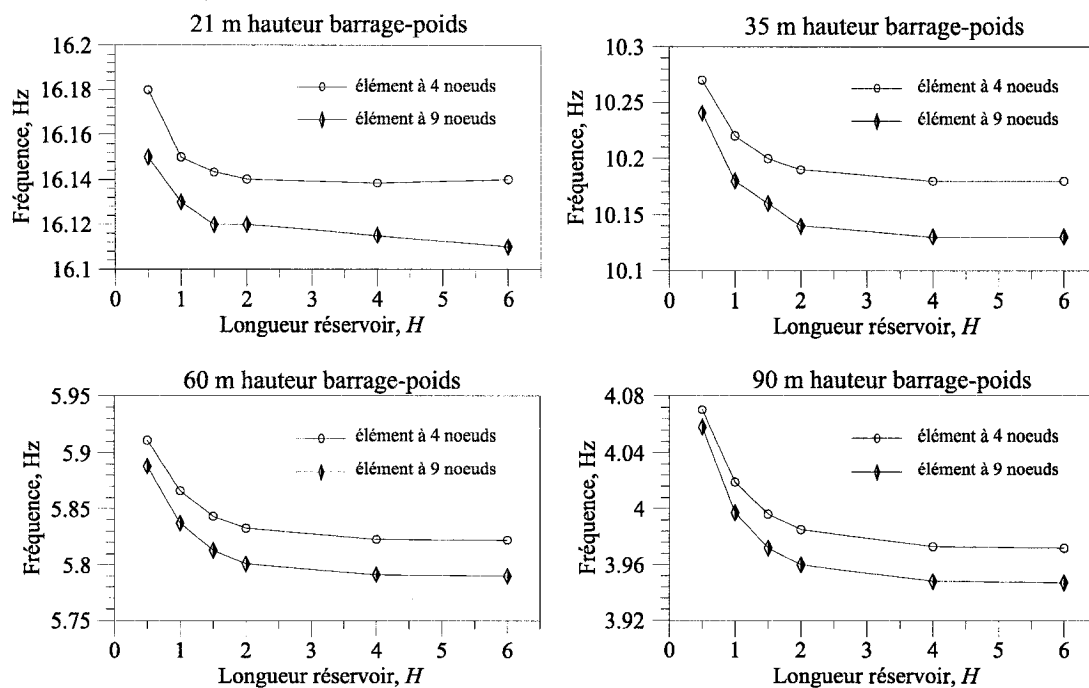


Figure 4.10 : Sensibilité des modèles éléments finis et l'effet de la longueur du réservoir.

En raison de ces résultats, nous assimilons au sous-système réservoir modélisé pour les analyses effectuées au chapitre 5, un réservoir composé d'éléments fluides isoparamétriques à quatre nœuds avec une longueur $L_R = 2H$.

4.7.4 Effet de la compressibilité de l'eau

On se propose dans cette section d'effectuer une comparaison sur l'effet de la compressibilité de l'eau sur le modèle de barrage de 21 m de hauteur. Afin d'éliminer l'effet de la fondation, nous étudions l'effet de la compressibilité sur un modèle de fondation rigide. Le maillage utilisé dans ces analyses est montré à la figure 4.9. Une épaisseur moyenne de 1 mètre de glace est considérée dans ces modèles. Afin d'évaluer l'effet de la compressibilité de l'eau sur la longueur du réservoir, trois modèles d'éléments finis sont créés et le réservoir est tronqué à 1H, 2H et 4H. Nous utilisons le chargement sismique provenant du séisme du Saguenay de récurrence SMD. Ce séisme est décrit au chapitre 3.

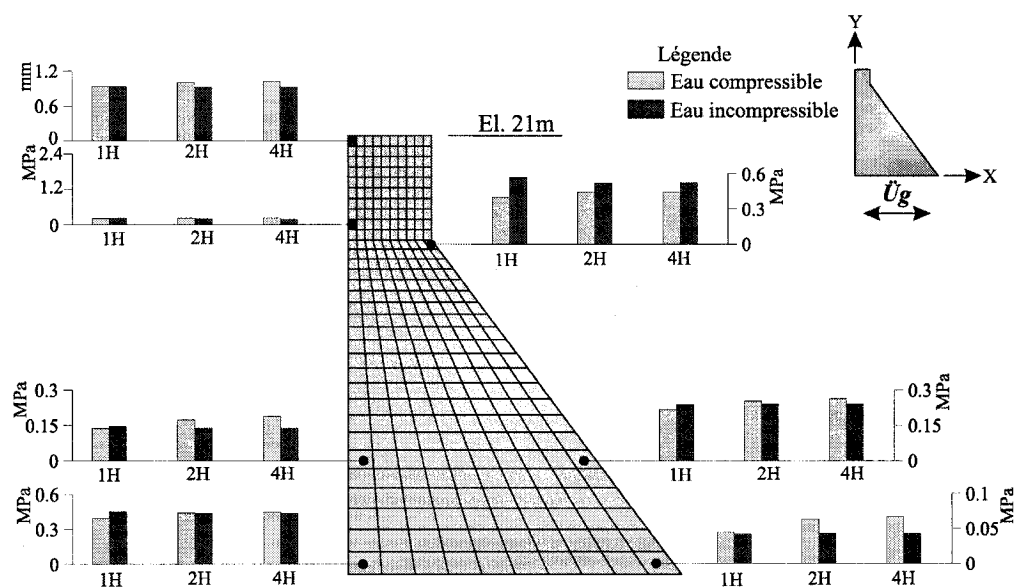


Figure 4.11 : Effet de la compressibilité de l'eau, séisme du Saguenay, SMD (sans glace).

Les figures 4.11 et 4.12, permettent respectivement de comparer, en variant la longueur du réservoir, l'effet de la compressibilité sur le déplacement (en mm) à la

crête du barrage et l'enveloppe des contraintes maximum de traction (en MPa). La figure 4.11 compare les modèles sans effet du couvert de glace; et la figure 4.12, quant-à elle, compare les modèles avec l'effet du couvert de glace.

Nous constatons, à la figure 4.11, que l'effet de la compressibilité de l'eau entraîne une augmentation du déplacement à la crête pour l'ensemble des trois longueurs de réservoir d'environ, 0,4% pour le 1H, 8,6% pour le 2H et 11,6% pour le 4H. L'analyse des contraintes principales de traction à la face amont démontre que l'effet de la compressibilité de l'eau, en considérant une longueur 1H, occasionne une diminution des contraintes de traction d'environ 1,2% à 11,8%. Par contre, pour les longueurs 2H et 4H, nous constatons une augmentation des contraintes, pouvant atteindre 32,6% pour le point de calcul à l'étude, situé sur la face amont, à environ au 2/3 de la profondeur du réservoir. De façon générale, l'effet de la compressibilité de l'eau en considérant une longueur de réservoir équivalente à 2H et 4H, entraîne une augmentation des contraintes principales de traction. Cependant, au point de calcul, situé près de la crête sur la face aval, nous trouvons une diminution des contraintes pour l'ensemble des longueurs de réservoir. Notons que ce point est proche d'une zone de singularité et que les valeurs brutes des contraintes doivent être prises avec précaution.

La figure 4.12, montre que l'effet de la compressibilité de l'eau entraîne globalement une diminution des déplacements et des contraintes principales de traction, lorsque le couvert de glace est considéré dans les analyses. Nous remarquons une différence considérable de l'effet de la compressibilité sur la longueur 1H, où 37% de différence pour le déplacement en crête et de 34% à 88% pour les contraintes principales de traction.

Comme on peut le voir à partir de ces figures, l'effet de la compressibilité de l'eau entraîne une rigidification du système glace-barrage-réservoir dans son ensemble et

amène de la flexibilité dans le système barrage-réservoir. Nous considérons l'effet de la compressibilité de l'eau pour les analyses ultérieures, présentées au chapitre 5.

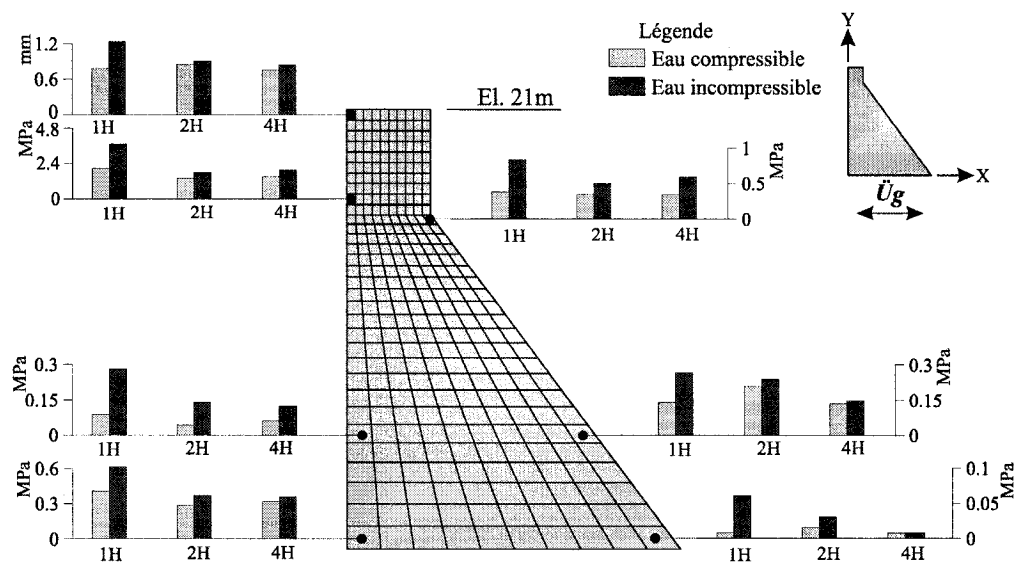


Figure 4.12 : Effet de la compressibilité de l'eau, séisme du Saguenay, SMD (avec glace).

4.7.5 Conditions aux limites à l'extrémité amont du couvert de glace

On se propose dans cette section d'effectuer une comparaison sur l'effet des conditions aux limites à l'extrémité amont du couvert de glace. Comme il a été mentionné précédemment, le réservoir et le couvert de glace se prolongent à l'infini vers l'amont. Cependant, la modélisation du couvert de glace par éléments finis impose le choix d'une condition aux limites à son extrémité amont. Idéalement, cette condition devrait tenir compte du frottement du couvert de glace sur les rives et permettre la dissipation d'énergie à cet endroit. Afin de déterminer l'influence de différentes conditions aux limites à l'extrémité amont du couvert de glace, trois systèmes de barrage-réservoir-glace présentés à la figure 4.13, de 21 m de hauteur, ont été modélisés avec chacun une

condition limite à l'extrémité amont du couvert de glace différente. Une épaisseur moyenne de 1 mètre de glace est considérée dans ces modèles. Le premier modèle simule un encastrement comme condition frontière (a), le deuxième modèle simule une condition libre en X (b) (horizontalement) et enfin, le troisième modèle, simule une condition libre en Y (c) (verticalement). Le maillage utilisé dans ces analyses est montré à la figure 4.9.

La figure 4.13 illustre les résultats en termes de contrainte principales de traction (MPa) aux points de calculs localisés sur les parements amont et aval du barrage de 21 m d'hauteur pour chaque condition frontière. L'état de référence pour la comparaison des résultats est le comportement structural du modèle considéré avec une condition frontière d'encastrement. Les réponses sismiques des barrages sont donc examinées en termes d'augmentation ou de diminution par rapport à l'état de référence correspondant.

À première vue, on peut remarquer que l'effet de la condition frontière, libre en X ou libre en Y, entraîne globalement une augmentation des contraintes principales de traction considérable. Nous observons que la condition frontière libre en X entraîne une augmentation des contraintes sur le parement amont plus importante, que celle libre en Y, pouvant atteindre 364% pour le point situé au 2/3 de la profondeur du réservoir. Par contre, la condition frontière libre en Y entraîne, a pour sa part, une augmentation plus importante que celle libre en X sur le parement aval du barrage. À noter que les contraintes calculées sont très faibles pour les trois types de conditions aux frontières à l'infini.

Ces résultats montrent qu'une condition aux limites à l'extrémité amont du couvert de glace soit, libre en X ou libre en Y engendre de la flexibilité dans le système global et qu'une condition d'encastrement engendre une rigidification globale du système. En raison des résultats obtenus de ces analyses, nous assimilons la condition aux limites à l'extrémité amont du couvert de glace à un encastrement.

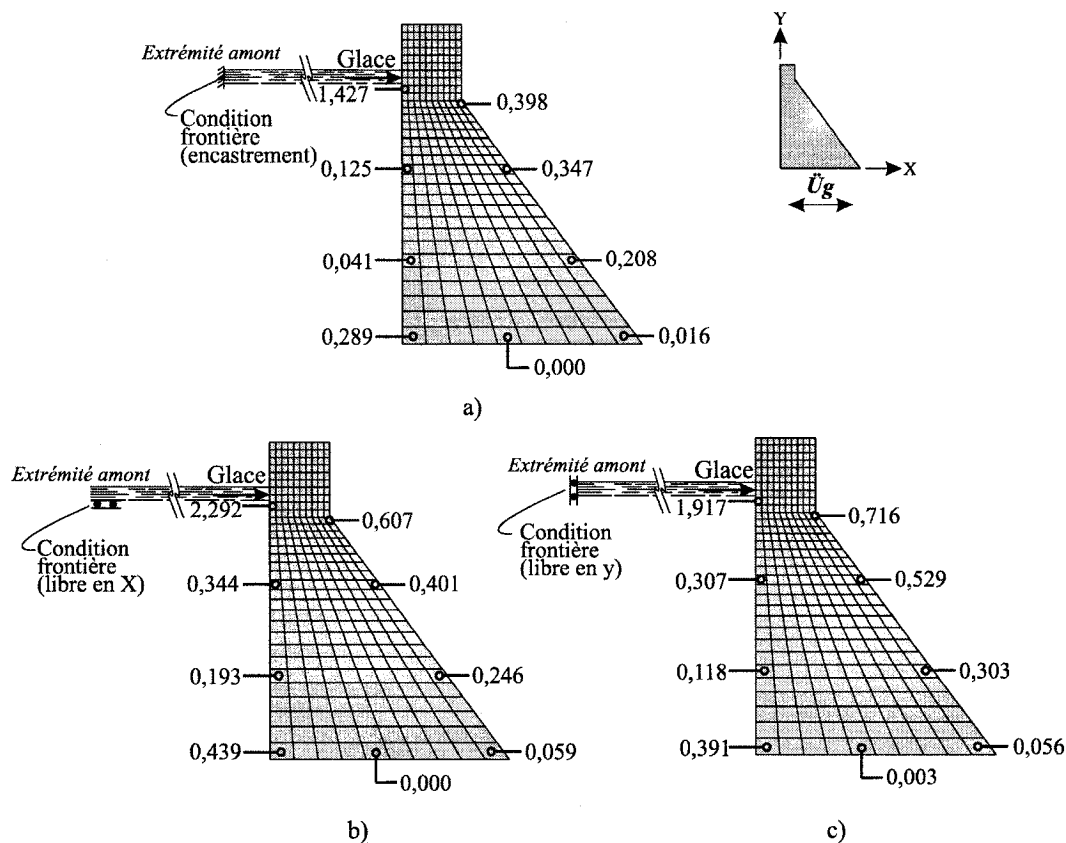


Figure 4.13 : Contraintes principales de traction (MPa) du barrage 21m : a) condition frontière d'encastrement; b) condition frontière, libre en X; c) condition frontière, libre en Y.

4.7.6 Effet du module d'élasticité de la glace

À priori, le module d'élasticité de la glace est un paramètre important qui caractérise la contribution du couvert de glace à la rigidité globale du système.

La variabilité de ce paramètre sur le modèle de 21 m d'hauteur, soumis au chargement sismique du Saguenay modifié de récurrence SMD, permet l'analyse du comportement du barrage. Les figures 4.15, 4.16 et 4.17 permettent respectivement de comparer, en variant le module d'élasticité de 475 MPa à 16500 MPa, le déplacement à la crête du

barrage et l'enveloppe des contraintes de traction principales tel qu'illustré aux points A à I sur la figure 4.14. La figure illustre également la composante du séisme ainsi que l'épaisseur du couvert de glace et la longueur du réservoir considéré pour les analyses.

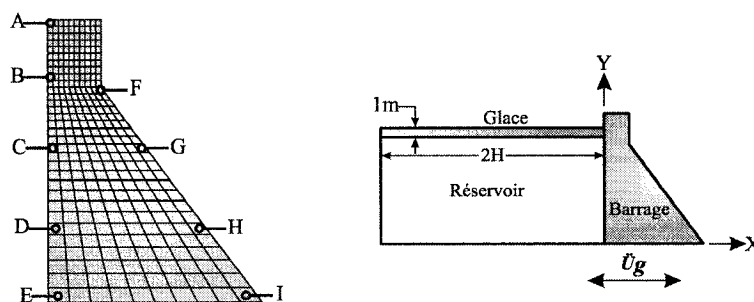


Figure 4.14 : Légende des points à l'étude et paramètre des sous-systèmes.

La figure 4.15 illustre l'effet d'échelle sur le déplacement maximum à la crête du barrage en fonction du module d'élasticité de 475 MPa à 16500 MPa. L'analyse de cette figure permet de constater que le déplacement maximum à la crête est de 1,18 mm pour le module d'élasticité correspondant à 2500 MPa et le minimum est de 0,85 mm pour le module d'élasticité correspondant à 9500 MPa. Ces résultats montrent qu'un module d'élasticité équivalent à 9500 MPa, engendre une rigidification globale du système.

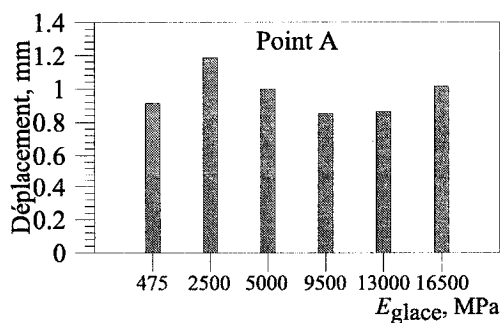


Figure 4.15 : Déplacement en crête du barrage.

Considérons maintenant les contraintes principales de traction calculées aux points illustrés à la figure 4.14. Nous remarquons que les contraintes de traction au point B augmentent de manière constante avec l'augmentation de la valeur du module d'élasticité pour atteindre 3,75 MPa avec $E_{\text{glace}} = 16500$ MPa. Les valeurs des contraintes pour les points C, D et E varient en fonction du module d'élasticité. Cependant, nous observons une tendance pour l'ensemble ces points, le module d'élasticité, $E_{\text{glace}} = 9500$ MPa engendre une rigidification globale du système glace-barrage-réservoir.

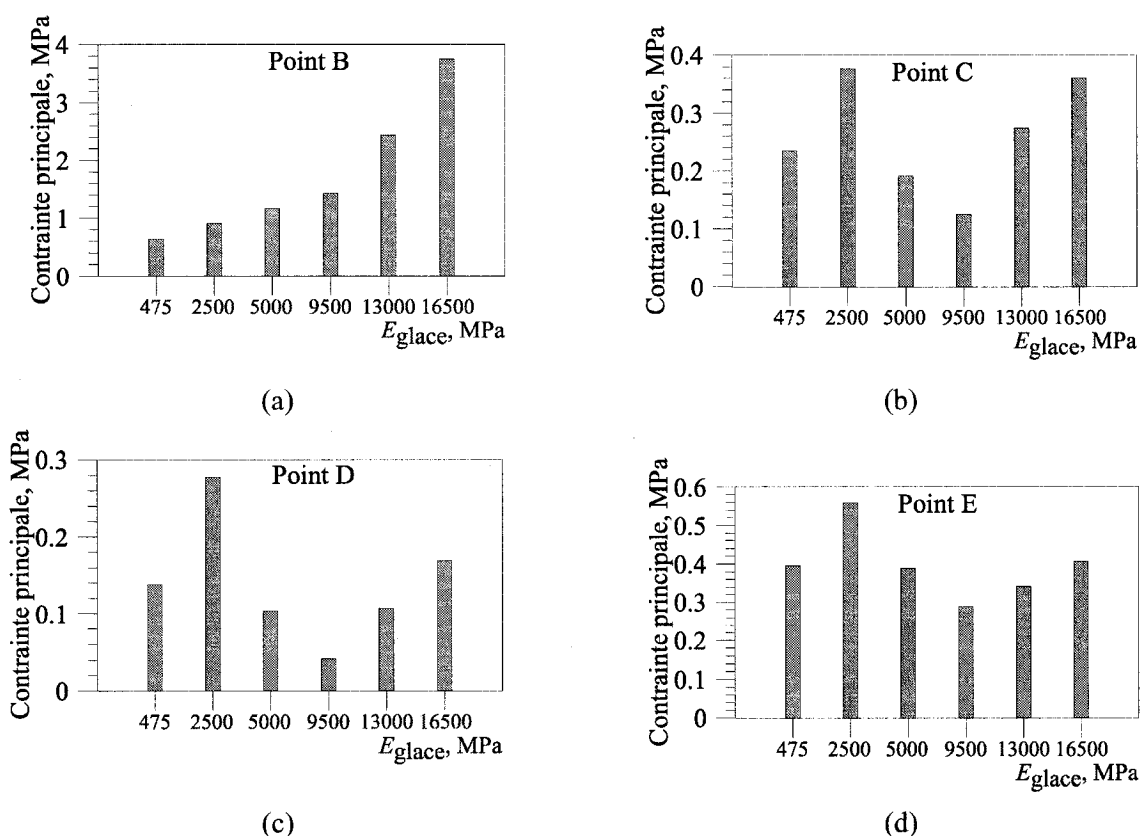


Figure 4.16 : Contraintes principales de traction de la face amont du barrage.

Les résultats obtenus à la figure 4.17 sont calculés aux points F, G, H et I sur le parement aval du barrage-poids à l'étude. Nous constatons que le module d'élasticité, $E_{\text{glace}} = 9500$ MPa entraîne une diminution des contraintes pour les points F et I. Pour

les points G et H, les valeurs des contraintes obtenues avec les modules d'élasticités de 9500 MPa, 13000 MPa, et 16500 MPa sont similaires et plus petites que les valeurs obtenues avec les modules d'élasticités de 475 MPa, 2500 MPa, et 5000 MPa. Il ressort de ces résultats que globalement le module d'élasticité, $E_{\text{glace}} = 9500$ MPa engendre une rigidification globale du système glace-barrage-réservoir.

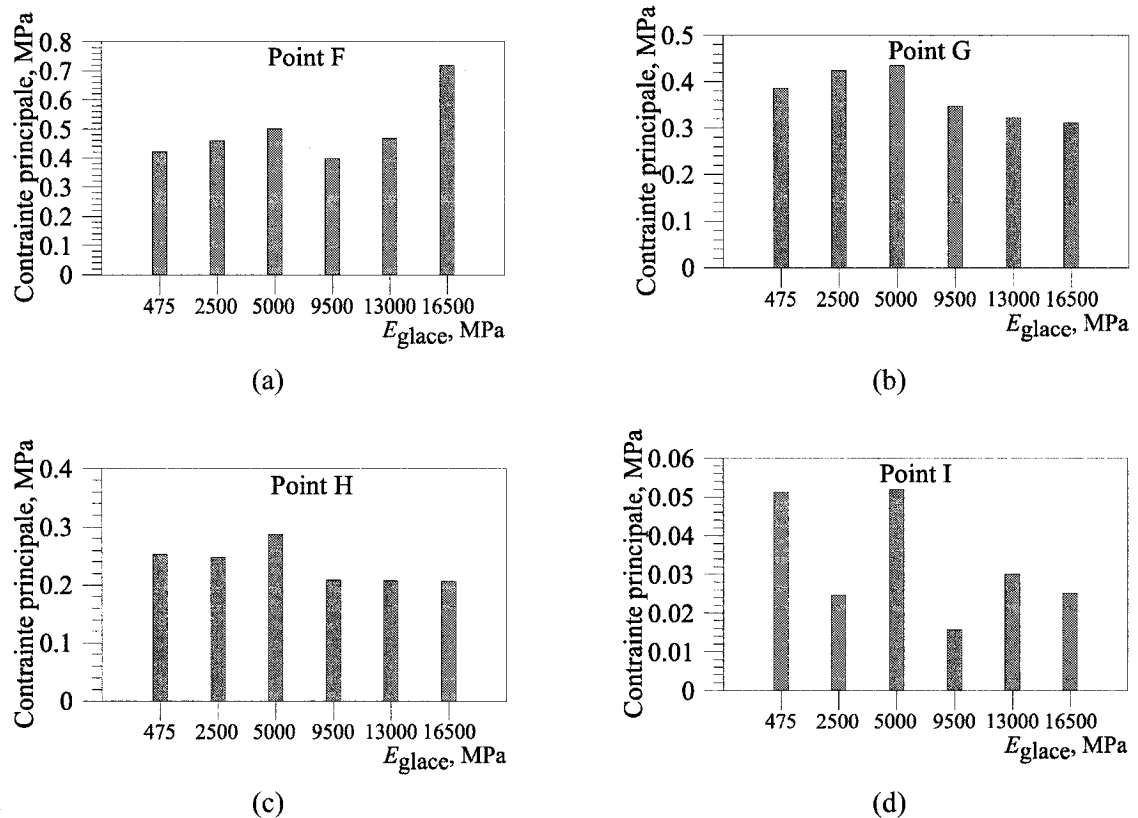


Figure 4.17 : Contraintes principales de traction de la face aval du barrage.

En raison des résultats obtenus de ces analyses, nous assimilons au couvert de glace, un module d'élasticité, $E_{\text{glace}} = 9500$ MPa.

4.7.7 Effet de l'épaisseur du couvert de glace

L'épaisseur de la glace est un paramètre dont la variabilité entre les saisons est très grande, tout dépendant de la période de l'année et du climat particulier du site à

l'étude. Des valeurs précises ne sont, en général, pas disponibles pour la majorité des barrages qui sont affectés par un couvert de glace uniforme. Afin de vérifier l'influence de l'épaisseur du couvert de glace sur la réponse dynamique des systèmes glace-barrage-réservoir, quatre essais sont effectués sur le modèle de barrage-poids de 21 m d'hauteur. Des épaisseurs h_{ice} , de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m et 2,0m du couvert de glace sont considérées pour les analyses. Les résultats suivants sont considérés pour les fins de la comparaison : les contraintes principales de traction dans tous les points de calcul pour les parements amont et aval (figure 4.18 et figure 4.19). La figure 4.14 illustre l'emplacement des points de calcul pour les quatre essais sur le système glace-barrage-réservoir de 21 m d'hauteur.

La figure 4.18 illustre l'effet d'échelle sur les contraintes principales de traction en fonction de l'épaisseur du couvert de glace pour les points B, C, D et E situés sur le parement amont du barrage. Nous observons que les contraintes principales de traction obtenues avec une épaisseur de glace h_{ice} , de 1,0 m sont inférieures à la moyenne pour les points C, D et E.

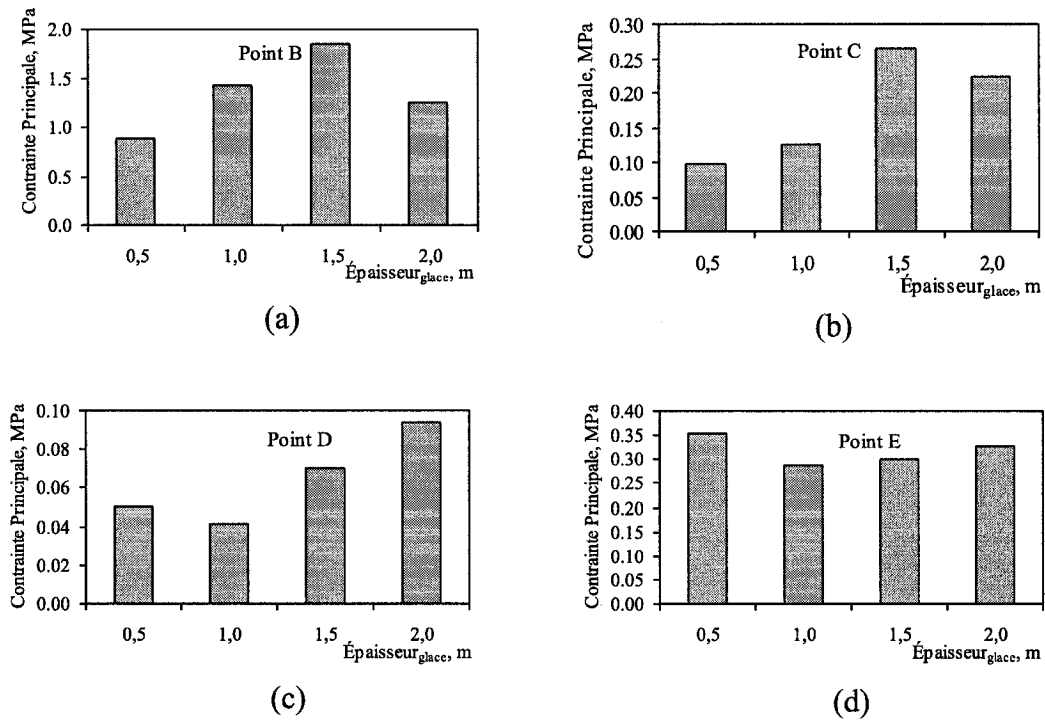


Figure 4.18 : Contraintes principales de traction de la face amont du barrage

La figure 4.19 illustre l'effet d'échelle sur les contraintes principales de traction en fonction de l'épaisseur du couvert de glace pour les points F, G, H et I situés sur le parement aval du barrage. Nous constatons une amplification de la rigidité du système glace-barrage-réservoir sur le parement aval avec l'augmentation de l'épaisseur du couvert de glace. Les résultats obtenus au point F semblent être variable en fonction de l'épaisseur du couvert de glace. Notons que le point F est proche d'une zone de singularité et que les valeurs brutes des contraintes doivent être prises avec précaution.

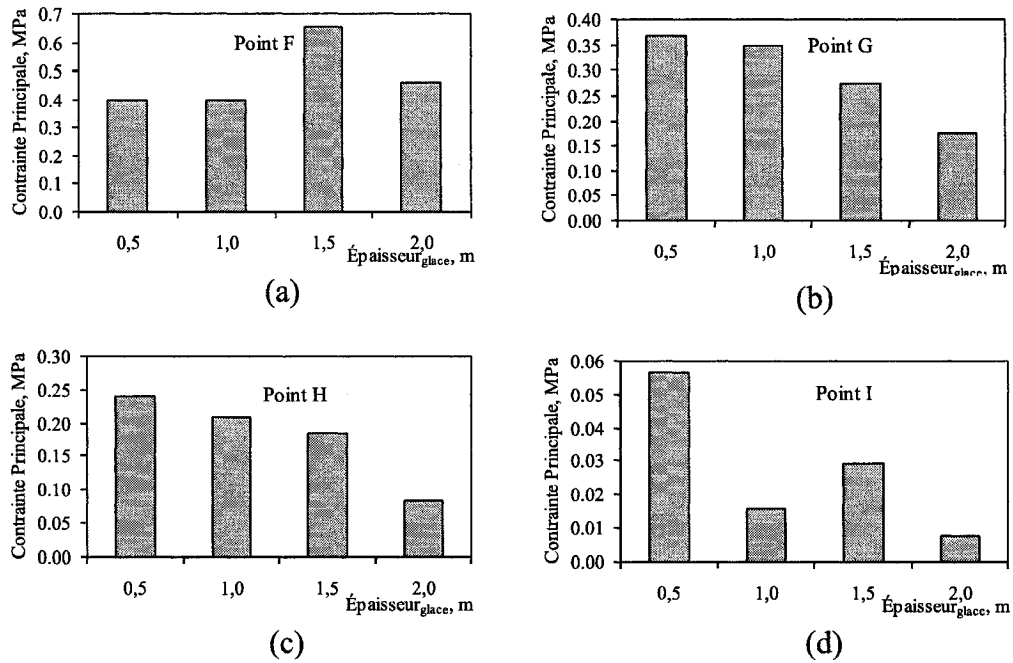


Figure 4.19 : Contraintes principales de traction de la face aval du barrage

4.8 Résumé

Ce chapitre nous a permis d'évaluer l'effet de différents paramètres sur le comportement dynamique du système glace-barrage-réservoir. Les hypothèses adoptées relativement au couvert de glace, ont été justifiées pour les paramètres suivants : conditions aux limites amont du couvert de glace, au module d'élasticité et l'épaisseur du couvert de glace. La profondeur du réservoir a été définie à $2H$ et le nombre de 4 nœuds par éléments est adopté.

Chapitre 5

Analyse comparative

5.1 Objectif du chapitre

Ce chapitre présente quatre modèles par éléments finis de systèmes glace-barrage-réservoir de différentes dimensions. Ces modèles sont soumis à divers chargements sismiques et leur réponse temporelle est analysée en détail.

5.2 Introduction

Tel que mentionné précédemment, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de la taille des systèmes glace-barrage-réservoir sur leur réponse sismique. Quatre barrages de hauteurs respectives de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m sont considérés. Ces barrages sont illustrés, sur la figure 5.1.

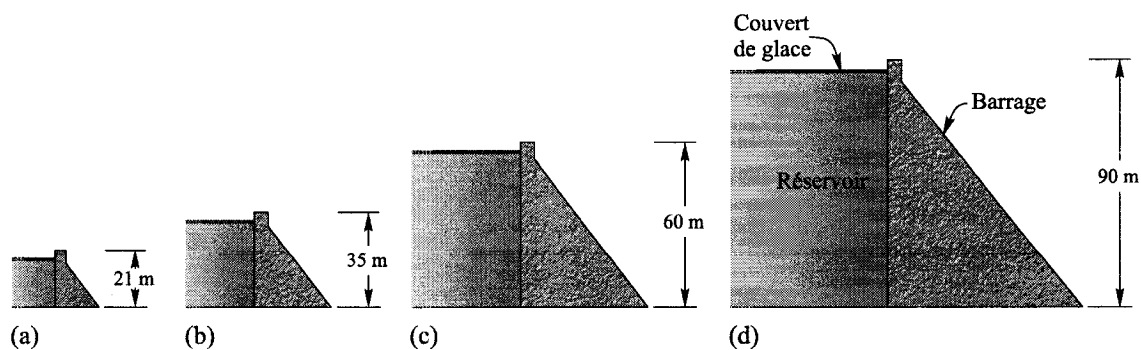


Figure 5.1: Système glace-barrage-réservoir à l'étude : (a) barrage 21 m d'hauteur; (b) barrage 35 m d'hauteur; (c) barrage 60 m d'hauteur; (d) barrage 90 m d'hauteur.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description de l'excitation sismique et des conditions initiales. La seconde partie illustre les résultats des différents essais.

5.3 Excitation sismique

Dans cette étude, les modèles construits sont soumis à des séismes afin d'analyser leur réponse temporelle. Le choix des accélérogrammes et leurs caractéristiques sont discutés en détails au chapitre 3 du présent document. Trois accélérogrammes historiques et quatre artificiels sont utilisés. Les cas de chargements considérés sont illustrés aux figures 5.2 et 5.3. En premier lieu, une série d'analyse est effectuée sur les modèles barrage-réservoir sous l'effet des séismes de récurrence SMD et SMP en tenant compte de la composante horizontale seulement. En second lieu, les analyses sont réalisées en tenant compte de l'effet de la composante verticale des séismes. Comme illustré à la figure 5.3, une troisième série d'analyse est réalisée en incluant le couvert de glace dans le système.

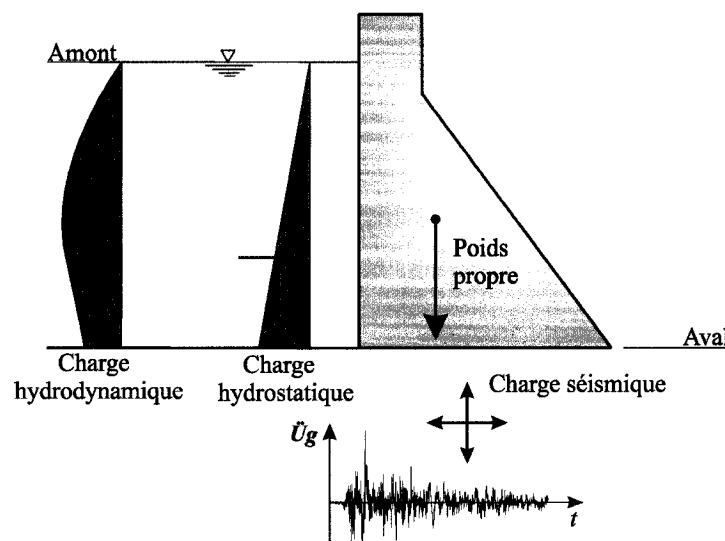


Figure 5.2 : Chargement statique et dynamique sans effet du couvert de glace.

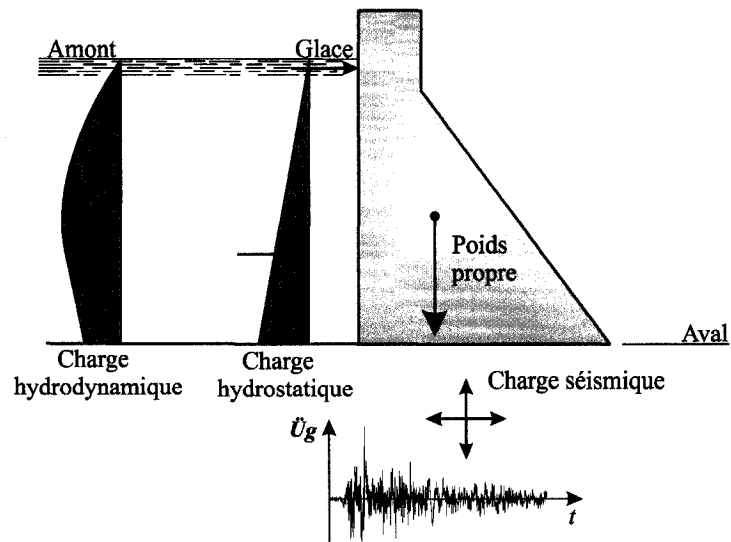


Figure 5.3 : Chargement statique et dynamique avec effet du couvert de glace.

5.3.1 Conditions initiales, réponses statique et temporelle

Les conditions initiales de l'analyse dynamique linéaire sont obtenues à partir de l'analyse statique du système. En effet, avant l'avènement du séisme, le barrage est soumis à son poids propre et aux poussées statiques du réservoir et du couvert de glace. Les effets thermiques ne sont cependant pas considérés dans cette étude, et les conditions initiales sont déterminées uniquement par application du poids-propre du système glace-barrage-réservoir. La pression hydrostatique résultante est illustrée à la figure 5.4 pour le cas : sans glace. Les résultats de l'analyse statique montrent qu'il n'y a pas de fissuration de l'ouvrage sous ces conditions.

Une procédure d'intégration directe temporelle pas à pas est adoptée pour la résolution des équations dynamiques du système global. La méthode implicite d'intégration directe de Newmark est utilisée en supposant une accélération moyenne constante avec $\delta = 0,5$ et $\alpha = 0,25$.

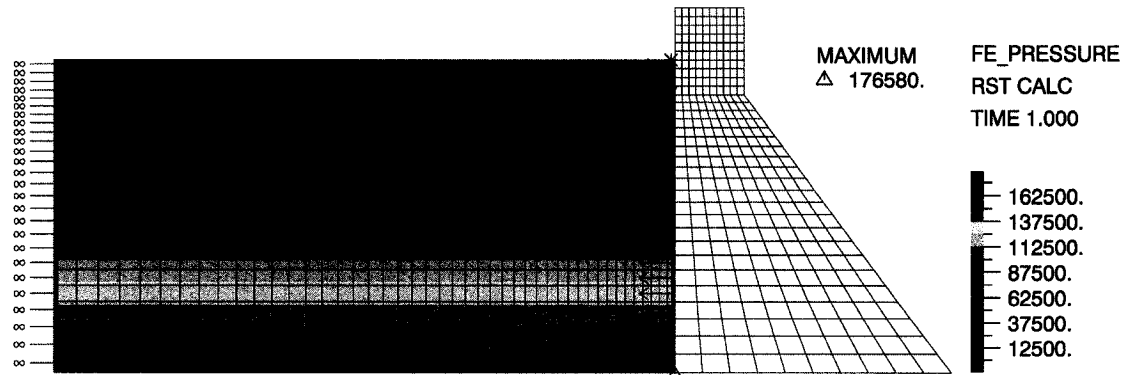


Figure 5.4 : Pression hydrostatique pour le modèle 21 m d'hauteur.

5.4 Discussion des résultats

Le logiciel ADINA (2002) est utilisé ici pour analyser les systèmes glace-barrage-réservoir décrits précédemment. La figure 5.5 illustre des points de calcul localisés aux centres de gravité de certains éléments sélectionnés sur les parements amont et aval de chaque barrage afin de comparer les réponses sismiques des différents modèles. Les résultats suivants sont considérés pour fins de la comparaison : (i) le déplacement et l'accélération horizontaux à la crête de chaque barrage (Point A), et (ii) les contraintes principales de traction dans tous les points de calcul. Pour chaque barrage, l'état de référence pour la comparaison des résultats est le comportement structural du modèle sans couvert de glace. Les réponses sismiques des barrages sont donc examinées en terme d'augmentation ou de diminution par rapport à l'état de référence correspondant.

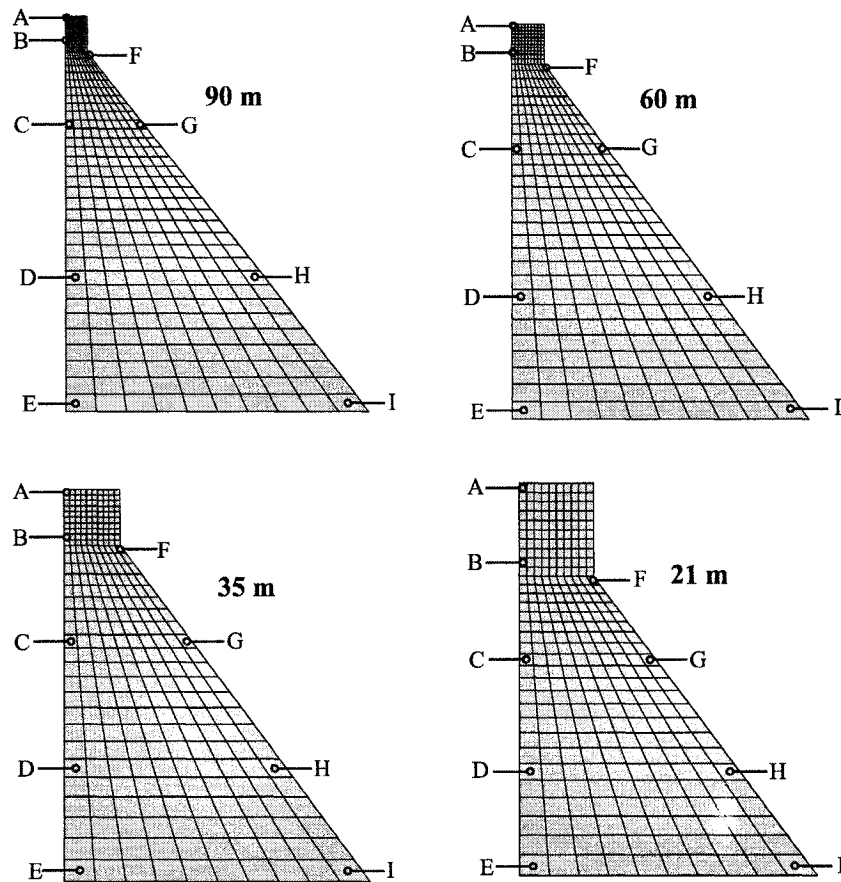


Figure 5.5 : Modèle d'élément finis avec les différents points à l'étude.

5.5 Effet des séismes de récurrence SMD

Cette section illustre les résultats obtenus à la suite des essais effectués sur les systèmes soumis aux cinq séismes de récurrence SMD. Seulement la composante horizontale des séismes est utilisée comme chargement pour cette série d'analyse.

La figure 5.6 illustre l'emplacement des points de calcul pour les quatre hauteurs de barrages. La figure montre également une numérotation des séismes étudiés, soient : le séisme du Saguenay modifié (no. 1), le séisme de Nahanni modifié (no. 2), le séisme d'El Centro modifié (no. 3), et deux séismes artificiels d'Atkinson modifiés (nos. 4 et

5). La figure illustre également la nomenclature adoptée pour distinguer les barrages B21, B35, B60 et B90, de hauteurs respectives de 21 m, 35 m, 60 m et 90.

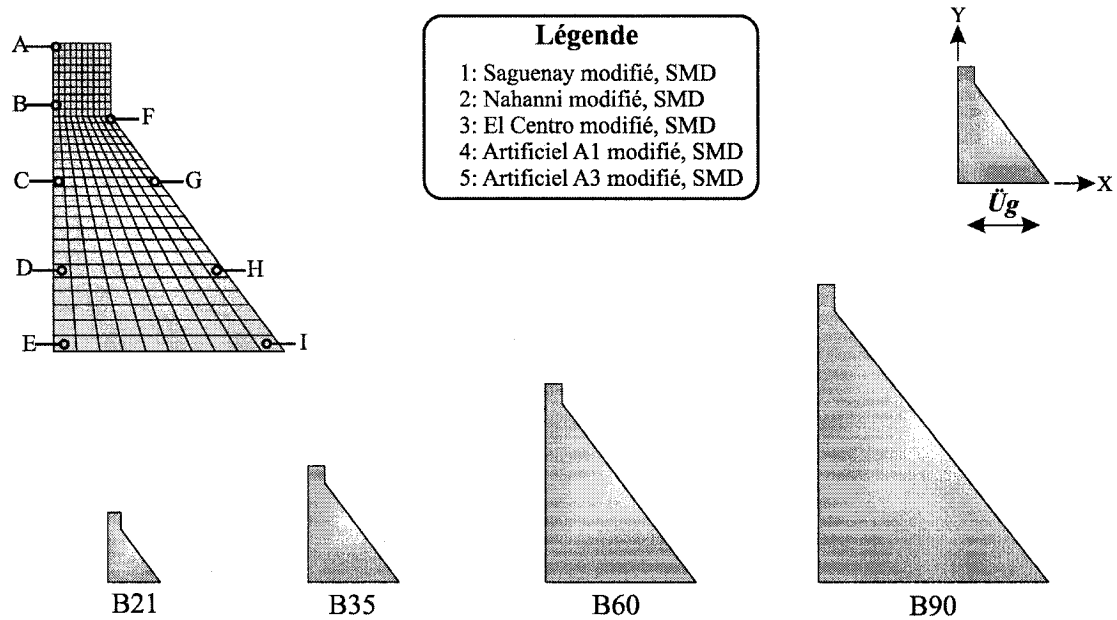


Figure 5.6 : Points de calcul, nomenclature des barrages et numérotation des séismes.

5.5.1 Déplacement à la crête du barrage

La figure 5.7 illustre l'effet d'échelle sur le déplacement maximum à la crête en fonction des différentes hauteurs des quatre barrages étudiés, avec et sans effets du couvert de glace. Les résultats des quatre modèles sont présentés sur un même graphique pour faciliter la comparaison. L'analyse de cette figure permet de constater que le déplacement maximum à la crête augmente globalement avec la hauteur du barrage-poids. Un déplacement maximum de 12 mm est observé pour le modèle glace-barrage B90 sous l'effet du séisme d'El Centro. Selon les séismes appliqués, la présence du couvert de glace entraîne une augmentation ou une diminution du déplacement maximum à la crête allant jusqu'à 30% pour certains modèles. Nous constatons que le séisme d'El Centro a pour effet d'augmenter les déplacements à la

crête des modèles B21, B60 et B90 de 25% à 30%, alors qu'il entraîne une diminution de l'ordre de 5% du déplacement à la crête du modèle B35. La figure montre également que sous l'effet du séisme du Saguenay, les déplacements maxima à la crête diminuent de manière uniforme de 29% pour le modèle B21 à 18% pour le modèle B90. L'effet des séismes artificiels est très variable et aucune tendance n'a pu être identifiée. Notons cependant que les déplacements maxima calculés sous l'effet de ces deux séismes sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus sous l'effet des séismes historiques.

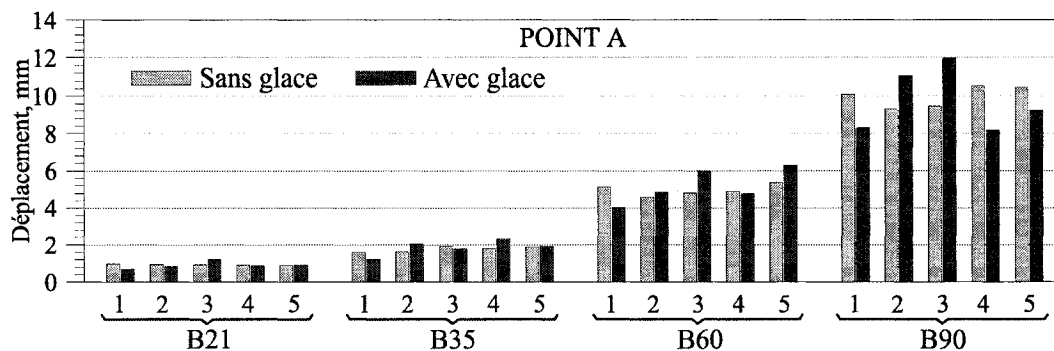


Figure 5.7 : Déplacements horizontaux au point A.

5.5.2 Accélération à la crête du barrage

La figure 5.8 illustre l'effet d'échelle sur l'accélération maximum à la crête en fonction des différentes hauteurs des quatre barrages étudiés, avec et sans effets du couvert de glace. Les résultats des quatre modèles sont présentés sur un même graphique pour faciliter la comparaison. L'analyse de cette figure permet de constater que l'accélération horizontale maximum à la crête augmente globalement avec la hauteur du barrage-poids. Nous constatons, que pour l'ensemble des séismes, l'accélération à la crête diminue de 2% à 48%. La figure montre également que sous l'effet du séisme de Nahanni, les accélérations maxima à la crête augmentent de 2% à 5% pour les

modèles B21, B35 et B60. L'effet des séismes artificiels est constaté par la diminution de l'accélération, sauf pour le modèle B35 où une augmentation de 5% sous l'effet du séisme no.5 est obtenue. Cependant aucune tendance quantifiable n'a pu être identifiée.

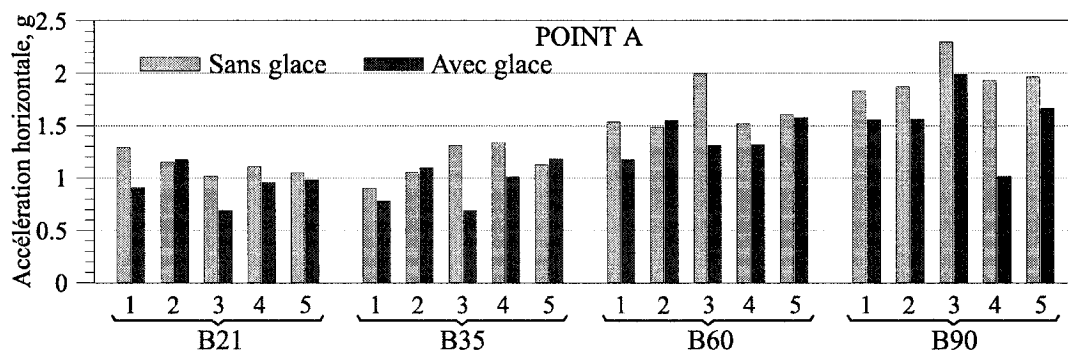


Figure 5.8 : Accélération horizontale au point A.

5.5.3 Évaluation des contraintes et du potentiel de fissuration

L'évaluation des contraintes, notamment celles de traction, se développant au sein d'un barrage sous l'effet d'un chargement sismique est un indicateur important de sa performance structurale. L'objectif de ce paragraphe est de montrer l'influence des couverts de glace sur les contraintes principales de traction déterminées aux points de calcul de la figure 5.6. Les figures 5.9 et 5.10 illustrent les contraintes (en MPa) obtenues pour l'ensemble des barrages étudiés sous l'effet des cinq séismes considérés. Notons que les contraintes montrées incluent l'effet des charges statiques. Chaque sous-graphique illustre les résultats en un point de calcul.

Le point B se trouve près de l'interface glace-barrage, endroit où l'on s'attendrait à avoir une amplification significative des contraintes. Ceci est confirmé par la figure 5.9. Les valeurs de ces contraintes doivent cependant être considérées avec prudence

car elles sont évaluées dans une zone de discontinuité proche de l'interface glace-barrage.

Au point C, situé à environs deux tiers de la hauteur du réservoir, il est observé que les contraintes principales maxima de traction subissent : (i) une augmentation allant jusqu'à 135% pour le modèle B21 soumis au séisme d'El Centro, et (ii) une diminution allant jusqu'à 75% pour le modèle B90. Les valeurs des contraintes varient entre 0,05 MPa et 0,62 MPa. Il est important de noter ici que l'influence du couvert de glace dans le cas du modèle B21 se traduit par une diminution des contraintes au point C, sauf sous l'effet du séisme d'El Centro qui induit une augmentation de la contrainte de traction maximum. Nous observons également que parmi les effets des séismes identifiés, celui des secousses artificielles est globalement le moindre. D'une manière générale, le couvert de glace a pour effet de diminuer ou d'augmenter les contraintes principales de traction dans des proportions variables ne dépassant pas 150%.

Considérons maintenant les contraintes principales de traction calculées au point D, situé à environs un tiers de la hauteur du réservoir. Tel qu'indiqué sur la figure 5.9, ces contraintes varient entre 0 et 0,58 MPa. Nous remarquons que l'effet du couvert de glace entraîne une diminution des contraintes principales de traction de 8% à 75% pour le modèle B21 soumis aux séismes considérés à l'exception du séisme artificiel no. 5. Ce dernier cause une légère augmentation des contraintes de 1% pour ce modèle. Pour le modèle B35, le couvert de glace induit une augmentation de la contrainte principale de traction de 5% à 180% sous l'effet des séismes 2 à 5, et une baisse de 100% de cette contrainte sous l'effet du séisme du Saguenay (no. 1). On peut donc conclure que les effets sur le modèle B35 sont globalement plus significatifs que sur le modèle B21, de taille plus petite. Ce résultat montre clairement que les effets combinés du couvert de glace et de l'excitation sismique n'obéissant pas à des tendances préétablies et peuvent donc être compliquées à prédire.

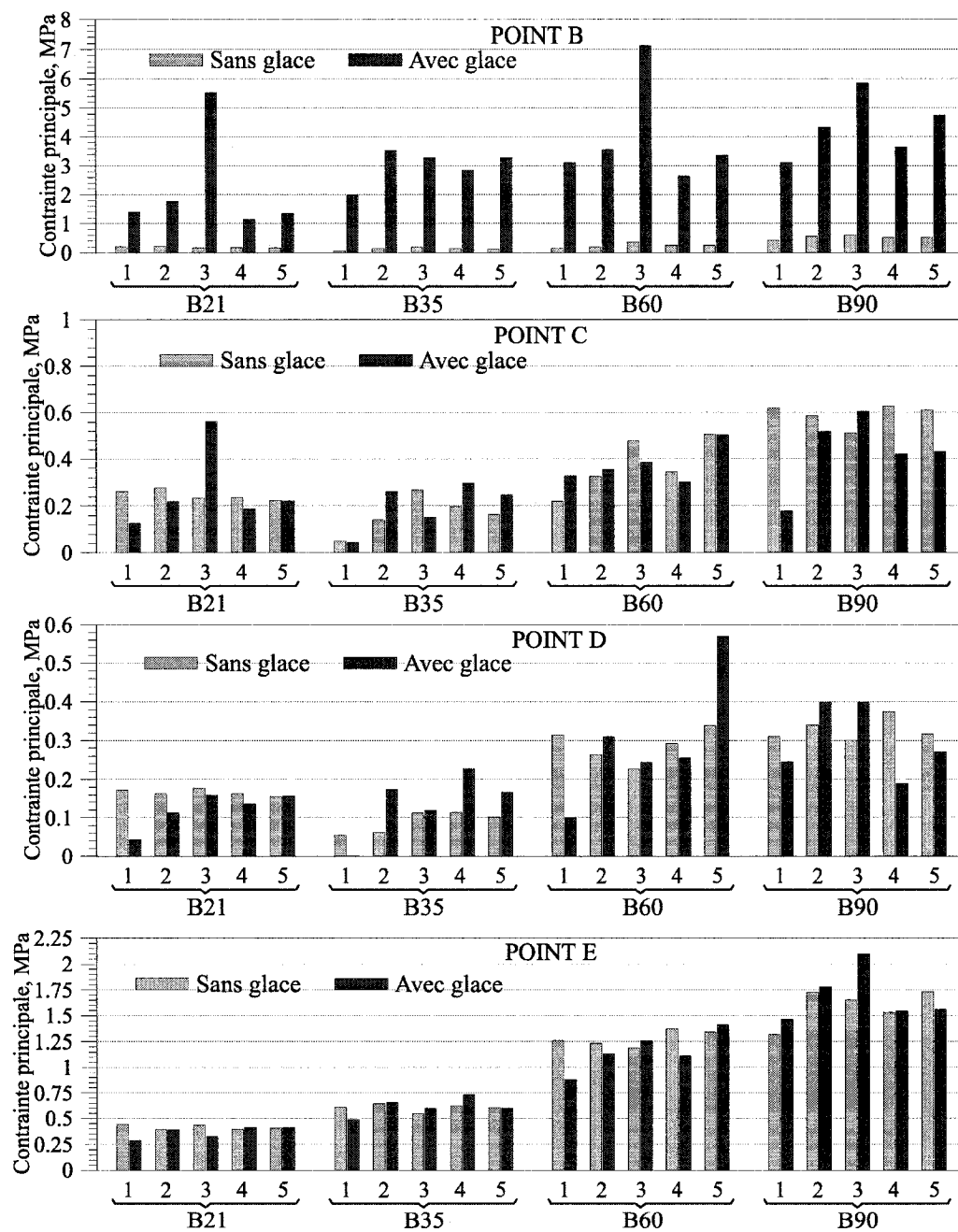


Figure 5.9 : Contrainte principale maximale obtenue de différents points sur la face amont.

Le point de calcul E est situé au pied du barrage. La valeur de la contrainte en ce point de singularité doit être considérée avec précaution. En moyenne, les contraintes principales de traction en ce point sont d'environ 0,30 MPa pour le modèle B21, 0,50 MPa pour le modèle B35, 1,05 MPa pour le modèle B35 et 1,55 MPa pour le modèles B90. Sous l'effet du couvert de glace et des séismes considérés, la contrainte principale de traction subit une augmentation pouvant aller jusqu'à 28% (Modèle B90 sous l'effet séisme d'El Centro), et une diminution pouvant aller jusqu'à 35% (Modèle B21 sous l'effet du séisme du Saguenay).

Les résultats obtenus à la figure 5.10 sont calculés aux points situés sur la face aval des barrages-poids étudiés. Nous observons que les contraintes principales de traction au point F sont du même ordre de grandeur pour les modèles B21 et B35, soit 0,35 MPa environ. Notons que le point F est proche d'une zone de singularité et que valeurs brutes des contraintes doivent être prises avec précaution. L'effet du couvert de glace est maximum pour le modèle B21 avec une augmentation d'environ 200% de la contrainte principale de traction. Les autres séismes ont cependant un effet beaucoup moindre sur ce modèle. Globalement, l'influence du couvert de glace est plus marquée sur les modèles B35 et B60. Une augmentation de 50% environ pour les séismes 1 et 2 et de 18% pour le séisme 5 est observée. De façon générale, le couvert de glace a peu d'effet sur le modèle B90. Une variation de $\pm 10\%$ de la contrainte principale de traction est observée dans ce cas.

Au point G, nous observons une diminution de la contrainte principale de traction sous l'influence du couvert de glace pour les modèles B21 et B35. Cette diminution se situe entre 5% et 30%. Pour le modèle B60, le couvert de glace occasionne des augmentations et des diminutions de la contrainte de traction principale pouvant aller jusqu'à 50%. Les contraintes principales de traction au point G sont de l'ordre de 0,40 MPa pour les modèles B21 et B35. La contrainte de traction peut atteindre 0,80 MPa sous l'influence du couvert de glace pour les modèles B60 et B90.

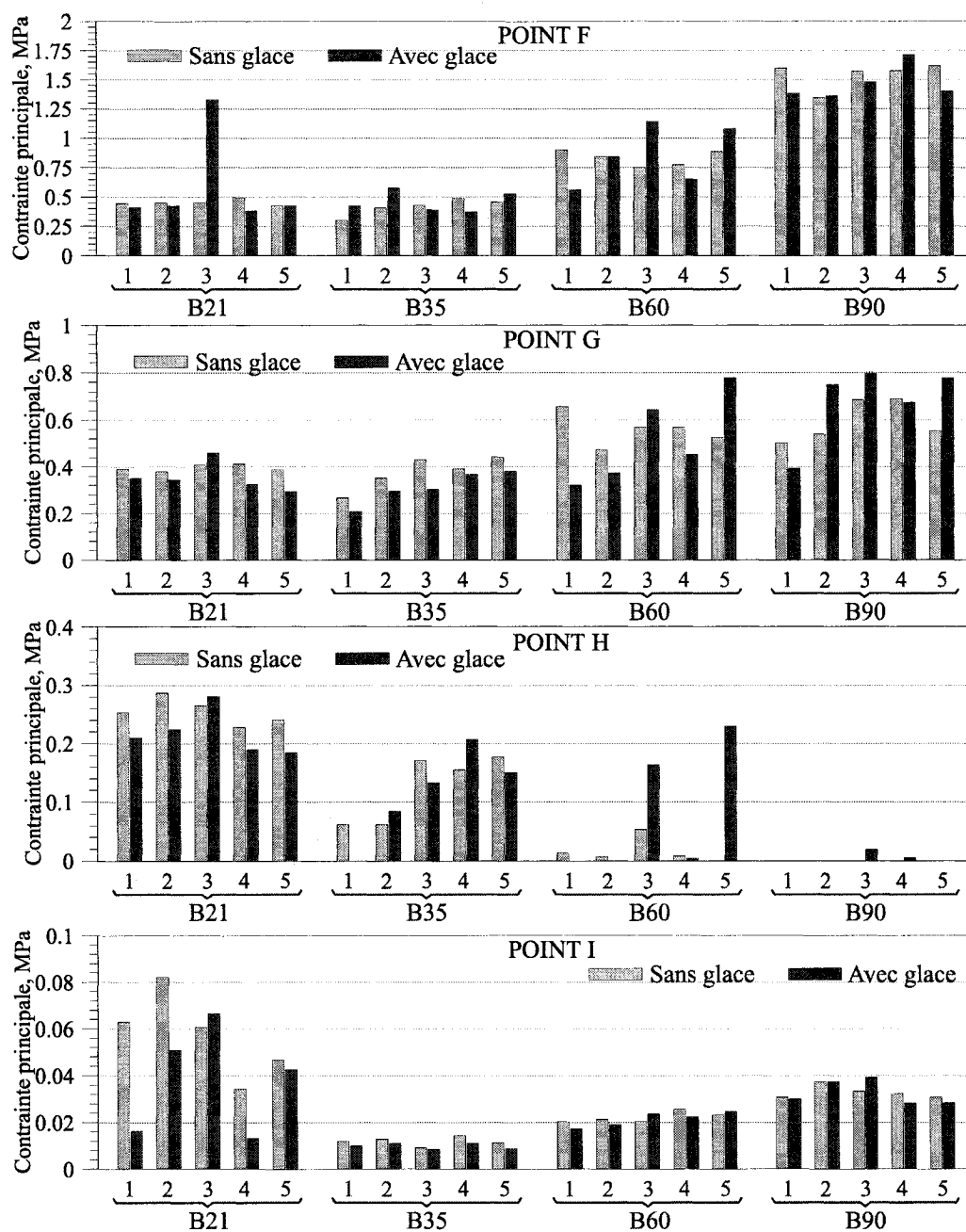


Figure 5.10 : Contrainte principale maximale obtenue de différents points sur la face aval.

Au point H, nous observons une diminution de la contrainte principale de traction sous l'influence du couvert de glace pour les modèles B21, B35 et B60. Cette diminution se situe entre 20% et 100%. Pour le modèle B35 et B60, le couvert de glace occasionne des augmentations et des diminutions de la contrainte de traction principale pouvant aller jusqu'à 200%. Les contraintes principales de traction au point H sont de l'ordre de 0,25 MPa pour le modèle B21 et 0,12 MPa pour le modèle B35. La contrainte de traction n'est presque pas perceptible pour le modèle B60 sans l'influence du couvert de glace. Aucune contrainte de traction n'est observable pour le modèle B90.

Le point de calcul I est situé au pied aval du barrage. La valeur de la contrainte en ce point de singularité doit être considérée avec précaution. En moyenne, les contraintes principales de traction en ce point sont d'environ 0,055 MPa pour le modèle B21, 0,01 MPa pour le modèle B35, 0,02 MPa pour le modèle B60 et 0,03 MPa pour le modèle B90. Dans l'ensemble sous l'effet du couvert de glace et des séismes considérés, la contrainte principale de traction subit une diminution pouvant aller jusqu'à 75% (Modèle B21 sous l'effet séisme du Saguenay), et une augmentation pouvant aller jusqu'à 20% (Modèles B21, B60, B90 sous l'effet du séisme d'El Centro).

Les résultats discutés dans ce paragraphe montrent que, sous les hypothèses adoptées dans ce travail, le couvert de glace n'affecte pas nécessairement d'avantage les barrages de petite taille. Une analyse détaillée de chaque système glace-barrage-réservoir avec ses particularités géométriques et matérielles est donc requise pour prédire l'enveloppe de la réponse sismique sous l'effet d'un séisme donné. On remarque cependant que dans tous les points de calcul, à l'exception des points de singularité, les contraintes principales maxima de traction calculées en incluant l'effet du couvert de glace demeurent globalement inférieures à deux fois celles obtenues sans couvert de glace.

5.6 Réponse temporelle

Cette section illustre la réponse temporelle des résultats obtenus à la suite des essais effectués sur les systèmes soumis au séisme du Saguenay de récurrence SMD. Seulement la composante horizontale du séisme est utilisée comme chargement.

Les figures 5.12, 5.13 et 5.14 permettent, de comparer les réponses temporelles avec et sans effet du couvert de glace pour les barrages-poids de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m d'hauteur. Les résultats suivants sont considérés pour les fins de la comparaison : (i) le déplacement horizontal à la crête de chaque barrage (Point A), et (ii) les contraintes principales de traction aux points de calcul E et F. Pour chaque barrage, l'état de référence pour la comparaison des résultats est le comportement structural du modèle sans couvert de glace. Les réponses sismiques des barrages sont donc examinées en termes d'augmentation ou de diminution par rapport à l'état de référence correspondant.

La figure 5.11 illustre les points de calcul localisés aux centres de gravité de certains éléments sélectionnés sur les parements amont et aval pour les quatre hauteurs de barrages. La figure montre également le séisme étudié, soit : le séisme du Saguenay modifié.

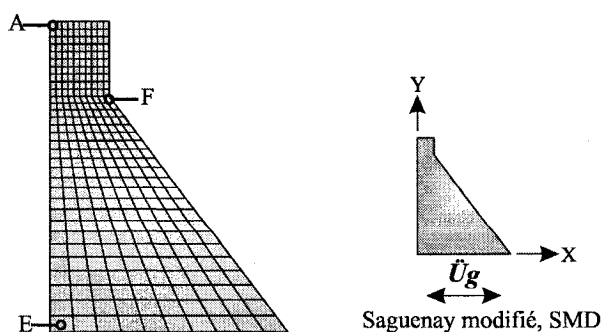


Figure 5.11 : Points analysés avec nom et composante du chargement

La figure 5.12 illustre l'effet d'échelle sur le déplacement dans le temps à la crête des différentes hauteurs des quatre barrages étudiés, avec et sans effet du couvert de glace. Les résultats des quatre modèles sont présentés sur la même figure pour faciliter la comparaison. L'analyse de cette figure permet de constater que le déplacement maximum à la crête augmente globalement avec la hauteur du barrage-poids, soit : 1,0 mm pour le B21, 1,6 mm pour le B35, 5,2 mm pour le B60 et 10,0 mm pour le B90. Pour l'ensemble des quatre barrages soumis au séisme du Saguenay, la présence du couvert de glace entraîne une diminution de manière uniforme du déplacement maximum à la crête de 29% pour le modèle B21 à 18% pour le modèle B90.

L'analyse temporelle des contraintes principales au pied amont (Point E) des quatre barrages est illustrée à la figure 5.13. Tel qu'indiqué sur la figure, l'amplitude maximum des contraintes de traction varient entre 0,25 et 1,45 MPa. Nous remarquons que l'effet du couvert de glace entraîne une diminution des contraintes principales de traction de 20% à 45% pour les modèles B21, B35 et B60. Cependant, le modèle B90 fait exception et une augmentation des contraintes d'environ 11% est observée. Notons qu'une similitude de l'amplitude maximum des contraintes de traction, sans l'effet du couvert de glace, est remarquée pour les modèles B60 et B90. Par contre, la contrainte maximum n'est pas relevée au même moment.

Les résultats obtenus à la figure 5.14 sont calculés au point F situé sur la face aval des barrages-poids étudiés. Notons que le point F est proche d'une zone de singularité et que les valeurs brutes des contraintes doivent être prises avec précaution. L'effet du couvert de glace est maximum pour le modèle B35 avec une augmentation d'environ 43% de la contrainte principale de traction. Les modèles B21, B60 et B90 subissent une diminution des contraintes de l'ordre de 8% à 40%. La contrainte maximum de traction peut atteindre 1,65 MPa, sans l'effet du couvert de glace, pour le modèle B90.

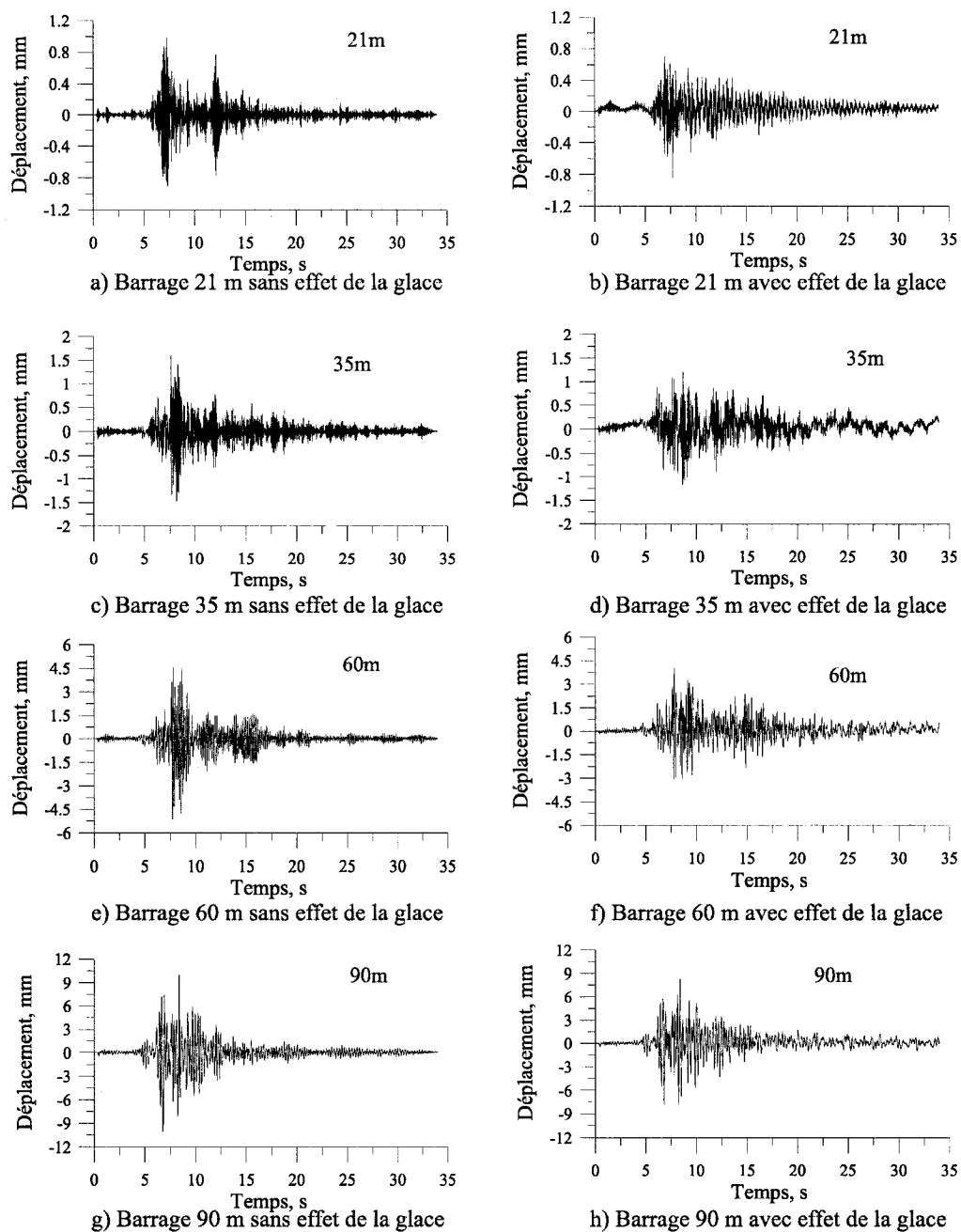


Figure 5.12 : Déplacements à la crête pour les barrages-poids de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m (Point A) sans et avec couvert de glace.

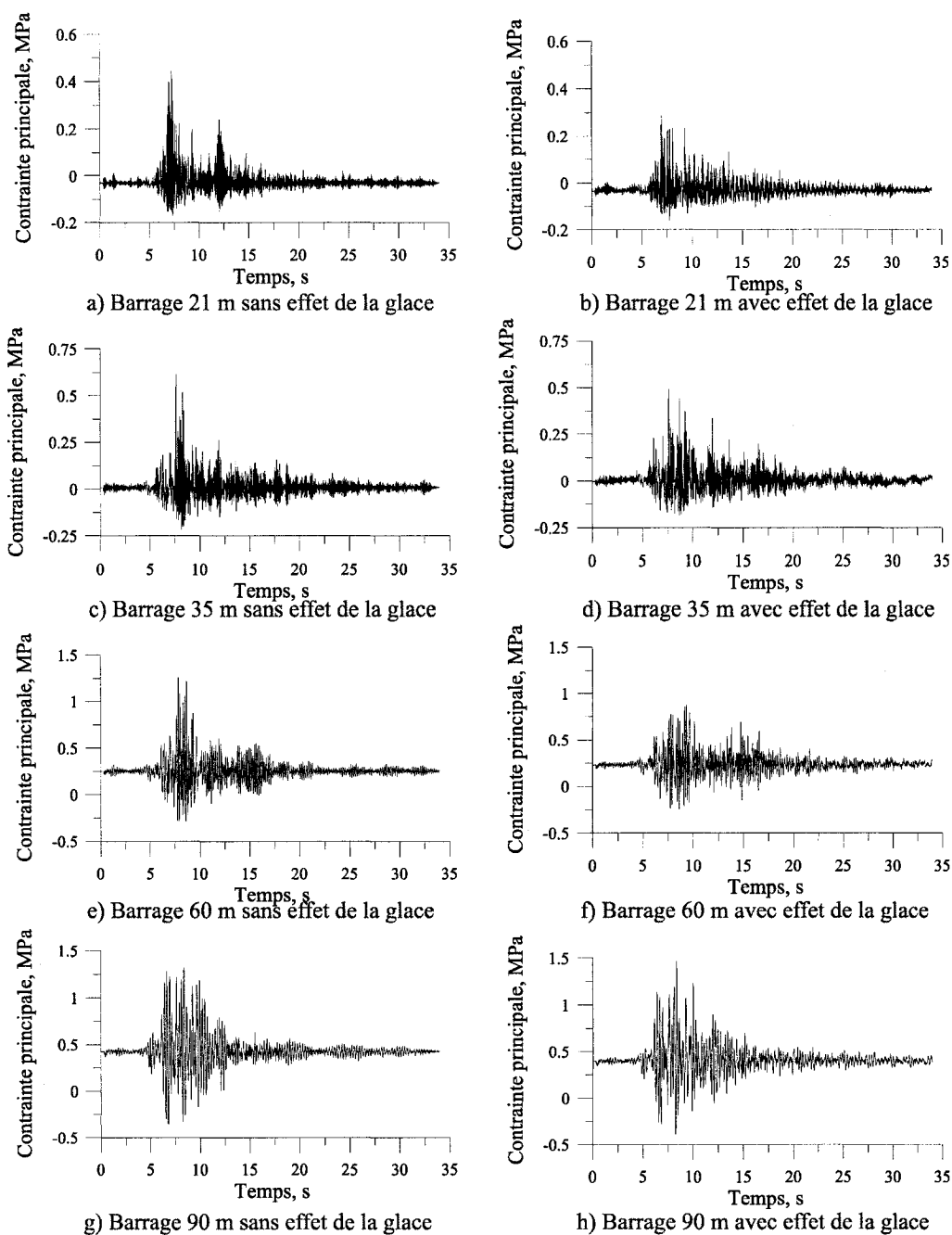


Figure 5.13 : Contrainte principal à la base amont des barrages-poids de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m (Point E) sans et avec couvert de glace.

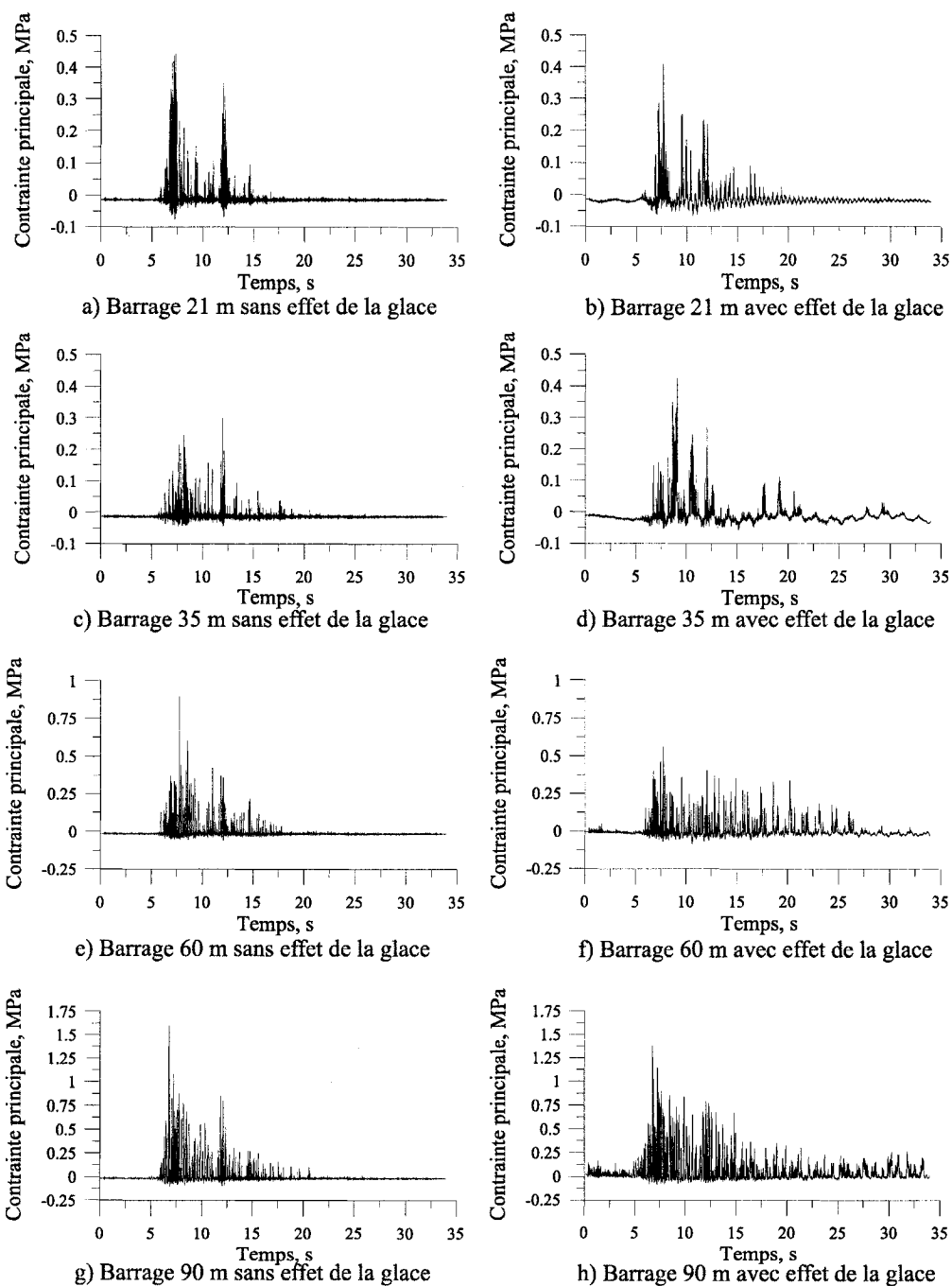


Figure 5.14 : Contrainte principal (Point F) des barrages-poids de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m sans et avec couvert de glace.

5.7 Analyse comparative

Cette section illustre trois séries d'analyses. En premier lieu, une série d'analyse est effectuée sur les modèles barrage-réservoir sous l'effet des séismes de récurrence SMD et SMP en tenant compte de la composante horizontale seulement. En second lieu, les analyses sont réalisées en tenant compte de l'effet de la composante verticale des séismes. Finalement, une troisième série d'analyse est réalisée en incluant le couvert de glace dans le système. Les résultats obtenus de ces analyses permettent d'évaluer l'influence de la composante verticale des séismes dans la réponse dynamique des systèmes barrage-réservoir et glace-barrage-réservoir. De plus, nous pouvons quantifier l'augmentation des déplacements et celle des contraintes à divers points en analysant les réponses des systèmes soumis aux séismes de récurrence SMD comparativement aux séismes de récurrence SMP.

5.7.1 Légende et nomenclature des graphiques

La figure 5.15 illustre l'emplacement des points de calcul pour les quatre hauteurs de barrages. La figure montre également une numérotation des séismes étudiés, soient : le séisme du Saguenay modifié (no. 1), le séisme de Nahanni modifié (no. 2), le séisme d'El Centro modifié (no. 3), et deux séismes artificiels d'Atkinson modifiés (nos. 4 et 5). La figure montre également les composantes des séismes retrouvées dans les analyses. La lettre H indique que les modèles sont soumis à la composante horizontale, tandis que les lettres H-V indiquent que les modèles sont soumis à une combinaison des deux composantes. Les dégradés des barres dans les graphiques indiquent que les résultats sont considérés avec ou sans l'effet des glaces. Les récurrences des séismes soient : SMD ou SMP, sont également indiquées sur les graphiques.

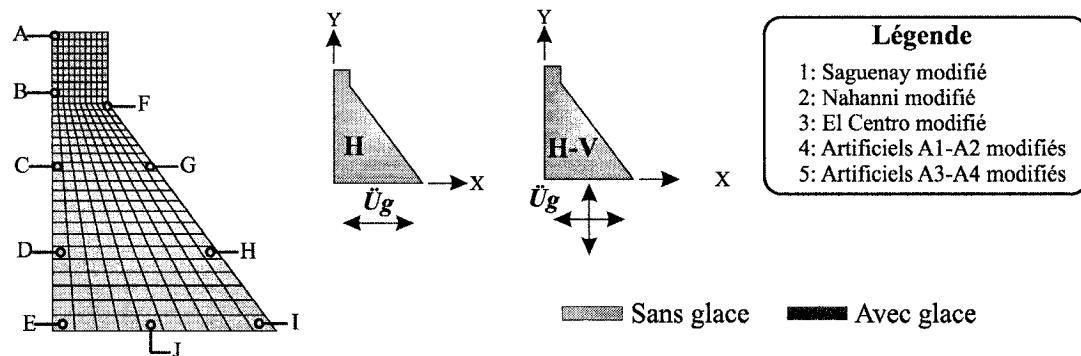


Figure 5.15 : Points de calcul, nomenclature des barrages et numérotation des séismes.

5.7.2 Analyse du déplacement en crête

La figure 5.16 illustre l'effet d'échelle sur le déplacement maximum à la crête en fonction des récurrences (SMD, SMP) et des composantes des séismes (H, H-V), avec et sans effet du couvert de glace. Les résultats provenant des deux récurrences et des deux composantes sont présentés sur un même graphique pour la même hauteur de barrage. L'analyse de cette figure permet de constater, que sans l'effet du couvert de glace, le déplacement maximum à la crête augmente globalement avec la récurrence SMP de l'ordre de 29% à 35% environ. En considérant l'effet du couvert de glace, la récurrence SMP entraîne une augmentation de 18% à 28%. De plus, nous constatons que les déplacements maximum sous la composante H, sont comparables à ceux sous les composantes H-V. Selon les séismes appliqués, la présence du couvert de glace entraîne une augmentation ou une diminution du déplacement maximum à la crête allant jusqu'à 60% pour certains modèles. La figure montre également que sous l'effet du séisme du Saguenay, les déplacements maxima à la crête diminuent pour tous les modèles, sauf pour le modèle B35 de récurrence SMP et des composantes H-V où une augmentation de 2% environ est obtenue.

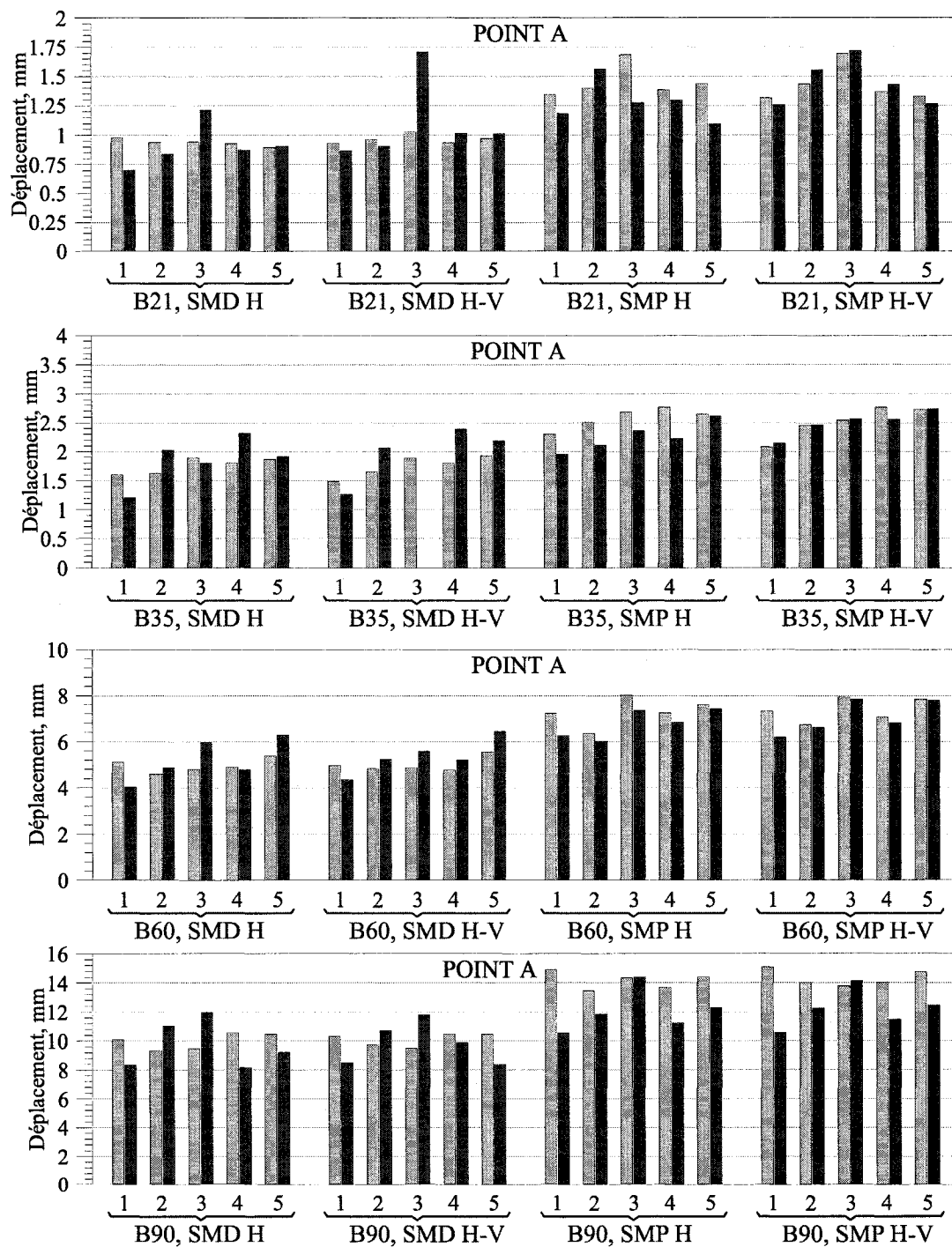


Figure 5.16 : Déplacement maximum obtenue au point A en crête des barrages-poids.

5.7.3 Analyse des contraintes principales à la face amont du barrage

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'évaluation des contraintes de traction se développant au sein d'un barrage est un indicateur important de sa performance structurale. L'objectif de cette section est de montrer l'influence de la récurrence SMP et de la composante verticale des séismes sur les contraintes principales de traction déterminées aux points de calcul de la figure 5.15. Les figures 5.17, 5.18 et 5.19 illustrent les contraintes (en MPa) obtenues pour l'ensemble des barrages étudiés sous l'effet des cinq séismes considérés, de la récurrence de calcul (SMD ou SMP) et de la composante (H ou H-V). Notons que les contraintes montrées incluent l'effet des charges statiques. Chaque sous-graphique illustre les résultats des quatre différentes hauteurs des barrages, soient le B21, le B35, le B60 et le B90.

La figure 5.17 illustre les résultats obtenus au point C, situé à environ deux tiers de la hauteur du réservoir. Nous remarquons que l'effet de la récurrence SMP entraîne une augmentation des contraintes principales de traction de 32% à 53% pour les quatre modèles de barrage. L'effet est moindre pour les modèles B60 et B90 pour lesquelles une augmentation en moyenne de 38% et 32% est obtenue. Notons que le modèle B60 sous la récurrence SMP et de la composante (H et H-V), est le seul modèle où l'effet du couvert de glace induit une diminution des contraintes de traction de 2% à 20% pour les cinq séismes à l'étude. D'une manière générale, l'effet de la composante verticale (sur les quatre modèles sans l'effet de la glace) a pour effet d'augmenter, en moyenne pour les cinq séismes, les contraintes principales de traction dans des proportions variable de 0% à 10%. Lorsque le couvert de glace est considéré dans les analyses, la composante verticale a pour effet d'augmenter les contraintes pour les modèle B21 et B35 de 24% et 17%, et une diminution des contraintes pour les modèles B60 et B90 de 3% et 10% en moyenne pour les cinq séismes. Pour le modèle B90 sous l'effet du séisme d'El Centro (SMP, SMD, H et H-V), le couvert de glace augmente les contraintes de traction jusqu'à 60 %. Nous constatons que les effets du couvert de

glace sont dans l'ensemble plus significatif pour le modèle B35 en augmentant les contraintes jusqu'à 100% au point C.

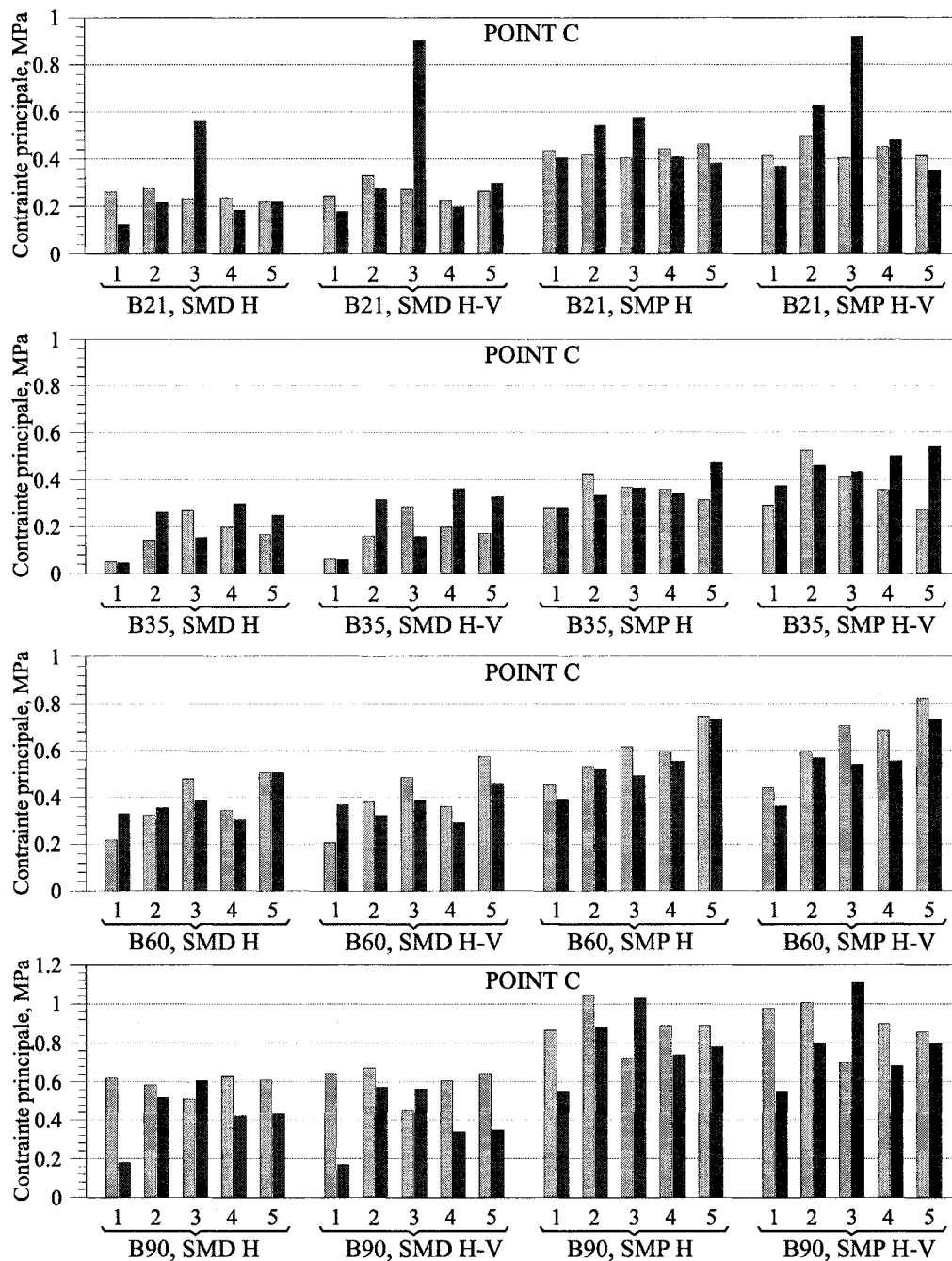


Figure 5.17 : Contrainte principale maximale obtenue au point C de la face amont.

Considérons maintenant les contraintes principales de traction calculées au point D, situé à environ un tiers de la hauteur du réservoir. Tel qu'indiqué à la figure 5.18, ces contraintes (sans effet du couvert de glace) subissent une augmentation en moyenne, sous l'effet de la récurrence SMP de 52 % pour le modèle B21, de 70% pour le B35, de 45% pour le B60 et de 55% pour le modèle B90. L'effet de la composante verticale, (récurrence SMD) en ne considérant pas le couvert de glace, entraîne une augmentation des contraintes de 9% à 13% en moyenne pour les cinq séismes. Par contre, nous observons que l'effet de la composante verticale, sur les modèles avec couvert de glace, entraîne une diminution de 1,3% pour le B21, et une augmentation de 0,5% à 20% pour les modèles B35, B60 et B90. D'une manière générale, le couvert de glace a pour effet de diminuer ou d'augmenter les contraintes principales de traction pour les modèles B21, B35 et B60. Notons que la plus forte augmentation des contraintes, de 5% à 180%, en considérant l'effet du couvert de glace est observé pour le modèle B35, sous l'effet des séismes 2 à 5, de récurrence SMD. Le modèle B90 sous l'effet de la récurrence SMP (composantes H et H-V), l'effet du couvert de glace entraîne une diminution des contraintes de 5% à 55% pour l'ensemble des cinq séismes.

Le point de calcul E est situé au pied du barrage. La valeur de la contrainte en ce point de singularité doit être considérée avec précaution. En moyenne, les contraintes principales de traction en ce point augmentent d'environ 22% à 52% sous l'effet de la récurrence SMP (sans effet du couvert de glace). Notons que pour ce point, en considérant l'effet du couvert de glace, l'augmentation des contraintes demeurent comparable à celles sans effet du couvert de glace lorsque les analyses sont réalisées avec la récurrence SMP. Nous observons une augmentation des contraintes sous l'influence de la composante verticale (récurrence SMD, sans effet du couvert de glace) variant de 1% à 5% en moyenne pour les cinq séismes, pour les modèles B21, B35 et B90. Le modèle B60 subit pour sa part, une diminution des contraintes principales de traction de 0,6% (récurrence SMD, sans effet du couvert de glace), et

une augmentation de 5,0% sous l'effet de la récurrence SMP (sans effet du couvert de glace).

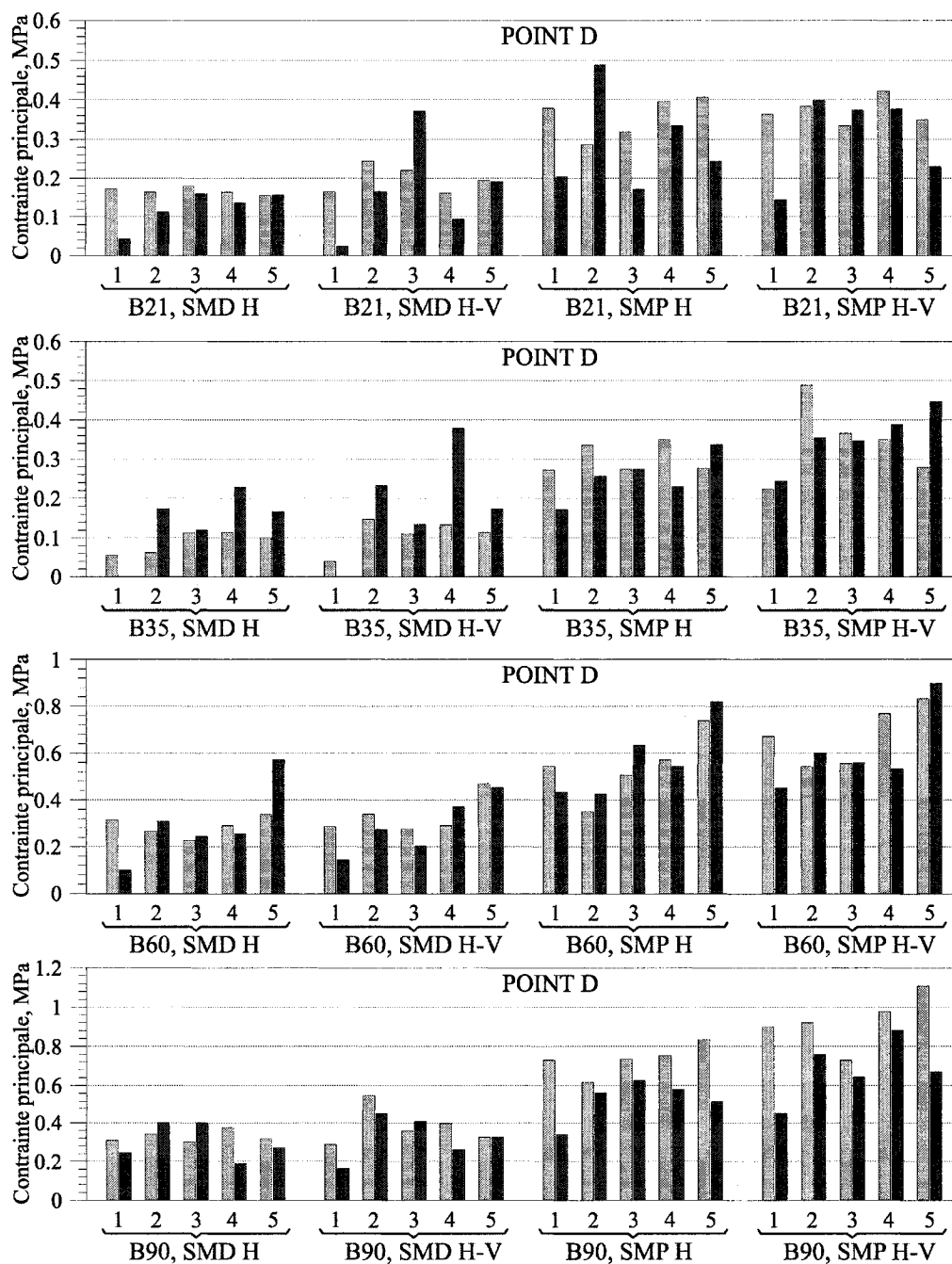


Figure 5.18 : Contrainte principale maximale obtenue au point D de la face amont.

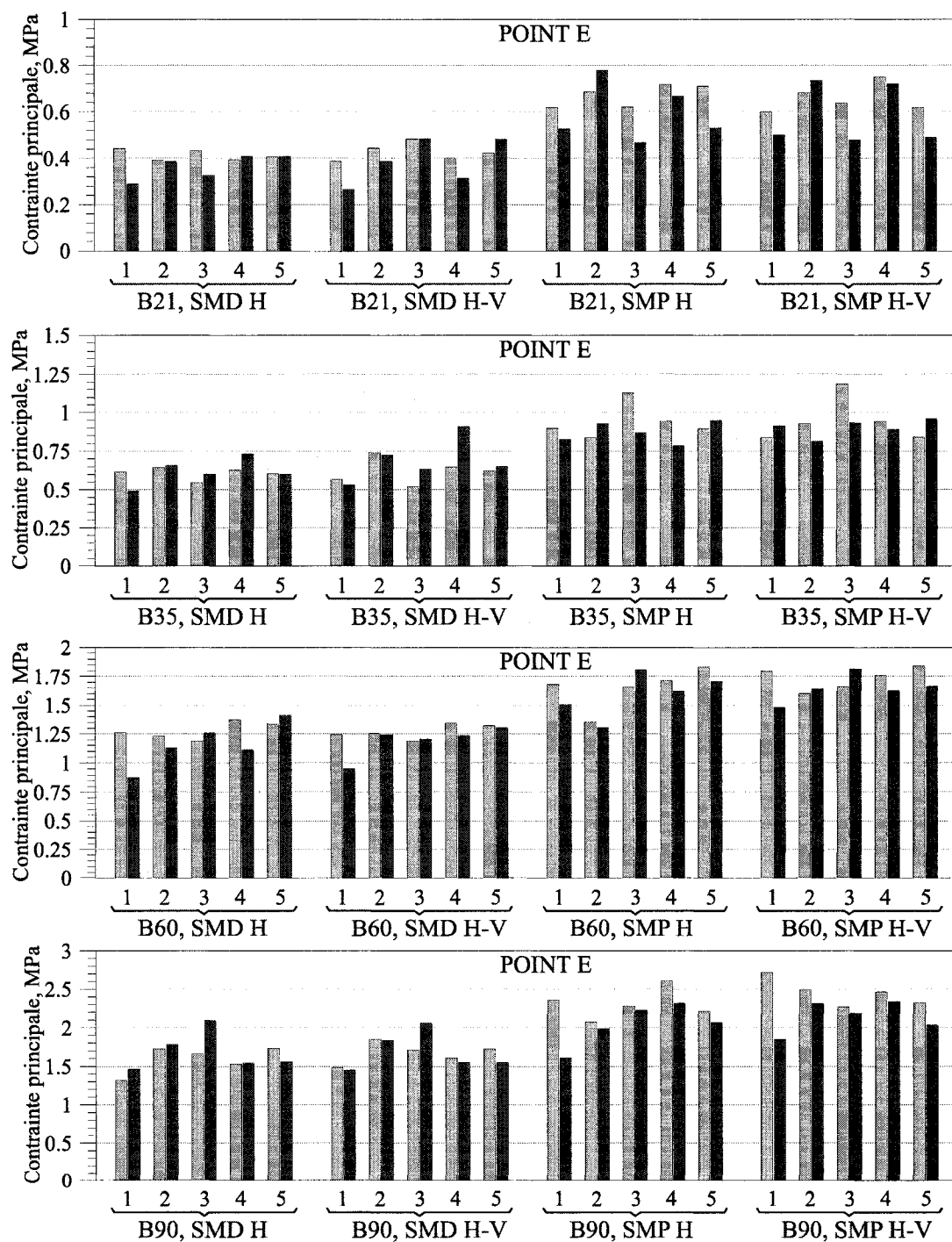


Figure 5.19 : Contrainte principale maximale obtenue au point E au pied amont du barrage.

5.7.4 Analyse des contraintes principales de la face aval du barrage

Les figures 5.20, 5.21, 5.22 et 5.23 illustrent les contraintes (en MPa) calculées aux points situés sur la face aval des barrages-poids étudiés sous l'effet des cinq séismes considérés, de la récurrence de calcul (SMD ou SMP) et de la composante (H ou H-V). Chaque sous-graphique illustre les résultats des quatre différentes hauteurs des barrages, soient le B21, le B35, le B60 et le B90.

Nous observons que les contraintes principales de traction au point F sont du même ordre de grandeur pour les modèles B21 et B35, soit 0,35 MPa environ. Pour ces mêmes modèles, les résultats démontrent que la récurrence SMP entraîne une augmentation des contraintes de 36% environ. Nous remarquons lorsque la composante verticale est considérée (récurrence SMD) dans les calculs pour les modèles B21 et B35, l'effet du couvert de glace augmente les contraintes de traction d'environ 33% en moyenne pour les 5 séismes.

La figure 5.21 illustre les résultats obtenus au point G. Nous remarquons que l'effet de la récurrence SMP entraîne une augmentation des contraintes principales de traction de 36% à 43% pour les quatre modèles de barrage. L'effet est moindre pour le modèle B60 pour lequel une augmentation en moyenne de 36% est obtenue. D'une manière générale, l'effet de la composante verticale (sans effet du couvert de glace) a pour effet de diminuer ou d'augmenter les contraintes principales de traction dans des proportions variable de $\pm 10\%$. Notons que l'effet du couvert de glace (sous récurrence SMD et les composantes H et H-V) diminue dans l'ensemble les contraintes principales de traction pour les modèles B21 et B35 jusqu'à 30%. Tandis que pour les modèles B60 et B90 (sous récurrence SMD et les composantes H et H-V), l'effet du couvert de glace entraîne une diminution et une augmentation de $\pm 50\%$. On observe pour les modèles B21, B35, B60 et B90 soumis aux cinq séismes de récurrence SMP (composantes H et H-V) une diminution des contraintes de traction sous l'effet du couvert de glace jusqu'à 35%.

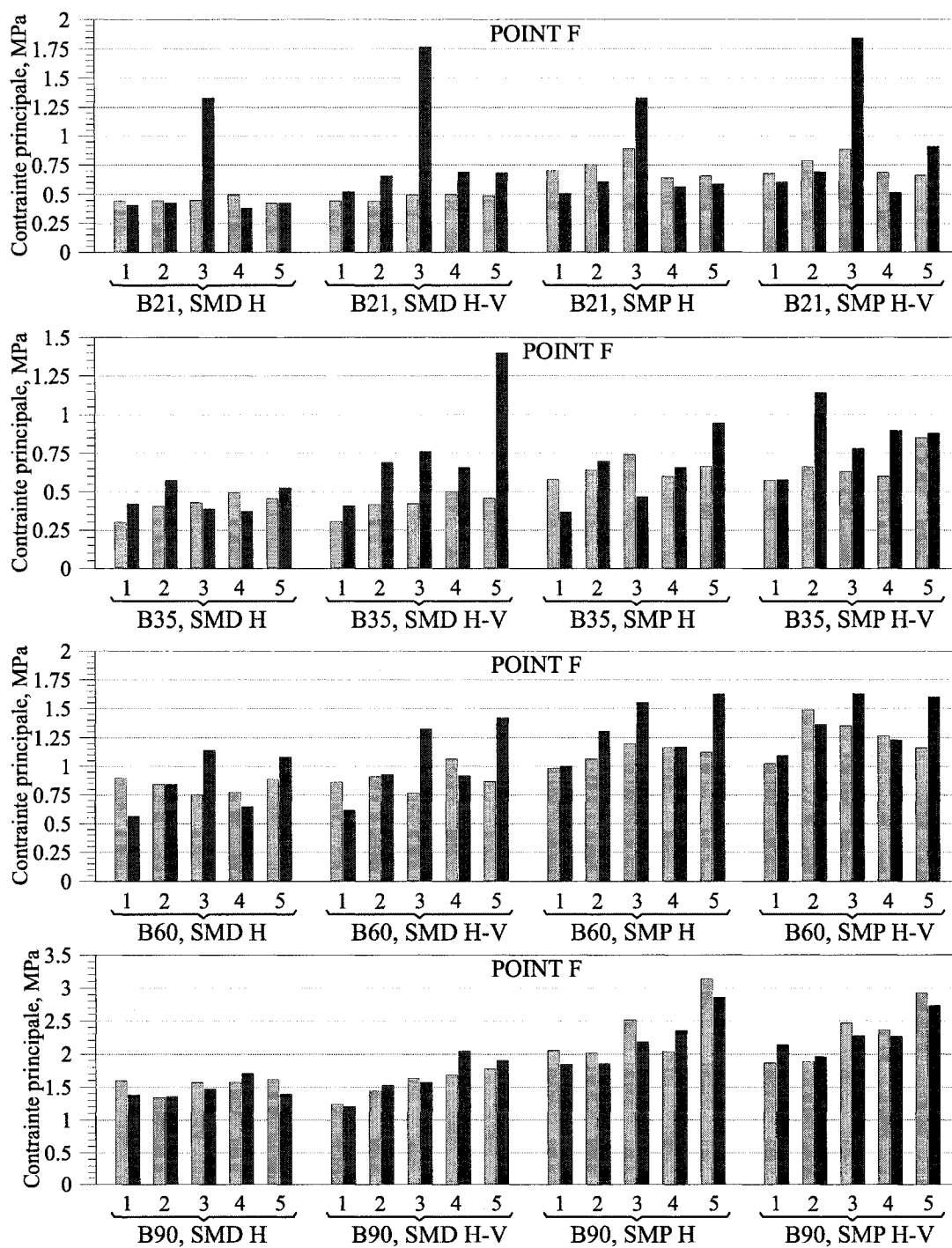


Figure 5.20 : Contrainte principale maximale obtenue au point F de la face aval.

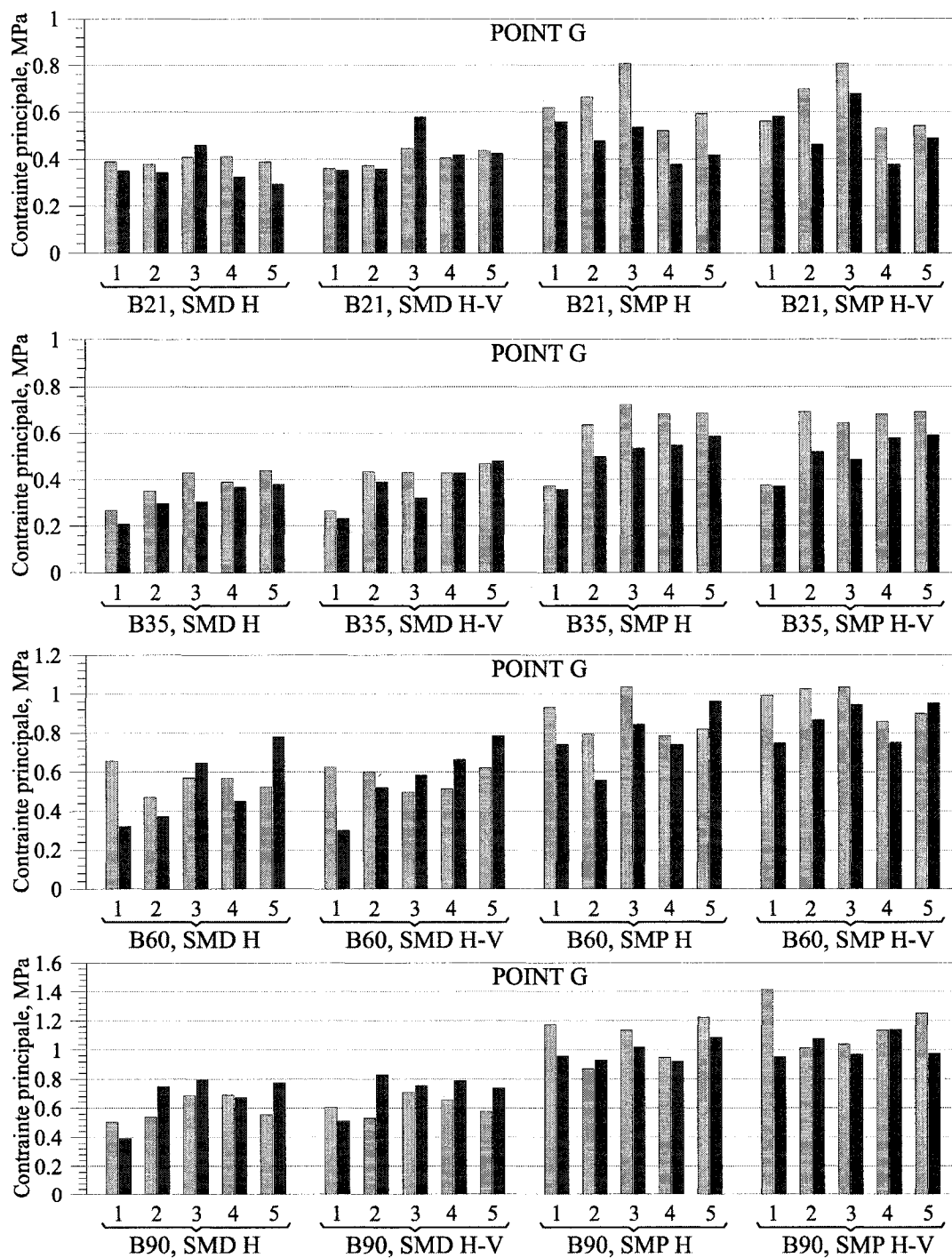


Figure 5.21 : Contrainte principale maximale obtenue au point G de la face aval.

La figure 5.22 illustre les résultats obtenus au point H. Nous remarquons que l'effet de la récurrence SMP (sans effet du couvert de glace) entraîne une augmentation des contraintes principales de traction de 43% pour le modèle B21, de 64% pour le B35, de 95% pour le B60 et plus de 100% pour le modèle B90. D'une manière générale, l'effet de la composante verticale (sans effet du couvert de glace) a pour effet d'augmenter les contraintes principales de traction dans des proportions variable de 0% à 10% en moyenne pour les cinq séismes. En moyenne, les contraintes principales de traction en ce point sont d'environ 0,24 MPa (SMD, composantes H et H-V) pour le modèle B21, de 0,14 MPa (SMD, composantes H et H-V) pour le modèle B35, de 0,02 MPa (SMD, composantes H et H-V) pour le modèle B35 et 0,0 MPa (SMD, composantes H et H-V) pour le modèles B90. Sous l'effet du couvert de glace et des séismes considérés, la contrainte principale de traction subit une diminution pouvant aller jusqu'à 40% (Modèle B21 sous l'effet de la récurrence SMP, H-V), et une augmentation pouvant aller jusqu'à 55% (Modèle B35 sous l'effet du séisme du Saguenay, SMP, H-V).

Le point I est situé au pied aval du barrage. Tel qu'illustré à la figure 5.23, nous remarquons que l'effet de la récurrence SMP (sans effet du couvert de glace) entraîne une augmentation des contraintes principales de traction de 17 % à 72% en moyenne pour les quatre modèles de barrage. L'effet est moindre pour les modèles B60 et B90 pour lesquelles une augmentation en moyenne de 17% et 31% est obtenue. Nous observons une diminution des contraintes principales de traction sous l'influence de la composante verticale (récurrence SMD, sans effet du couvert de glace) variant de 1% à 2% en moyenne pour les cinq séismes, pour les modèles B21, B35. Les modèles B60 et B90 subissent pour leurs parts, une augmentation des contraintes principales de traction de 1,5% à 3,0% (récurrence SMD, sans effet du couvert de glace). Pour les modèles B21 et B90 sous la récurrence SMP, le couvert de glace induit une diminution des contraintes de traction de 2% à 55% pour les cinq séismes. Nous pouvons conclure que les effets du couvert de glace sont dans l'ensemble (récurrence SMD et SMP) plus significatif pour le modèle B21 en diminuant les contraintes jusqu'à 90%.

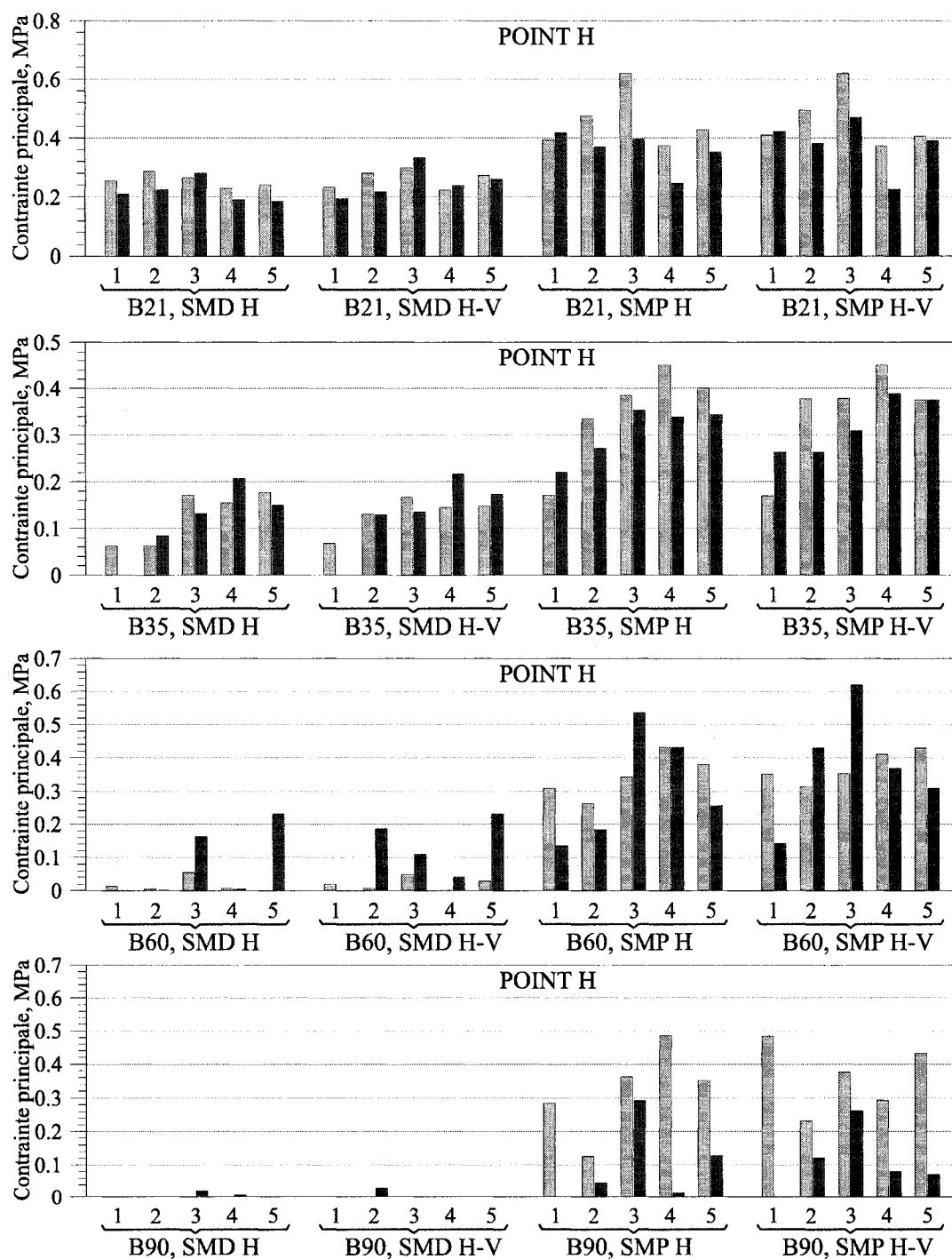


Figure 5.22 : Contrainte principale maximale obtenue au point H de la face aval.

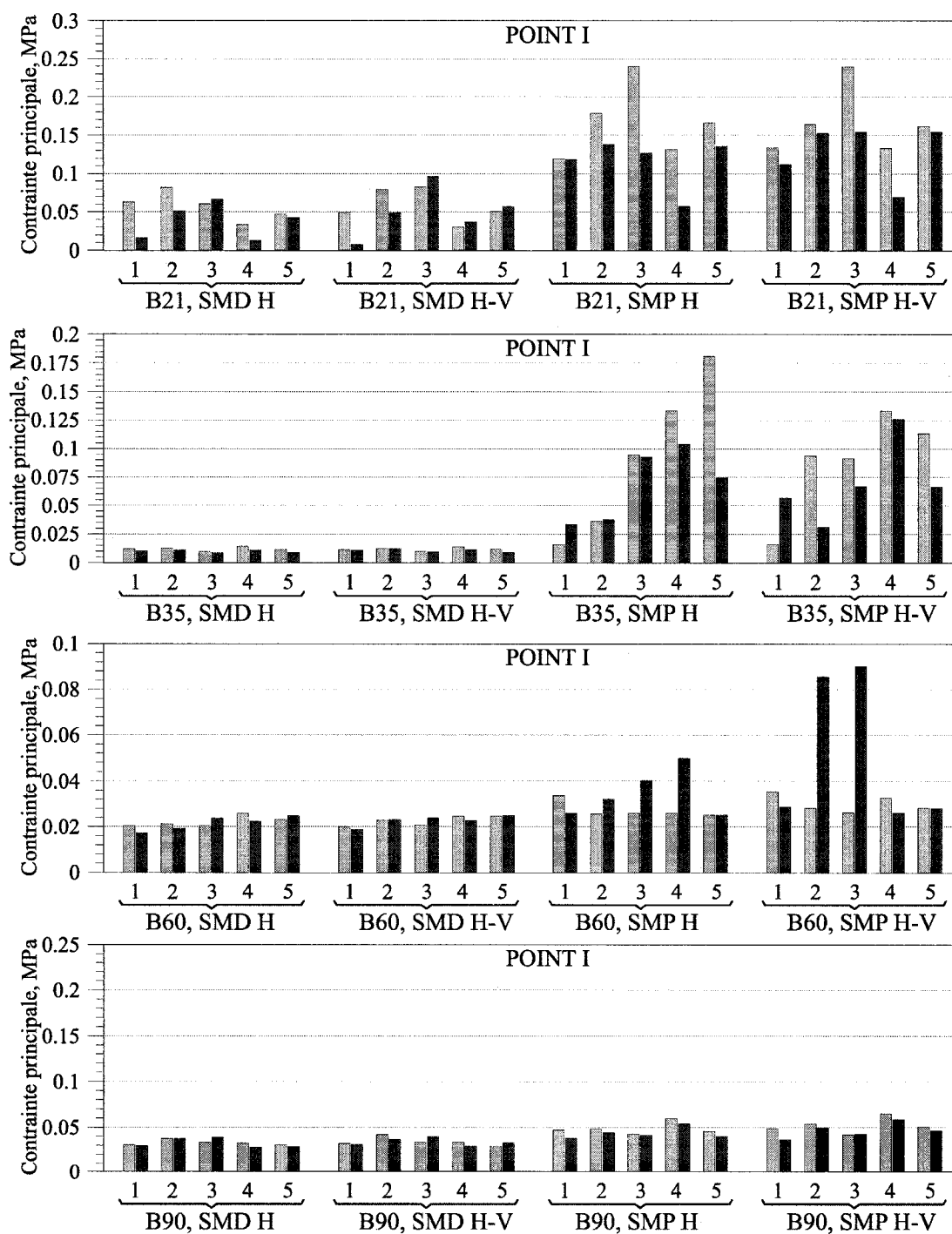


Figure 5.23 : Contrainte principale maximale obtenue au point I au pied du barrage aval.

5.8 Résumé

D'après les résultats discutés dans cette section, sous les hypothèses adoptées dans ce travail, le couvert de glace n'affecte pas nécessairement d'avantage les barrages de petite taille. Une analyse détaillée de chaque système glace-barrage-réservoir avec ses particularités géométriques et matérielles est donc requise pour prédire l'enveloppe de la réponse sismique sous l'effet d'un séisme donné. On remarque cependant que dans tous les points de calcul, à l'exception des points de singularité, les contraintes principales maxima de traction calculées en incluant l'effet du couvert de glace demeurent globalement inférieures à deux fois celles obtenues sans couvert de glace.

Les analyses ont démontré que l'effet de la récurrence SMP entraîne une augmentation des déplacements à la crête et des contraintes principales de traction pour tous les points de calculs. Notons que pour les points de calculs D, H et I, les résultats montrent clairement que la récurrence SMP peut augmenter significativement les contraintes.

Quand à l'ajout de la composante verticale, les résultats démontrent qu'elle influence la réponse du barrage en termes de contraintes de traction pouvant atteindre 10% sans l'effet du couvert de glace et de 33% en incluant l'effet du couvert de glace. Comme l'ont démontré certaines études antérieures, la composante verticale n'est pas critique au niveau de la propagation des fissures. Nous pouvons conclure que la réponse du barrage causée par la composante verticale est comparable avec celle de la composante horizontale.

Chapitre 6

Conclusion

Le présent travail de recherche avait pour objectif général de déterminer l'influence d'un couvert de glace sur la réponse dynamique des barrages-poids en béton. Pour ce faire, la réponse dynamique de barrage-poids a été étudiée et ce en considérant l'effet de taille. Quatre différentes géométries et hauteurs de barrage-poids ont été analysées. Les hauteurs de 21 m, 35 m, 60 m et 90 m représentatives des barrages généralement rencontrés au Québec sont modélisées. Deux systèmes pour chaque hauteur de barrage est ensuite modélisés en 2D par éléments finis. Le premier système inclu le barrage et le réservoir alors que le second comprend le couvert de glace, le barrage et le réservoir. L'équation dynamique a été ensuite résolue en appliquant comme chargement extérieur cinq séismes, dont trois provenant d'accélérogrammes historiques et deux provenant d'accélérogrammes artificiels. Parmi les trois séismes historiques, deux sont représentatifs des caractéristiques de l'est du Canada et un est caractéristique de l'ouest, tandis que les séismes artificiels sont générés avec les caractéristiques de l'est du Canada. Les systèmes ont été soumis premièrement à la composante horizontale des séismes et dans une deuxième étape, la composante verticale est ajoutée à la composante horizontale pour en évaluer l'influence. Finalement, tenant compte des récurrences pour fin de calcul, les séismes ont été calibrés sur deux spectres de récurrence SMD et SMP. Les résultats de l'analyse de ces différents modèles ont été comparés à la lumière des déplacements et des accélérations en crête du barrage, des distributions des contraintes principales de traction.

Les résultats ont démontré que le couvert de glace n'affecte pas nécessairement d'avantage les barrages de petite taille. Une analyse détaillée de chaque système glace-barrage-réservoir avec ses particularités géométriques et matérielles est donc requise pour prédire l'enveloppe de la réponse sismique sous l'effet d'un séisme donné. On remarque cependant que dans tous les points de calcul, à l'exception des points de singularité, les contraintes principales maxima de traction calculées en incluant l'effet du couvert de glace demeurent globalement inférieures à deux fois celles obtenues sans couvert de glace.

Aussi les analyses ont montré que l'influence de la récurrence SMP entraîne globalement une augmentation des déplacements à la crête et des contraintes principales de traction de 30 à 50% pour l'ensemble des tailles de barrage à l'étude.

Quant à l'ajout de la composante verticale, les résultats montrent qu'elle influence la réponse du barrage en termes de contraintes de traction pouvant atteindre 10% sans l'effet du couvert de glace et de 33% en incluant l'effet du couvert de glace. Comme l'ont démontré certaines études antérieures, la composante verticale n'est pas critique au niveau de la propagation des fissures. Nous pouvons conclure que la réponse du barrage causée par la composante verticale est comparable avec celle de la composante horizontale.

En complément à cette recherche quelques recommandations sont énumérées pour de futures études relatives à l'influence du couvert de glace des barrages-poids en béton. Parmi celles qui retiennent l'attention, la considération de l'effet tridimensionnel des systèmes barrage-glace-réservoir-fondation permettrait une meilleure compréhension du phénomène. Aussi, dans les analyses, la glace se comportait comme un matériau linéaire-élastique. La glace est cependant un matériau dont le comportement est très complexe, il faudrait donc inclure cet aspect dans la formulation du problème aussi et modéliser l'interface glace-barrage avec un élément de contact. Finalement, il serait

particulièrement important de refaire toutes les analyses avec un endommagement initial étant donné qu'il n'existe pratiquement aucun barrage sans endommagement.

BIBLIOGRAPHIE

ABRAHAMSON, N.A. 1998. Non-Stationary spectral matching program RSPMATCH. PG&E Internal Report.

ADINA Users Guide. 2002. Report ARD 02-1. ADINA R & D, Inc.

BOUAANANI, N. 2004. Analyse avancée des structures par éléments finis, Notes de cours CIV6502, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

BOUAANANI, N. 2002. Étude de l'effet d'un couvert de glace sur le comportement dynamique des barrages-poids. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec.

BOUAANANI, N., PAULTRE, P., PROULX, J. 2002. Two-dimensional modelling of ice cover effects for the dynamic analysis of concrete gravity dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp. 2083-2102.

CALAYIR, Y., DUMANOGLU, A. A. et BAYRAKTAR, A. 1996. Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the eulerian and lagrangian. Computers & Structures Vol.59, No.5, pp. 877-890.

CAMMAERT, A.B., MUGGERIDGE, D.B. 1988. Ice interaction with offshore structure, Van Nostrand Reinhold, New-York.

CANADIAN DAM SAFETY ASSOCIATION. 1999. Dam safety guidelines, Edmonton, Alberta.

CHAGNON, J.-Y. 1992. Séismes: quelles sont les zones à risques dans la région du Québec? Interface, Nov/Dec 1992, 30-39.

CHOPRA, ANIL K., CHAKRABARTI, P., and GUPTA, SUNIL. 1980. Earthquake response of concrete gravity dams including hydrodynamic and foundation interaction effects. Report NO.UCB/EERC-80/01, pp. 107-131. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

CHOPRA, ANIL K., CHAKRABARTI, P. 1973. Hydrodynamic Pressure and response of gravity dams to vertical earthquake component. pp. 325-335

CHRISTOPOULOS, C., LÉGER, P., FILIATRAULT, A., 2003. Seismic sliding response analysis of gravity dams including vertical accelerations. Journal of Earthquake Engineering Vibration. Vol.2, No.2, pp. 189-200.

CHRISTOPOULOS, C. 1998. A Study on the Characteristics of Vertical Seismic Accelerations and Their Effects on Civil Engineering Structures, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

COMFORT, G., GONG, Y., SINGH, S., ABDELNOUR, R. 2003. Static ice loads on dams. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 30, pp.42-68.

CROTEAU, P. 1983. Dynamic interactions between floating ice and offshore structures. Raport No. UCB/EERC-83/06, University of California, Berkeley, 335 p.

FENVES, G., CHOPRA, A.K. 1984. Earthquake analysis and response of concrete gravity dams. Report No. UCB/EERC-84/10, University of California, Berkeley, Californie, august, 213 p.

FREDERKING, R.M.W. 1979. Laboratory tests on downdrag loads developed by floating ice covers on vertical piles. Proceedings of the Fifth International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions (POAC) - Norwegian Institute of Technology. pp.1097-1110.

GHRIB, F., LÉGER, P., TINAWI, R. 1996. Une approche progressive de vérification sismique des barrages en béton d'Hydro-Québec (Volume II). Rapport No.EPM/GCS-1996-02, École Polytechnique de Montréal, Département de génie civil, section Structures, Montréal.

HYDRO-QUÉBEC 2003. Guide pour la sélection des paramètres sismiques, Rapport du Sous-Groupe Séismicité, Janvier 2003.

KIDO, K., SUGIMURA, MORITAM M., HIRAKI, K. 1997. Dynamic analysis of Hitokura dam during the 1995 Hyugoken-Nambu earthquake. Commission Internationale Des Grands Barrages, Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages, Florences, pp. 689-708.

KRY, P.R. 1980. Ice forces on wide structures. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No. 01, pp. 97-113.

LÉGER, P., LECLERC, M. 1996. Evaluation of earthquake ground motions to predict cracking response of gravity dams. Engineering Structures, Vol. 18, No. 3, pp. 227-239.

LÉGER, P., TAYEBI, A.K. PAULTRE, P. 1993. Spectrum-compatible accelerograms for inelastic seismic analysis of short-period structures located in Eastern Canada, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 951-968.

LUPIEN, E. 1998. Modélisation et comportements dynamiques 2D versus 3D du barrage Outardes 3. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke. Québec.

McCULLOUGH, F. 1996. L'influence des couverts de glace sur le comportement sismique des barrages-poids. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

- McCULLOUGH, F., LÉGER, P., TINAWI, R. 1996. L'influence des couverts de glace sur le comportement sismique des barrages-poids. Rapport No. EPM/GCS-1996-05. Département de génie civil, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- MELLOR, M. 1980. Mechanical properties of polycrystalline ice. Physics and Mechanics of Ice, Edited by P. Tryde, Springer-Verlag, Berlin, pp. 217-245.
- MICHEL, B. 1964. Éléments de la physique de la neige et de la glace, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 71 p.
- MICHEL, B. 1978. Ice mechanics. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 499 pp.
- MICHEL, B., RAMSEIER, R.O. 1969. Classification of river and lake ice, Applied Mathematics Modelling, Vol.15, Nov./Dec., pp. 633-638.
- MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS DU CANADA. 1973. Étude des rives du St-Laurent - Action de la glace sur les ouvrages maritimes.
- MIURA, F., NOZAWA, I., SAKAKI, N., HIRANO, K. 1988. Dynamic stability of an off-shore structure surrounded by thick ice during strong earthquake motions. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, August, Japan. Vol.3, pp. 465-470.
- OLSON, G., BATHE, K-J. 1985 An infinite element for analysis of transient fluid-structure interactions. Engineering Computations, Vol. 2, pp. 319-329.
- PAULTRE, P. 2005. Dynamique des structures, application aux ouvrages de génie civil. Lavoisier. 702 p.
- PAZ, M. 1994. International Handbook of Earthquake Engineering. Codes, Programs and Examples. Chapman & Hall, U.S.A, 545 p.

PROULX, J., PAULTRE, P. 1994. Étude expérimentale et numérique du comportement dynamique du barrage-poids Outardes 3. *Rapport de recherche SMS-94/03*, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 161 p.

SCHULSON, E.M. 1999. The structure and mechanical behavior of ice. Journal JOM, The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), Vol.51, No. 02, February, pp. 21-27.

SERVICE CANADIEN DES GLACES. 2006. Site web : <http://ice-glaces.ec.gc.ca>

SUN, K. 1993. Effects of ice layer on hydrodynamic pressure of structures, Journal of Cold Regions Engineering, ASCE; Vol. 7, No. 3, pp. 63-76.

TRIFUNAC, M.D., BRADY, A.G. 1975. A study of the duration of strong earthquake ground motion, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 65, No. 3, pp. 581-626.

VITTECOQ, S. 2005. Étude de l'effet des glaces sur le comportement dynamique du barrage des Outardes 3. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke. Québec.

WESTERGAARD, H.M. 1933. Water pressures on dams during earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. 1850, pp. 418-472.

WILSON, E.L., TAYLOR, R.L. DOHERTY, W.P. et GHABOUSSI, J. 1973. Incompatible displacement models. Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics, Academic Press, New-York, pp. 43-57.