

EFFETS DE SITE DU BARRAGE EN ENROCHEMENT DENIS-PERRON (SM-3), QUÉBEC



*Challenges from North to South
Des défis du Nord au Sud*

Daniel Verret⁽¹⁾, Denis LeBoeuf⁽²⁾ Eric Péloquin ⁽¹⁾
⁽¹⁾ Hydro-Québec, Montréal, Qc, Canada

⁽²⁾ Département de génie civil et de génie des eaux – Université Laval, Québec, Qc, Canada

ABSTRACT

In this paper, spectral analysis of strong-motion and ambient noise were carried out at the Denis-Perron (SM-3) dam to evaluate possible site effects and the actual frequency of resonance (F_N) of this earth structure. The Denis-Perron Dam is a rockfill embankment dam standing 171 meters high and 378 meters long. It is the highest earthfill dam in Québec. The dam is built in a narrow valley with its left and right abutments resting on a gneissic rock foundation. Three-component digital strong-motion stations were installed on the dam's crest and on bedrock, on the left abutment. The spectral response of the accelerographic data is estimated from a series of three small earthquakes that occurred in 1999 and 2002. The magnitudes M_w of these earthquakes varies between 4.0 and 5.1. The F_N was estimated by calculating standard spectral ratios using the bedrock station as the reference site. For all three earthquakes, the spectral amplification curves show a clear peak between 2.0 and 2.2 Hz, in the transverse direction, and between 1.55 and 1.8 Hz, in the longitudinal direction. Amplification ratios range between 5.0 and 18.5 in the transverse directions and between 2.8 and 19.5 in the longitudinal direction. When the site response is evaluated from ambient noise recordings and using the H/V technique of interpretation, the F_N is about 2.1 Hz in the transverse direction and 1.8 in the longitudinal direction. Relative ground motions at the two stations sites are presented and discussed. A strong amplification of the vertical motion component was also observed at both station sites.

RÉSUMÉ

Cet article présente une analyse spectrale des signaux de séismes et des mesures de bruit ambiant réalisées sur le barrage Denis-Perron (SM-3) afin d'étudier les effets de site et la fréquence fondamentale de vibration (F_N) de cet ouvrage en terre. Le barrage Denis-Perron est un barrage en enrochement d'une hauteur maximale de 171 mètres et d'une longueur de 378 mètres en crête. Il s'agit du plus haut barrage en terre au Québec. Ce barrage est construit dans une vallée étroite dont les parois rocheuses sont constituées d'un gneiss. Des accéléromètres numériques mesurant des signaux selon les 3 composantes ont été installés sur la crête ainsi que sur l'appui rocheux en rive gauche. Les réponses spectrales des accélérations sont estimées pour des séries de signaux de 3 séismes de faibles amplitudes enregistrés en 1999 et en 2002. La magnitude de ces séismes varie entre 4,0 et 5,1. La fréquence fondamentale de vibration (F_N) a été estimée en calculant les ratios spectraux en référence aux signaux de l'accéléromètre sur le rocher. Pour chacun des trois séismes, les courbes des accélérations spectrales illustrent un pic entre 2,0 et 2,2 Hz dans la direction transversale et entre 1,55 et 1,8 Hz dans la direction longitudinale. Les ratios d'amplification des accélérations maximales varient entre 5,0 et 18,5 dans la direction transversale et entre 2,8 et 19,5 dans la direction longitudinale. La réponse du site évaluée avec les enregistrements de bruit ambiant en utilisant la technique d'interprétation H/V résulte en une fréquence fondamentale de vibration (F_N) de 2,1 Hz dans la direction transversale et de 1,8 Hz dans la direction longitudinale. Les signaux des deux stations sont traités et discutés. Une amplification importante de la composante verticale des signaux est également observée pour les deux stations de mesures.

1 INTRODUCTION

Cet article présente l'analyse de trois séismes de faible amplitude enregistrés au site du plus grand barrage en enrochement compris dans le parc d'Hydro-Québec. Il s'agit du barrage Denis-Perron (SM-3). Ces séismes n'avaient pas l'énergie pour affecter de quelque façon que ce soit le comportement de ce barrage récent construit suivant les standards d'Hydro-Québec.

Cet article présente en premier lieu, le cadre théorique de la méthodologie retenue pour l'analyse des signaux. Dans un deuxième temps, cette méthodologie est explicitée avec le séisme de plus forte magnitude ($M_N 5,1$). Les enregistrements traités des trois séismes sont présentés. En dernier lieu, les fonctions de transfert et les fréquences

fondamentales de vibration (F_N) sont étudiées pour les trois séismes.

Au Québec, le nombre de remblais instrumentés avec des accéléromètres est relativement limité. Par ailleurs, il n'existe pas ou peu de publications analysant en détail des enregistrements d'événements sismiques. Rainer et ses collaborateurs (1990 et 1991) ont publié une analyse détaillée de données instrumentales recueillies lors du séisme du Saguenay ($M_w 5,9$) pour trois barrages, soit aux Outardes-2, Manic-3 et Daniel-Johnson.

Outre ces travaux, aucune autre étude de ce genre n'a été recensée au Québec ni même dans l'Est du Canada. Ces informations sont d'intérêt considérant les particularités du contenu fréquentiel des séismes de l'Est

du Canada. Avec cet article, l'état des connaissances de données instrumentales mesurées en crête d'un remblai et spécifiques au contexte géologique du Québec développées par Rainer et ses collaborateurs (1990) est bonifié par l'analyse de quelques signaux mesurés au site du barrage Denis-Perron construit dans une vallée étroite.

2 CADRE THÉORIQUE DU TRAITEMENT DES SIGNAUX ET MÉTHODOLOGIE

Sur le plan théorique, l'accélération, la vitesse et le déplacement dans le temps d'un signal sont liés par deux dérivées successives en fonction du temps. Selon les principes physiques de base, la vitesse et le déplacement devraient redevenir nuls à la fin des événements. Or, pour la plupart des signaux composés de données brutes, ces conditions ne sont pas satisfaites. Un traitement est donc requis si l'on désire exploiter de tels signaux dans l'objectif de réaliser des calculs dynamiques. Il importe de mentionner qu'aucun traitement n'est requis pour l'analyse des modes de vibration d'un barrage en remblai dans l'espace fréquentiel.

De multiples sources peuvent contribuer à générer du bruit dans un signal, soit le fonctionnement et les composantes de l'accéléromètre, le convertisseur d'un signal analogique vers un signal numérique, le mouvement de sol sous un instrument, etc. Malheureusement, l'incertitude des sources et leur contribution en termes de bruit dans le signal mesuré demeure impossible à isoler. Ceci explique pourquoi, encore à ce jour, aucune correction universelle n'a été développée pour traiter systématiquement un signal.

Les accéléromètres plus récents de type numérique sont beaucoup plus avantageux que les anciens modèles analogiques, modèles installés antérieurement sur certains barrages d'Hydro-Québec (Rainer et coll., 1990). Ils fonctionnent en continu, permettant ainsi de conserver des pré-enregistrements et d'éliminer plusieurs problèmes liés à la numérisation de signaux analogiques. Ils sont également performants pour une plage fréquentielle plus importante avec une fréquence naturelle qui excède généralement 50 Hz. Les systèmes d'acquisition numériques des instruments plus récents offrent également l'option d'enregistrer un taux élevé de mesures. Malgré ces avantages, les signaux enregistrés par un instrument numérique nécessitent tout de même un traitement.

Les portions du signal de pré-enregistrement et de post-enregistrement d'un instrument numérique procurent un modèle de bruit. Toutefois la composante la plus importante du bruit est dans bien des cas combinée avec le signal lui-même. Or, ces modèles de bruit aux extrémités du signal ne permettent pas de départager totalement le bruit du signal ; il en résulte donc une combinaison bruit-signal indissociable qui peut être plus ou moins importante selon l'instrument. L'enjeu lors du

traitement d'un signal consiste alors à estimer le niveau de bruit dans le signal et son effet selon son application dans un problème d'ingénierie.

Diverses méthodes (Boore et Bommer, 2005 ; Boore et coll., 2002 ; Chiu, 2011) ont été développées pour traiter des séismes par des ajustements (*baseline correction*) ainsi que par l'application de filtres pour soustraire les distorsions, soit à haute et basse fréquences. La méthode de traitement de Boore et coll., (2002) utilisée par le U.S. Geological Survey (USGS), est parmi les plus utilisées. Cette méthode est détaillée et utilisée dans la présente analyse.

D'une part, Boore et ses collaborateurs (2002) rapportent que Graizer (1979) a proposé un modèle de traitement dont la correction (*baseline correction*) est calculée à partir d'une fonction polynomiale ajustée à la vitesse du signal. La correction est appliquée à l'accélération du signal jusqu'à ce que le déplacement final soit minimal, nul ou quasi-nul. Une attention doit toutefois être apportée avec ce modèle d'ajustement si l'enregistrement est très long (> 80 sec.), car l'ajustement d'une fonction polynomiale sur toute la durée du signal pourrait induire une distorsion à ce dernier. Cet aspect ne pose pas de limitation pour des signaux représentatifs de l'est du Canada dont la durée moyenne est environ de 20 secondes et généralement inférieure à 40 secondes.

D'autre part, Boore (2001) a aussi généralisé le modèle de Iwan (1985). Cet ajustement vise à établir deux droites qui permettront de corriger la vitesse du signal. La deuxième droite représente une vitesse moyenne pour la fin du signal, vitesse que l'on veut ramener nulle. La première droite débute au début du signal (vitesse nulle) et se raccorde à la seconde droite à un temps présélectionné après la portion du signal de forte intensité (pics d'accélération et de vitesse). Les calculs sont répétés pour divers temps présélectionnés afin d'obtenir la meilleure correction.

L'expérience avec un groupe de grands séismes a montré que cette technique d'ajustement ne permettait pas toujours de traiter adéquatement les signaux (Boore et coll., 2002). À la suite du séisme de Hector Mine en Californie (1999), Boore et ses collaborateurs ont adopté un modèle de correction simplifié avec une fonction quadratique, inspiré de celui de Glaizer (Boore, 2001). La figure 1 illustre les modèles de traitement des signaux, soit à partir d'une fonction quadratique (Boore et coll., 2002) et à partir de deux droites (Boore, 2001) pour deux scénarios de temps (t_2) présélectionnés.

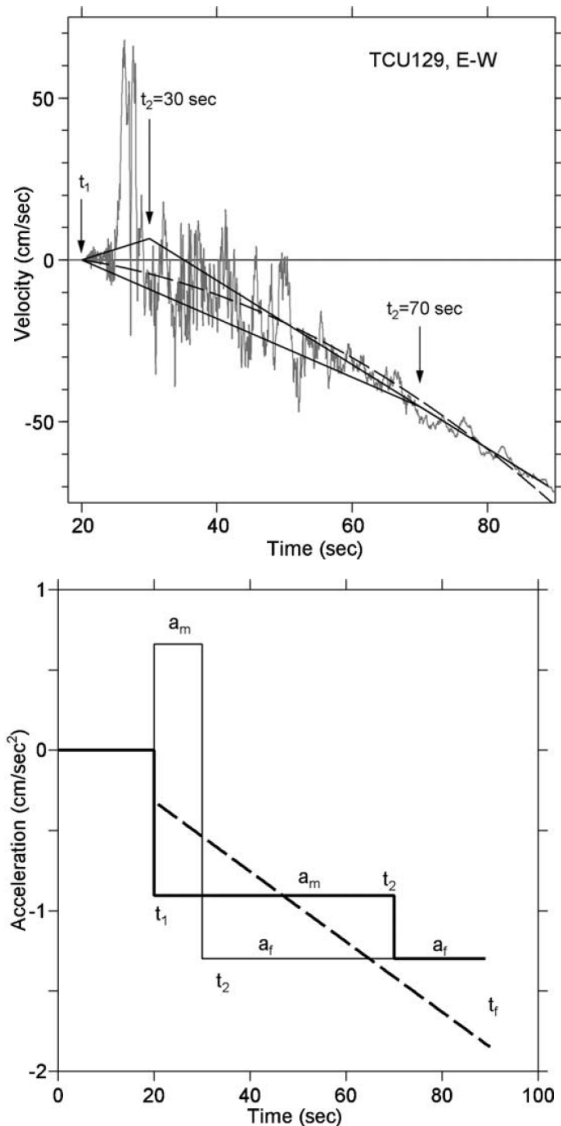


Figure 1. Modèles de traitement des signaux à partir d'une fonction quadratique (lignes pointillées) et de deux droites pour deux scénarios de temps (t_2) présélectionnés (Boore et coll., 2002 ; Boore, 2001)

Il existe différents filtres (Ormsby, Elliptical, Butterworth, Chebychev et Bessel), assez similaires entre eux, pour réaliser un filtrage des fréquences (Boore et Bommer, 2005). Le filtre a pour effet de réduire l'amplitude du signal pour une ou des plages de fréquence. Un filtre passe-haut laisse passer les hautes fréquences et atténue les basses fréquences et vice-versa pour un filtre passe-bas. Le filtre passe-bande inclut ces deux fréquences de filtrage. La portion du signal entre ces deux fréquences de filtrage est alors conservée.

Le choix de la fréquence de filtrage est fonction du degré de contamination en bruit pour les basses fréquences et la fréquence de vibration des accéléromètres pour les hautes fréquences mais également selon l'application

visée avec le signal traité. L'application d'un filtre qui soustrait abruptement tous les mouvements d'une fréquence inférieure au filtre passe-haut ou supérieure à un filtre passe-bas peut induire des distorsions importantes dans un signal. Conséquemment, les filtres sont développés pour réduire progressivement la réponse à basse ou à haute fréquence. Le taux de décroissance est ajusté avec l'ordre de la fonction de filtrage. La figure 2 illustre la relation de décroissance du filtre Butterworth du deuxième, quatrième et sixième ordre centré à passe-haut de 0,05 Hz. Lin et Adams (2010) propose l'utilisation d'un filtre Butterworth du quatrième ordre à passe-haut de 0,3 Hz.

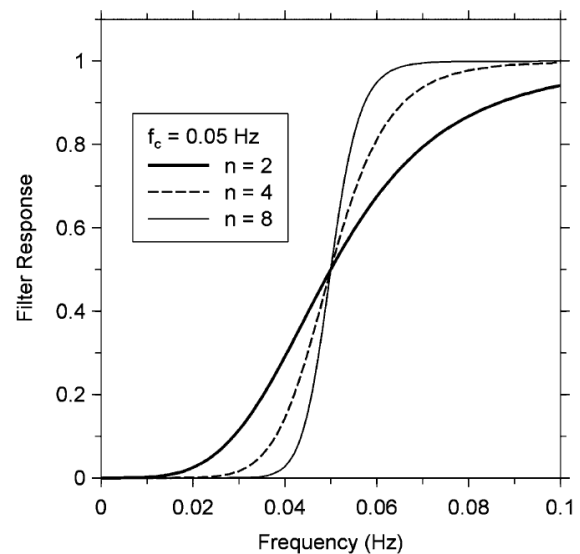


Figure 2. Relation progressive de filtrage de l'accélération – Filtre Butterworth de deuxième, quatrième et sixième ordre à passe-haut de 0,05 Hz

Les accéléromètres à l'étude possédaient une fréquence fondamentale de vibration légèrement supérieure à 50 Hz, bien au-delà de la plage des fréquences d'intérêt pour des barrages en enrochement, soit généralement inférieure à 1-2 Hz. Un filtrage (atténuation) des hautes fréquences, nommé passe-bas, devrait être effectué minimalement pour une fréquence légèrement inférieure à la fréquence fondamentale de vibration des instruments. Lin et Adams (2010) propose un filtrage passe-bas de 50 Hz.

3 DESCRIPTION DU SITE

La figure 3 illustre la vue en plan de la vallée et du barrage alors que la figure 4 montre une section de la vallée dans l'axe longitudinal de l'ouvrage.

La région du site possède un relief accidenté formé de vallées étroites encastrées entre des massifs rocheux culminant à une altitude moyenne de 500 m environ. La région est située à l'intérieur de la province géologique du Grenville du bouclier canadien; c'est une zone tectoniquement stable constituée de roches cristallines,

ignées et métamorphiques, d'âge précambrien. Le socle rocheux est généralement constitué par une série de gneiss migmatisés et plus rarement de gneiss lités. Localement, ces séries sont recoupées par des massifs intrusifs constitués d'anorthosite, de granite et de pegmatite.

Le barrage Denis-Perron est un ouvrage en enrochement à noyau de till présentant une hauteur de 171 m et une longueur en crête de 378 m. Il ferme la rivière dans une vallée très escarpée. Il est construit sur des alluvions grossières dans le fond de la vallée sauf le noyau, les

filtres et les transitions qui sont fondés sur le socle rocheux ou sur du béton de remodelage. Sur les appuis, les recharges sont fondées sur le socle rocheux ou sur les colluvions en rive droite du côté aval.

Ce barrage était instrumenté de deux accéléromètres entre 1998 et 2002. Un instrument était situé sur la crête du remblai alors que la deuxième station était positionnée à la mi-hauteur du barrage sur l'appui rocheux escarpé. La position approximative des accéléromètres est illustrée (points rouges) sur la figure 3.

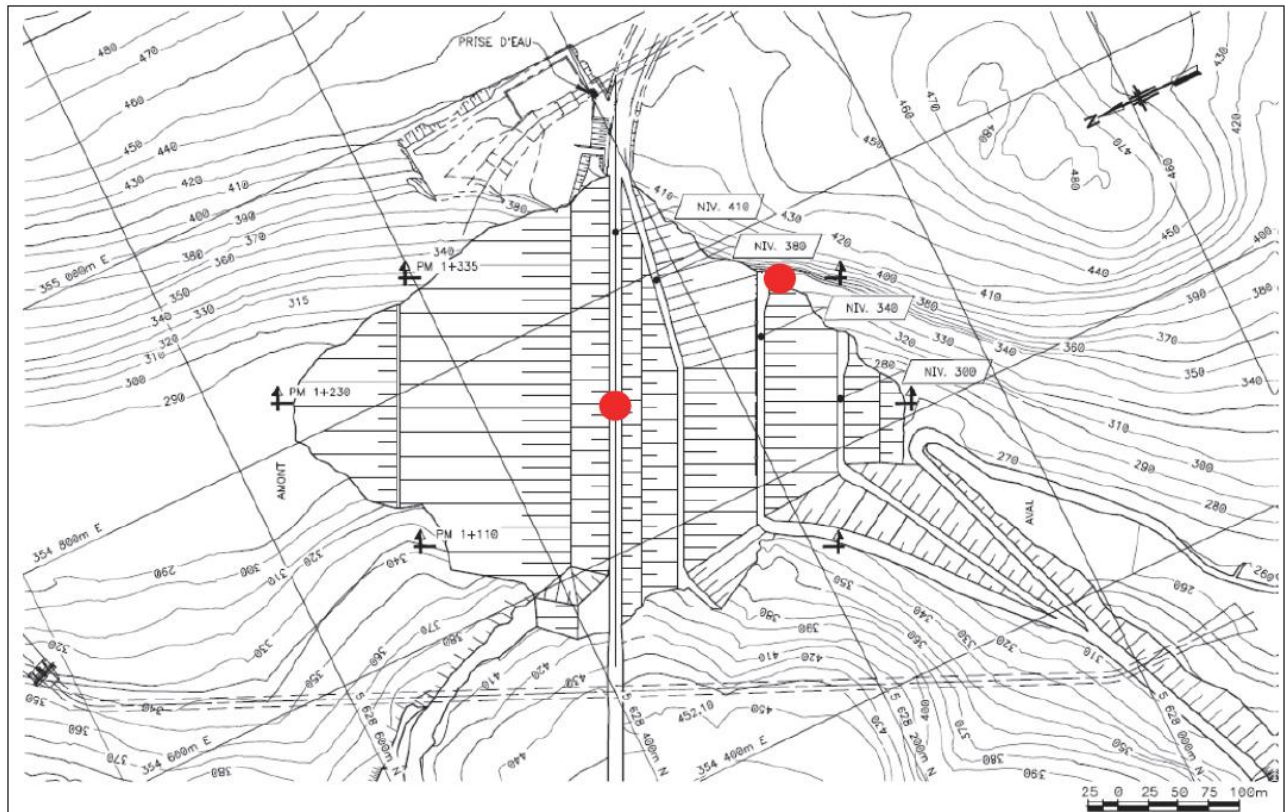


Figure 3 : Vue en plan de la vallée et du barrage Denis-Perron

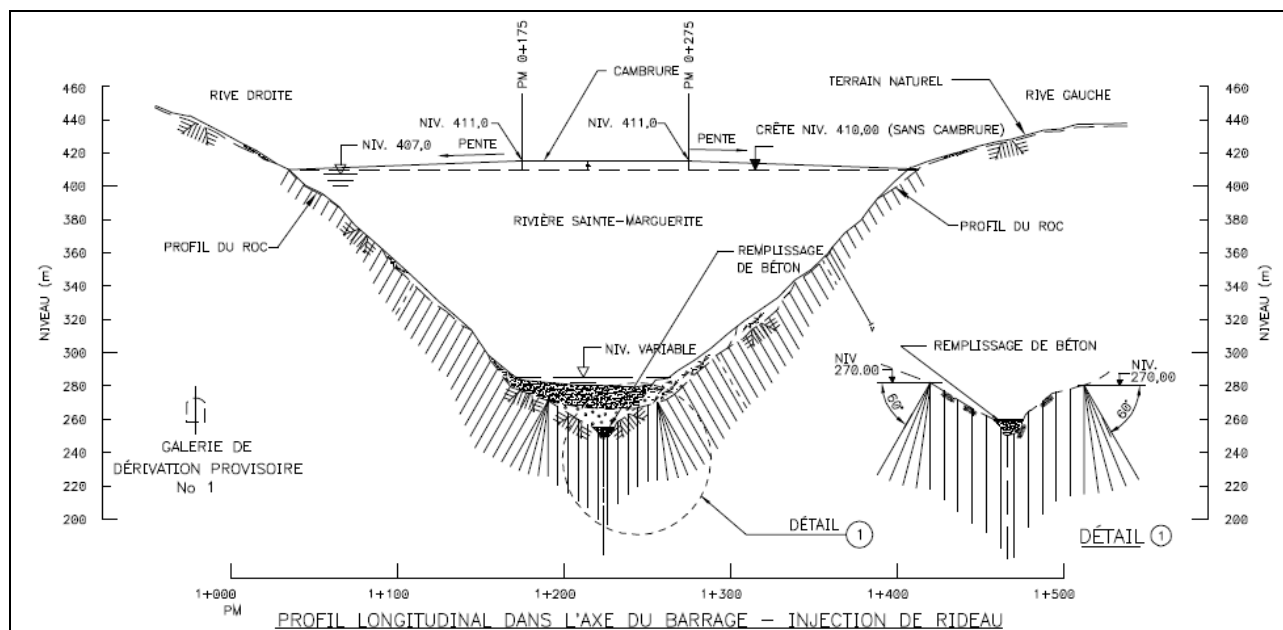


Figure 4 : Coupe longitudinale de la vallée dans l'axe central du barrage Denis-Perron

4 DONNÉES SISMOLOGIQUES

Les accéléromètres étaient de type Altus K2 Kinematics, enregistrant des signaux selon trois directions, soit longitudinale, transversale et verticale par rapport à l'axe du barrage. Il s'agit d'instruments munis d'un système d'acquisition et d'un convertisseur analogique-numérique, possédant une fréquence de résonance propre à chaque instrument avoisinant 50 Hz. Les deux instruments étaient synchronisés dans le temps.

Entre 1998 et 2002, ces instruments ont enregistré tout près de 671 séries de données instrumentales. La très grande majorité de ces événements était liée à des activités de dynamitage dans la région de cet aménagement. Bien que les activités de dynamitage soient propices à déclencher ce type d'instruments, le nombre important de données instrumentales non relié à des séismes découle du fait que les instruments étaient programmés pour déclencher à une faible accélération de 0,1 % g (1 cm/s²). Une analyse détaillée des événements sismiques recensés par la Commission géologique du Canada (CGC) a permis de rattacher trois séries de signaux à des séismes réels. Le tableau 1 liste ces événements ainsi que leurs principales caractéristiques.

Tableau 1 : Séismes mesurés au site du barrage Denis-Perron

Date	M _N	R _{ep} (km)	Lat (°)	Long (°)
16 mars 1999	5,1	129,2	49,615	- 66,344
20 janvier 2002	4,1	146,4	49,487	- 66,954
23 juillet 2002	4,0	134,5	49,594	- 66,953

5 ÉTAPES DE TRAITEMENT DES SIGNAUX

La procédure décrite dans Boore et coll. (2002) et dans Boore et Bommer (2005) respecte les recommandations de Lin et Adams (2010) ainsi que la pratique du USGS et elle découle entre autres d'un atelier de travail organisé par le Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems (COSMOS) en mai 2004. Elle comporte six étapes détaillées comme suit :

1. calculer la moyenne du pré-enregistrement de la relation de l'accélération du signal brut et soustraire cette moyenne de l'enregistrement pour ramener la relation de l'accélération du signal centrée sur l'ordonnée à zéro (*zeroth-order correction*) ;
2. intégrer l'accélération en fonction du temps pour obtenir la vitesse dans le temps ;
3. ajuster une fonction quadratique à la relation de la vitesse en fonction du temps, temps initial immédiatement après le pré-enregistrement soit à l'arrivée du signal (*baseline correction*) ;
4. soustraire la dérivée de la fonction quadratique à la relation de l'accélération brute après l'ajustement d'ordre zéro ;
5. appliquer un filtre Butterworth passe-bande du quatrième ordre; réaliser les intégrations simple et double pour obtenir les relations de vitesse et déplacement.

6 TRAITEMENT DES SIGNAUX

Cette procédure de traitement a été utilisée pour traiter les enregistrements du barrage Denis-Perron. Les calculs sont détaillés pour le séisme possédant la plus forte magnitude (M_N5,1). Certains calculs seront davantage explicités pour les signaux dans la direction longitudinale (roc/crête) de cet événement.

La figure 5 illustre les signaux bruts du 16 mars 1999 sans aucune correction, soit les signaux obtenus des

instruments. Chacun des signaux présente un décalage par rapport à l'ordonnée à l'origine, nécessitant ainsi l'ajustement d'ordre zéro. À noter qu'il y a un rapport de 4 entre les échelles des signaux enregistrés au rocher et ceux en crête.

Le tableau 2 présente l'ajustement calculé dans la plage du pré-enregistrement. Une moyenne de ce décalage en considérant la totalité du signal a également été calculée pour chacun des signaux, soit la méthode recommandée par des instruments analogiques. Pour chacun des signaux, les moyennes selon ces deux approches sont très similaires, ce qui indique une certaine symétrie des signaux par rapport à l'ordonnée à l'origine. La moyenne du pré-enregistrement est utilisée dans la présente analyse.

Une analyse paramétrique a été réalisée pour évaluer l'effet de la correction de la ligne de référence (*baseline correction*) ainsi que différentes variantes de filtrage. Le logiciel *Seismosignal* a été utilisée pour les calculs. Le

tableau 3 détaille les scénarios de traitement des signaux analysés.

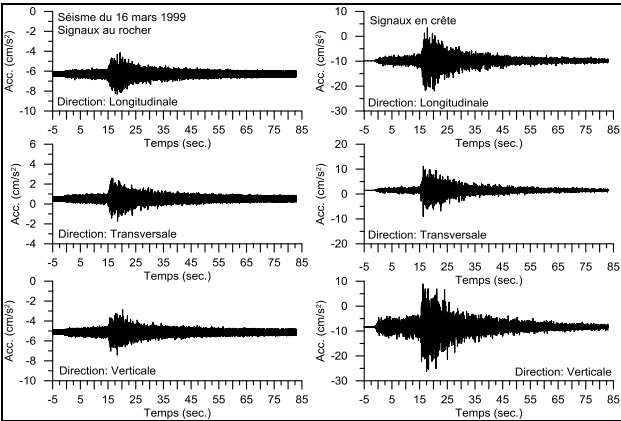


Figure 5. Signaux bruts enregistrés par les instruments du barrage Denis-Perron lors du séisme du 16 mars 1999

Tableau 2 : Ajustement d'ordre zéro des signaux enregistrés lors du séisme du 16 mars 1999

Moyenne	Rocher			Crête		
	Long (cm)	Vert (cm)	Trans (cm)	Long (cm)	Vert (cm)	Trans (cm)
Pré-enregistrement	− 6,2838	− 5,1313	0,5240	− 9,8378	− 8,3554	1,4735
Signal au complet	− 6,2846	− 5,1310	0,5250	− 9,8412	− 8,3519	1,4745

Tableau 3 : Analyse paramétrique – Scénarios de traitement des signaux

Scénario	Ligne de référence	Filtrage basse fréquence (Hz)	Filtrage haute fréquence (Hz)
1	oui	—	—
2	oui	0,1	40
3	oui	0,3	40
4	non	0,3	40

L'ajustement de la ligne de référence (*baseline correction*) a été calculé avec une fonction quadratique. Pour tous les scénarios de filtrage, un filtre de type Butterworth passe-bande de quatrième ordre a été utilisé. La figure 6 illustre les résultats de cette analyse paramétrique.

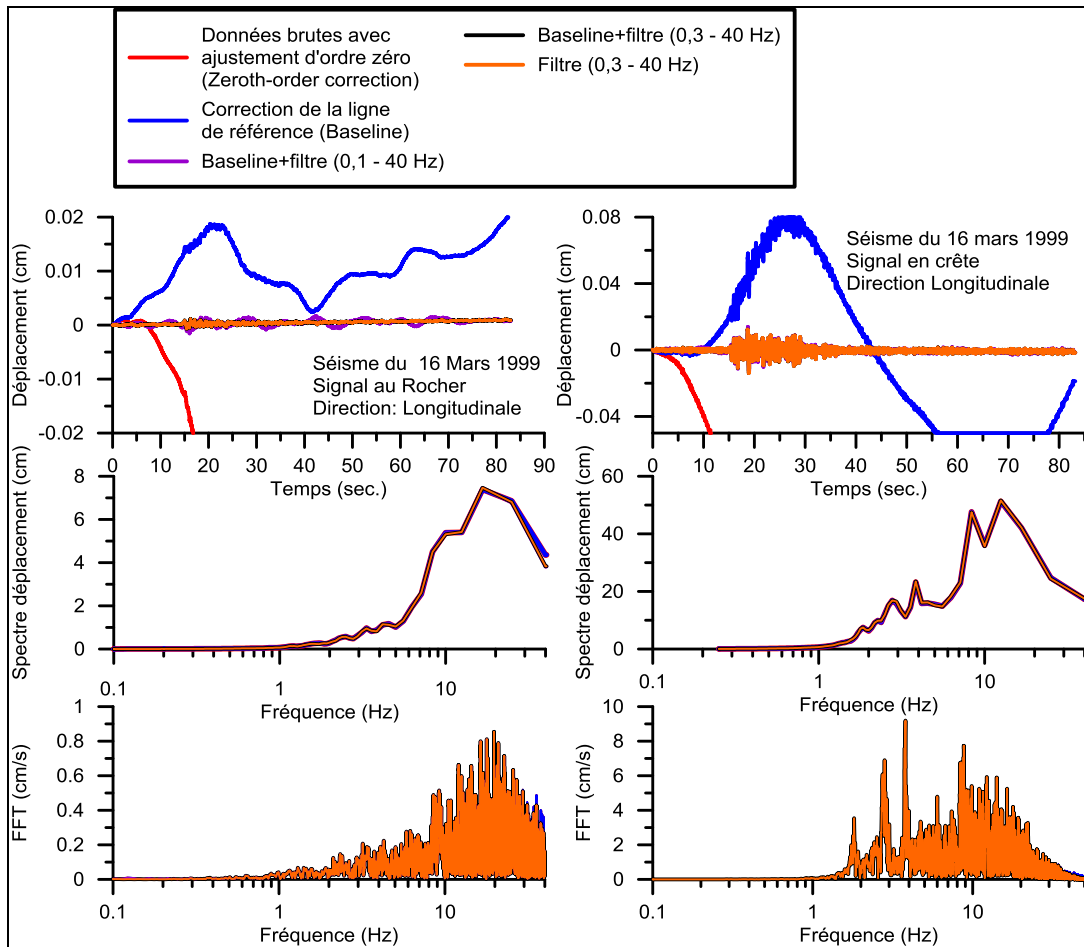


Figure 6: Analyse paramétrique de l'ajustement de la ligne de référence et des filtres – Déplacement, spectre de déplacement et transformée de Fourier dans la direction longitudinale enregistrés lors du séisme du 16 mars 1999

Les conclusions suivantes sont tirées des résultats de l'analyse paramétrique :

- les calculs sans correction de la ligne de référence avec seulement un filtre passe-bande procurent un déplacement final nul ou quasi-nul, indication que le signal contient peu de bruit et de distorsion pour la plage de fréquences 0,3-40 Hz ;
- pour le signal au rocher, le filtrage des fréquences inférieures à 0,3 Hz procure les meilleurs résultats et un déplacement final nul ;
- entre 0,3 et 40 Hz, les transformées de Fourier et les spectres de déplacement de tous les scénarios sont parfaitement identiques à l'exception qu'à la limite du filtre passe-bande les effets de filtrage sont perceptibles.

Sur la base de cet exercice, tous les signaux du tableau 5.1 ont été traités selon les paramètres du scénario 3 (ajustement de la ligne de référence, passe-bande entre 0,3 et 40 Hz). Il est à noter que pour certaines composantes des signaux, un déplacement final plus près de 0 est obtenu avec un filtrage à 20 Hz, ce qui laisse présager que les signaux posséderaient un peu de bruit dans la plage de fréquence 20-40 Hz.

La figure 7 montre les fonctions temporelles des trois séismes à l'étude. Le tableau 4 présente les accélérations maximales pour chacun des séismes. Il s'agit de séismes de très faible amplitude. Il est intéressant de noter que pour les deux premiers séismes, l'accélération maximale dans la direction verticale excède l'accélération maximale dans les directions horizontales et que pour le troisième séisme, l'accélération verticale demeure significative p/r aux directions horizontales. Ceci est contraire à ce qui est normalement observé pour un terrain plat. Dans notre compréhension, il s'agit d'un effet 3D (dit effet de site) découlant de la géométrie de la vallée escarpée. Elgamal (1992) a fait la même observation pour des données sismologiques mesurées sur le barrage La Villita, particulièrement pour le séisme le plus faible. Il faut toutefois mettre en contexte que la station au roc était située sur l'appui gauche, à un niveau approximatif de 340 m.

Il est à noter que les ratios des accélérations des deux premiers séismes sont comparables à ceux calculés par Rainer et coll. (1990) pour d'autres barrages en remblai sollicités par le tremblement de terre du Saguenay en 1988 ($M_w 5,9$).

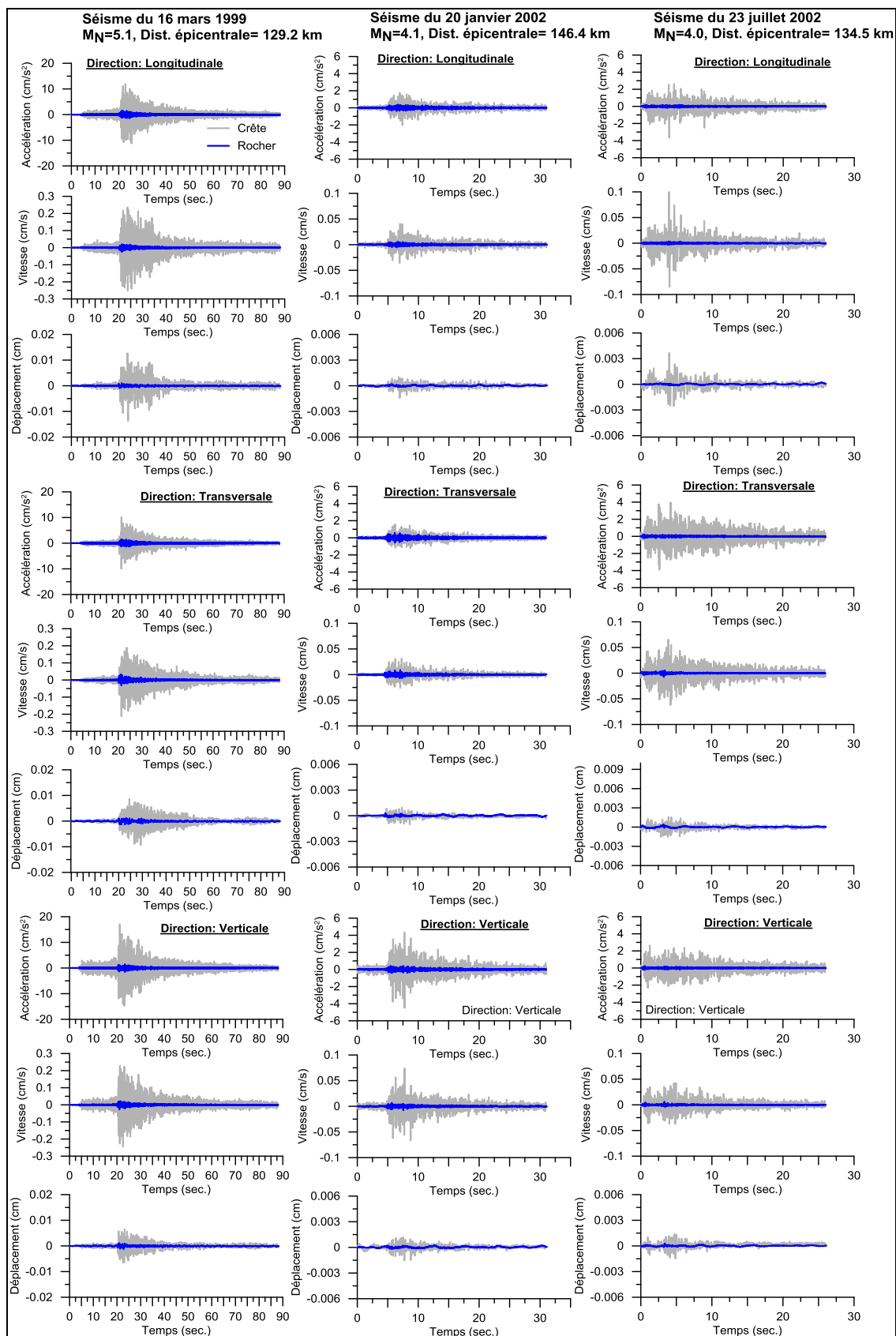


Figure 7 : Fonctions temporelles des trois séismes enregistrés en crête du barrage Denis-Perron

Tableau 4 : Accélérations maximales pour chacun des séismes

Séisme	A max Direction longitudinale			A max Direction transversale			A max Direction verticale		
	Rocher (g)	Crête (g)	Ratio	Rocher (g)	Crête (g)	Ratio	Rocher (g)	Crête (g)	Ratio
16 mars 1999	0,0021	0,0118	5,6	0,0022	0,0105	4,7	0,0019	0,0178	9,4
20 janvier 2002	0,0004	0,0020	5,0	0,0006	0,0017	2,8	0,0004	0,0045	11,3
23 juillet 2002	0,0002	0,0037	18,5	0,0002	0,0039	19,5	0,0002	0,0026	13,0

7 ANALYSE DE LA FRÉQUENCE FONDAMENTALE DE VIBRATION

Pour chacune des directions des signaux à l'étude, la fonction de transfert et la fréquence fondamentale de vibration (F_N) ont été calculées selon trois approches :

- comparaison du rapport de la transformée de Fourier ($FFT_{crête}/FFT_{rocher}$) ;
- comparaison du rapport moyen de la transformée de Fourier ($FFT_{crête}/FFT_{rocher}$), calculé en effectuant la moyenne des rapports sur une plage mobile ;
- Pour chaque valeur FFT, il s'agit d'une moyenne de type fenêtre Parzen établie sur une plage de fréquence centrée sur la valeur FFT. Dans la présente analyse, la plage fréquentielle retenue est de 0,1 Hz, (0,05 Hz de part et d'autre de la valeur FFT).
- comparaison du rapport de l'accélération spectrale ($SA_{crête}/SA_{rocher}$).

Tel qu'illustré sur la figure 6, la FFT au rocher est de très faible amplitude, particulièrement pour les fréquences inférieures à 2 Hz. Une attention doit être portée à cette particularité car elle engendre pour certaines portions du spectre de grandes amplifications qui n'ont pas nécessairement de sens physique et risquent de masquer les fréquences de vibration.

Les figures 8 à 10 présentent les fonctions de transfert et les fréquences fondamentales de vibration pour chacune des directions.

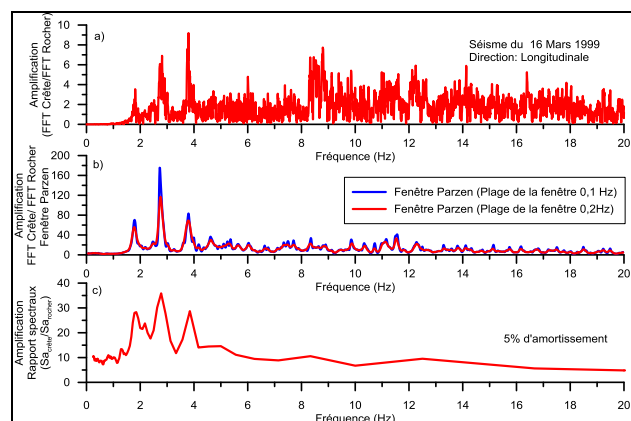


Figure 8 : Fonction de transfert dans la direction longitudinale – Séisme du 16 mars 1999

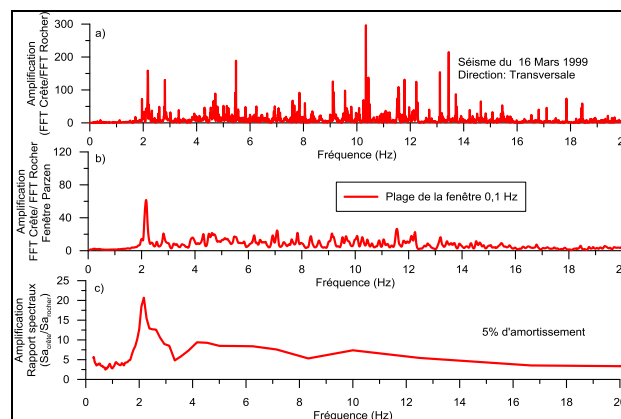


Figure 9 : Fonction de transfert dans la direction transversale – Séisme du 16 mars 1999

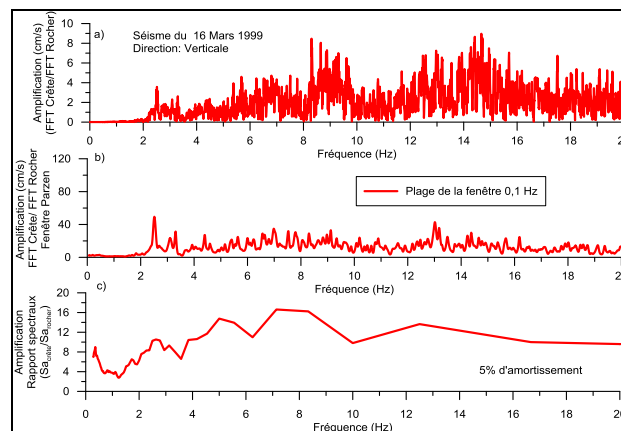


Figure 10 : Fonction de transfert dans la direction verticale – Séisme du 16 mars 1999

Le tableau 5 présente les F_N du barrage Denis-Perron sur la base des données sismologiques du 19 mars 1999. Dans les directions horizontale, longitudinale et transversale, la F_N déterminée avec les FFT est identique à celle déterminée avec SA . Toutefois, dans la direction verticale, la concordance entre la F_N déterminée avec les FFT et les SA n'est pas aussi évidente à interpréter. Un pic est perceptible autour de 2,5 Hz mais les rapports spectraux illustrent davantage de variations pour de faibles fréquences. Dans cette direction, les fonctions de transfert de la figure 10 exposent une allure similaire entre

elles mais différente de celles des autres directions. Les effets de site pourraient expliquer ces résultats.

Tableau 5 : Fréquences fondamentales de vibration du barrage Denis-Perron lors du séisme du 16 mars 1999

Direction	Fréquence fondamentale de vibration (F_N) (Hz)
Longitudinale	1,80
Transversale	2,12
Verticale	2,45

L'analyse de la fréquence fondamentale de vibration a été étendue aux deux autres séismes. Les fonctions de transfert ($FFT_{crête}$ par rapport à la FFT_{rocher} , fenêtre Parzen) dans chacune des directions de ces événements ont été superposées dans l'espace fréquentiel.

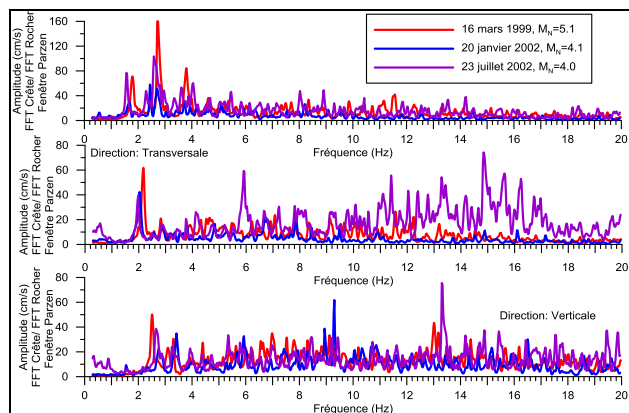


Figure 11 : Fonctions de transfert selon les trois directions des trois séismes

La superposition illustre que les F_N sont similaires pour chacun des séismes. L'événement du 16 mars 1999, avec la magnitude la plus élevée, présente des valeurs un peu plus élevées que l'on pourrait associer à des déformations non linéaires légèrement plus accentuées. Ces écarts entre les fréquences fondamentales de vibration peuvent également être affectés par divers facteurs : conditions hivernales, niveau du réservoir, incertitudes des instruments, etc. Globalement, ces résultats des trois événements différents sont cohérents. Ces signaux, bien que de faibles amplitudes, offrent la possibilité d'étudier et de valider des lois de comportement à de très faibles déformations.

Une comparaison est aussi faite (tableau 6) entre les F_N obtenues avec les accéléromètres pour les trois séismes et celles mesurées sur le terrain par Lacroix et Verret (Lacroix, 2015) à l'aide d'un sismomètre de type *Tromino*. La concordance entre ces deux séries de fréquences fondamentales de vibration est excellente.

Tableau 6 : Plage de la fréquence fondamentale de vibration des composantes des trois séismes

Direction	Fréquence fondamentale de vibration (Hz)	
	Accéléromètre	Sismomètre <i>Tromino</i> (Lacroix, 2015)
Long.	1,55-1,82	(N-S)* $1,62 \pm 0,22$ (PM 1+235)
Transv.	2,00-2,20	(E-W)* $2,06 \pm 0,23$ (PM 1+235)
Vert.	2,45-2,80	—

* La direction Nord-Sud présente un angle de $25,17^\circ$ par rapport à la direction transversale.

8 CONCLUSION

Dans le cadre de cette analyse, les accéléromètres sur le barrage Denis-Perron ont enregistré trois séismes entre 1998 et 2002. Il s'agit de séismes de faible amplitude. Tous les signaux de ces séismes ont été traités avec un ajustement de la ligne de référence (*baseline correction*) et un filtre de type Butterworth passe-bande avec passe-haut à 0,3 Hz et passe-bas à 40 Hz.

Pour tous les séismes, l'accélération maximale de la composante verticale est significative par rapport à l'accélération maximale des composantes horizontales, ce qui laisse présager des effets de site (amplification des ondes de surface) découlant de la géométrie de la vallée escarpée. Ces résultats sont cohérents avec les résultats d'Elgamal (1992) pour des séismes de faible magnitude.

La plage de fréquence fondamentale de vibration pour les directions horizontales est très similaire à celle mesurée avec le sismomètre lors des essais sur le terrain effectués au printemps de 2013.

Lors de ces séismes, le barrage Denis-Perron a présenté un excellent comportement sans aucune déformation perceptible.

9 REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier le CRSNG du Canada et Hydro-Québec pour subventionner le présent projet de recherche ayant mené à ces résultats. Les auteurs désirent également remercier Hydro-Québec pour avoir partagé les données instrumentales des accéléromètres installés sur le barrage Denis-Perron et autorisé la publication.

10 RÉFÉRENCES

Boore, D. M. (2001). Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 1199-1211.

- Boore, D. M., C. D. Stephens et W. B. Joyner. (2002). Comments on Baseline Correction of Digital Strong-Motion Data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 18.
- Boore, D. M. et J. J. Bommer. (2005). Processing of Strong-Motion Accelerograms: Needs, Options and Consequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(2), 93-115. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.10.007>.
- Chiu, H.-C. (2012). A Compatible Baseline Correction Algorithm for Strong-Motion Data. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23(2), 10.
- Elgamal, A. (1992). Three-Dimensional Seismic Analysis of La Villita Dam. *Journal of Geotechnical Engineering* 118(12), 22.
- Lacroix M., (2015). Analyse des déplacements permanents des barrages en remblai et en enrochement par des méthodes pseudo-dynamiques pour l'est du Canada, Mémoire de maîtrise - Préliminaire, Département de Génie civil et de Génie des eaux, Faculté des Sciences et Génie, 278 pages.
- Lin, L. et J. Adams. (2010). Compilation of digital strong motion data for eastern Canada, Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering / Compte Rendu de la 9ième Conférence Nationale Américaine et 10ième Conférence Canadienne de Génie Parasismique; 11 pages
- Rainer, J. H. (1990). Tremblement de Terre du Saguenay, 25 novembre 1988; Sismogrammes traités des secousses fortes Barrage Outardes 2, Manic 3 et Manic 5 (Vol. 1, pp. 45). Hydro-Québec, Direction Sécurité des Barrages , Montréal, Québec, Canada: Conseil national de Recherches Canada - Institut de recherche en construction.
- Rainer, J. H. et O. Dascal. (1991). *Behavior of Instrumented Hydro-Quebec Dams during the Saguenay Earthquake*. Paper presented at the Canadian Dam Safety Conference, Whisler, British-Columbia (Canada).