

## Analyse sismique des barrages-poids: Application numérique au barrage Paugan

R. Lupien<sup>1</sup>

### RÉSUMÉ

La vérification de la stabilité sismique des barrages-poids selon l'approche pseudo-statique traditionnelle répond mal aux interrogations sur la sécurité réelle des barrages vieillissants. Dans ce contexte, Hydro-Québec, à l'instar d'autres organismes concernés, préconise une approche progressive à cinq niveaux pour la vérification sismique de ses barrages en béton. L'exemple numérique du barrage Paugan (phase 1) présente certains résultats obtenus des diverses méthodes d'analyse linéaire.

### ABSTRACT

Traditional use of the pseudo-static approach for the seismic stability evaluation of gravity dams does not correlate well with the real safety margin of ageing dams. As some other organizations, Hydro-Québec favours a five-level progressive approach for the seismic evaluation of its concrete dams. Numerical results (phase 1) of the Paugan dam analyses, obtained from different linear methods, are presented.

### INTRODUCTION

En regard des nouvelles cartes sismiques canadiennes et de l'état actuel des connaissances, il appert que la vérification de la stabilité des barrages, selon une approche pseudo-statique, n'est ni suffisante ni rassurante, du moins, pour certains ouvrages. Dans ce contexte, Hydro-Québec a mobilisé des groupes de travail et amorcé des programmes de recherches et de développement dans le domaine de la sécurité et de l'intégrité des barrages existants en béton. L'Association canadienne de la sécurité des barrages prépare actuellement un guide pour la vérification des barrages existants ; toutefois, pour les barrages-poids en particulier et les structures connexes, on ne précise pas de procédure de vérification, dans l'éventualité où les critères de performance établis ne sont pas respectés.

Le barrage Paugan, construit en 1928, sur la rivière Gatineau, a récemment fait l'objet de réfections importantes dont la coupure, au câble diamanté, de la prise d'eau, à sa jonction avec le barrage-régulateur désaffecté (figure 1), transformé depuis lors en barrage-poids. Des études dynamiques ont alors été amorcées en vue de confirmer le bon comportement sismique du barrage ainsi coupé. La portion de prise d'eau étudiée, bien que constituant une section relativement massive et dont la stabilité n'était pas critique, a priori, a servi de prototype pour l'expérimentation des méthodes d'analyses numériques, dans le domaine linéaire.

<sup>1</sup>Hydro Québec

## APPROCHE DE VÉRIFICATION SISMIQUE

L'approche suivie pour l'étude du barrage Paugan (prise d'eau) consiste en une approche progressive de la vérification sismique, passant d'un niveau d'analyse simple vers des niveaux plus sophistiqués. Hydro-Québec avec le concours des chercheurs de l'École Polytechnique de Montréal (Ghrib et al., 1994) effectue présentement une revue critique des méthodes d'analyses sismiques pour les barrages en béton ; les cinq niveaux d'analyses considérés sont les suivants :

- (1) vérification des caractéristiques du barrage en regard d'une grille de pré-sélection ;
- (2) analyse pseudo-statique (ou coefficient sismique) ;
- (3) analyse pseudo-dynamique selon Fenves et Chopra (1986) ou méthodes spectrales ;
- (4) analyse dynamique linéaire transitoire dans le domaine du temps ou des fréquences ;
- (5) analyse dynamique non linéaire transitoire (fissuration, sous-pressions, etc...).

La présente étude numérique de Paugan a bien franchi les trois (3) premiers niveaux d'analyse et s'est aventurée au niveau 4, d'une façon préliminaire, par une étude de sensibilité du comportement sismique de Paugan, face à certains accélérogrammes connus. Étant donné la complexité géométrique du barrage dans sa portion étudiée (prise d'eau), une modélisation 3-D des quatre prises d'eau en rive gauche de la coupure a été effectuée.

## CALCULS NUMÉRIQUES APPLIQUÉS À PAUGAN

Le barrage principal d'une longueur d'environ 270 m atteint dans sa portion la plus élevée une hauteur de l'ordre de 46 m ; le plot le plus critique fait l'objet, actuellement, d'une vérification sismique selon l'approche progressive exposée ci-dessus. Toutefois la portion de la prise d'eau dont les calculs sont présentés ici concerne une section du barrage plutôt massive, d'environ 16 m de hauteur ; bien que la stabilité globale de cette portion n'était pas réellement mise en doute, des calculs sismiques plus poussés furent effectués, en vue de valider la coupure complète du barrage réalisée en 1991.

### Paramètres sismiques

Toutes les méthodes d'analyse n'utilisent pas nécessairement les mêmes paramètres sismiques. Ainsi, pour les calculs pseudo-statiques, Hydro-Québec (1993), après avoir divisé le Québec en zones sismiques, suggère pour chacune des zones un coefficient empirique pour l'accélération à prendre en compte dans les calculs ; par exemple, une valeur de 0.15 g est proposée pour le site de Paugan. Toutefois, pour les besoins de comparaison entre les diverses méthodes d'analyse, il est apparu nécessaire de choisir l'accélération de pointe du sol (APS), malgré ses défauts reconnus, comme paramètre de comparaison.

Comme l'historique du Québec ne permet pas l'utilisation d'une approche déterministe pour définir le séisme maximal probable (SMP), il faut adopter une méthode probabiliste qui traite les variables, telles la magnitude et la distance, comme des grandeurs statistiques avec les distributions de probabilité et les incertitudes connexes. On retrouve dans le rapport de recherches de l'Association Canadienne de l'Électricité (ACE, 1990), au volume B, les cartes des paramètres de mouvements du sol établies à partir des relations d'atténuation de l'EPRI (1988). À la figure 2, apparaissent les spectres de réponse d'égal probabilité (Paugan) pour trois niveaux de probabilité et deux rapports d'amortissement.

L'ACE (1990) recommande d'utiliser un tremblement de terre SMP ayant une probabilité annuelle de dépassement de 1/10000. Par contre Hydro-Québec (1993) recommande d'utiliser un SMP d'une fréquence de récurrence maximale de 2000 ans (1/2000). Pour fins de comparaison, les deux accélérations de pointe du sol (APS) correspondant à ces deux niveaux de probabilité ont été retenues, soit 0.27 g ( $P = 1/2000$ ) et 0.44 g ( $P = 1/10000$ ). Quant au rapport d'amortissement, il a été déterminé à partir de l'approche pseudo-dynamique (Fenves et Chopra, 1986), et la même valeur a aussi servi pour les autres méthodes d'analyse. Le rapport d'amortissement 9.4 % résulte de l'amortissement forfaitaire de 5 % pour le barrage considéré sans eau et de l'amortissement additionnel apporté par les interactions avec l'eau et la fondation du barrage.

### **Méthodes d'analyse**

Après avoir vérifié la non-conformité de Paugan aux critères de sélection permettant d'arrêter l'analyse au niveau 1, la méthode pseudo-statique (niveau 2) a été effectuée en considérant l'accélération de pointe du sol (APS), plutôt que le coefficient sismique de 0.15 g ; ceci, afin de ramener les études sur une même base de comparaison. Bien que cette approche traditionnelle soit déficiente en considérant une accélération uniforme sur toute la hauteur, ce qui va à l'encontre du comportement réel représenté par le mode fondamental de vibration, elle n'en demeure pas moins, pour le praticien, un indicateur lui permettant de justifier, s'il y a lieu, des études plus poussées. L'effet dynamique du réservoir a été simulé de façon statique par la technique bien connue des masses ajoutées, selon Westergaard ; cette technique a aussi été utilisée pour la méthode spectrale et l'analyse dynamique dans le domaine du temps. Les résultats numériques sont présentés au tableau 1.

Ensuite, un troisième niveau d'analyse se concrétisait par l'application de la méthode pseudo-dynamique simplifiée de Fenves et Chopra (1986) ainsi que par l'utilisation de la méthode spectrale. La section typique, à cause de sa complexité, ne se qualifiait pas dans les limites d'applicabilité de l'approche simplifiée mais, les calculs ont néanmoins été effectués. Cette méthode simplifiée subdivise la section bidimensionnelle du barrage-poids en plusieurs tranches horizontales (figure 1) ; à partir du mode fondamental, on peut, à l'aide de tableaux, évaluer numériquement les effets de l'interaction eau-barrage-fondation et, simplement, calculer les contraintes statiques équivalentes par la théorie des poutres.

Dans un second temps, le modèle 3D par éléments finis de cette section plutôt non régulière a été soumis à une analyse de vibration afin d'extraire les principaux modes de vibration (figure 4). Par la suite, une analyse spectrale, à partir des spectres de réponse de la figure 2, permettait d'obtenir par superposition modale les résultats présentés au tableau 1.

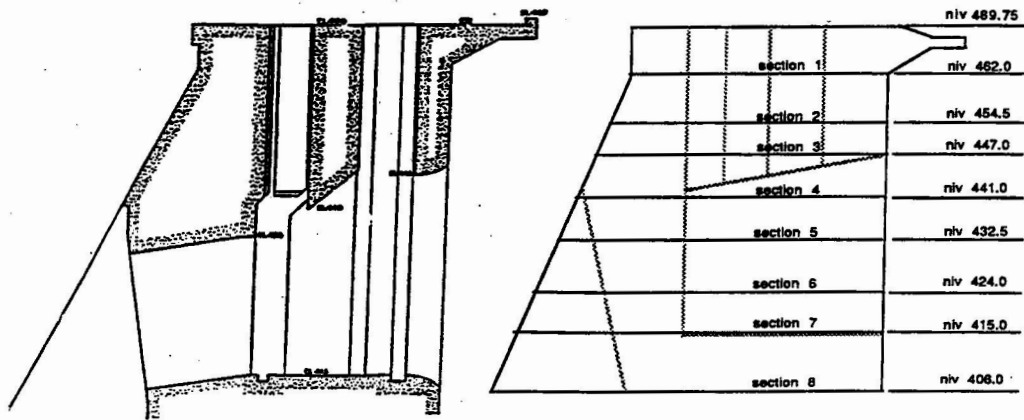
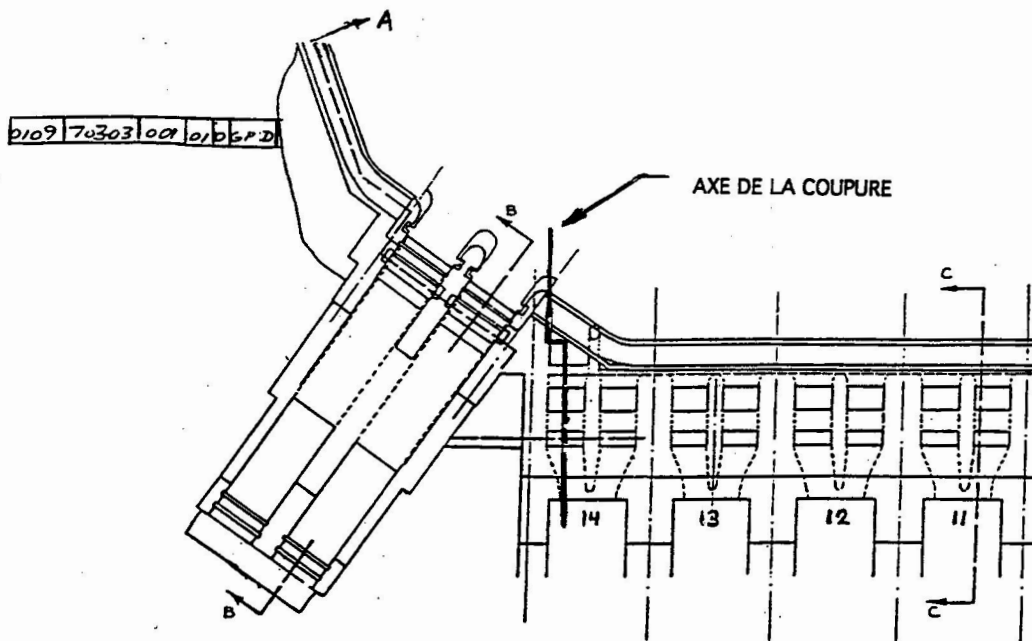
Enfin, le modèle était exploité pour une analyse de quatrième niveau à l'aide de deux accélérogrammes connus, soit : Chicoutimi nord longitudinal 1988 et El Centro nord-sud 1940 (figure 3). Le séisme d'El Centro est un séisme californien qui n'est certes pas représentatif des séismes de l'est de l'Amérique ; il a néanmoins été utilisé pour mettre en évidence ses caractéristiques particulières, face au comportement d'une structure rigide, comme le barrage Paugan. Pour les fins de comparaison, ces deux séismes ont été calibrés par leur APS pour les ramener à l'APS commune aux diverses méthodes d'analyse (tableau 1).

## CONCLUSIONS

- ♦ Les diverses méthodes d'analyse confirment que la portion de prise d'eau étudiée n'est pas critique au point de vue sismique, ce qui était anticipé dès le départ, et qu'une coupure, telle que réalisée en 1991, n'affecte pas son comportement de façon appréciable.
- ♦ C'est la méthode d'analyse spectrale qui semble fournir les contraintes les plus élevées.
- ♦ L'approche pseudo-dynamique (simplifiée) de Fenves et Chopra (1986), qui utilise la réponse dynamique basée sur le mode fondamental de vibration et ce, sans recourir à la méthode des éléments finis, apparaît très intéressante pour la vérification sismique des barrages-poids.
- ♦ Les résultats obtenus de la méthode pseudo-dynamique simplifiée (tableau 1) montrent des contraintes de l'ordre de 70 % des contraintes résultant de l'analyse spectrale effectuée sur le modèle d'éléments finis 3-D.
- ♦ L'approche progressive suivie pour cette étude sert également pour les études du plot principal de Paugan (46 m), en cours actuellement.

## RÉFÉRENCES

- Association Canadienne de l'Électricité ; "Évaluation de la sécurité des barrages actuels en cas de séisme", Volumes A, B, C-1, C-2, C-3 et C-4, Acres International Ltd, avril 1990.
- CIGB, Bulletin 72 ; "Choix des paramètres sismiques pour grands barrages - Recommandations", 1989.
- Dascal O., Larocque G., Le Comte P., Nguyen D. ; "Guide pour la sélection des paramètres sismiques - Rapport du sous-groupe séismicité" ; Hydro-Québec, décembre 1993.
- EPRI, 1988 ; "Engineering Model of Earthquake Ground Motion for Eastern North America", Research Report NP-6074, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- Fenves G., Chopra A.K. ; "Simplified Analysis for Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dams" Report No. UCB/EERC-85/10, June 1986, Earthquake Eng. Research Center, Berkeley.
- Ghrib F., Léger P., Tinawi R. ; "Une approche progressive pour vérifier la sécurité sismique des barrages existants en béton tenant compte des particularités de la sismicité du Québec" ; version préliminaire du rapport EPM/GCS-1994-19, École Polytechnique de Montréal, décembre 1994.
- Lupien R. ; "Aménagement Paugan - Conséquences de la coupure du barrage principal - Rapport final", Hydro-Québec, mars 1992.
- Lupien R. ; "Vérification sismique des barrages-poids : approche numérique pour le barrage Paugan" ; Symposium 1992 sur les techniques avancées de surveillance et de maintenance et sur le béton ; IREQ, 8-9 décembre 1992.
- National Research Council ; "Earthquake Engineering for Concrete Dams : Design, Performance and Research Needs", National Academy Press, 1990.



SECTION CC

POSITION DES SECTIONS UTILISÉES POUR LES CALCULS  
STATIQUES ET DYNAMIQUES (NIVEAUX EN PIEDS)

Figure 1 : Pagan - Jonction prise d'eau avec barrage régulateur

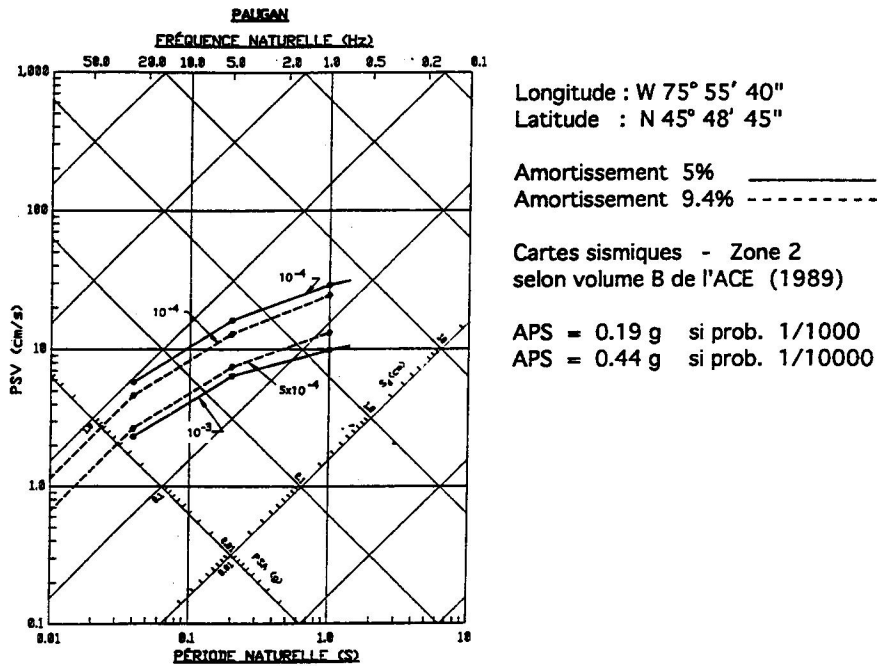


Figure 2 : Paugan - Spectres de réponse d'égale probabilité

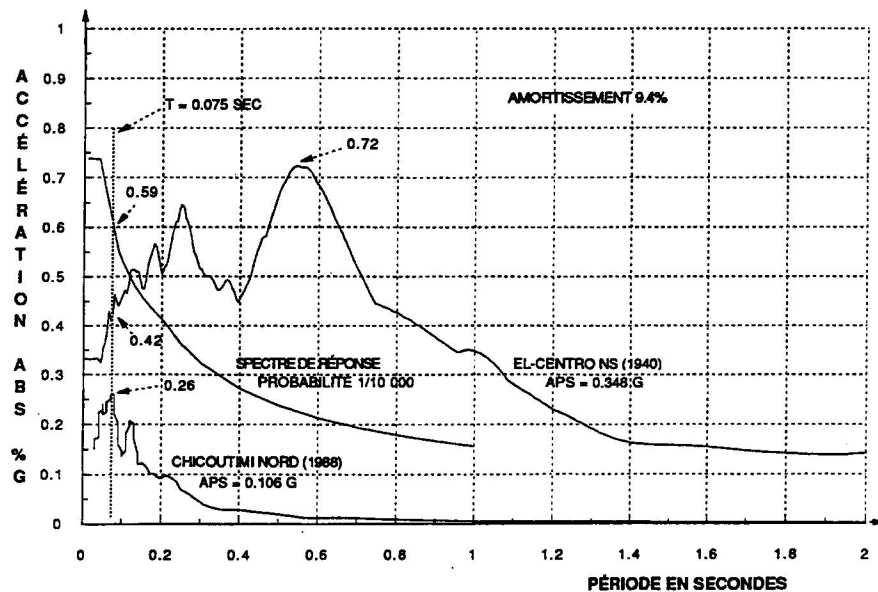


Figure 3 : Spectres de réponse - Accélération absolue

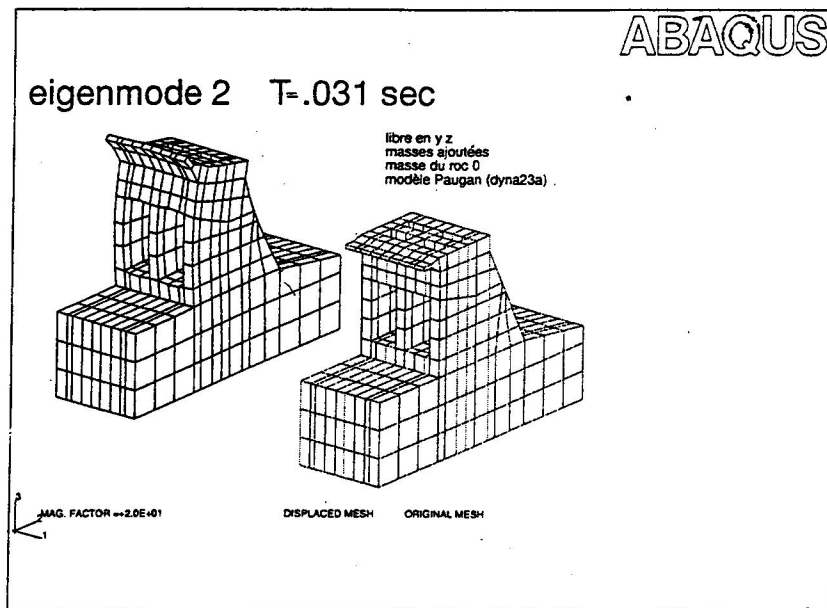
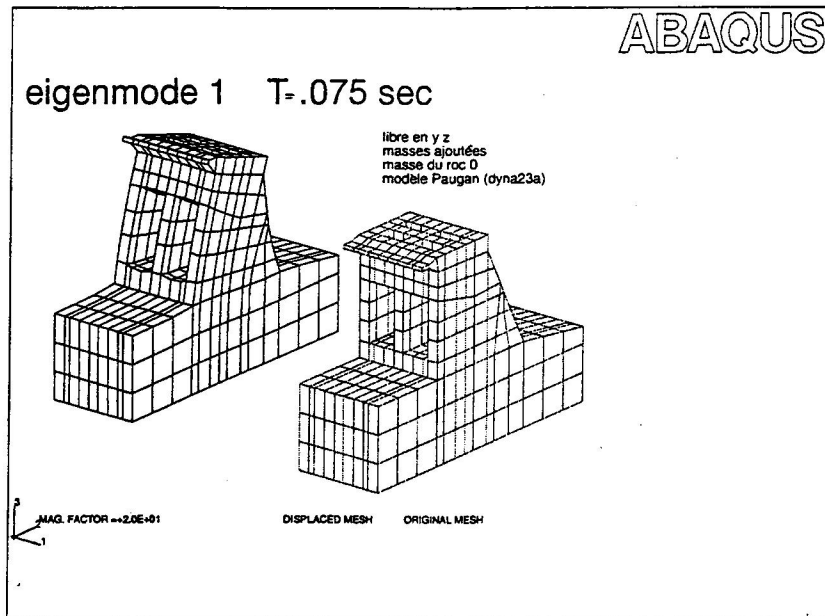


Figure 4 : Paugan - Les deux premiers modes de vibration

**TABLAU 1a - ANALYSE SISMIQUE DU PLOT 9 DE LA PRISE D'EAU DE PAUGAN**  
**ACCÉLÉRATION MAX. DU SOL = 0.27G (PROB. 1/2000)**

niveau	PROB. 1/2000* AMORTIS. 9.4%		MÉTHODE SIMPL SELON CHOPRA AMORTIS. 9.4%		PSEUDOSTAT. # APS = 27G AMORTIS. 0%		CHICOUTIMI N+ LONG. X 2.55 AMORTIS. 9.4%	
	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)
1	55	40	20	20	0	15	35	75
2	185	200	60	55	15	105	130	70
3	240	200	95	85	50	110	195	260
4	330	200	220	130	115	115	275	260
5	420	370	325	235	180	260	360	290
6	560	460	405	330	290	360	475	315
7	670	460	485	435	475	395	600	405
8	625	415	260	380	455	360	560	360

\* résultats d'une analyse dyn. effectuée à l'aide du spectre de réponse pour le site de Paugan (dyna23a)  
+ résultats d'une analyse dyn. effectuée à l'aide de l'accélérogr. de Chicoutimi Nord (dyna25)  
# résultats d'une analyse statique utilisant l'accélération max. du sol (dyna24cc)

**Note:** Aucun signe n'apparaît avec les contraintes à cause du renversement cyclique.

**TABLAU 1b - ANALYSE SISMIQUE DU PLOT 9 DE LA PRISE D'EAU DE PAUGAN**  
**ACCÉLÉRATION MAX. DU SOL = 0.44G (PROB. 1/10000)**

niveau	PROB. 1/10000* AMORTIS. 9.4%		CHICOUTIMI N+ LONG. X 4.15 AMORTIS. 9.4%		EL-CENTRO NS# (1940) X 1.26 AMORTIS. 9.4%		MÉTHODE SIMPL SELON CHOPRA AMORTIS. 9.4%	
	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. amont $\sigma_{33}$ (kPa)	contr. aval $\sigma_{33}$ (kPa)
1	90	70	55	115	30	70	35	35
2	330	345	200	115	90	70	105	90
3	415	345	315	425	160	270	170	140
4	570	345	455	425	240	270	385	230
5	730	640	570	455	330	295	550	400
6	965	800	770	515	460	330	705	570
7	1165	805	970	655	590	405	825	725
8	1080	720	915	570	545	365	450	650

\* résultats d'une analyse dyn. effectuée à l'aide du spectre de réponse pour le site de Paugan (dyna23a)  
+ résultats d'une analyse dyn. effectuée à l'aide de l'accélérogr. de Chicoutimi Nord (dyna25)  
# résultats d'une analyse dyn. effectuée à l'aide de l'accélérogr. d'El Centro NS (dyna28)

**Note:** Aucun signe n'apparaît avec les contraintes à cause du renversement cyclique.