

Conception sismique du pont du boulevard Saint-Laurent

Sylvain Bédard, ing., M.Sc.A.
Ghislain Dionne, ing., Ph.D. génie civil
Christian Lemay, ing., M.Sc.

Pascal Beauséjour, ing., M.Sc.A.
Patrick Lamontagne, ing., M.Sc.A.

Dessau-Soprin
1200, boul. St-Martin Ouest, bureau 300
Laval (Québec)
H7S 2E4, Canada

GENIVAR
500, boul. Gréber, 3e étage
Gatineau (Québec)
J8T 7W3, Canada

RÉSUMÉ : Le pont du boulevard Saint-Laurent est une structure nouvellement conçue dont la construction a débuté à l'automne 2005. Il franchira la vallée du ruisseau des Fées dans le parc de la Gatineau. Puisque ce pont est situé sur un site écologique sensible et dans un secteur très visible du parc, la structure a été conçue de façon à répondre à des considérations environnementales et esthétiques.

Comme tous nouveaux ponts conçus au Canada, cet ouvrage imposant doit pouvoir résister aux forces importantes générées par un séisme. Dans le cas présent, les exigences sismiques se sont vues difficiles à adresser en raison des conditions de sol particulières et par l'exigence de construire les fondations en minimisant l'impact sur l'habitat naturel environnant.

Sans une sélection judicieuse de la position des appuis fixes, la pente importante de la fondation rocheuse aurait causé une différence de rigidité entre les piles. Cette différence de rigidité aurait mené à des problèmes de distorsion lors d'un tremblement de terre. Pour minimiser les effets de distorsion, différents types de fondation ont été adoptés afin d'assurer une rigidité uniforme. La distribution des efforts sismiques a été validée à l'aide d'un modèle tridimensionnel.

1. INTRODUCTION

Pour terminer la construction du boulevard Saint-Laurent à Gatineau, Québec, un tronçon de 1,7 km doit être complété entre la promenade du Lac-des-Fées et le boulevard St-Raymond traversant ainsi le parc de la Gatineau. Ce parc est la propriété de la Commission de la Capitale National du Canada. Le projet, estimé à 56 M\$, comprend les travaux routiers et la construction d'un pont de 290 m de longueur. La structure, d'une largeur de 30 mètres, enjambe le ruisseau des Fées en 4 travées continues de 60 m - 85 m - 85 m - 60 m (figure 1 et figure 2). La dalle de béton sera supportée par 8 poutres en acier d'une profondeur variant de 1,8 m à 4 m, espacées à 3,8 m centre à centre. Le coût de construction pour le pont uniquement est estimé à 27 M\$ et la construction s'échelonnait sur environ 2½ ans.

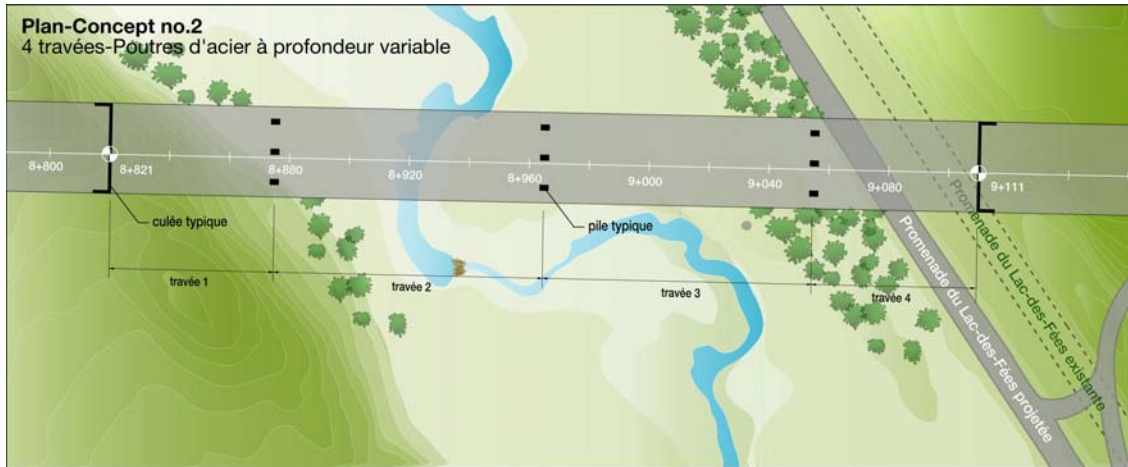


Figure 1 : Vue en plan

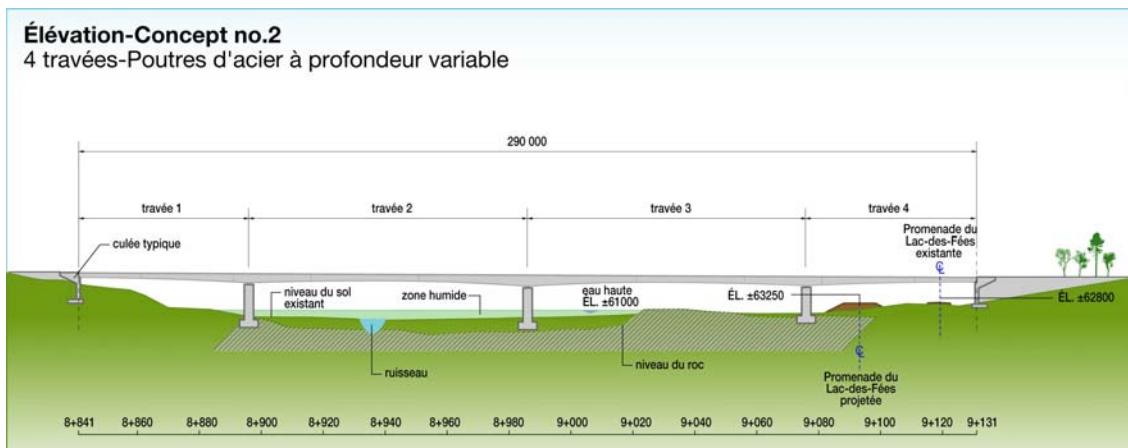


Figure 2 : Élévation

Le nouveau pont a été conçu suivant la dernière édition de la norme « Code canadien sur le calcul des ponts routiers » CAN/CSA-S6-00. Cette nouvelle norme inclut plusieurs modifications majeures du point de vue sismique comparativement aux éditions précédentes. La conception a davantage été compliquée par des conditions de sol difficiles. De plus, le parc de la Gatineau est un environnement naturel protégé et, par conséquent, la conception et les méthodes de travail préconisées se doivent de minimiser l'impact sur l'habitat naturel de plusieurs espèces animales et végétales.

2. CRITÈRES DE CONCEPTION

2.1 Code canadien (CAN/CSA-S6-00)

Le dernier code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00) a été officiellement mis en application par le ministère des Transports du Québec en 2002. Les éditions précédentes établissaient la force sismique en se basant uniquement sur les mouvements du sol et ne prenaient pas en considération les caractéristiques dynamiques de la structure.

Le dernier code utilise maintenant un spectre de réponses dynamiques, qui tient compte des caractéristiques de la structure, et introduit le concept de ductilité. Il introduit également

3 catégories d'importance qui dictent de quelle façon l'ouvrage devrait se comporter sous l'action d'un séisme :

- « Pont de secours » pour les ponts qui doivent être pleinement opérationnels après un tremblement de terre;
- « Pont d'urgence » pour les ponts qui doivent permettre au moins le passage des véhicules d'urgence après un tremblement de terre;
- « Autre » pour les ponts pour lesquels il n'est pas requis qu'ils soient opérationnels après un tremblement de terre, mais qui ne doivent toutefois pas s'effondrer.

Le choix de la catégorie applicable à une structure spécifique est principalement décidé par le propriétaire de l'ouvrage. Puisque le pont du boulevard Saint-Laurent n'est pas situé sur un axe prioritaire, et pour minimiser les coûts de construction, le propriétaire a décidé de classer ce pont dans la catégorie « Autre ».

Dans le code canadien, la force sismique, pour un mode « m » donnée, est déterminée par le produit du coefficient de réponse sismique élastique, C_{sm} , et de la masse équivalente du pont. Le coefficient est donné par :

$$C_{sm} = \frac{1,2 A I S}{T_m^{2/3}} \leq 2,5 A I \quad (\text{Eq.1})$$

Où A est le rapport d'accélération de la zone;
I est le facteur d'importance;
S est le coefficient de site
 T_m est la période du m^e mode de vibration de la structure.

La valeur du coefficient C_{sm} est consistante avec le spectre de réponse élastique de la norme AASHTO (1994) à l'exception que le facteur d'importance est explicitement inclus dans l'équation du code canadien.

Pour prendre avantage de la formation de rotule plastique dans la structure, le code canadien permet une réduction des forces obtenues à l'aide du spectre précédent en utilisant un facteur de modification « R ». Ce coefficient prend en compte la capacité de la structure à dissiper de l'énergie, la redondance des systèmes de retenue et la rigidité des éléments de fondation. Dans le cas du pont du boulevard Saint-Laurent, un facteur de modification de 3 a été utilisé dans la direction longitudinale. Dans la direction transversale, la hauteur des colonnes des piles est faible comparativement à la largeur. Les colonnes vont donc se comporter comme des piles-murs, et un facteur de modification de seulement 2 a été utilisé.

2.2 Esthétique et environnement

Le pont est situé près d'une zone urbaine mais à l'intérieur des limites du parc de la Gatineau. Le parc est dédié à la protection de la nature et il reçoit également plusieurs touristes chaque année. Une piste cyclable traversera le pont alors qu'une route de service, le ruisseau des Fées et une autre piste cyclable passeront sous la structure. L'aspect visuel de la structure est donc très important. Le concept final est esthétiquement attrayant. Un profil à profondeur variable et le nombre réduit de travées lui donne une allure élancée et raffinée. De plus, pour mieux intégrer

l'ouvrage dans son environnement, le propriétaire a choisi de peindre les poutres d'un gris pâle métallique afin d'en rehausser l'aspect.

La vallée sous le pont est sillonnée par un ruisseau bordé de terres marécageuses. La pile centrale sera construite directement au milieu du marais alors que les deux autres seront construites juste à l'extérieure des limites des terres humides. Des mesures de mitigation ont été intégrées aux documents contractuels pour compenser la perte d'habitat du poisson. De plus les excavations et le remaniement du sol doivent être limités au minimum durant la construction et tous les matériaux apportés sur le site doivent être récupérés à la fin des travaux.

La faible profondeur d'eau dans le marais et la présence de végétation empêchent l'utilisation de barge sur le site, mais la proximité du roc permet la construction d'un pont temporaire. Celui-ci doit être érigé sur des pieux forés et permettre un dégagement minimum de 1 m au-dessus du niveau des eaux afin de permettre le libre écoulement de l'eau. Pour être en mesure de satisfaire tous les critères environnementaux, 2,8 M\$ seront dépensés pour la construction et la démolition pont temporaire et le chemin d'accès au site.

Le concept final du pont est un compromis entre le respect de l'environnement, les critères d'esthétique et un coût de travaux raisonnable.

3. CONCEPTION SISMIQUE

3.1 Conditions de sol (méthodologie et résultats)

Avant de procéder à la conception de l'ouvrage, il était primordial de connaître la composition du sol et le profil du roc. Une équipe de géotechniciens a utilisé la méthode de réfraction sismique pour déterminer la position approximative du roc. À partir des informations préliminaires ainsi obtenues, une campagne de forages a été demandée aux emplacements des unités de fondations projetées afin d'obtenir des résultats plus précis à ces endroits. Les résultats obtenus par la méthode de réfraction sismique ont permis de débiter la conception du pont avant que les résultats des forages ne soient disponibles. Cette méthodologie a été utilisée car elle permet de réduire les effets négatifs sur l'environnement en réduisant le travail requis à l'intérieur des limites du marais. La campagne de forage a eu lieu durant l'hiver en utilisant un pont de glace, ce qui réduit également les impacts négatifs sur l'environnement.

Le profil du roc obtenu par la méthode de réfraction sismique était relativement droit avec une légère pente dans la direction longitudinale du pont. Cependant, le concept pour les fondations a dû subir d'importants changements lorsque les résultats des forages ont été obtenus. Les échantillons prélevés montrent une pente longitudinale du roc plus importante que prévue ainsi que des pentes transversales pouvant aller jusqu'à 1V :2H pour les deux piles situées du côté *ouest*. De plus, les résultats montrent que les pentes transversales à ces deux piles sont inversées l'une par rapport à l'autre (figure 3).

3.2 Concept sismique choisi

Le système structural, qui doit résister aux forces sismiques, adopté pour la conception du pont du boulevard Saint-Laurent suit les lignes directrices de la norme S6-00 : des éléments de fondation ductiles qui, par la formation de rotules plastiques, dissipent une partie de l'énergie

transmise à la structure durant un tremblement de terre et l'énergie non dissipée se traduit par des forces de conception sismique équivalentes agissant sur la structure.

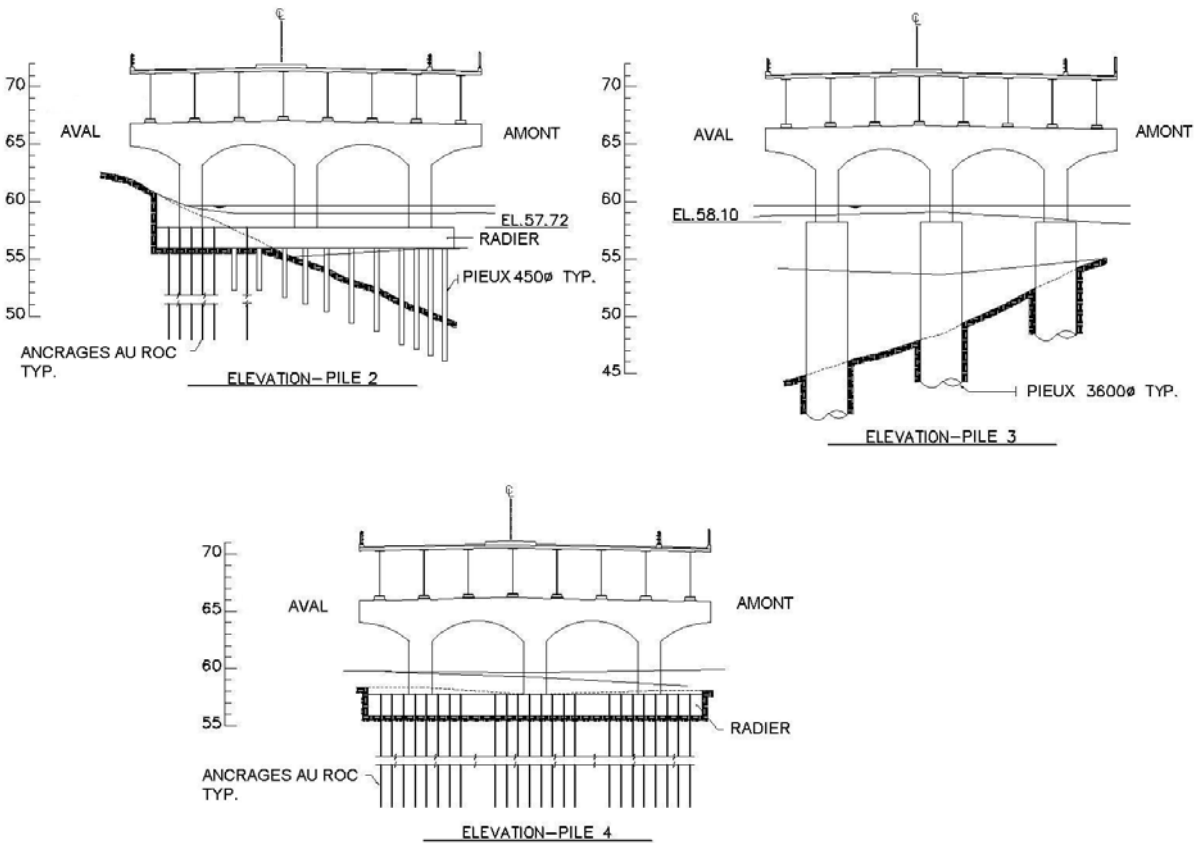


Figure 3 : Piles

Différents systèmes structuraux ont été étudiés pour résister aux forces sismiques. Le concept retenu a été choisi en tenant compte des conditions de sol inhabituelles, des critères environnementaux, de la facilité de construction et du coût de construction. Le défi principal vient du fait que la hauteur des colonnes d'une pile, mesurée à partir du roc jusqu'au-dessous des chevêtres, varie d'une colonne à l'autre en plus d'être différente d'une pile à l'autre. Cette particularité géométrique induirait une concentration de demande en ductilité dans les colonnes plus courtes à cause de leurs rigidités relatives plus élevées. Ainsi, une pile formée de colonnes de longueurs différentes est plus sujette à une plastification séquentielle de ces colonnes plutôt qu'à une plastification simultanée. Il est donc inapproprié de considérer les résultats obtenus d'une analyse linéaire pour ce genre de situation et la norme S6-00 recommande d'uniformiser la ductilité des éléments de fondation afin d'obtenir une plastification simultanée des piles ou des colonnes.

Système de retenue transversale

À l'origine du projet, les cinq unités de fondations - culées 1 et 5 et les piles 2, 3 et 4 – devaient servir à transférer les forces sismiques transversales à la fondation rocheuse. L'objectif a donc été

de transformer les piles de sorte qu'elles se comportent toutes de façon similaire et obtenir un comportement symétrique pour l'ensemble du pont. Comme la pile 4 est située sur une surface de roc plane, elle est devenue la référence en terme de comportement transversal à reproduire sur les autres piles. Les fondations des piles 2 et 3 ont dû être adaptées pour répondre à cet objectif.

Le système de résistance transversal qui a été finalement mis de l'avant diffère légèrement du concept d'origine, car seules les culées 1 et 5 et les piles 2 et 4 sont utilisées pour transférer les forces sismiques à la fondation rocheuse. Suite aux analyses, il est devenu apparent qu'utiliser la pile centrale, soit la pile 3, afin de transmettre les charges sismiques était la solution la moins avantageuse. Une raison évidente de ce fait est que la force de conception sismique totale sur l'ouvrage diminue lorsque la pile 3 ne fait pas partie du système de retenue transversal puisque la rigidité globale du tablier diminue (les forces transversales sont présentées à la section 4.1). Puisque les efforts sur cette pile sont moins élevés, il est également devenu possible de prolonger les colonnes de la pile centrale jusqu'à la surface de roc incliné en utilisant des caissons d'acier emboîtés dans le roc (figure 3). Durant la construction, les caissons de grande dimension vont émerger de la surface du marais, ce qui produira un espace de travail fermé pour ériger la structure et ainsi diminuer les effets négatifs sur le marais dans ce secteur.

Les culées 1 et 5 ainsi que la pile 4 ont une géométrie très régulière. Leur fondation repose directement sur une surface de roc plane située près de la surface. Pour ce qui est de la pile 2, un monticule rocheux émerge de la surface du marais du côté aval. Il est utilisé comme point d'ancrage pour un radier qui va pouvoir transmettre les efforts horizontaux au roc. Ce radier est situé à la même élévation que la semelle de la pile 4, ce qui a pour résultat d'obtenir des hauteurs similaires pour toutes les colonnes des piles 2 et 4. Des pieux verticaux sont introduits sous l'extrémité amont du radier afin de reprendre les efforts verticaux. Les pieux sont emboîtés dans le roc pour empêcher tout glissement de leur base.

Le système de retenue transversal choisi inclut plusieurs types de fondation mais donne plusieurs avantages à la résistance sismique du pont du boulevard Saint-Laurent :

- Il uniformise la rigidité des éléments de fondation réduisant ainsi le risque de plastification séquentielle des colonnes;
- Il permet un comportement symétrique du pont avec une distribution uniforme des efforts aux éléments de fondation similaires;
- La formation des rotules plastiques se produit à des endroits accessibles permettant de procéder aux inspections et aux réparations, si requis, suite à un séisme.

Système de retenue longitudinale

Les forces sismiques longitudinales induites dans cette structure de 290 m de long sont transférées à la pile 4 pour les raisons suivantes :

- La retenue à la pile offre une meilleure dissipation de l'énergie qu'une retenue à la culée, car la pile est plus ductile;
- La plastification des colonnes se fera simultanément puisqu'elles sont toutes de la même longueur à cause de la fondation rocheuse plane à cet endroit;
- Facilité de construction, puisqu'il s'agit de la seule pile entièrement à l'extérieur du marais.

La charge morte agissant sur cette pile est cependant insuffisante pour résister au moment de renversement induit par un tremblement de terre. Des ancrages en acier à haute performance de 65 mm de diamètre, espacés à 1 m centre-à-centre, sont donc requis pour maintenir la pile en place pendant un séisme.

4. CONCEPTION STRUCTURALE

4.1 Analyse

Selon le code canadien, la méthode de la charge uniforme, qui est une méthode d'analyse simplifiée, aurait pu être utilisée pour déterminer les efforts sismiques agissant sur la structure. Cependant, puisque le pont est libre de se déplacer transversalement à la pile centrale et à cause de l'importance de l'ouvrage, il a été décidé qu'il serait plus approprié d'utiliser la méthode d'analyse spectrale multimodale.

Les efforts sismiques sur le pont ont été déterminés en utilisant un modèle du pont en trois dimensions. La dalle de béton était représentée par des éléments finis et les poutres, les diaphragmes et les contreventements étaient représentés par des éléments de poutre. La rigidité des culées et des piles a été prise en compte en utilisant des supports élastiques pour les piles, et des supports fixes pour les culées. Le poids total du tablier (incluant la dalle, les poutres, le pavage et les glissières) utilisé dans l'analyse est estimé à 11 200 tonnes.

Dans la direction longitudinale, la structure ne dispose que d'un point fixe et la réaction totale dans cette direction est environ 21 100 kN. Dans la direction transversale, tel que spécifié dans le code canadien, plusieurs modes de vibration sont requis afin d'obtenir au moins 90 % de la masse modale participante. La réponse de la structure pour chaque mode est alors combinée en utilisant la méthode CQC (Complete Quadratic Combination). Les réactions transversales sur chaque culée et pile sont montrées dans le tableau 1 pour les cas où les appuis latéraux de la pile centrale sont libres ou retenus. Les forces indiquées proviennent d'une analyse élastique et ne prennent pas en compte le facteur de modification R.

Tableau 1 : Forces transversales sur les culées et les piles

	Pile 3 fixe (kN)	Pile 3 mobile (kN)
Culée 1	3 250	5 360
Pile 2	12 490	15 570
Pile 3	18 050	0
Pile 4	11 070	16 070
Culée 5	3 230	5 230

Dans le cas où tous les appuis sont fixes transversalement, la force maximum se retrouve à la pile centrale. Si les appuis de la pile centrale sont libres, on remarque une augmentation des forces générées sur les autres piles mais, puisqu'elles sont localisées à l'extérieur du marais, il est plus facile de construire des fondations qui pourront mieux résister aux efforts en minimisant l'impact sur l'environnement. Il est également intéressant de noter que la force transversale totale est seulement de 42 200 kN lorsque la pile 3 est libre, comparé à 48 100 kN lorsque toutes les piles sont fixes.

4.2 Retenues

Le tablier du pont doit être adéquatement retenu dans les deux directions pour être en mesure de transmettre les efforts sismiques du tablier vers les unités de fondation. Longitudinalement, tous les appuis à élastomère confiné sont mobiles sauf à la pile 4, où les appareils d'appuis seront conçus pour résister aux efforts. Cependant, pour un pont large localisé dans une région où la température de l'ossature peut varier entre 43 °C et -29 °C, les forces dues à la dilatation thermique peuvent devenir un problème si tous les appuis sont retenus. Les appuis ont donc été conçus pour permettre les déformations dues aux variations de température dans la direction transversale.

Pour être en mesure de reprendre les grands mouvements qui se produiront durant un séisme, une série de butées en acier (figure 4) a été conçue en gardant toutefois un espace de 10 mm entre les surfaces de contact pour permettre les plus petits mouvements causés par la variation de température. De plus, les surfaces de contact sont recouvertes d'un néoprène pour pouvoir absorber les impacts lorsque des mouvements rapides se produiront.

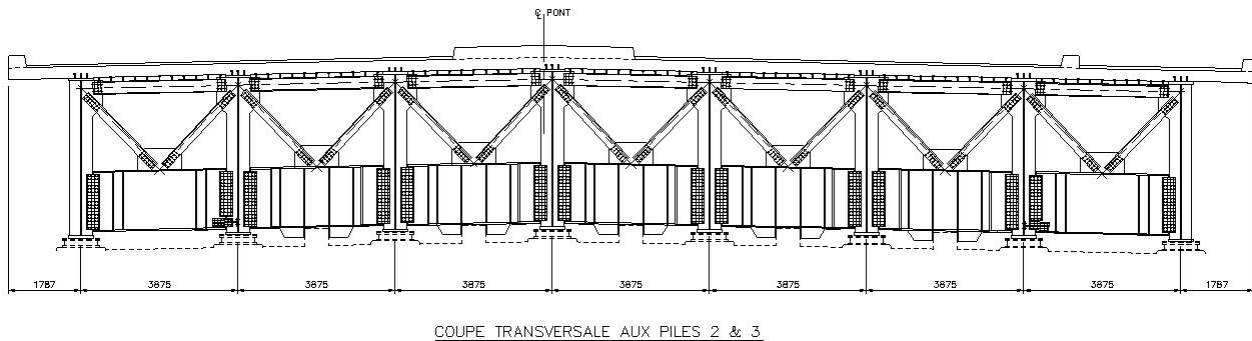


Figure 4 : Retenues transversales

Les contreventements et les butées en acier ont été conçues pour demeurer élastiques sous une charge égale à 1,25 fois les forces sismiques générées dans la structure. Cette pondération a été appliquée afin de s'assurer que la résistance aux limites ultimes de ces éléments n'était pas atteinte avant d'avoir pleinement développé la rotule plastique dans les piles.

5. CONCLUSION

La construction du pont du boulevard Saint-Laurent a débuté récemment et sera complétée à la fin de 2007. Ce fût un défi de rencontrer toutes les exigences de la norme S6-00 concernant les critères de conception sismique pour cette structure de 290 m de long par 30 m de large. La protection de l'environnement, les critères d'esthétisme et les pentes importantes de la fondation rocheuse furent les principaux éléments qui ont dicté la conception de cet ouvrage.



Figure 5 : Concept proposé

Le principal défi relevé concernant la conception parasismique a été de concevoir des éléments de fondation dont la rigidité est uniforme en empiétant le moins possible sur l’habitat naturel environnant en cours de construction. Libérer le mouvement des appareil d’appuis de la pile centrale dans la direction transversale a permis d’éliminer les efforts à cette pile dans les deux directions et ainsi éliminer le besoin de construire un radier comme à la pile 2. Par conséquent, le volume d’excavation dans le marais a pu être réduit tout en maintenant la rigidité globale de l’ouvrage symétrique.

6. RÉFÉRENCES

1. CSA International, “Canadian Highway Bridge Design Code. CAN/CSA-S6-00”, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada 2000;
2. Verreault, N., Bouteldja, M., Bonaccio, R., Roy, S., “Viaduc McConnel-Laramée, Lac-des-Fées, Gatineau, Québec, Étude Géotechnique”, LVM-Fondatec Réf 330309-100-GE-001-03, Juin 2004;
3. Guitard, A., Sévigny, É., Mugemana, D., Dickey, R., Simonyi, G., Jones, R., Walsh, G., “Construction de l’axe McConnell-Laramée entre l’autoroute 50 et le chemin de la montagne, Loi canadienne sur l’évaluation environnemental, Rapport d’examen préalable.”, Transports Canada, Pêches et Océans Canada et la Commission de la Capitale National, Mai 2003;