

INTERACTIONS « SOLS – STRUCTURES » : CONSTRUCTION DES 3 PONTS DE LA RIVIÈRE CABANO

Denis Lessard, ing. M. Sc.

Module surveillance, Service de la conception des structures, ministère des Transports du Québec

930, chemin Sainte-Foy, 2e étage, Québec (Québec), G1S 4X9

RÉSUMÉ :

Lors de la construction des fondations profondes des ponts de l'autoroute 85 et du boulevard Industriel au dessus de la rivière Cabano, plus spécifiquement durant les travaux de vibrofonçage des pieux caissons, les culées du pont adjacent Phil-Latulippe nouvellement construit se sont légèrement déplacées vers la rivière. Plusieurs campagnes de caractérisation géotechnique des sols porteurs ont été réalisées et des travaux spéciaux de stabilisation ont été exécutés aux abords des fondations de ces 3 ponts. Des programmes de surveillance ont été instaurés pour le suivi du comportement des ponts et les pieux caissons du pont Phil-Latulippe ont fait l'objet d'une étude structurale, incluant l'interaction sol-structure.

1. INTRODUCTION

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a débuté en 2005, des investigations géotechniques pour appuyer la reconfiguration de la route 185 en autoroute 85. La construction de l'autoroute 85 a été motivée par l'importance du trafic lourd qui transite régulièrement entre le Québec et le Nouveau-Brunswick et les accidents graves qui sont survenus sur la route 185 depuis plusieurs décennies. Parmi les travaux majeurs qui ont été initiés par le MTQ, le pont à 3 travées de la route 185 qui enjambait la rivière Cabano a été remplacé par 3 ponts adjacents à une travée (59 m chacune) :

Pont P-13816 (3 travées) remplacé par : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Pont P-11888N (rue Phil-Latulippe)} \\ \text{Pont P-11940 (autoroute 85), axe de la route 185} \\ \text{Pont P-11888S (boulevard Industriel)} \end{array} \right.$

Le site des 3 ponts est localisé dans la ville de Cabano, à environ 30 minutes de route à l'est de Rivière-du-Loup. Les ponts sont situés au dessus de la rivière Cabano, tout près de l'embouchure qui se déverse dans le grand lac Témiscouata.

Figure 1 :
Localisation du site



2. CONCEPTION ET CONSTRUCTION DU PONT PHIL-LATULIPPE

2.1 Étude géotechnique

Le MTQ a réalisé en 2006, l'étude géotechnique pour la construction du pont Phil-Latulippe. Cette étude a mis en relief le caractère très lâche des sols granulaires aux abords de la rivière Cabano.

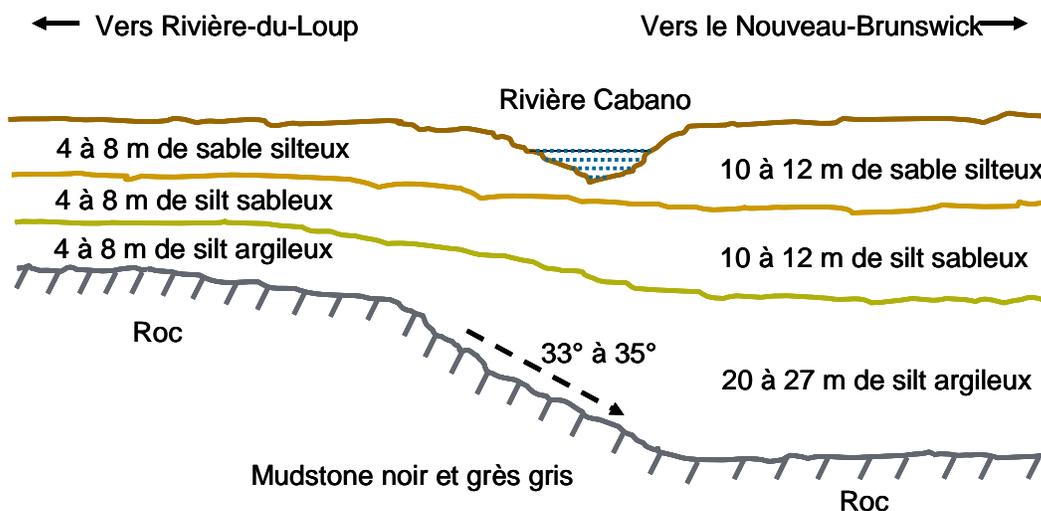
La figure 2 illustre la coupe stratigraphique des sols aux abords de la rivière Cabano, vis-à-vis les fondations du pont Phil-Latulippe. Voici un résumé descriptif des sols :

- ❖ Sur la rive nord (côté Rivière-du-Loup), de la surface jusqu'au roc : 4 à 8 m de sable silteux, 4 à 8 m de silt sableux et finalement 4 à 8 m de silt argileux.
- ❖ Sur la rive sud (côté Nouveau-Brunswick), de la surface jusqu'au roc : 10 à 12 m de sable silteux, 10 à 12 m de silt sableux et finalement 20 à 27 m de silt argileux.

L'épaisseur des couches de sols augmente significativement de la rive nord à la rive sud de la rivière, soit d'environ 20 m à 50 m d'épaisseur. Sous la rivière, le roc plonge vers le sud avec un angle apparent de 33 ° et 35 °. Les horizons de sable et de silt ont une compacité lâche à très lâche. Les analyses statiques (simplifiées) et dynamiques (complexes) du potentiel de liquéfaction ont démontré que les deux couches supérieures de sols (sable et silt) sont susceptibles de se liquéfier suite à un tremblement de terre majeur (magnitude de 6,9 et plus).

Figure 2 :

COUPE STRATIGRAPHIQUE - RIVIÈRE CABANO



Avant le tremblement de terre, les couches de sable et de silt saturées d'eau subissent une pression interstitielle « normale » (colonne en bleu, figure 3) et le squelette granulaire se maintient en place grâce à la pression intergranulaire (flèches blanches, figure 3).

Pendant un séisme majeur, la pression interstitielle augmente subitement et la pression intergranulaire chute toute aussi rapidement au point que les grains de sol perdent contact entre eux, ce qui provoque la liquéfaction du sol.

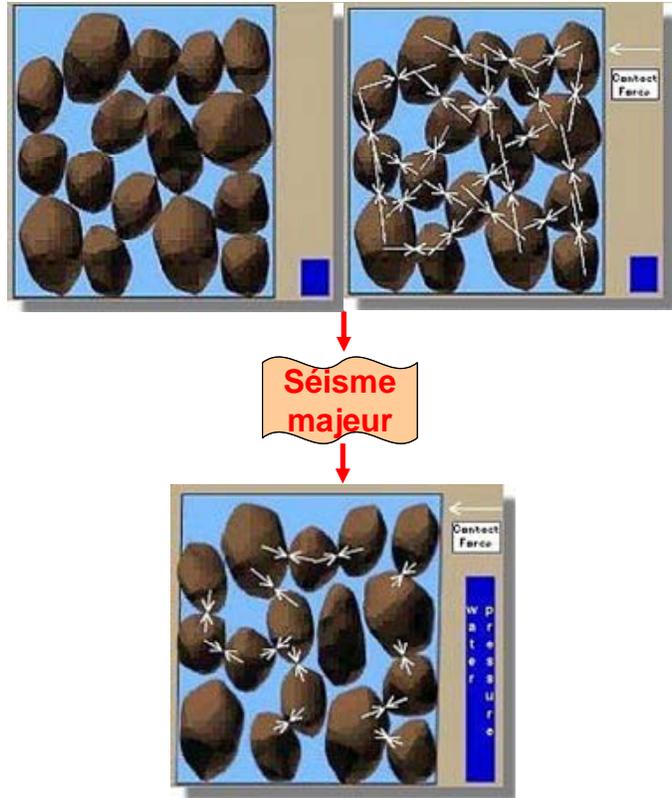
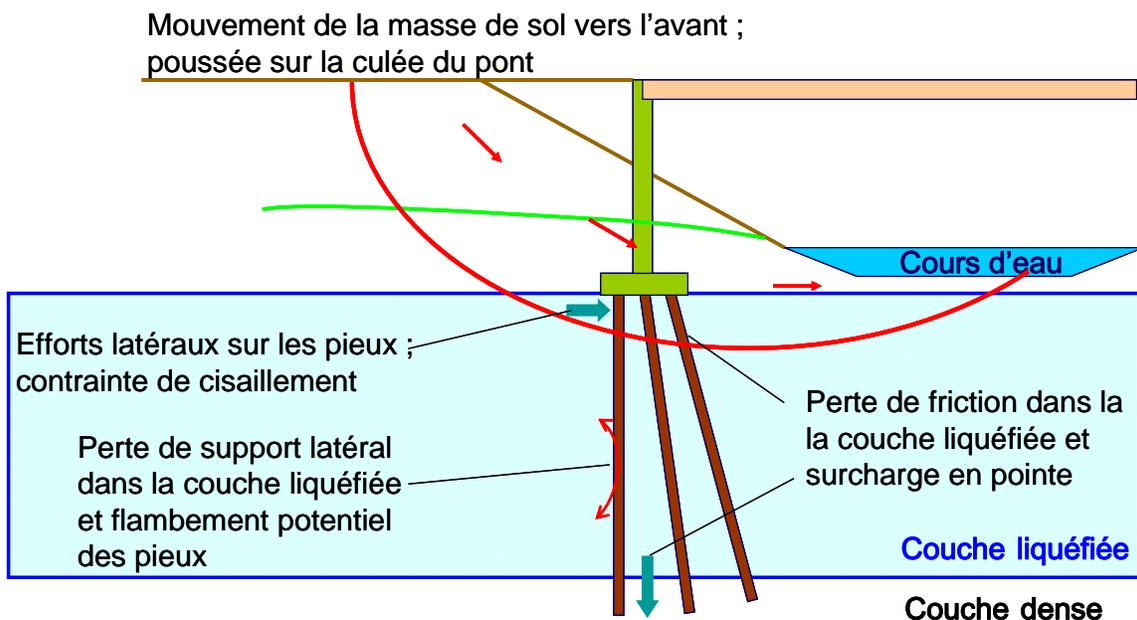


Figure 3 :
Liquéfaction des sols

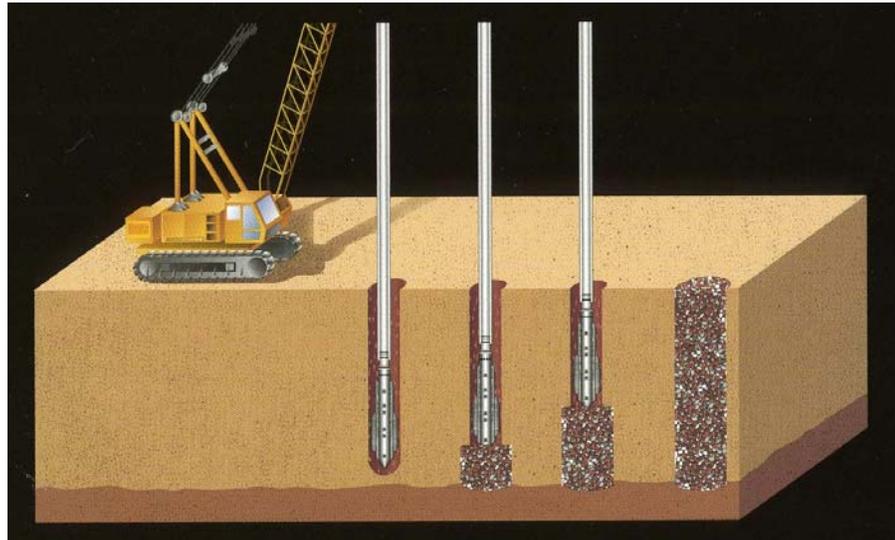
Les conséquences d'une liquéfaction des sols peuvent être catastrophiques pour les fondations d'un pont. La figure 4 illustre un exemple classique où un glissement de terrain est provoqué par la liquéfaction d'un horizon de sol granulaire lâche.

Figure 4 : Conséquences d'une liquéfaction des sols



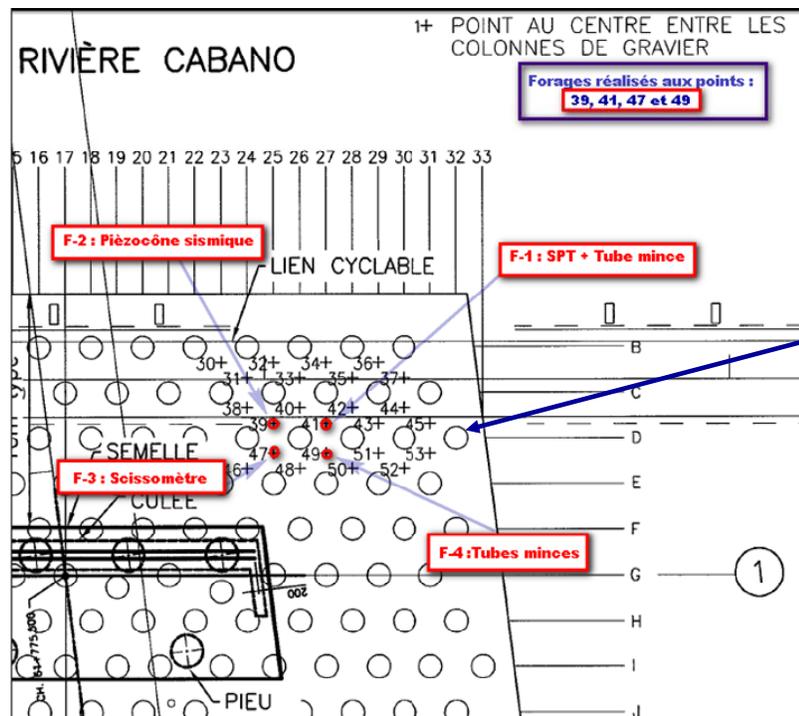
Afin d'éviter cette situation, les sols porteurs ont été densifiés à l'aide de la méthode de vibroremplacement qui consiste à insérer des colonnes de pierre selon un patron prédéterminé. La figure 5 illustre la méthode utilisée à Cabano : un vibreur est descendu jusqu'à la couche de silt argileux et des granulats sont acheminés par le conduit interne, pendant que le vibreur remonte lentement vers le haut, construisant ainsi une colonne de pierre. Les sols autour de celle-ci se densifient par le passage du vibreur qui repousse latéralement les sols.

Figure 5 :
Densification par vibroremplacement



La figure 6 montre une partie des sols densifiés selon un patron triangulaire. Les distances entre les colonnes de pierre sont de 2,25 m centre-centre et les diamètres des colonnes mesurent 0,99 m ou 1,14 m. Le taux de remplacement varie entre 18 et 23 %. Les zones de sols traités sont étendues à un pourtour de 10 m au-delà des semelles de fondation.

Figure 6 :
Patron de densification

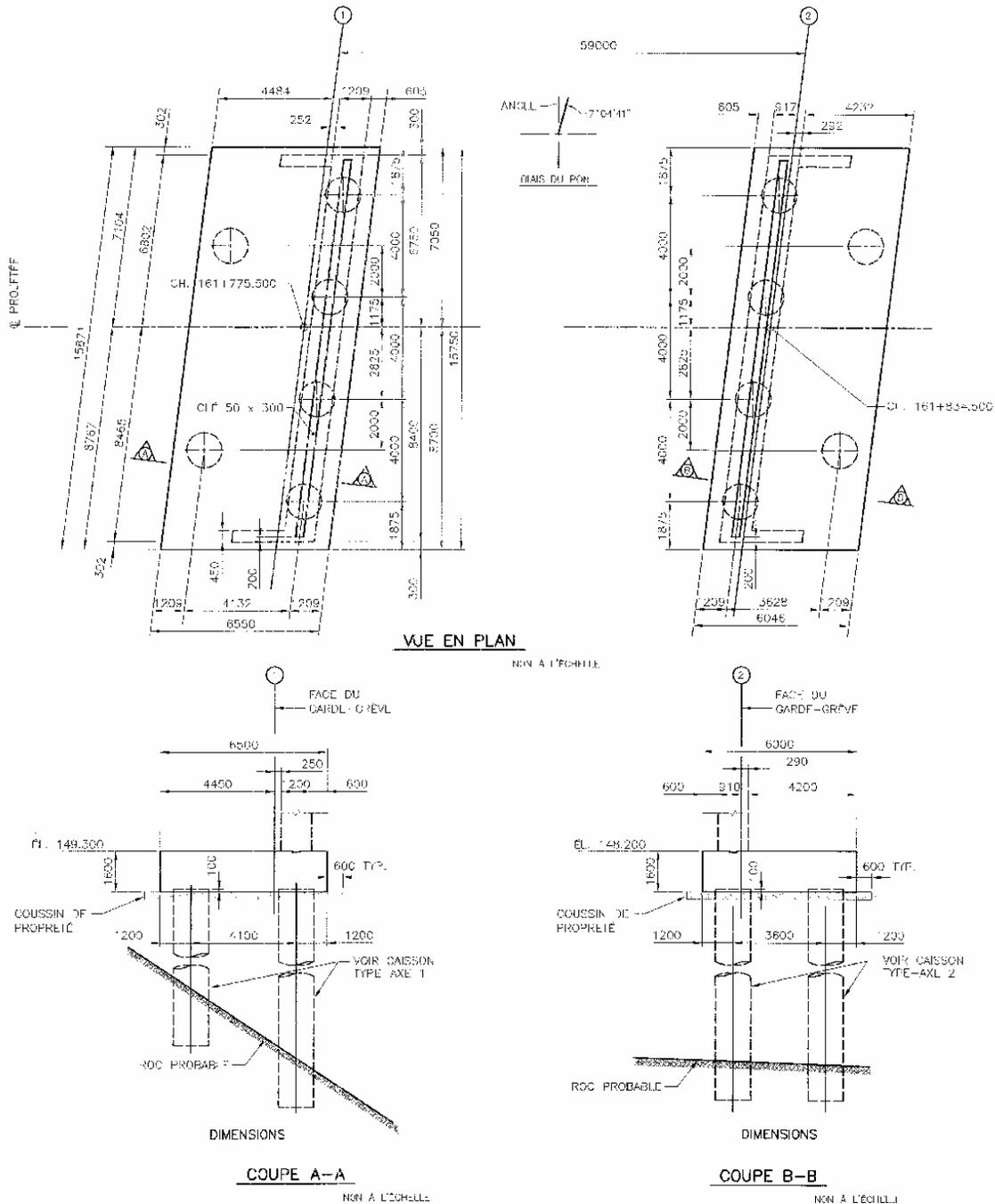


**Vibro-
densification
par insertion
de colonnes
de pierre**

2.2 Plans du pont Phil-Latulippe — fondations

Les culées du pont Phil-Latulippe s'appuient sur des semelles supportées chacune par 6 pieux caissons de 1,3 m de diamètre chacun. Chaque semelle contient une première rangée de 4 pieux caissons suivie d'une deuxième rangée de deux pieux caissons situés plus vers l'arrière par rapport à la rivière (figure 7). L'usage de pieux conventionnels a été écarté en raison de la pente accentuée sous la semelle nord du pont et aussi des grandes charges combinées, notamment celles générées par la friction négative.

Figure 7 : Fondations profondes du pont Phil-Latulippe



2.3 Construction du pont Phil-Latulippe – Historique des travaux

La construction du pont Phil-Latulippe s'est étendue sur les années 2006 et 2007. Après la pose du tablier et son bétonnage au cours de l'été 2007, nous avons observé un léger déplacement de la culée nord vers la rivière Cabano. Un programme de surveillance a été instauré pour suivre le comportement des deux culées. Entre juillet et novembre 2007, nous avons observé de faibles déplacements (lents) des culées vers la rivière. Aucun déplacement apparent n'a été noté entre novembre 2007 et février/mars 2008 (joint de dilatation demeuré intact...).

Le pont Phil-Latulippe a été mis en service en septembre 2007 et la circulation de la route 185 a été détournée sur ce nouveau pont (desserte est). Le pont de la route 185 a été démoli en novembre 2007.

3. CONCEPTION ET MODIFICATION DU PROGRAMME DE TRAVAIL POUR LA CONSTRUCTION DE L'AUTOROUTE 85 ET DU BOULEVARD INDUSTRIEL

3.1 Étude géotechnique

L'étude géotechnique pour les ponts de l'autoroute 85 et du boulevard Industriel a été réalisée par le MTQ en 2007. Tout comme le projet de construction du pont Phil-Latulippe, il y a une présence importante de sols potentiellement liquéfiables situés sur un horizon de silt argileux. Les sols porteurs sous les 4 culées de ces ponts ont également été densifiés par la méthode du vibroremplacement.

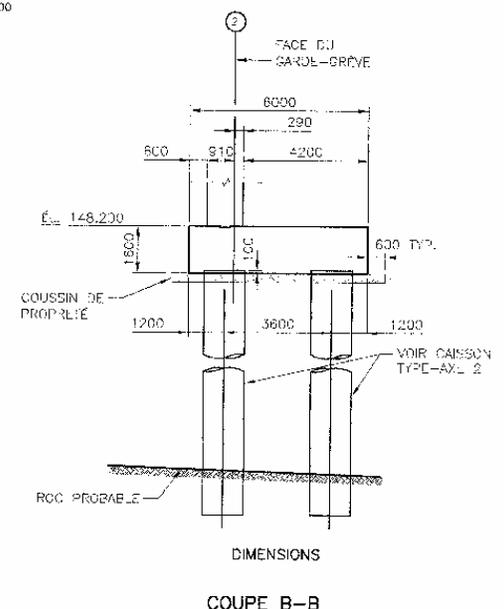
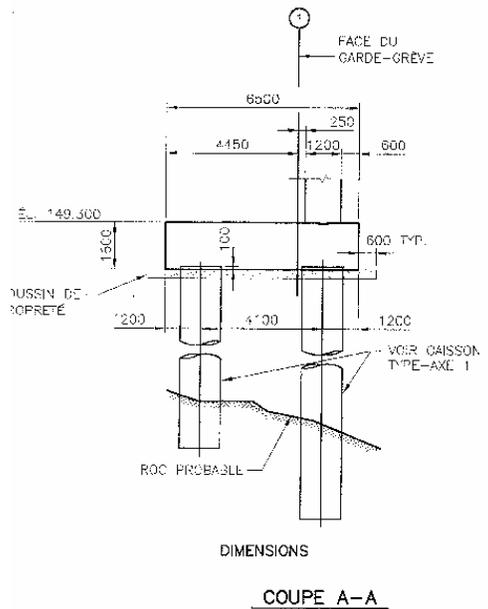
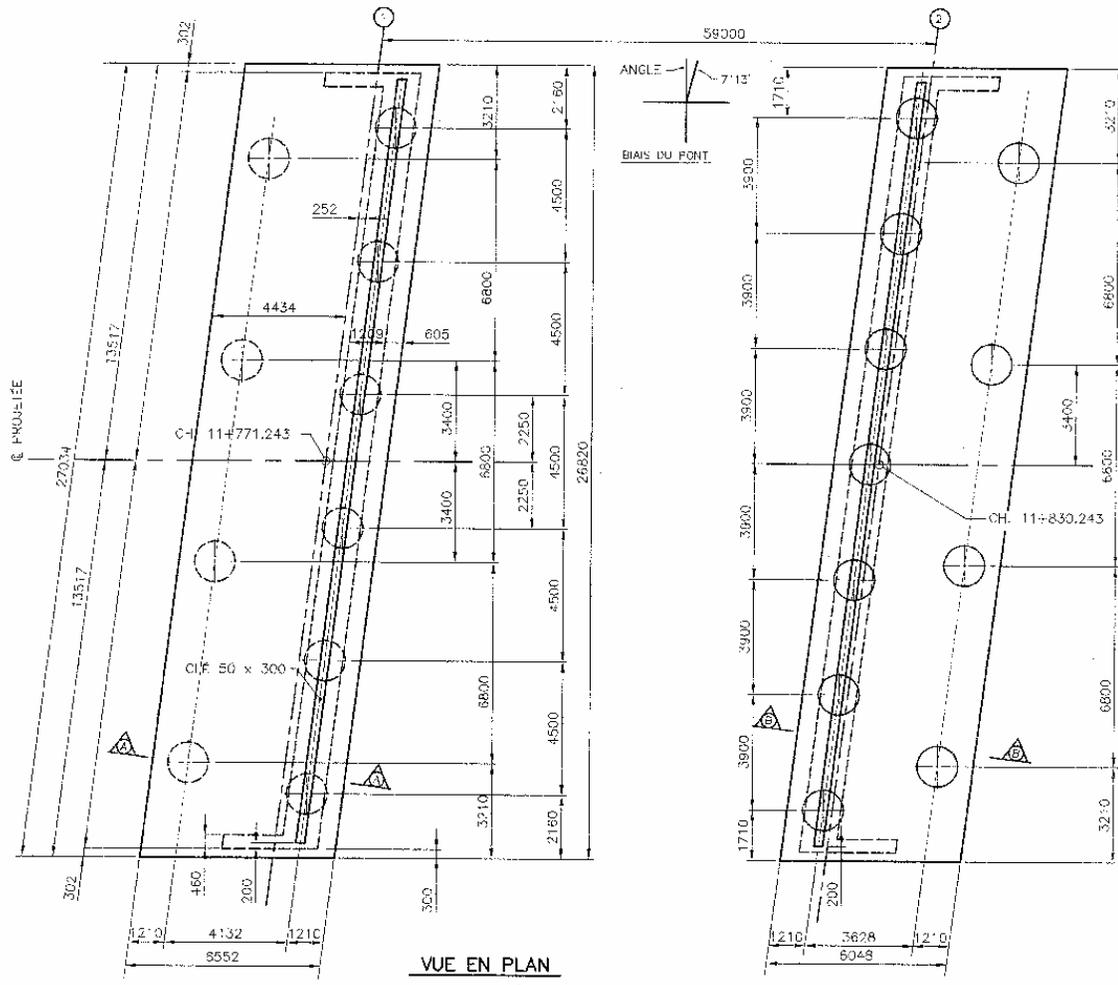
3.2 Plans du pont de l'autoroute 85 — fondations

Les fondations profondes du pont de l'autoroute 85 sont constituées comme suit (figure 8) :

- ❖ Semelle nord : 10 pieux caissons de 1,3 m de diamètre chacun (6 en avant et 4 en arrière)
- ❖ Semelle sud : 11 pieux caissons de 1,3 m de diamètre chacun (7 en avant et 4 en arrière)

Les fondations du pont Industriel sont moins imposantes : semelle nord : 4 pieux caissons de 1,3 m de diamètre chacun (2 en avant et 2 en arrière), semelle sud : 5 pieux caissons de 1,3 m de diamètre chacun (3 en avant et 3 en arrière).

Figure 8 : Fondations profondes du pont de l'autoroute 85



La figure 9 montre les 7 pieux caissons avant de la semelle sud du pont de l'autoroute 85.

Figure 9 : Vue des pieux caissons – semelle sud, mars 2008



3.3 Construction des ponts de l'autoroute 85 et du boulevard Industriel – Historique des travaux

Les travaux de construction de ces deux ponts se sont étendus de 2007 à 2009. Pendant le fonçage des pieux caissons du pont de l'autoroute 85, en février/mars 2008, nous avons observé une reprise marquée des mouvements latéraux des culées du pont Phil-Latulippe vers la rivière Cabano. Plusieurs actions ont été prises afin de stabiliser les culées de ce pont et des réparations ont été effectuées sur le pont Phil-Latulippe et aux approches : joints de dilatation, tiges d'ancrage, appareils d'appui, dalles d'approche, chaussée...

Avant l'intervention du MTQ, selon les témoignages du surveillant de chantier, les vibrations ressenties, lors du vibrofonçage, étaient plus fortes que celles ressenties lorsque deux sismographes ont été installés pour le contrôle des vibrations. En mars 2008, suite au déplacement subit des culées du pont Phil-Latulippe, des restrictions ont dû être imposées sur l'usage des vibrofonçeurs utilisés pour l'insertion des pieux caissons du pont de l'autoroute 85. Nous avons imposé une limite de la vitesse des particules à 5 mm/s et la fréquence des ondes devait être au moins 1,5 fois supérieure à la fréquence de résonance du système

« vibrofonçeur/pieu caisson/sol », afin d'éviter ou de minimiser une déstructuration des sols et la dégradation de leur résistance latérale. Des études européennes ont démontré que l'effet de résonance rend plus difficile le fonçage des pieux.

Suite aux dommages observés sur le pont Phil-Latulippe, nous aussi avons apporté des modifications aux plans et devis de construction des ponts de l'autoroute 85 et du boulevard Industriel :

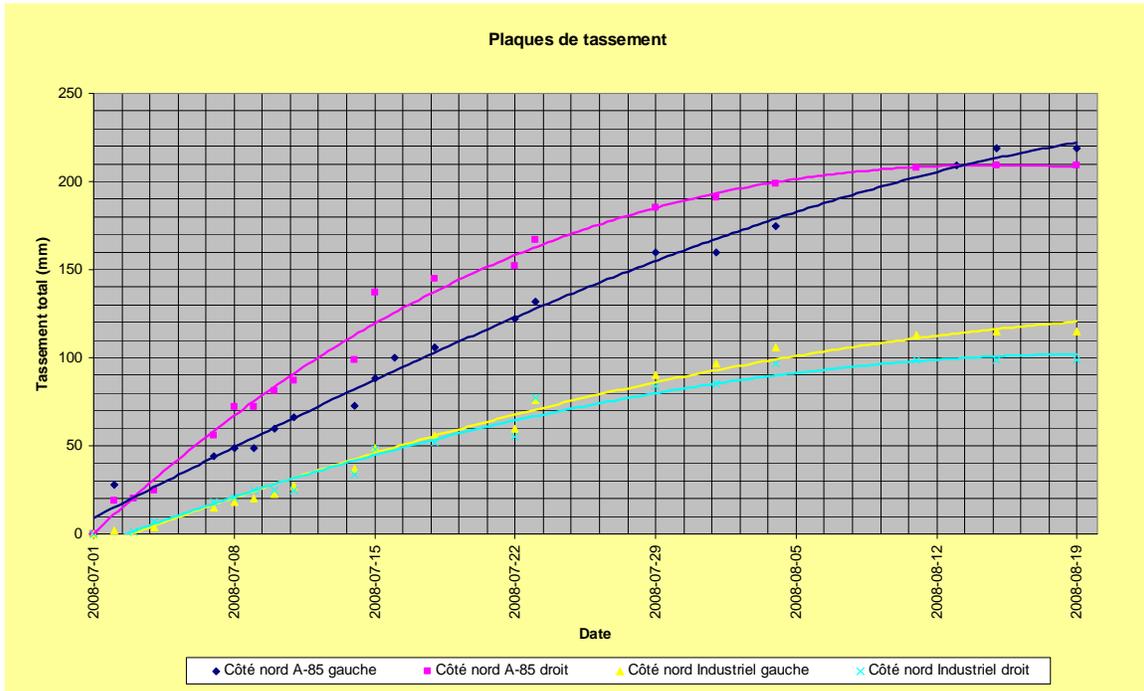
- ❖ Construction de remblais structuraux au pied des culées des ponts, juin et juillet 2008, afin d'augmenter l'effet de butée (figure 10).
- ❖ Mise en place de remblais de préchargement vis-à-vis les futures fondations des culées, juillet et août 2008, afin de provoquer rapidement à l'avance les tassements dans les sols granulaires plus ou moins compacts (cela malgré leur densification par vibroremplacement).
- ❖ Construction de petits remblais légers en forme de pyramide inversée à l'arrière des culées, été et automne 2009, afin de minimiser les poussées latérales sur les culées.
- ❖ Mise sur pied de plusieurs programmes d'instrumentation pour le suivi des mouvements des 3 ponts : inclinomètre pour le pont Phil-Latulippe, suivi des tassements aux approches des ponts et suivi des déplacements des 6 culées.

Figure 10 : Construction d'un remblai structural au pied de la culée nord du pont Industriel, juin 2008



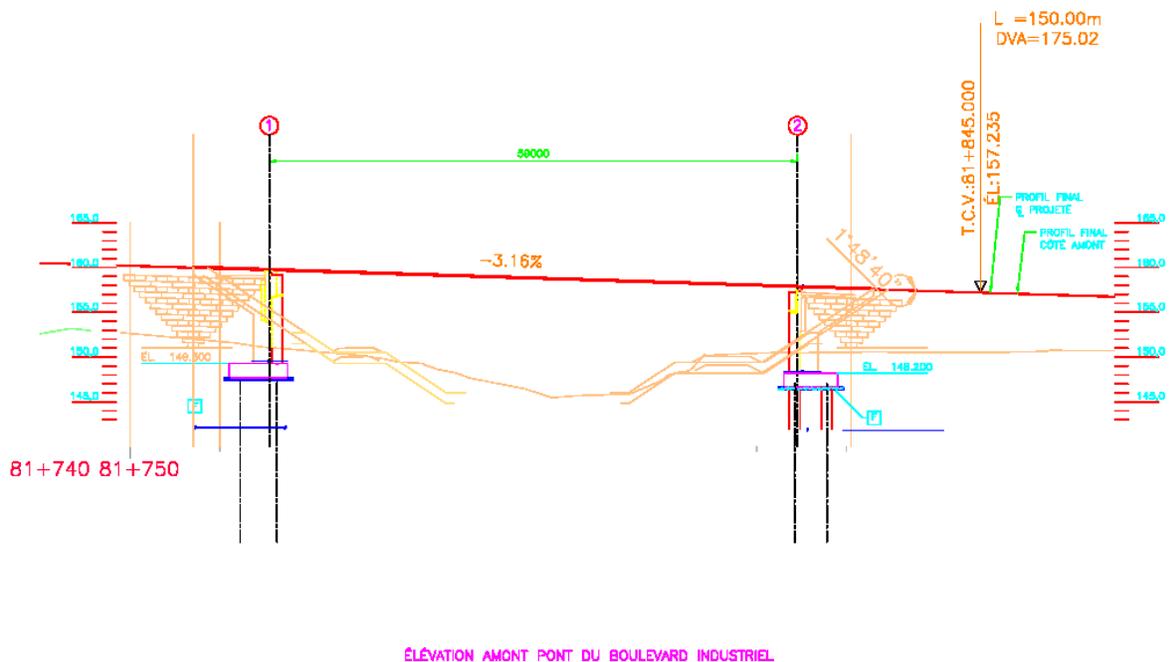
Huit plaques de tassement ont été installées pour suivre les effets du préchargement des sols porteurs situés sous les semelles des ponts de l'autoroute 85 et du boulevard Industriel. Les courbes de tassement se sont stabilisées après un délai d'environ 7 semaines (figure 11).

Figure 11 : Suivi des tassements sous les remblais de préchargement



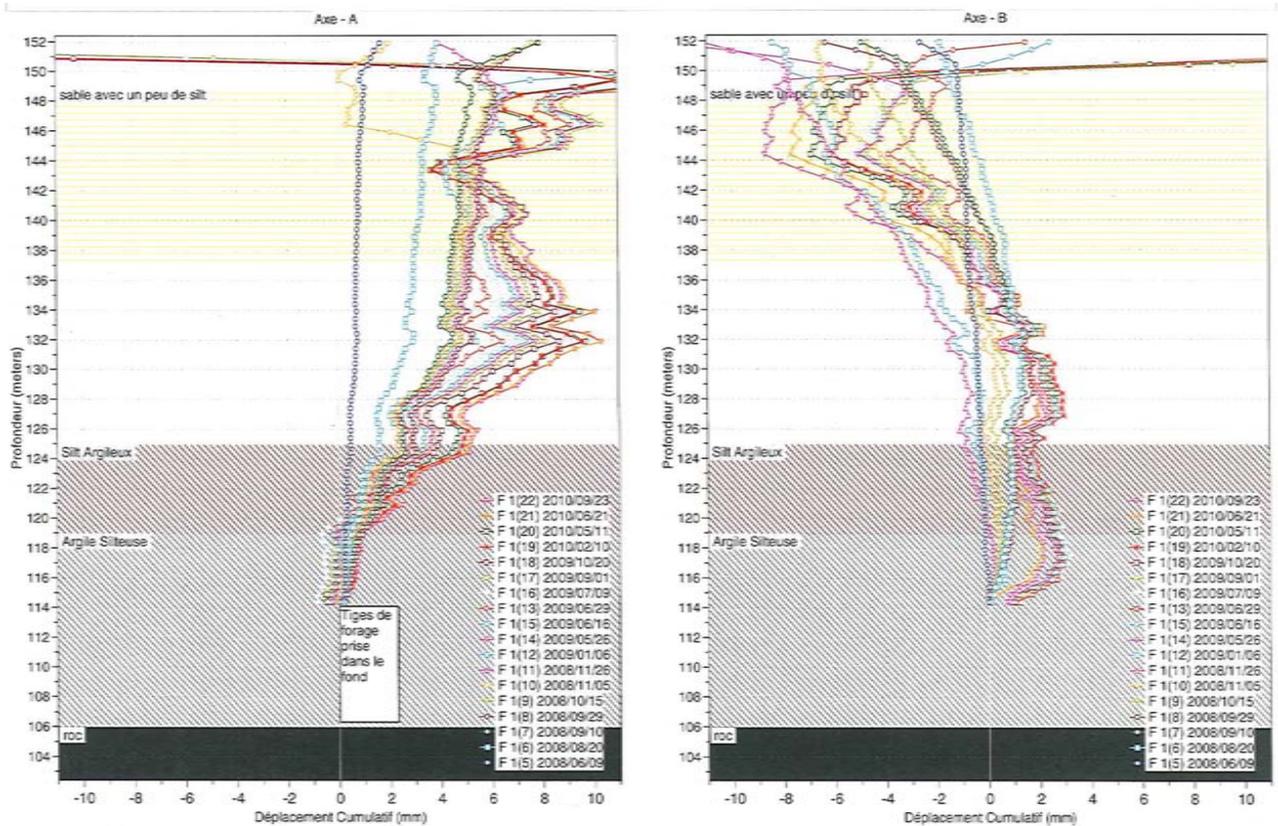
La figure 12 illustre la forme des petits remblais légers constitués de noyaux en polystyrène construits à l'arrière des culées du pont du boulevard Industriel.

Figure 12 : Vue en coupe des noyaux légers du boulevard Industriel



Au printemps de 2008, un inclinomètre a aussi été installé au pied de la culée sud du pont Phil-Latulippe. Les mesures inclinométriques montrent un déplacement maximal dans les sols granulaires de 1 cm vers la rivière, aux environs de 18 m de profondeur (figure 13, axe A). Il est à noter que la partie supérieure de l'horizon de sol granulaire s'est déplacée d'environ 0,85 cm vers le pont de l'autoroute 85 (figure 13, axe B). Ce déplacement latéral par rapport à l'axe du pont pourrait s'expliquer par une déstructuration partielle des sols qui aurait été plus marquée du côté ouest du pont Phil-Latulippe, en raison de la distance plus faible séparant cette zone de sol et la source d'énergie produite par le vibrofonçeur.

Figure 13 : Suivi des mouvements des sols à l'aide d'un inclinomètre



En surface, le suivi des déplacements des culées du pont Phil-Latulippe montre que les cibles font du surplace depuis un peu plus de deux ans. Les mesures des cibles installées sur les 2 autres ponts ne montrent pas de déplacements significatifs (à l'intérieur des limites de précision de l'appareil).

En octobre 2009, la circulation de la route 185 qui empruntait le pont Phil-Latulippe a été détournée sur le pont du boulevard Industriel, afin de permettre la construction de petits remblais légers à l'arrière des culées du pont Phil-Latulippe.

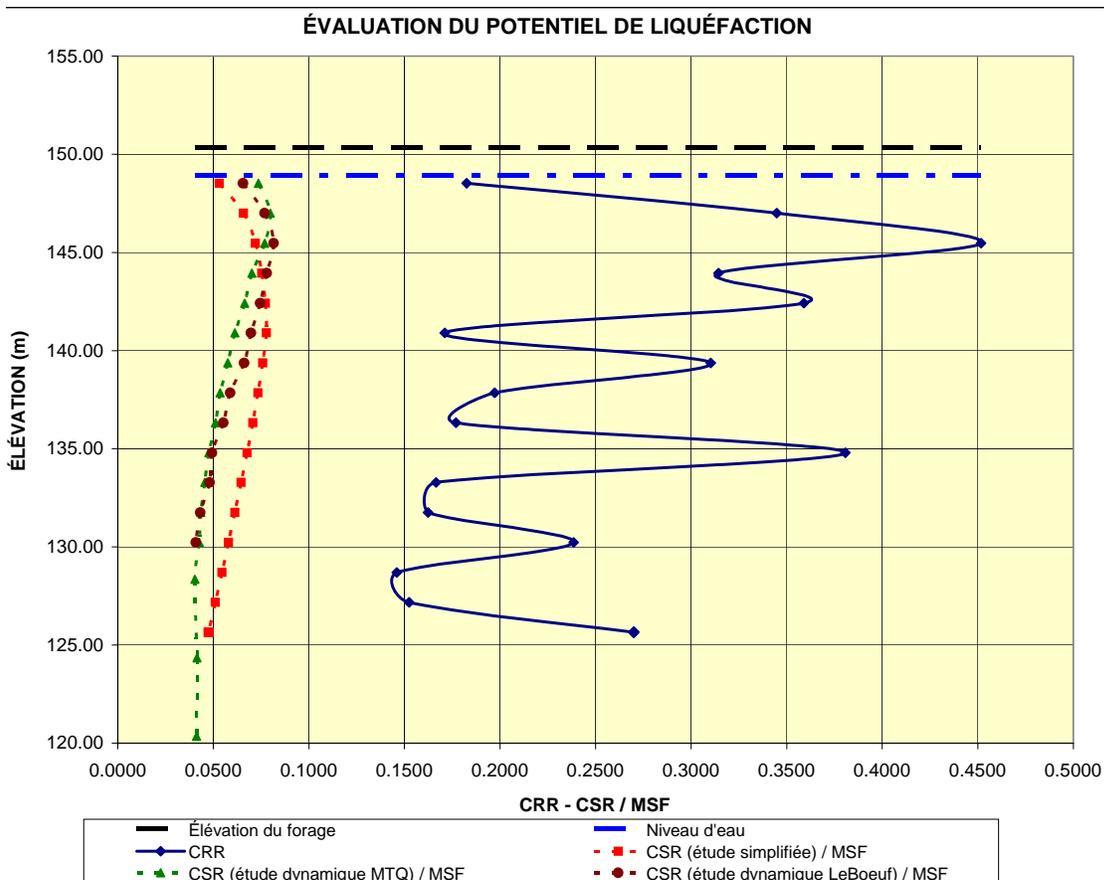
4. ÉTUDES GÉOTECHNIQUES SUPPLÉMENTAIRES DU MTQ

Suite au mauvais comportement des sols sous les fondations du pont Phil-Latulippe, des études géotechniques supplémentaires ont été réalisées afin de bien caractériser les sols densifiés et d'établir un programme de travaux de stabilisation pour assurer à long terme l'intégrité des fondations du pont.

De nouvelles analyses statiques et dynamiques du potentiel de liquéfaction (novembre 2010) ont été réalisées par le MTQ. Les conclusions de ces études confirment que les sols densifiés ne se liquéfieraient pas durant un séisme de magnitude 6,9 (figure 14).

Une analyse du degré de consolidation des dépôts de silt argileux a été effectuée en mars 2011. Le dépôt argileux, situé sur la rive nord, est pratiquement consolidé et celui de la rive sud montre un degré de consolidation de l'ordre de 60-70 %. À titre préventif, les remblais légers de ce pont ont été allongés pour prévenir le développement de contraintes à long terme sur les pieux caissons.

Figure 14 : Évaluation du potentiel de liquéfaction dans la zone des sols traités



5. ÉTUDE STRUCTURALE DES PIEUX CAISSONS

Depuis 2009, le Consortium SNC-Lavalin-Roche, avec l'appui de deux chercheurs spécialistes en analyses dynamiques sols/structures, évalue l'intégrité structurale des fondations profondes du pont Phil-Latulippe. Des modèles numériques avec des éléments finis ont été développés pour simuler les interactions sols-fondations-structures, notamment l'étude des contraintes-déformations des pieux caissons et la distribution de la poussée sur ces derniers.

Les analyses numériques sont faites en concordance avec les mesures inclinométriques et les données d'arpentage provenant des programmes d'instrumentation.

Le MTQ attend le dépôt du rapport final pour 2012 et définira les actions à prendre pour assurer à long terme l'intégrité du pont Phil-Latulippe.

6. SITUATION ACTUELLE

Les 3 ponts de la rivière Cabano sont ouverts à la circulation. L'ouverture du pont de l'autoroute 85 et la réouverture du pont Phil-Latulippe ont été réalisées en août 2011. La décision de rouvrir le pont Phil-Latulippe a été basée sur la recommandation d'un comité d'experts.

L'étude du comportement du pont Phil-Latulippe se poursuit à l'aide d'un programme de surveillance à distance (GPS) et de mesures d'arpentage.

7. REMERCIEMENTS

L'auteur de cet article tient à remercier les personnes suivantes qui ont contribué de façon directe ou indirecte à la préparation de cet article :

Gérard Desgagné, ing. M. Sc., chef du Service de la conception des structures, et Sylvain Goulet, ing. Service de la conception des structures, Direction des structures

Rénald Sirois, ing. et Michel Brisson, arp.-géo., Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine

Gilles Grondin, ing. M. Sc. A. et Christine Normand, tech., ex-collègues de travail du Service de la géotechnique et de la géologie, Direction du laboratoire des chaussées

Denis Lessard, ing., M. Sc.
MTQ, mai 2012