

CONSTRUCTION D'UN PONT À CULÉES INTEGRALES SUR L'AUTOROUTE 50 (Pont Doherty)

Nikola Dzeletovic, ing., M.Sc.A.
DESSAU-SOPRIN INC. - Ponts et Ouvrages d'art

Ghislain Dionne, ing., Ph.D. et Christian Lemay, ing., M.Sc.A.
DESSAU-SOPRIN INC. - Ponts et Ouvrages d'art

RÉSUMÉ : Dans le cadre du prolongement de l'autoroute 50 entre les municipalités de Buckingham et Lochaber en Outaouais, Dessau-Soprin a été mandaté pour procéder à la préparation des plans et devis pour la construction de cinq (5) ponts d'étagement disséminés le long de ce tronçon.

L'un de ces ponts est celui au-dessus du Chemin Doherty. Il s'agit d'un pont d'étagement à travée simple de 44 m de portée en acier avec dalle composite et culées intégrales. Il s'agit là d'une solution novatrice permettant de concevoir des ouvrages sans joint de dilatation.

La particularité de ce projet vient du fait que les conditions géotechniques du site font en sorte que certaines couches du sol sous-jacent sont potentiellement liquéfiables en cas de séisme. En raison de ce problème, l'utilisation de pieux foncés jusqu'au roc était proscrite. Ainsi, une solution utilisant la résistance en friction développée le long de l'axe des pieux a été étudiée et mise en œuvre afin de contourner ce problème.

INTRODUCTION

Le choix d'un type de pont est gouverné par différents aspects. Pendant la phase préliminaire, l'ingénieur doit évaluer plusieurs paramètres. Ces paramètres vont principalement influencer les coûts de construction et les coûts d'exploitation du futur ouvrage. Parmi ceux-ci figurent les conditions d'utilisation de la structure projetée et le type de sol sur le site de construction. Le choix judicieux du type d'ouvrage qui soit le mieux adapté aux conditions du site permet de réaliser des économies substantielles pour le propriétaire du pont.

Dans le cas du pont Doherty, les conditions particulières du site ont été mises à contribution par l'utilisation de culées intégrales prenant appui sur une seule rangée de pieux flexibles par culée. Le fait d'opter pour une solution sur pieux permettait de surmonter les problèmes reliés à la faible capacité portante du sol en place. Cette solution s'avère également économique en limitant substantiellement la dimension des culées par rapport à une conception plus conventionnelle.

L'élimination des joints de dilatation constitue également un avantage pour le propriétaire en raison des coûts d'entretien réduits et de la longévité accrue que procure cette solution. En effet, l'élimination de joints permet d'empêcher la dégradation des extrémités du tablier et de l'infrastructure, causée par la pénétration d'eau saturée de sels de déglacage à travers des joints défectueux.

DESCRIPTION DU PROJET

Le pont Doherty est un pont à culées intégrales comportant une travée simple de 44 m de portée. La figure n° 1 présente une vue en élévation de la structure. Le tablier d'une largeur de 14.7 m, est conçu pour quatre (4) voies de calcul, même si le pont ne comportera que deux (2) voies de circulation en service. En effet, après l'achèvement de cette phase de la construction de l'autoroute 50, laquelle prévoit uniquement la construction de la chaussée sud, le pont comptera une voie de circulation dans chaque direction.

Les résultats des sondages géotechniques, effectués à l'emplacement du pont projeté, montrent que la couche de sol de surface présente une épaisseur totale d'environ 12 m. Cette couche est composée essentiellement de silt et de sable et possède une compacité de très lâche à moyenne. Des sols pulvérulents d'une telle compacité sont susceptibles de se liquéfier lors d'un séisme. Cette couche de sol de surface s'appuie sur un dépôt d'argile silteuse, à silt argileux d'une épaisseur allant jusqu'à 30 m. À son tour, ce dépôt d'argile repose sur une couche de till de compacité dense à très dense, d'une épaisseur d'au moins 15 m. L'épaisseur exacte de cette dernière couche n'a pu être établie, puisque les sondages ont été limités à une profondeur approximative de 65 m, sans que le roc n'ait été atteint.

Pour pouvoir construire le pont sur des semelles superficielles, il nous aurait fallu construire un remblai temporaire afin d'éviter les tassements différentiels. Ce remblai aurait dû être enlevé par la suite pour la construction du pont. Nous avons écarté cette solution à cause des contraintes de temps qu'elle imposait et nous nous sommes orientés vers une solution avec des fondations profondes.

Suite à une comparaison entre un ouvrage conventionnel avec culées sur pieux, et un pont intégral, nous avons écarté l'option du pont conventionnel.

En dépit du potentiel de liquéfaction de la première couche de sol, les conditions géotechniques étaient favorables à la construction d'un pont à culées intégrales avec une seule rangée de pieux flexibles en « H » par culée. Les principaux points qui ont justifié cette option sont les suivants :

- Rapidité de la construction;
- Nombre de pieux réduit;
- Réduction du poids de la structure (50 % de moins par rapport à un pont conventionnel) ;
- Durabilité de l'ouvrage;
- Économie dans le coût de la construction et de l'exploitation.

Toutefois, le choix final du type d'ouvrage et la viabilité de la solution avec un pont à culées intégrales se devait de tenir compte du potentiel de liquéfaction du sol. En collaboration avec l'ingénieur géotechnique, des analyses du potentiel de la liquéfaction ont été effectuées au laboratoire de géotechnique. Les résultats obtenus ont montré que le phénomène de liquéfaction pouvait ajouter une charge non négligeable (frottement négatif) aux pieux. Dans le cas présent, cette augmentation peut représenter 80 % de la charge pondérée appliquée sur les pieux.

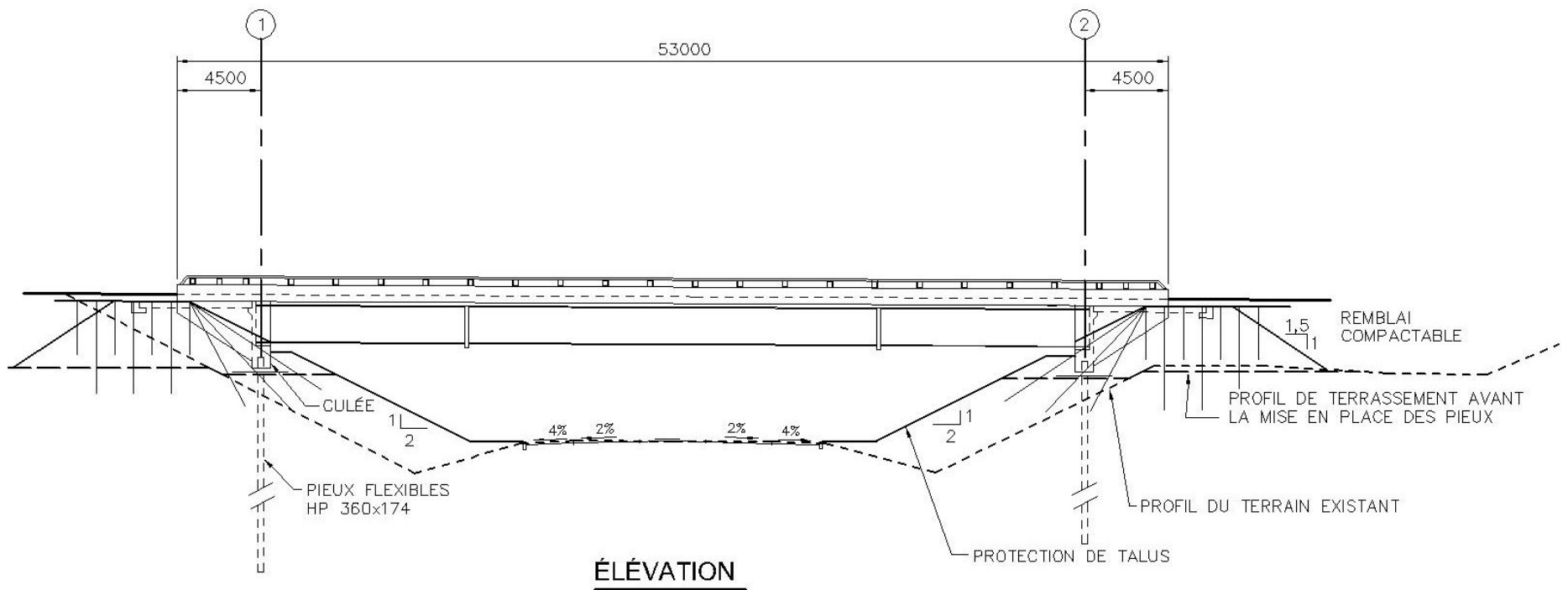


Figure n° 1 : Élévation du pont Doherty

Suite à plusieurs discussions avec l'ingénieur géotechnicien, ce scénario pouvait s'avérer catastrophique dans le cas d'un pont à culées intégrales.

À la lumière de ces informations, une étude de faisabilité approfondie s'est imposée. Même si la norme S6-00 ne prévoit l'application de charges sismiques pour calculer les culées dans le cas d'un pont à travées simples, nous ne pouvions ignorer ce problème dans ce cas spécifique. D'autant plus que plusieurs ouvrages de références traitant des ponts à culées intégrales suggèrent d'éviter l'utilisation de ce type de pont dans les sols susceptibles à la liquéfaction.

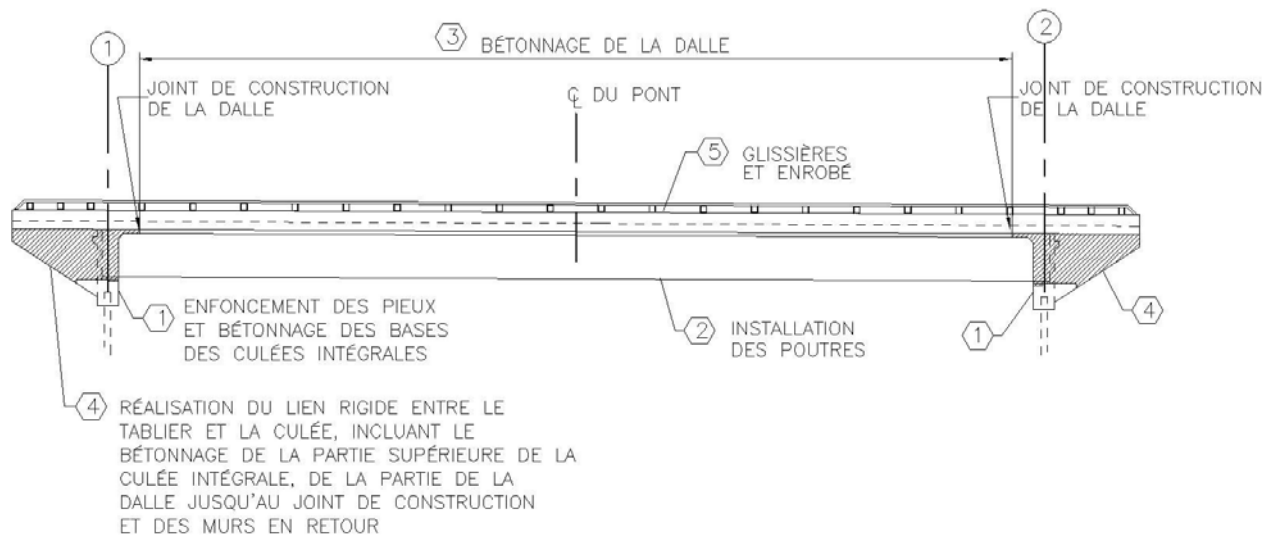
Les conclusions du rapport géotechnique montrent qu'en cas de séisme, le frottement des sols sur les pieux entraîne les pieux vers le bas et ajoute une charge aux pieux. Toutefois, ceci n'est vrai que si les pieux s'appuient sur une couche résistante de façon à ce qu'ils ne puissent tasser. Dans le but d'éviter le problème du frottement négatif, la seule option possible était d'utiliser les pieux dont la totalité de la résistance est mobilisée par le frottement latéral le long des pieux. Les pieux devaient donc traverser complètement la couche de sol liquéfiable, et la pointe des pieux devait s'arrêter dans le sol cohérent sans atteindre une couche dense. Il s'agit là d'une solution très particulière. À notre connaissance, la quasi-totalité des ponts intégraux ont été construits sur des pieux allant jusqu'au refus.

PARTICULARITÉS DE LA STRUCTURE DU PONT DOHERTY

- Les étapes de construction et les séquences de bétonnage du pont sont déterminées de façon à minimiser les efforts de flexion dans les pieux (figure n° 2) :
 - Étape 1 : Après l'enfoncement de pieux, les bases de culées intégrales sont bétonnées jusqu'à l'élévation nécessaire pour la pose des poutres;
 - Étape 2 : Les poutres sont posées sur des appuis temporaires en élastomère;
 - Étape 3 : La dalle est coulée en deux séquences. Dans un premier temps, on effectue le bétonnage de la dalle jusqu'aux joints de construction situés à 1.5 m des axes des culées ;
 - Étape 4 : Par la suite, on bétonne la partie supérieure des culées intégrales et la partie restante de la dalle, incluant les murs d'aile. De cette façon, aucun moment de flexion dû aux charges mortes des poutres, dalle et diaphragmes n'est transféré aux pieux ;
 - Étape 5 : La pose de l'enrobé et le bétonnage des glissières s'effectue après que le béton de l'étape précédente ait atteint une résistance suffisante (action composite complète).

Le remblayage derrière les culées est effectué lorsque le pont est devenu intégral et lorsque la résistance en compression du béton ait atteint 75 % de la valeur spécifiée.

- Chacune des culées prend appui sur une rangée de 10 pieux flexibles. Les pieux sont orientés de façon à ce que les moments de flexion les sollicitent suivant leurs axes faibles. Ils sont enfoncés jusqu'à une profondeur de 40 m. Préalablement à l'enfoncement des pieux, des travaux de terrassement ont été effectués jusqu'en dessous de la base des culées intégrales (figure n° 3).



SÉQUENCE DE BÉTONNAGE ET ÉTAPES DE CONSTRUCTION

Figure n° 2

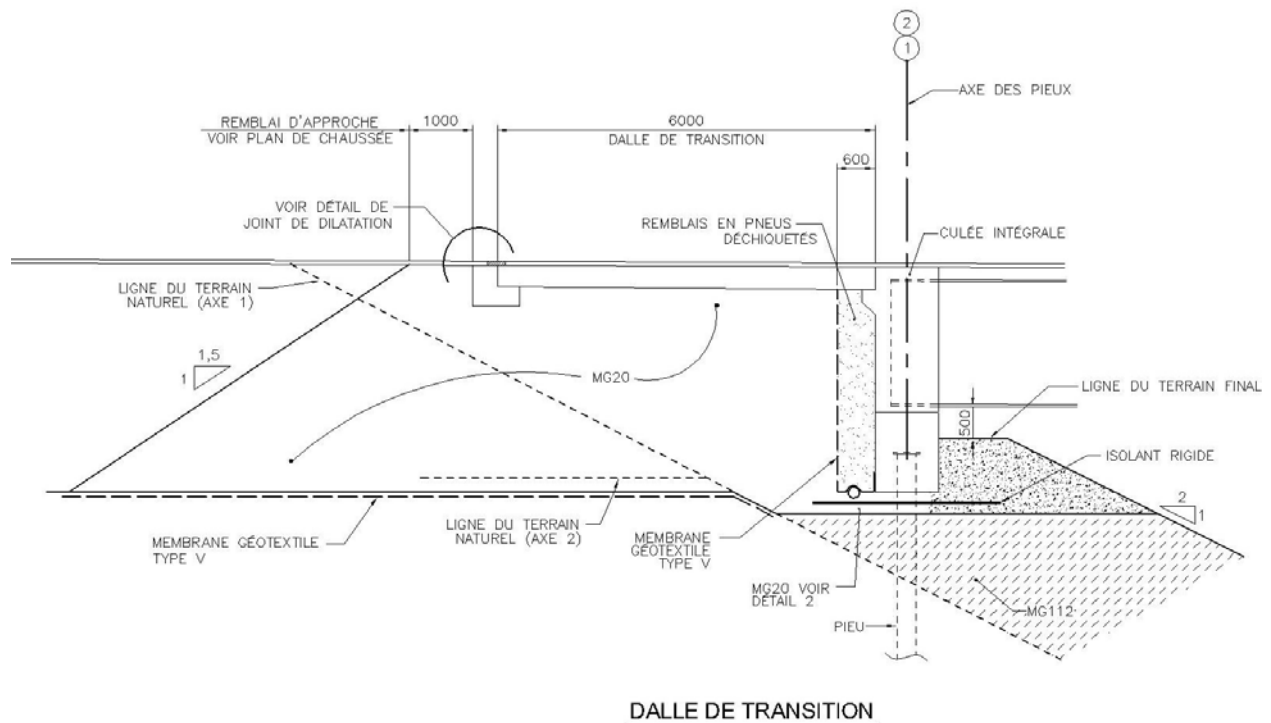


Figure n° 3 : Détail à l'approche du pont

- Le tablier du pont Doherty est supporté par cinq (5) poutres d'acier de 2.02 m de hauteur qui sont, une fois le pont terminé, complètement noyées dans le béton des culées, comme le montre la figure n° 4. Pendant la construction, les poutres sont posées sur des appuis en élastomère de 30 mm d'épaisseur. Ces appuis permettent la rotation et la déflexion des poutres, lesquelles sont causées par le poids propre des poutres, de la dalle et des charges vives de construction. Des trous oblongs sont également prévus dans les plaques de fixation des poutres afin de permettre les mouvements causés par les changements thermiques avant que le pont ne devienne intégral.

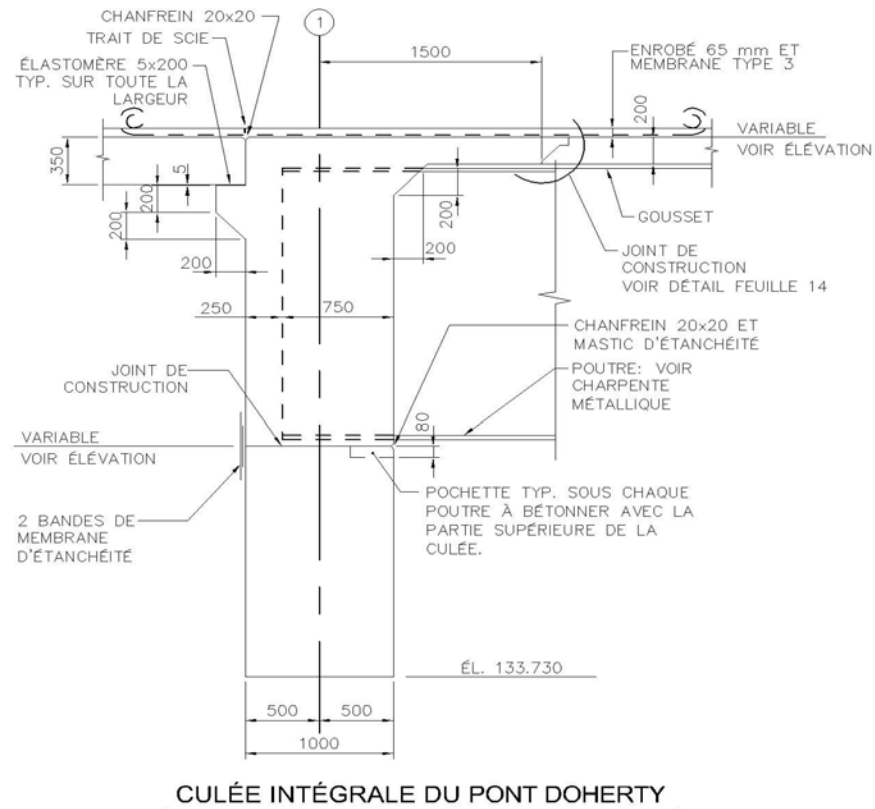


Figure n° 4

- Dans le but de limiter la hauteur des culées et, de ce fait, réduire les pressions latérales s'appliquant sur ces dernières, nous avons eu recours à de l'isolant géotechnique. L'utilisation de l'isolant nous a permis de réduire la profondeur des culées intégrales, tout en offrant une protection adéquate contre l'action du gel.
- Tel que montré sur la figure n° 3, un remblai de pneus déchiquetés ayant 600 mm d'épaisseur a été placé derrière chaque culée. L'utilisation de ce type de remblai a pour objectif de diminuer les pressions latérales dues à la poussée des terres, réduire la résistance aux mouvements dus à l'expansion thermique et, finalement, limiter la possibilité de tassements dans les vides créés derrière les culées lorsque le pont se contracte.

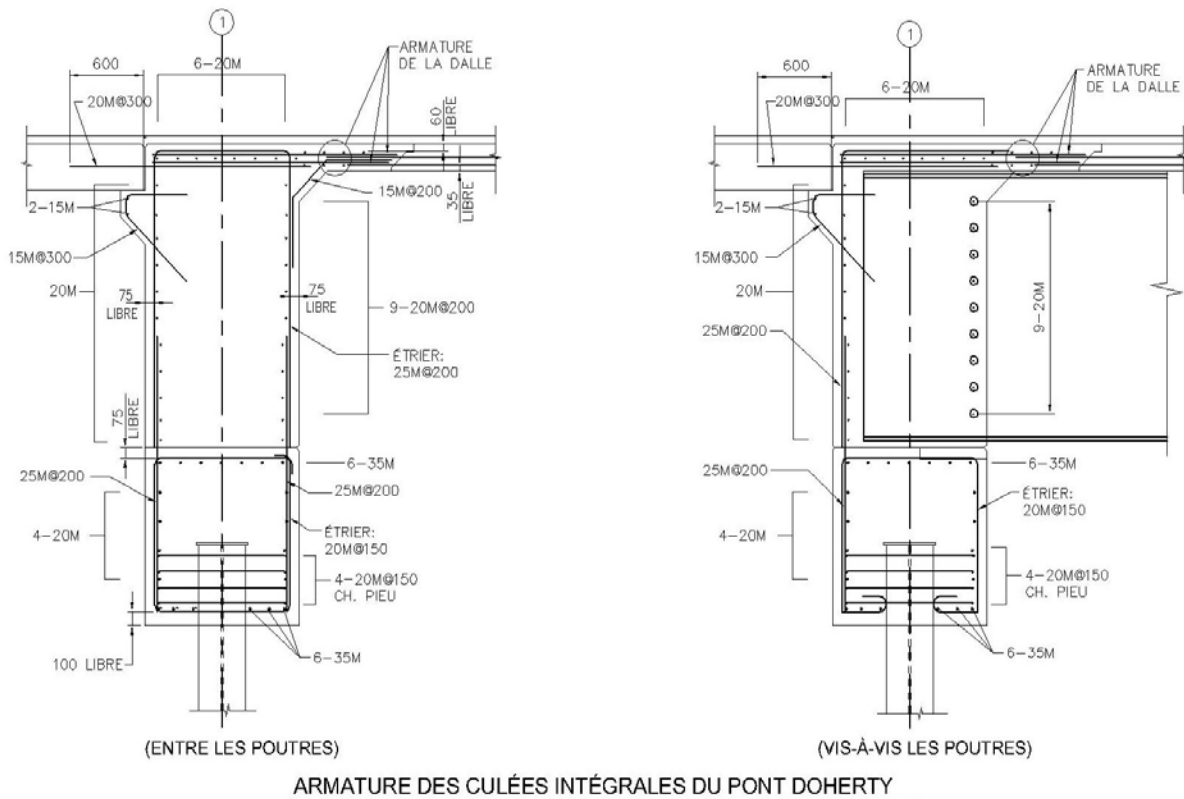
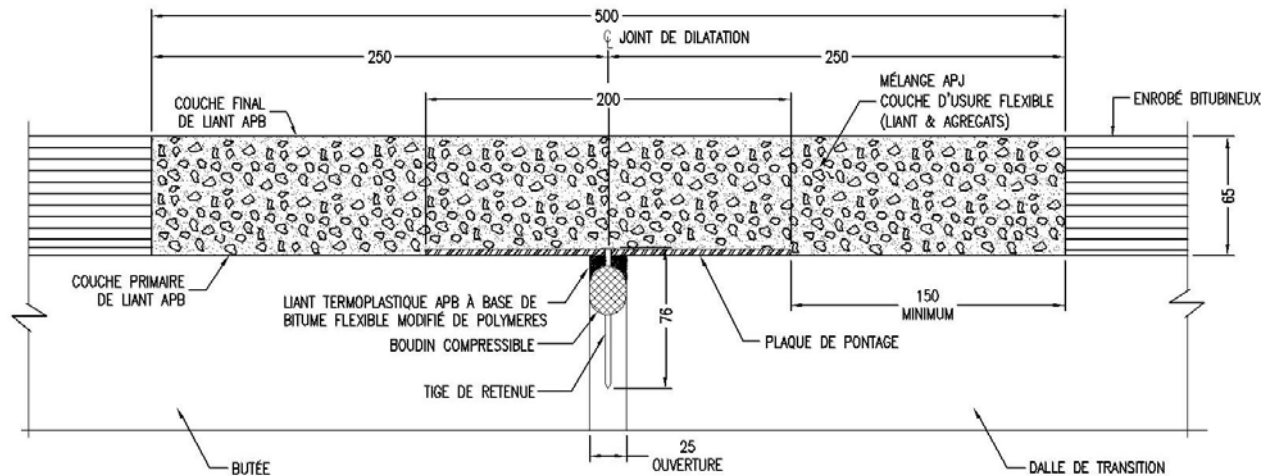


Figure n° 5

- Les pneus déchiquetés sont séparés du remblai granulaire adjacent par une membrane géotextile. L'utilisation de la membrane géotextile permet d'empêcher que les particules de sol ne pénètrent dans le remblai en pneus déchiquetés prévenant ainsi un éventuel problème de tassement. La granulométrie est choisie de façon à permettre un compactage uniforme. Il est important que les pneus déchiquetés utilisés pour le remblai ne soient pas contaminés par la graisse, l'huile, l'essence, les morceaux de bois ou tout autre contaminant organique.
- La mise en place de pneus déchiquetés a été faite par couches successives de 300 mm d'épaisseur et chaque couche a été, par la suite, compactée par six (6) passages d'un compacteur sauteur dont la charge de compaction est d'au moins 1250 kg.
- Comme le montre la figure n° 6, les joints viscoélastiques (« Asphaltic Plug Joints ») sont posés aux extrémités de chaque dalle de transition afin d'absorber les mouvements de la structure.
- Les extrémités des dalles de transition reposent sur des butées en béton, dans le but d'éviter la fissuration et les tassements du pavage à l'interface de la dalle de transition et du remblai d'approche (figure n° 3). Dans le même but, la finition de remblai du pont est réalisée avec une pente 1 : 1.5 avant de faire le remblai d'approche pour la route.



JOINT ASPHALTIQUE "APJ" - DÉTAIL TYPIQUE

Figure n° 6

CONCEPTION

Analyse par étapes

La construction d'un pont intégral étant réalisée par étape, on se doit d'en tenir compte lors de l'analyse. Pour les fins de la conception, nous avons considéré trois étapes :

1. Dans cette étape, les poutres sont assemblées et supportées par les culées. Toutefois, le béton de la dalle est encore plastique (étape 3 de construction). Seules les poutres résistent aux charges appliquées. Le poids de la dalle, le poids propre des poutres, des contreventements et des culées sont également pris en compte. Aucun moment n'est transféré aux pieux à cette étape.
2. L'action composite complète est considérée entre la dalle, les poutres et les culées. À ce stade, nous avons considéré les effets de la charge vive, de la variation de la température, le poids de la partie supérieure des culées et la pression des terres.
3. Les poutres, la dalle et les culées sont monolithiques. Toutefois, le module d'élasticité de la dalle est considéré à $1/3$ de sa valeur finale pour tenir compte de l'effet du fluage sous les charges permanentes surimposées ($E_s/E_c=3n$). Les charges dues au pavage, glissières ainsi que les charges dues au retrait sont considérées dans cette étape.

Lors du calcul de la cambrure à appliquer aux poutres d'acier, nous avons considéré que la charge due aux coffrages a été ajoutée dans la première étape et que les coffrages sont enlevés dans la deuxième étape.

Interaction sol-structure

Nous avons considéré que l'intensité de la pression des terres varie en fonction des mouvements du pont. Sous l'influence des changements de température, la structure s'allonge ou se contracte. Dans le cas où le pont se contracte en raison de la diminution de la température, une pression active se génère à l'arrière de la culée. À l'inverse, lorsque le pont s'allonge dû à l'augmentation de la température, l'intensité des pressions qui se développent contre la culée dépendra de l'amplitude du mouvement. Le coefficient de la pression K peut varier entre K_0 et K_p , selon l'amplitude des déplacements. Comme le montre la figure n° 7, les mouvements pour mobiliser complètement la pression passive sont beaucoup plus importants que ceux requis pour développer la pression active.

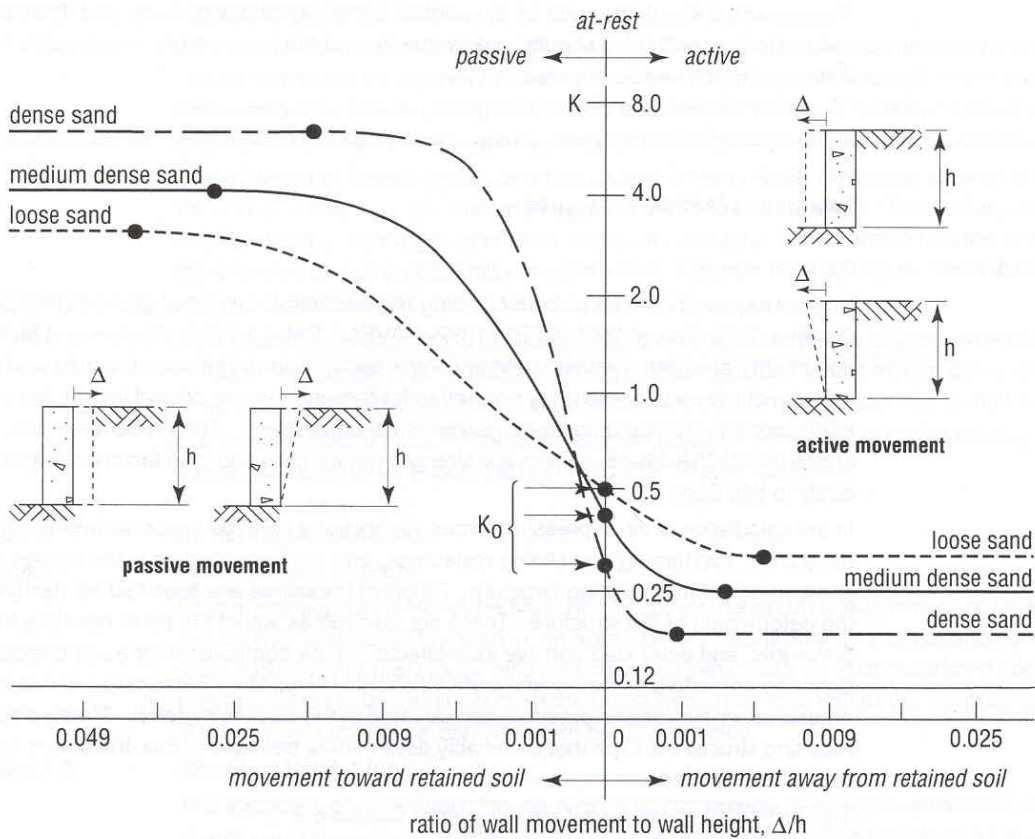


Figure n° 7 : Mouvement relatif entre le mur et le sol adjacent

Modèle structural

Tel que mentionné précédemment, l'analyse de la structure a été effectuée en tenant compte des étapes de construction. À l'aide d'un logiciel d'analyse des structures, nous avons utilisé donc un modèle pour chacune des étapes de la conception. Une fois l'analyse de chacune des étapes complétée, les efforts sont cumulés afin d'obtenir les efforts finaux pour l'élément concerné. À la première étape, le pont est modélisé comme une poutre simplement appuyée. Pour les étapes 2 et 3, le pont est modélisé comme un cadre rigide sur appuis élastiques, comme le montre la figure n° 8. La structure est calculée pour une largeur effective de la dalle. Les culées sont modélisées avec une section rectangulaire dont la longueur correspond à la largeur effective de la dalle.

Pour modéliser les pieux, nous avons utilisé un pieux équivalent dont le moment d'inertie et la surface dépendent du nombre total de pieux sur la longueur effective de la culée. Les pieux sont divisés en plusieurs segments égaux en utilisant un modèle de ressorts. La rigidité de chaque appui élastique latéral le long d'un pieu est calculée en utilisant le *module de la réaction latérale du sol* k_s défini par l'ingénieur géotechnique. Étant donné qu'il s'agit de pieux en friction, nous avons considéré que la rigidité du ressort vertical à l'extrémité des pieux est égale à la rigidité du ressort latéral au même niveau.

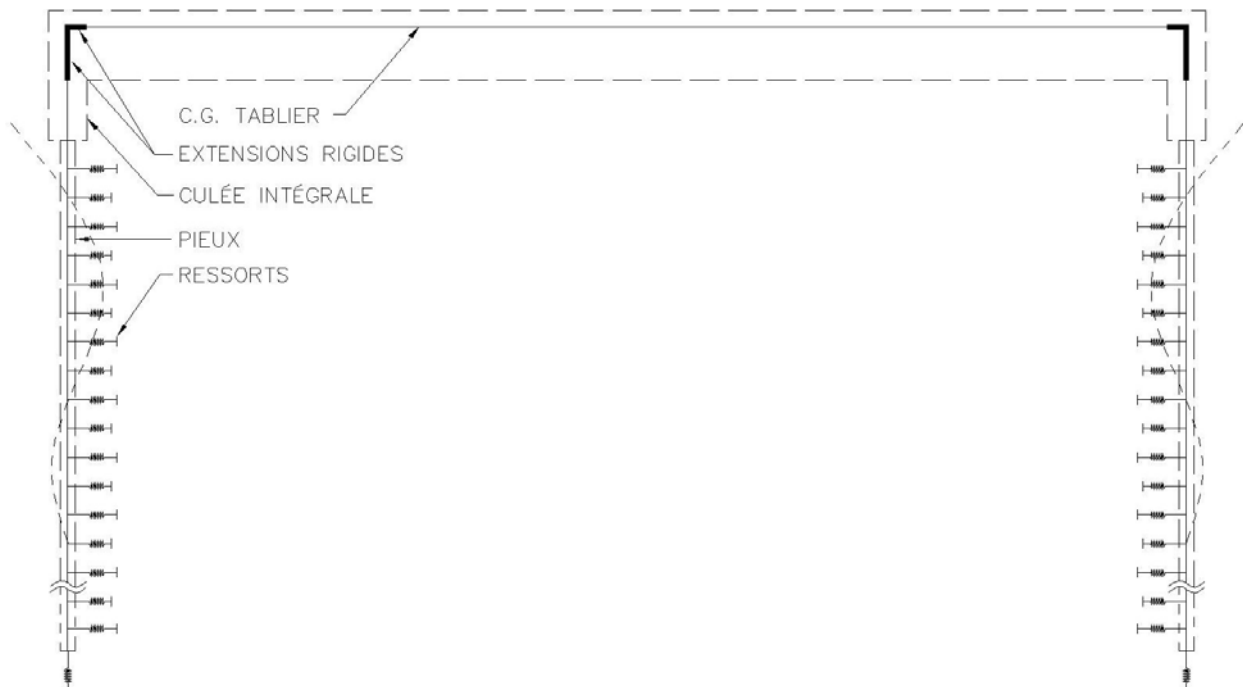


Figure n° 8 : Modèle structural pour l'action composite complète

ESSAIS DE CHARGEMENT SUR LES PIEUX EN COMPRESSION

Selon les affirmations de l'ingénieur en géotechnique, il fallait prévoir que la capacité géotechnique des pieux ne se développerait immédiatement, étant donné qu'une bonne partie de la capacité latérale se développe dans la couche de sol cohérent. Un délai d'environ trois semaines est nécessaire, suite au fonçage, pour que le frottement se mobilise et que les pressions interstitielles se dissipent.

Puisque la résistance des pieux dépend exclusivement de la résistance en friction, dans le but de pouvoir suivre la dissipation des pressions interstitielles, nous avons eu recours à quatre (4) piézomètres à réponse rapide, soit deux à proximité des pieux de chacune des culées. Deux piézomètres ont été installés à 15 m de profondeur et deux autres à 20 m de profondeur.

Dans le but de vérifier la résistance des pieux, des essais dynamiques sur quatre (4) pieux (deux par culée) et des essais statiques sur deux (2) pieux (un par culée) ont été prévus. Afin de ne pas retarder indûment le chantier, nous avons prévu deux pieux témoins, lesquels étaient installés dans un rayon de 15 à 30 mètre des culées, en plus des pieux prévus aux plans. Ces pieux avaient pour but de nous permettre de suivre l'évolution de la résistance au cas où il nous aurait fallu plus de temps pour atteindre les résistances spécifiées aux plans. Avec l'aide de ces pieux, il nous aurait été possible de permettre à l'entrepreneur de poursuivre ces travaux jusqu'à l'ajout d'une charge définie par le résultat des essais obtenus. Heureusement, la résistance nominale des pieux a été obtenue dans le délai prévu et nous n'avons pas eu à utiliser les pieux témoins

PROBLÈMES DURANT LA CONSTRUCTION

Lors de la construction d'un pont à culées intégrales, une attention particulière doit être apportée au fonçage des pieux. Puisque l'on ne dispose que d'une seule rangée de pieux pour supporter la culée et que l'on sollicite les pieux suivant leurs axes faibles, ce type de structure requiert une précision dans le positionnement des pieux plus importante que pour un ouvrage conventionnel.

Dans le Cahier des Charges et Devis Généraux, plus communément connu sous l'appellation de CCDG, les tolérances imposées à l'entrepreneur se retrouvent à l'article 15.3.4.1 et vont comme suit :

- La déviation de l'axe d'un pieu par rapport à sa position théorique doit être inférieure à 2% de sa longueur ;
- L'écart entre la position finale de la tête du pieu et sa position théorique ne doit pas être supérieur à 100 mm.

Étant donné que les culées intégrales ne s'appuient que sur une seule rangée de pieux, elles ne sont généralement pas très larges. Donc, une translation suivant l'axe longitudinal de l'axe du pont aura inévitablement des répercussions sur la répartition des efforts entre la culée et les pieux en plus de causer des problèmes lors de la construction. On remarque également que le CCDG n'impose pas de tolérance sur l'orientation du pieu. En effet, il n'est pas rare lors du fonçage que l'on observe une rotation du pieu sur lui-même. Dans une construction conventionnelle, cet état

de chose est généralement sans conséquence. Toutefois, dans le cas d'un pont à culée intégrale, les pieux sont sollicités suivant leurs axes faibles. En tournant sur son axe, le pieu voit sa rigidité flexionnelle modifiée à la hausse.

En somme, une variation du positionnement des pieux par rapport à leur position théorique a des répercussions qui se doivent d'être prises en considération. Tel que :

- apparition de moments parasites dans les pieux, causés par le poids des poutres et la dalle durant la construction;
- difficulté à respecter la pose des armatures telles que montrées aux plans;
- lorsque les pieux sont désaxés vers l'extérieur du pont, les efforts générés peuvent excéder la capacité des pieux. Dans ce cas, le concept initial peut être remis en question.

Dans le cas du pont Doherty, suite aux opérations de fonçage, il s'est avéré que plusieurs pieux n'étaient pas alignés suivant l'axe théorique projeté. En fait, la position de la tête de plusieurs d'entre eux excédait largement les tolérances permises par le CCDG. Après vérification des efforts occasionnés par ces écarts, les deux culées ont été élargies de 250 mm vers le centre du pont afin de rectifier ce manquement.

ASPECT ÉCONOMIQUE

Dans le cas présent, nous estimons que la construction d'un pont comportant des culées conventionnelles s'élève à environ 15% de plus que pour la construction d'un pont à culées intégrales. À cela, il faut ajouter les économies que procure, à long terme, la réduction des coûts d'entretien. La construction de culée intégrale requiert également moins de matériaux et contribue donc à une utilisation plus judicieuse des ressources. Dans un contexte où l'environnement prend une place de plus en plus importante, on se doit de garder à l'esprit cet aspect.

À notre connaissance la construction d'un pont intégral permet une économie allant de 6 % à 20 % par rapport au prix d'une structure conventionnelle, ce qui représente des économies non négligeables pour les propriétaires du pont.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports, et plus spécialement la Direction de l'Outaouais et la Direction des structures, pour l'opportunité qu'ils nous ont fournie en nous permettant de mettre à contribution notre expertise dans le cadre de ce mandat. Nous aimerions également souligner l'excellente collaboration de M. Jean-Hugues Deschênes de «Qualitas Géoconseil» lors de l'élaboration des plans et devis pour la réalisation de cet ouvrage.

RÉFÉRENCES

1. David LeBlanc: **Innovative Approaches for the Design of Integral Abutment Bridges**, 2003 Ohio Transportation Engineering Conference
2. David I. Harvey, Don W. Kennedy: **Integral Abutment Bridges – Design And Constructibility** , 2002, Associated Engineering Ltd, British Columbia
3. C. Vipulanandan, David J. Elton : **Recycled Materials in Geotechnical Applications**, ASCE Geotechnical Special Publication No. 79, 1998
4. Vasant C. Mistry: **Integral Abutment and Jointless Bridges**, Conference of High Performance Steel Bridges, 2000, Baltimore, Maryland
5. Gangarao H., Thippeswamy H., Dickson M., Franco J.: **Survey and Design of Integral Abutment Bridges**. Workshop on Integral Abutment Bridges, Pittsburgh, Pennsylvania, 1996
6. Edward P. Wasserman, John Houston Walker, **Integral Abutments for Steel Bridges**, American Iron and Steel Institute, 1996