Construction du pont de Ste-Marie-de-Beauce

Conception par Jacques Blouin ing. M.Sc. Directeur Ouvrages d'art
GÉNIVAR

Surveillance par Mario Trottier ing. Directeur Charpentes et ponts
Dessau-Soprin

Avril 2004

Introduction

Le pont de Ste-Marie-de-Beauce situé sur la route 216 au-dessus de la rivière Chaudière est un pont courbe en acier. Il se situe au centre-ville de Ste-Marie et de ce fait, le coté esthétique de l'ouvrage était un critère de design important du projet.

La conception d'un pont courbe demande une analyse structurale beaucoup plus détaillée qu'un pont droit ainsi qu'une attention particulière au niveau des détails de construction. Cet article présente sommairement les critères de conception, la méthode d'analyse utilisée, les résultats obtenus et explique la méthodologie ayant conduit aux différents détails de construction du pont.

Description du pont

Le pont présente une courbe horizontale de 450 mètres de rayon. Il comporte trois travées continues de 48,88 mètres, 55 mètres et 48,88 mètres. La longueur totale du tablier est de 152 mètres. La largeur du tablier est de 13,5 mètres. Au-dessus des piles, de chaque coté du tablier, des belvédères sont aménagés portant la longueur des porte-à-faux à 3,3 mètres pour une largeur totale du tablier de 16,5 mètres (figure 1). Le moment de flexion négatif sous le poids mort du belvédère étant supérieur au moment de fissuration de la dalle de tablier, cette dernière est post-tendue transversalement dans ces zones afin de contrôler la fissuration sous le poids propre ainsi que la flèche due au porte-à-faux. Le tablier repose sur quatre unités d'appui, soit deux culées et deux piles en rivière. Les fondations de ces unités sont sur pieux en acier.

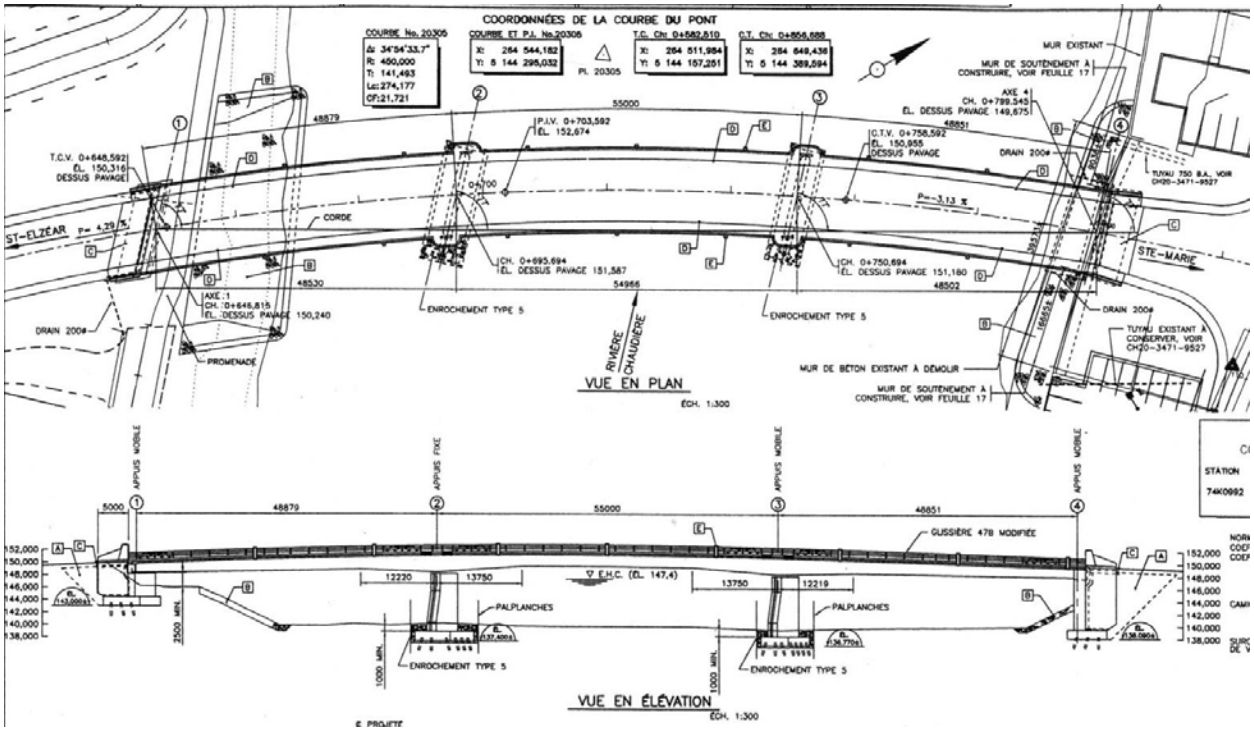

Figure 1 : Géométrie du pont

Le tablier est composé d'une dalle de béton de 250 mm d'épaisseur reposant sur quatre poutres courbes en acier à inertie variable et à action composite espacées de 3600 mm centre à centre (figure 2). Le rayon de courbure des quatre poutres est identique. Ceci fut possible par l'orientation des unités d'appuis.

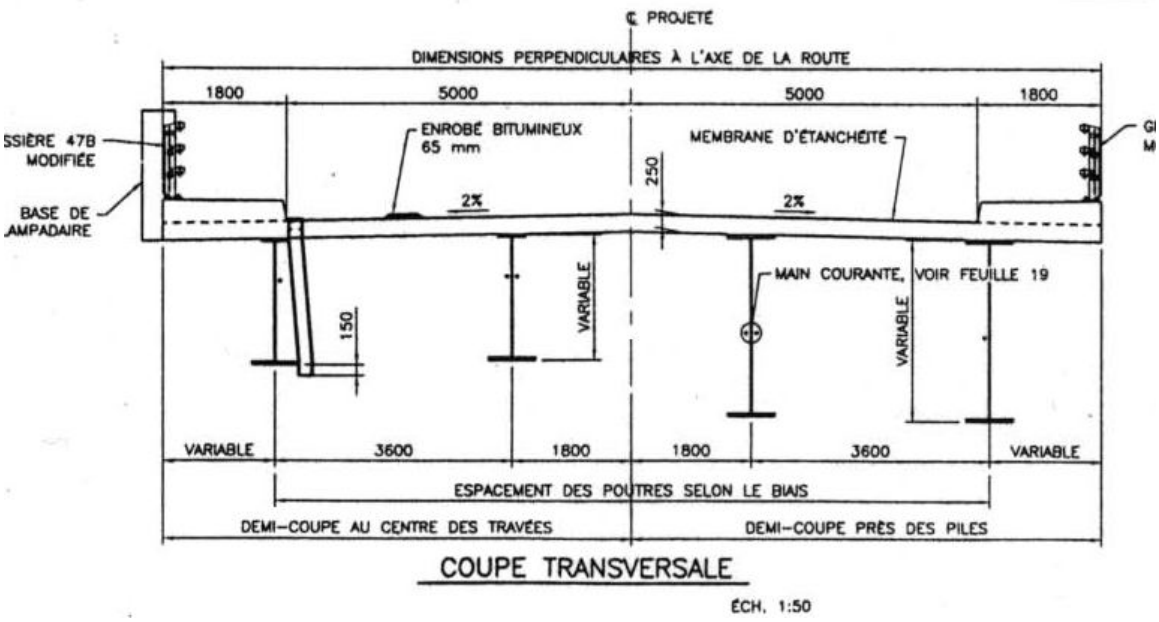

Figure 2 : Coupe transversale du tablier

La hauteur des poutres varie de 1400 mm à 2600 mm dans les travées de rive et de 1800 mm à 2600 mm dans la travée centrale. Les entretoises reliant les poutres sont espacées à 6,1 mètres centre en centre et deux rangs de lacets en V assurent le contreventement horizontal durant la phase de construction du tablier (figure 3).

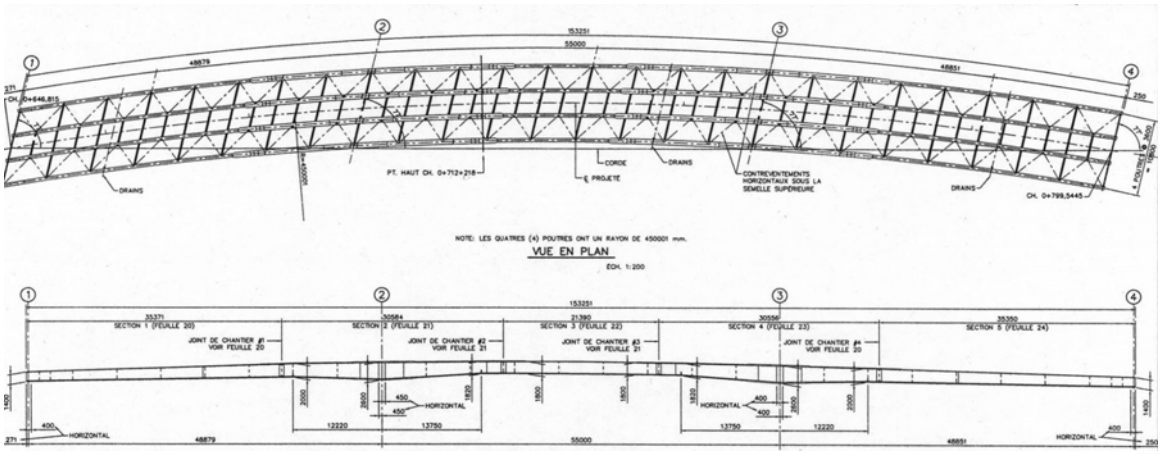

Figure 3 : Vue en plan et en élévation des poutres d'acier

Chargements

Les chargements considérés pour le dimensionnement des éléments d'acier et des unités d'appui sont les suivants :

a) Le poids propre;

b) La surcharge routière normalisée QS-660;

c) Le gradient de température;

d) La poussée des terres;

e) La pression des glaces;

f) La charge de vent;

g) La surcharge sismique.

Pour l'analyse sismique, l'étude respecte les exigences du chapitre 4 de la norme CAN/CSA-S6-00.

Critères de conception

La norme CAN/CSA-S6-00 n'était pas en vigueur lors de la conception du pont de Ste-Marie. Cependant la norme CAN/CSA S6-88 ne traite pas des poutres courbes en acier contrairement à la nouvelle norme. Aussi, les poutres d'acier furent calculées avec la norme CAN/CSA-S6-00. De même, le pont a fait l'objet d'une analyse spectrale pour l'analyse sismique selon la nouvelle norme S6-00 étant donné qu'un pont courbe entre dans la catégorie des structures irrégulières.

Pour la conception d'une poutre en I courbe, plusieurs critères de conception doivent être respectés. Les principaux sont :

- Le rapport de la contrainte normale de gauchissement de torsion et de la contrainte normale de flexion doit être inférieur à 0,5 en tout point;
- L'espacement des entretoises doit être inférieur à 25 fois la largeur de la semelle;
- Les semelles doivent être au-moins de classe 3;
- $M_{fx} / M_{rx} + M_{fw} / M_{ry} < 1$ (pour la résistance de chaque semelle)
  où $M_{rx} = \phi_s F_y S_x$ de la poutre et $M_{ry} = \phi_s F_y S_y$ de la semelle;
- $M_{fx} < M'_{rx}$ (pour la stabilité de la semelle en compression)
  où M'_{rx} est la résistance en flexion d'une poutre courbe et est fonction de la longueur non supportée de l'aile en compression, du rayon de courbure, de la largeur de la semelle et de l'intensité de la contrainte normale de flexion;
- L'espacement des raidisseurs d'âme est fonction de l'épaisseur de l'âme, du rayon de courbure et de l'espacement des entretoises.

Aussi, il est important d'avoir un modèle d'analyse permettant d'évaluer les moments de flexion dans les semelles dus au gauchissement de torsion.

Modèles d'analyse

Afin d'évaluer les efforts secondaires engendrés par la courbure du pont, un modèle 2D ne peut-être utilisé. Un modèle 3D (grillage plan) ne permet que l'évaluation des efforts de flexion (M_{fx}) et de cisaillement dans les poutres d'acier. Les efforts de torsion obtenus de ce modèle étaient localisés très près des appuis et d'assez faible intensité et ne pouvaient servir à la conception des poutres. L'évaluation des efforts de flexion dans les semelles (M_{fw}) dus au gauchissement de torsion ne peuvent être évalués avec un modèle de grillage.

Afin d'obtenir les efforts secondaires dans les semelles des poutres dus à la courbure du pont, il est requis d'utiliser les éléments finis. Le modèle utilisé consistait à modéliser les âmes des poutres par éléments finis et les semelles par des membrures ayant les propriétés géométriques (A_x, I_x, I_y, J_{xx}) des plaques d'acier constituant les semelles (figures 4 et 5). Ceci avait pour avantage d'avoir directement les efforts de flexion dans les semelles autour de l'axe Y et ainsi éviter l'évaluation de ces efforts à partir des contraintes.

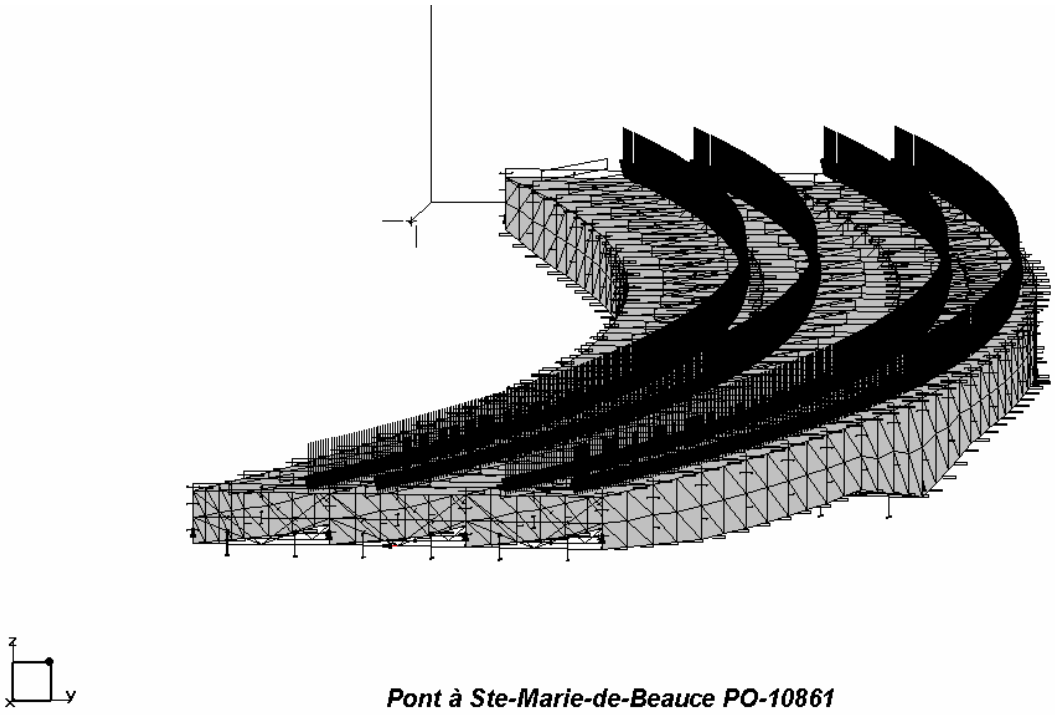

Figure 4 : Modèle d'analyse 3D avec un scénario de chargement

Ce modèle permettait aussi de modéliser les entretoises et les lacets de façon précise, de calculer les efforts secondaires dans les semelles supérieures et inférieures et de voir les effets locaux des lacets servant à la retenue latérale des poutres durant la phase de construction.

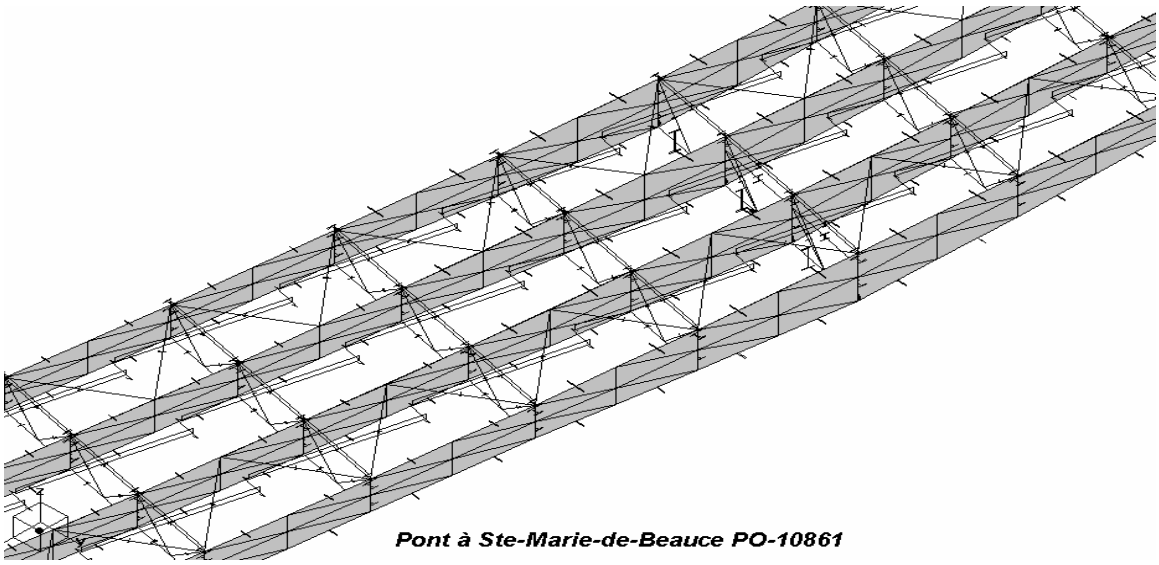

Figure 5 : Poutres modélisées par éléments finis (âmes) et membrures (semelles, entretoises et tablier)

Le tablier était composé de plaques (non montrées à la figure 5) ayant la propriété d'avoir l'effet diaphragme ou non selon la phase de construction du pont analysée.

Résultats des analyses

Les efforts de flexion dus au gauchissement en torsion sont principalement causés par les lacets en V (figure 6). Ces lacets ont pour principale fonction de contreventer horizontalement les poutres durant la construction du tablier. Si ces lacets sont placés au niveau de la semelle inférieure, en plus de créer des efforts lors de la construction du tablier, ils induisent aussi des efforts secondaires (M_{fw}) à chaque passage de camion, efforts qu'il faut aussi considérer au niveau de la fatigue dans les zones en tension.

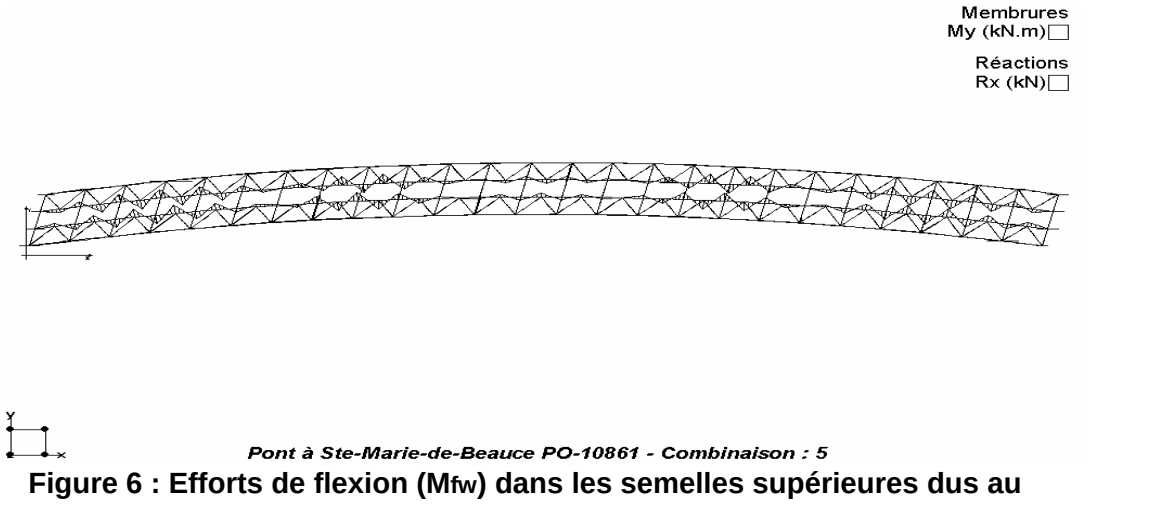

Figure 6 : Efforts de flexion (M_{fw}) dans les semelles supérieures dus au gauchissement de torsion sous le poids de la dalle de tablier

En les plaçant au niveau de la semelle supérieure, les efforts de flexion dus au gauchissement de torsion ne sont importants que pour la coulée du tablier. Une fois le tablier complété, l'influence des lacets ne se fait plus sentir. Au niveau de la semelle inférieure, les efforts secondaires demeurent relativement faibles même sous la charge de camion (figure 7).

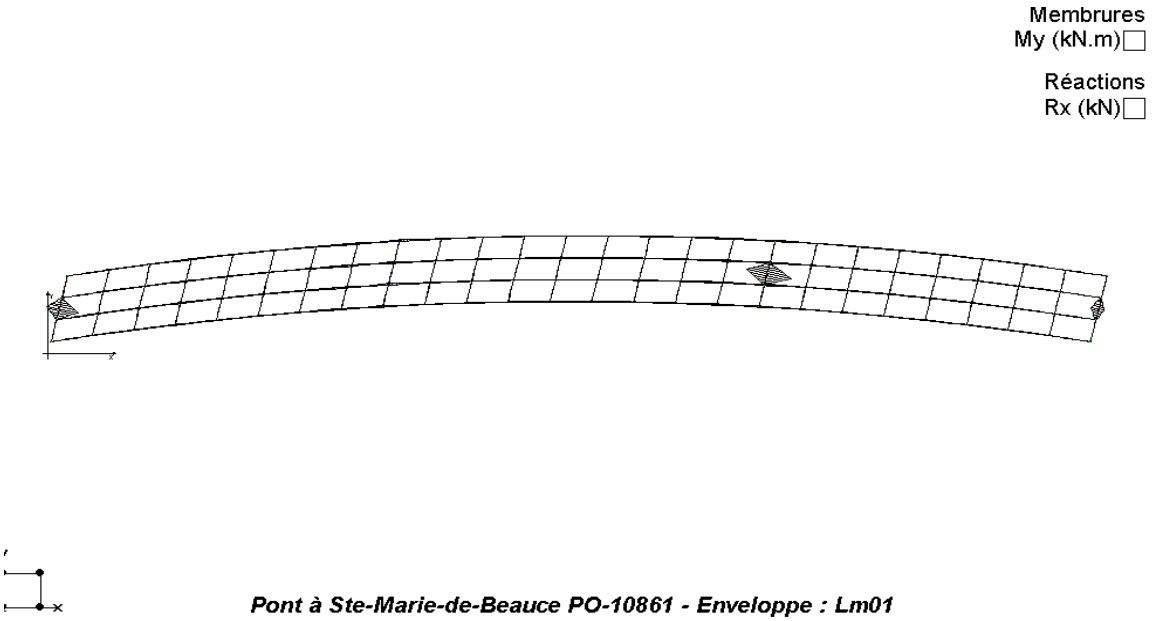

Figure 7 : Efforts de flexion (Mfw) dans les semelles inférieures dus au gauchissement de torsion sous la charge de camion

Sur un pont courbe, tous les cas de chargement engendrent des efforts latéraux aux appuis. Malgré la présence des poutres de levage, les efforts ne se distribuent pas également entre les appuis et la position de l'appui le plus sollicité horizontalement sur une même culée ou pile varie en fonction de la voie chargée et du nombre de voies chargées.

De même pour l'analyse sismique, de fortes variations au niveau des réactions d'appuis étaient présentes sur une même culée ou pile. Ceci demandait des ancrages importants pour chacun des appareils d'appui et de ce fait, à un surdimensionnement des ancrages.

Afin de résoudre ce problème, des appareils bidirectionnels sont utilisés avec butoirs centraux aux culées et à la pile 3. À la pile 2, des appareils unidirectionnels retiennent le tablier longitudinalement et un butoir le retient latéralement.

Tel que le spécifie la norme CAN/CSA-S6-00 pour les pont courbes, les butoirs, à l'exception de celui de l'axe 2, ne sont pas perpendiculaires aux unités d'appui, mais orienté vers l'unité fixe (figure 8). Ceci afin de permettre au tablier de se dilater sous les variations de température sans engendrer d'efforts horizontaux dans les butoirs et les diaphragmes. Cependant, cette orientation produit des effort de torsion dans les poutres de levage centrales tel que montré à la figure 7. Ceci demande un dimensionnement des poutres de levage en torsion et le boulonnage de leurs ailes aux poutres principales (figure 9).

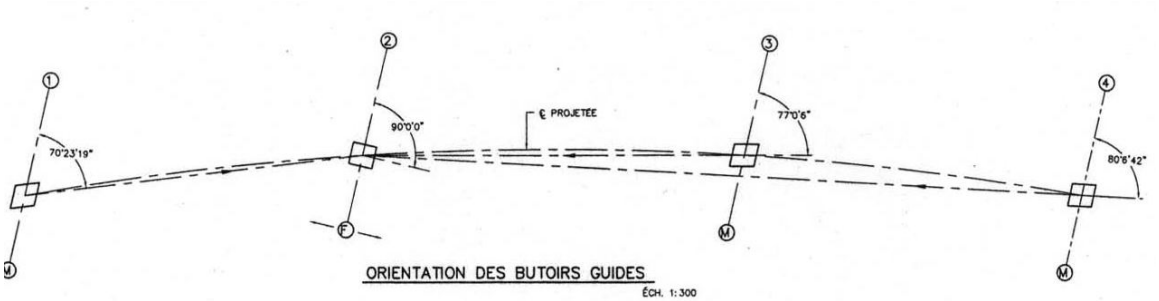

Figure 8 : Orientation des butoirs sur l'unité fixe

Lorsque la dalle est complétée, cette dernière agit comme un diaphragme rigide et l'ajout des charges permanentes dues aux trottoirs, glissières et revêtement bitumineux induira des efforts longitudinaux permanents dans les appareils d'appuis fixes et sur les butoirs presque deux fois plus élevés que ceux induits lors de la coulée de la dalle malgré un poids de ces composantes deux fois inférieur à celui du tablier.

Comme déjà mentionné, pour un pont courbe, la retenue latérale du tablier exercée par les butoirs n'est pas seulement requise que pour résister au séisme ou au vent. Des efforts horizontaux provenant du tablier sous la charge permanente et de service seront présents pour ainsi dire de façon permanente tout au long de la vie utile de l'ouvrage et il est important que ces efforts soient bien transférés aux piles et aux culées par un système de diaphragmes adéquat tel que montré à la figure 9.

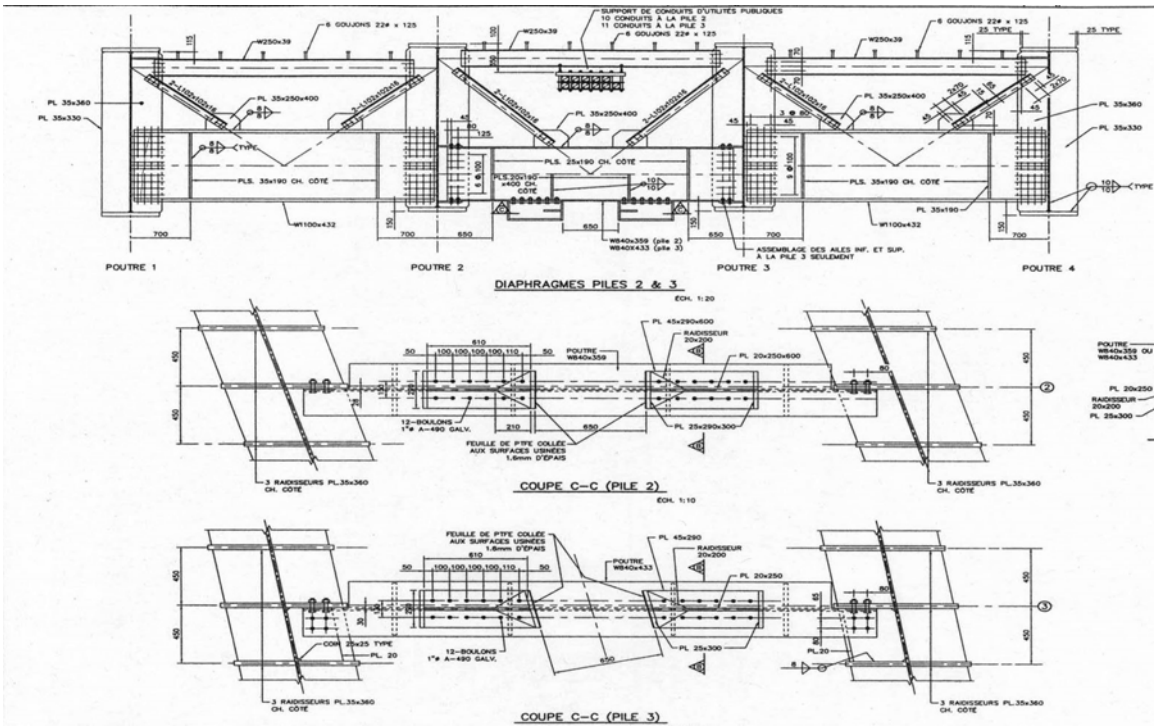

Figure 9 : Diaphragmes au-dessus des piles

Enfin. la poutre la plus sollicitée est la poutre de rive située du coté extérieur à la courbe. Malgré cet écart de sollicitation entre les poutres, elles sont dimensionnées de façon identique à l'exception des cambrures spécifiées pour la construction du tablier. Les exigences de la norme pour les poutres courbes a comme résultat d'avoir des semelles et une âme plus épaisses qu'une poutre similaire sans courbure.

Conclusion

La conception d'un pont courbe demande une analyse structurale beaucoup plus détaillée qu'un pont droit et une attention particulière au niveau de la conception des détails de construction. La modélisation du pont de façon précise est essentielle afin d'évaluer tous les efforts secondaires engendrés par la courbure du pont et permettre ainsi de concevoir les détails particuliers requis de façon adéquate.

Pour l'analyse d'un pont courbe, un modèle avec grillage plan ne permet de calculer que les efforts principaux de flexion et de cisaillement mais ne permet pas d'évaluer les efforts secondaires de flexion dus au gauchissement de torsion. Un modèle 3D où les poutres sont modélisées par éléments finis et où les entretoises et les lacets sont modélisés précisément est requis. Ceci permet d'évaluer les efforts secondaires dans les semelles des poutres courbes nécessaires à la conception des poutres, d'évaluer les efforts dans les diaphragmes et les lacets et à établir les phases de coulée du tablier qui ont une influence importante sur les efforts permanents drainés par les appareils d'appui fixes et les butoirs.

La conception d'une poutre courbe en acier demande plusieurs critères de conception à satisfaire et se sont les lacets servant à assurer le contreventement horizontal des poutres lors de la construction de la dalle de tablier qui produisent le plus d'efforts de flexion dus au gauchissement de torsion dans les semelles. Aussi, il est important de les placer au niveau de la semelle supérieure. Enfin, des efforts horizontaux relativement importants sont présents aux appuis pour tous les cas de chargement.