

**ÉLARGISSEMENT ET RÉPARATION DES PONTS EN ARC NORD ET SUD
SITUÉS SUR L'AUTOROUTE 20
AU-DESSUS DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE À SAINT-ROMUALD**

Jacques Blouin, ing. M. Sc.
Directeur – Ouvrage d'art

GENIVAR Société en commandite
5355, boulevard des Gradins
Québec (Québec) G2J 1C8

RÉSUMÉ : Cet article présente le projet d'élargissement et de réfection des ponts en arc situés sur l'autoroute 20 au-dessus de la rivière Chaudière à Saint-Romuald. Le projet réalisé y est expliqué ainsi que les problèmes rencontrés, tels que : les déformations à long terme des nouveaux arcs par rapport aux arcs existants, la méthode de construction des nouveaux caissons en arc et celle utilisée pour le remplacement des dalles de tablier sur les arcs existants.

INTRODUCTION

Le projet consistait à élargir les tabliers des ponts en arc Nord et Sud situés sur l'autoroute 20 au-dessus de la rivière Chaudière à Saint-Romuald. Le projet incluait la réparation du béton des arcs existants, la démolition et la reconstruction des dalles de tablier sur les arcs, ainsi que la reconstruction complète des travées d'approche.

La préparation des documents d'appel d'offres pour les travaux routiers, l'éclairage et la gestion de la circulation était sous la responsabilité de la Direction territoriale de Chaudière-Appalaches. La préparation des documents d'appel d'offres pour la réparation du béton des arcs existants, le remplacement des dalles de tablier sur les arcs existants et la reconstruction des travées d'approches – incluant les travées d'approche des nouveaux arcs – était sous la responsabilité du Service de l'entretien des structures de la Direction des structures du ministère des Transports du Québec. GENIVAR avait la responsabilité de préparer les documents d'appel d'offres pour l'élargissement de la section en arc des ponts Nord et Sud, incluant leur fondation et l'élargissement des culées Est et Ouest.

Le coût de ces travaux est de 30 M\$, dont 10 M\$ pour les travaux reliés aux deux structures. Les travaux du pont Nord ont été réalisés en 2004 et 2005 par l'entrepreneur « Le groupe CRT inc. ». Quant à ceux du pont Sud, ils ont été réalisés en 2005 et 2006 par l'entrepreneur « Construction Kewit cie ».

Le présent article porte principalement sur les facteurs ayant influencé la conception du nouvel arc, notamment ceux reliés au fluage du béton. La méthode de construction du nouvel arc et le remplacement de la dalle de tablier sur les arcs existants sont aussi abordés de façon sommaire.

DESCRIPTION DES PONTS

Les ponts sont constitués d'une section en arc sur laquelle prennent appui les travées d'approche, comme il est montré à la figure 1. La longueur totale du pont Nord est de 114 mètres et celle du pont Sud de 135,2 mètres. Pour ce dernier, l'approche Ouest est constituée de deux travées ayant respectivement 30,4 et 21,35 mètres de longueur et prenant appui sur une pile intermédiaire. La largeur du tablier avant l'élargissement était de 14,325 mètres. Les travaux réalisés ont augmenté sa largeur à 20,12 mètres.

Pour les deux ponts, la travée principale en arc est constituée de deux caissons en béton armé à inertie variable d'une portée de 92,6 mètres, lesquels sont reliés ensemble par des diaphragmes en béton armé très rigides. Ces ponts furent construits en 1962. Le tablier des travées d'approche existantes était constitué de poutres en béton armé supportant une dalle mince en béton.

L'élargissement des ponts s'est fait par la construction d'un troisième arc en béton armé situé au Nord de chaque structure (voir figure 2). Les nouvelles travées d'approche sont constituées d'un tablier composé de poutres en acier travaillant de façon composite avec la dalle de béton.

L'élargissement des culées Est a été réalisé par des culées évidées d'une hauteur de 20 mètres. Elle sont constituées d'une dalle épaisse sous remblai prenant appui sur un nouveau mur en retour du côté extérieur et sur le mur de soutènement existant du côté intérieur. La culée du pont Nord a 31 mètres de longueur, alors que celle du pont Sud a 22 mètres de longueur. Du côté Ouest, les culées sont de type conventionnel.

Pour chaque pont, les travaux de construction ont été réalisés en trois phases. La première phase consistait à construire le nouvel arc, les nouvelles travées d'approche et l'élargissement des culées. La deuxième phase consistait à démolir et à reconstruire la dalle de tablier au-dessus du caisson central, incluant le remplacement des tabliers des travées d'approche. La troisième phase, similaire à la deuxième, était réalisée sur le caisson Sud. Les phases 1 et 2 sont illustrées aux figures 2 et 3. Pour chacune des phases de construction, la circulation était déviée sur la section complète afin d'avoir en tout temps deux voies de circulation sur le pont.

Une fois les trois phases complétées, de la post-tension transversale a été appliquée au niveau de la dalle de tablier afin de contrôler la fissuration de cette dernière.

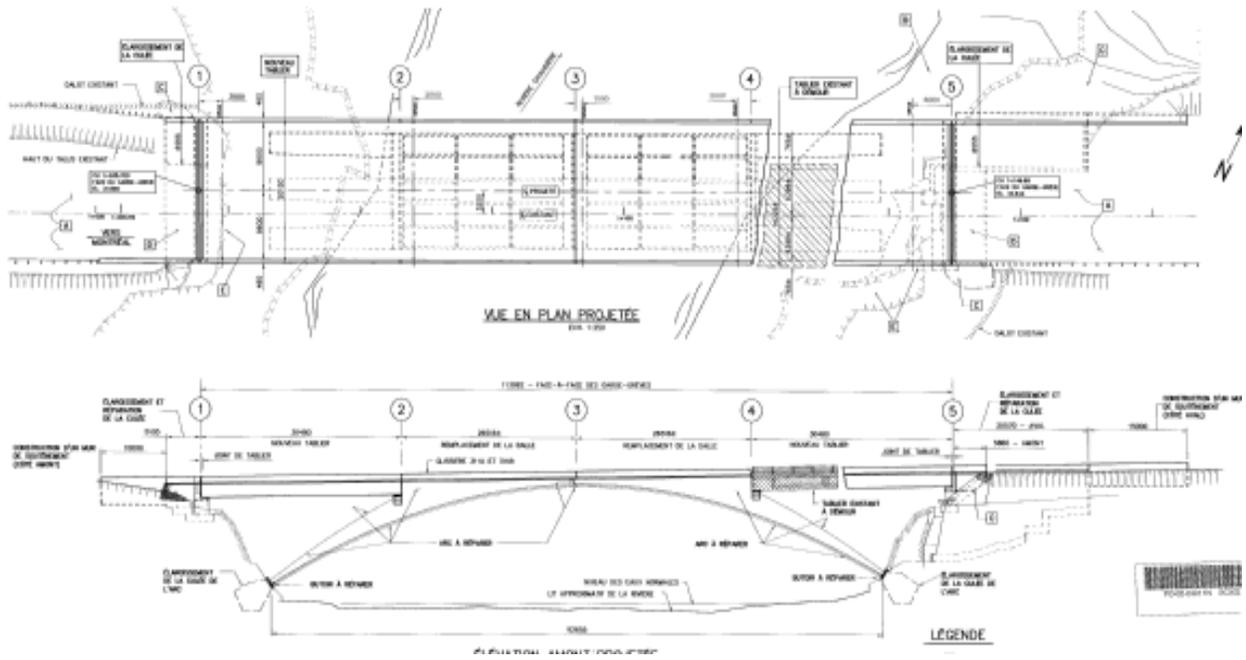


Figure 1 : Géométrie du pont Nord

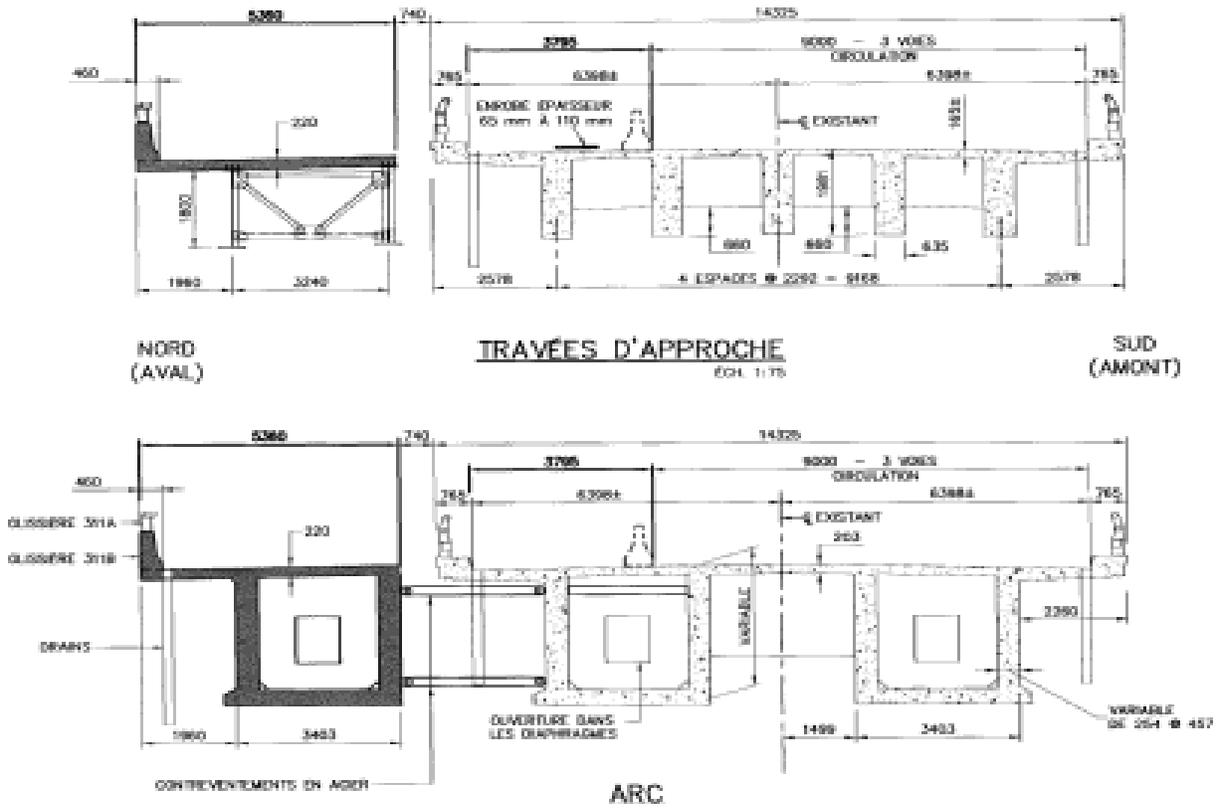


Figure 2 : Phase 1, coupe transversale du tablier

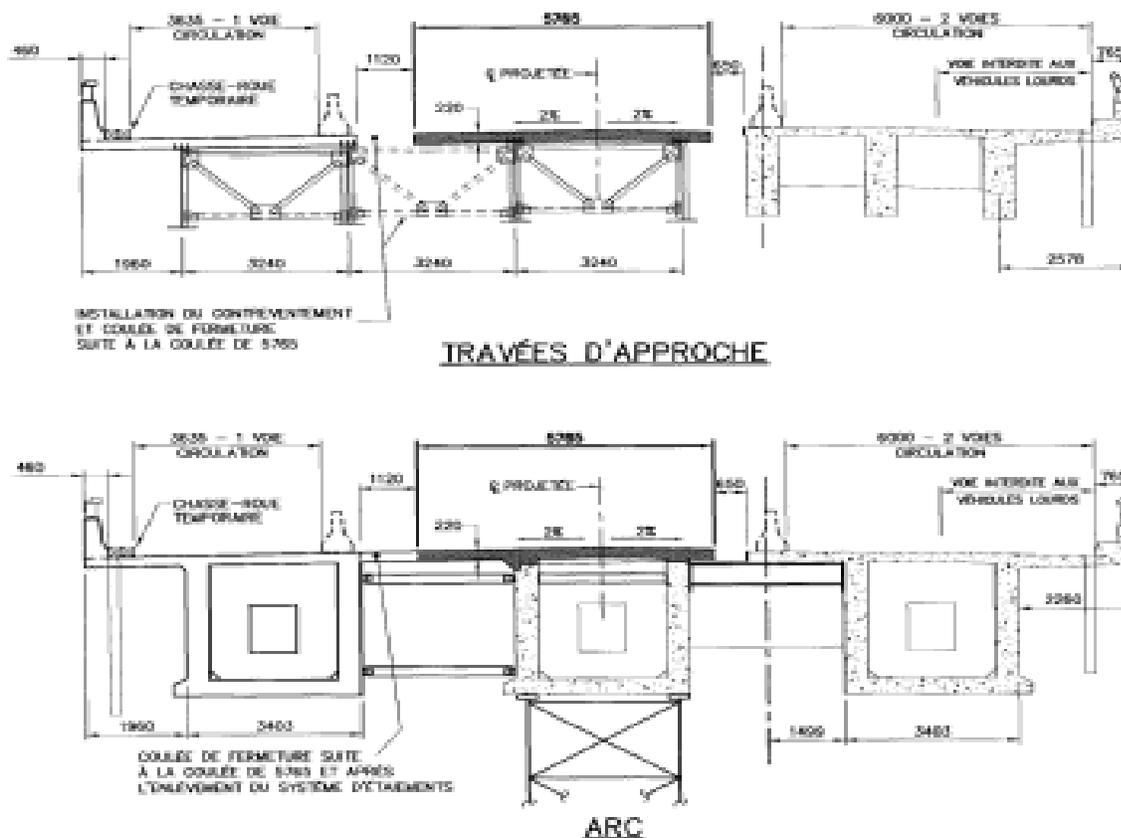


Figure 3 : Phase 2, coupe transversale du tablier

GÉOMÉTRIE DE L'ARC

La section en arc est composée d'un caisson en béton armé à inertie variable, comme montré aux figures 4 à 6. L'arc se subdivise en deux parties. La partie inférieure de l'arc est formée d'une béquille sur laquelle s'appuient les travées d'approche. La partie supérieure de l'arc constitue le tablier sur lequel circule le trafic. La géométrie de la béquille est montrée à la figure 5, tandis que la géométrie de la partie supérieure est montrée à la figure 6.

Les appuis de l'arc sont des rotules et le centre de l'arc, c'est-à-dire à l'axe 3, comporte aussi une rotule. Ces appuis sont constitués de coussins en caoutchouc élastomère renforcés de fibres synthétiques. Ces coussins sont placés à l'intérieur de boîtiers en acier ancrés au béton. La figure 5 montre la rotule à la base des béquilles. La figure 6 montre la rotule au centre de l'arc.

Aucune modification de la géométrie initiale des caissons n'a été apportée par rapport à la géométrie des caissons des arcs existants, à l'exception de détails mineurs près de l'axe 3 afin de diminuer localement le taux de contraintes. Seuls l'acier d'armature et le type de béton ont été modifiés. Un béton de ciment de type XIII (50 MPa) a été utilisé.

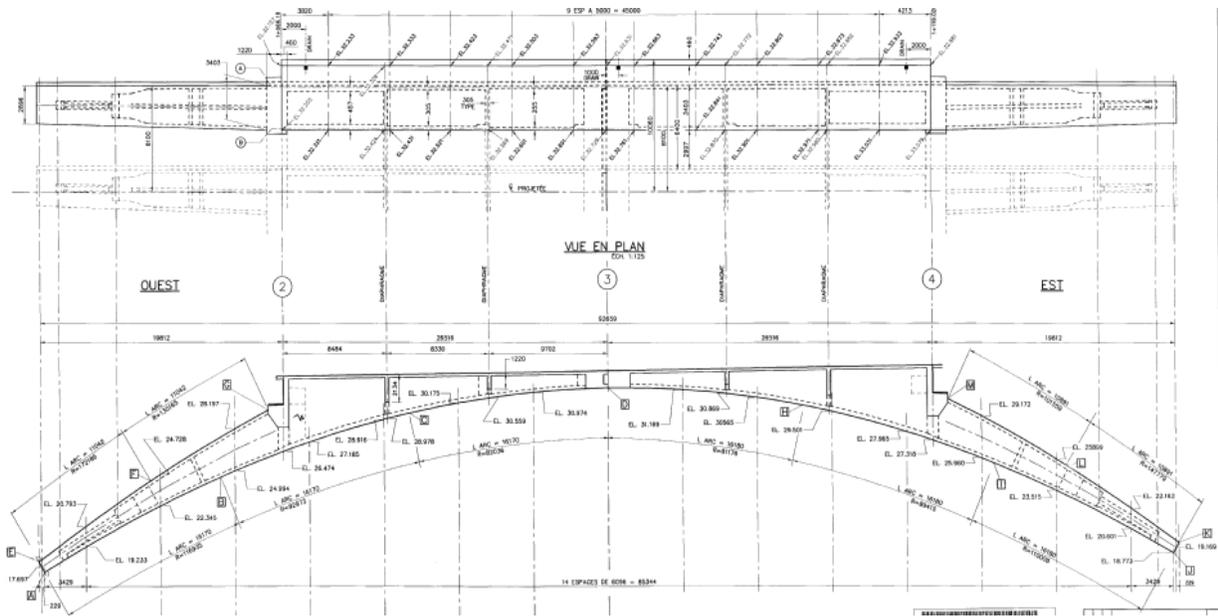


Figure 4 : Vue en plan et en élévation du nouvel arc

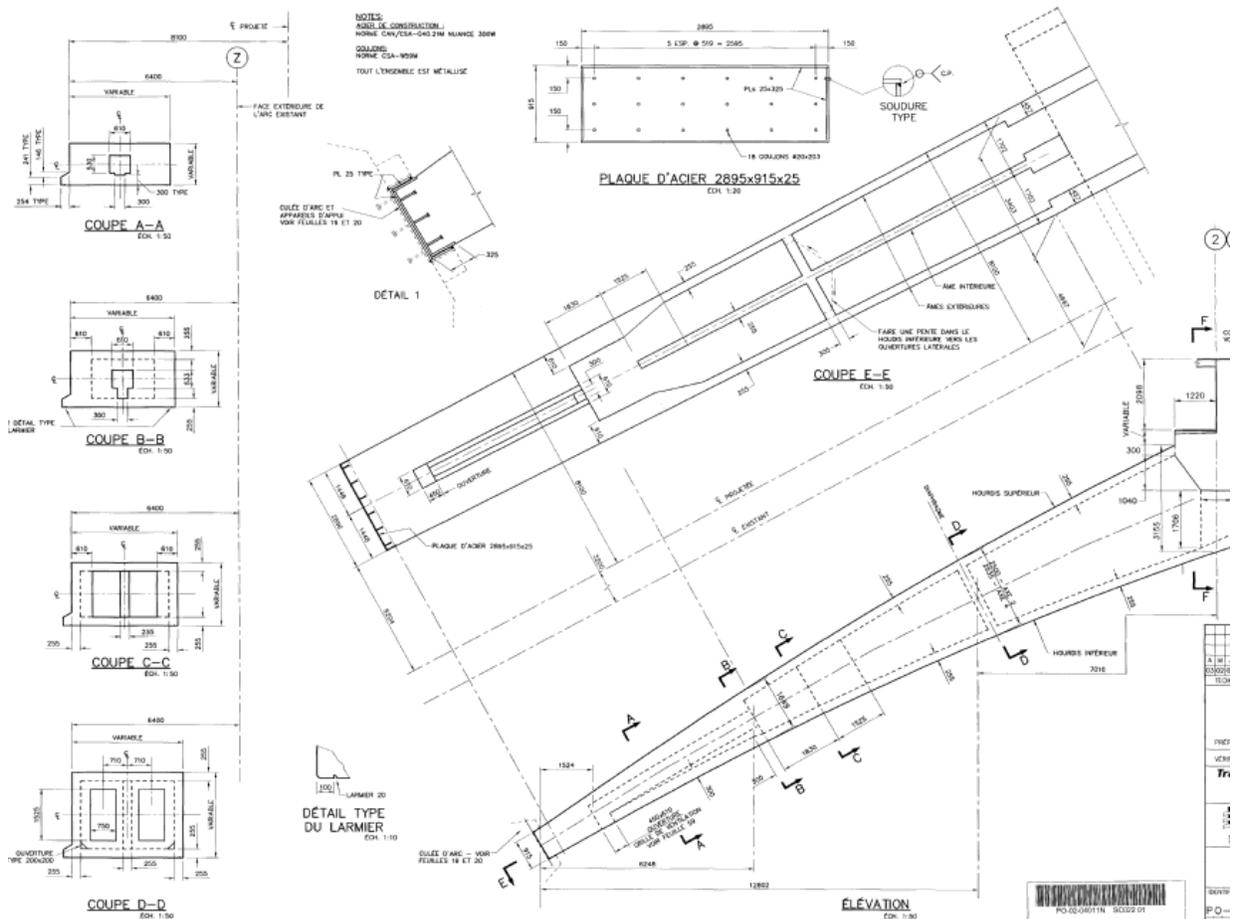


Figure 5 : Détails de la béquille

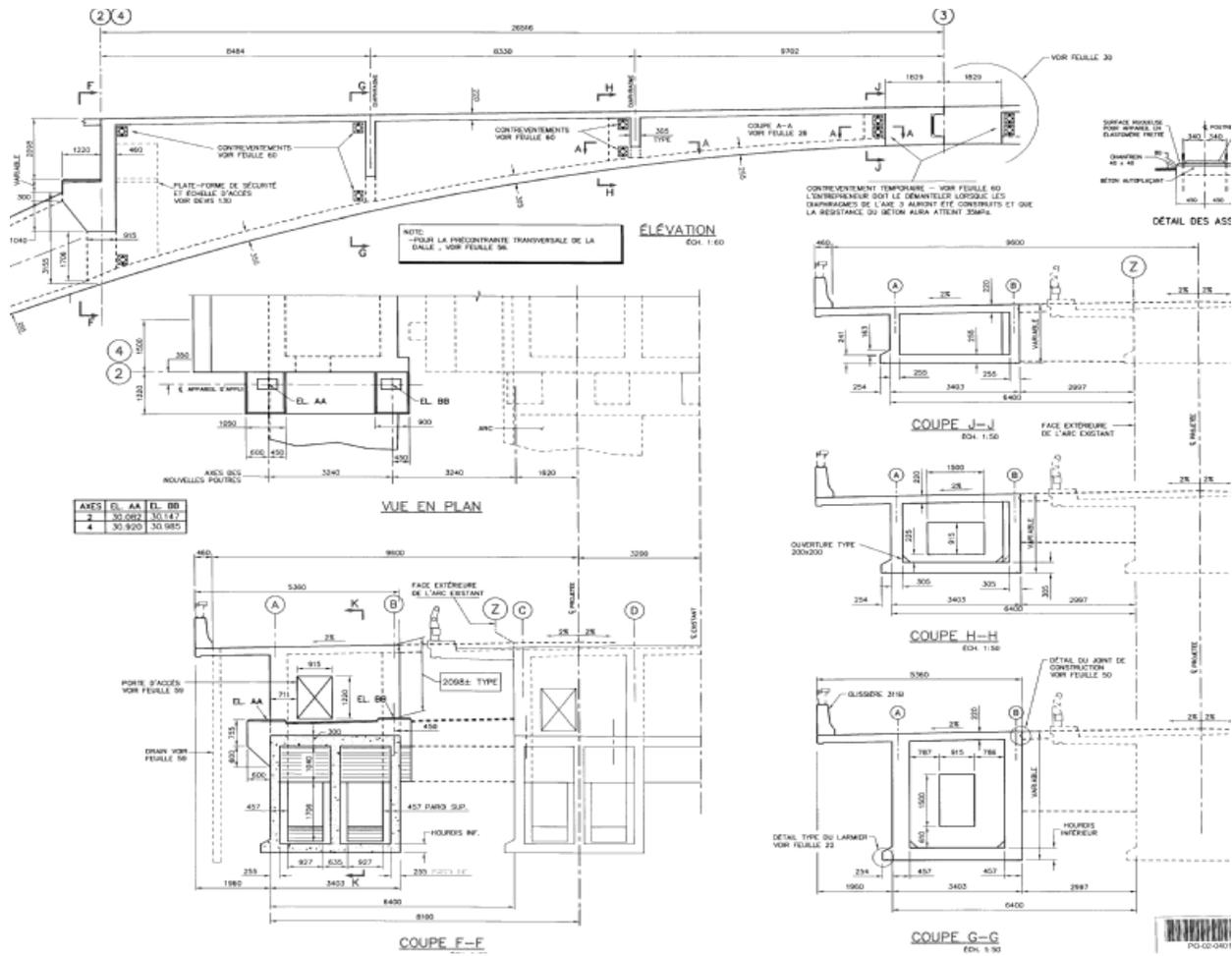


Figure 6 : Détails du caisson du tablier

CHARGEMENTS

Les chargements considérés pour le dimensionnement de l'arc sont les suivants :

- Le poids propre selon les étapes de construction;
- La surcharge routière normalisée QS-660;
- Le fluage;
- Le retrait;
- La température;
- La surcharge sismique (selon la norme S6-88).

La capacité en flexion des arcs est fortement influencée par les efforts de compression axiaux. La capacité en flexion pondérée des caissons fut aussi vérifiée, en plus des combinaisons demandées par la norme S6-88 avec la combinaison $0.85 (N_D + N_L) + 1.2 M_D + 1.6 (1+I) M_L$.

Pour ce projet, le fluage a fait l'objet d'une étude plus poussée. Les arcs existants sont construits depuis plus de 40 ans, alors que le retrait et le fluage de ces arcs sont complétés depuis plusieurs années. Le béton du nouvel arc subira un retrait et un fluage pour au moins les cinq prochaines années.

Aussi, il était important de connaître la déformation à long terme du nouvel arc afin de déterminer à quelle élévation l'arc devait être construit par rapport au pont existant ainsi que son influence sur le comportement des arcs existants.

Pour cette analyse, les spécifications du chapitre 8 de la norme S6-00 ont été suivies. La déformation causée par le fluage se calcule comme suit :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{c(t-t_0)} &= [0,8 (1 - K_0) + 0,4\beta_d + k_r (k_{f(t)} - k_{f(t_0)})] \varepsilon_e \\ &= \Phi_{(t-t_0)} \cdot \varepsilon_e\end{aligned}$$

- où
- ε_e = Déformation élastique du béton $(P/A_x \pm M_x/S_x) / E_c$
 - K_0 = Coefficient reflétant la variation de la résistance du béton avec l'âge
 - β_d = Coefficient représentant le développement de la déformation élastique différée avec le temps
 - k_r = Coefficient de fluage en fonction de l'humidité relative
 - k_f = Fonction représentant la déformation plastique différée

Cette équation est valide pour un béton de 40 MPa. Pour un béton de 50 MPa, les valeurs calculées doivent être corrigées, tel qu'il est expliqué dans la norme S6-00. Le fluage fut analysé à l'aide d'un gradient thermique équivalent calculé comme suit :

$$\Delta T = \varepsilon_{c(t-t_0)} / \alpha$$

où α est le coefficient de dilatation thermique du béton. Le chargement simulant le fluage s'est fait par un gradient thermique équivalent pour chacune des étapes de construction. Le fluage est fonction de plusieurs facteurs, dont le temps entre la coulée du béton et sa mise sous chargement. Les étapes de construction et les temps retenus pour chaque étape de construction se résument comme suit :

- Décoffrage de l'arc à 30 jours;
- Coulée des dalles des travées d'approche à 180 jours;
- Coulées des diaphragmes à 270 jours;
- Pavage à 365 jours;
- Déformation après 730 jours.

Les déformations calculées sont montrées à la figure 7. La courbe en pointillé montre la déformation obtenue en considérant les étapes de construction et un gradient thermique équivalent. La courbe supérieure montre la déformation avec un gradient thermique équivalent en considérant la structure complètement chargée à 30 jours. La courbe inférieure montre la déformation obtenue en multipliant directement la flèche élastique obtenue à

chaque phase de construction par le coefficient de fluage. En considérant les étapes de construction, le calcul se faisait comme suit :

$$\begin{aligned}\Delta_{t30} &= \Delta_1 \\ \Delta_{t90} &= (1 + \Phi_{(90-30)}) \Delta_1 + \Delta_2 \\ \Delta_{t180} &= (1 + \Phi_{(180-30)}) \Delta_1 + (1 + \Phi_{(180-90)}) \Delta_2 + \Delta_3\end{aligned}$$

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ étant les déformations élastiques à chaque étape de construction, ce calcul était répété pour 365 jours et 730 jours.

Le calcul du fluage par un gradient thermique équivalent donne une augmentation des déformations d'environ 12 % par rapport à la pondération directe de la flèche élastique. À noter que le fait de calculer le fluage à partir d'une structure totalement complétée à 30 jours n'augmente les déformations que de 6 % à long terme.

Le coefficient de fluage après 5 ans a aussi été calculé à titre comparatif avec d'autres normes, dont les résultats sont donnés au tableau suivant :

Norme	$\Phi_{(1825-30)}$
S6-00	1,359
A23.3-94	1,22
ACI-1992	0,89
AASHTO-1994	0,59

Les résultats montrent que la norme S6-00 est la plus sévère concernant le calcul du fluage. À noter que les arcs ont été instrumentés par le ministère des Transports du Québec afin de suivre leurs déformations dans le temps.

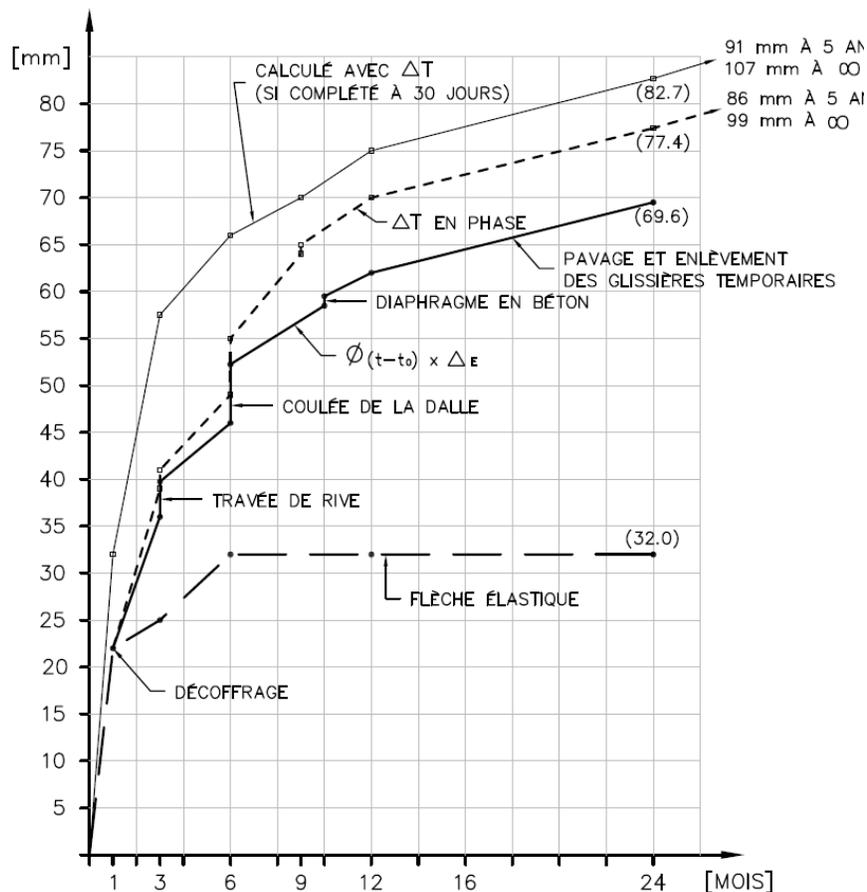


Figure 7 : Déformation au centre de l'arc à cause du fluage

Les analyses 3D ont montré que le fluage engendre des efforts considérables dans le caisson central existant si le nouvel arc est relié de façon trop rigide aux arcs existants. Des diaphragmes rigides ont pour effet de transférer une partie de la masse du nouvel arc ainsi qu'une partie de la masse de l'arc extérieur existant à l'arc central, tel que montré à la figure 8, et donc à surcharger ce dernier. Le raccordement du nouvel arc aux arcs existants devait donc permettre au nouvel arc de se déformer librement sans engendrer de nouveaux efforts aux arcs existants.

Les diaphragmes en béton, tels que ceux existants, ne pouvaient être utilisés à court terme et leur construction plusieurs mois plus tard causait de nombreux problèmes. Pour ce faire, des diaphragmes en acier ont été utilisés (voir figure 9). Ces diaphragmes sont fixés à chaque joint que par un seul boulon conçu en conséquence afin d'avoir une rotule parfaite. De plus, les diagonales ne sont pas reliées à la membrure inférieure du diaphragme afin de permettre le mouvement vertical de l'arc.

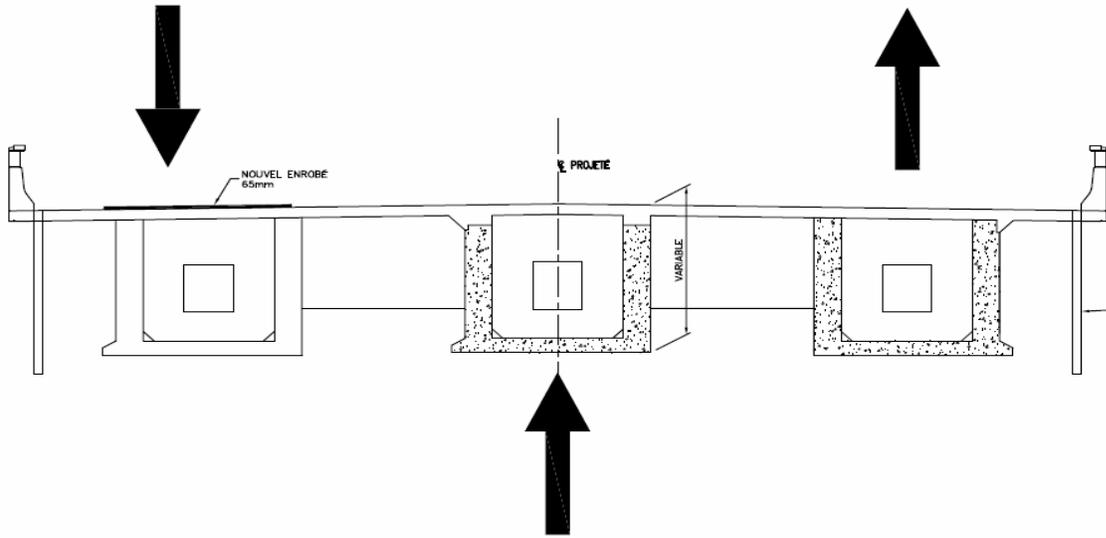


Figure 8 : Influence du fluage sur les arcs existants

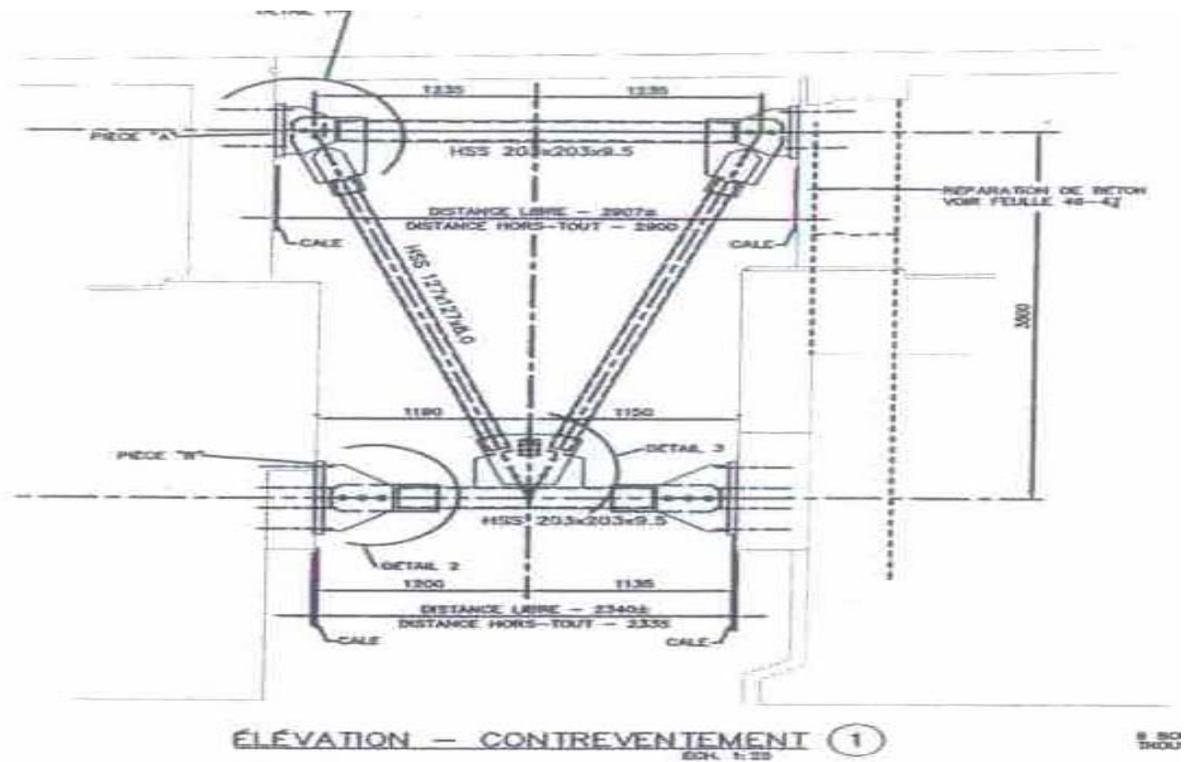
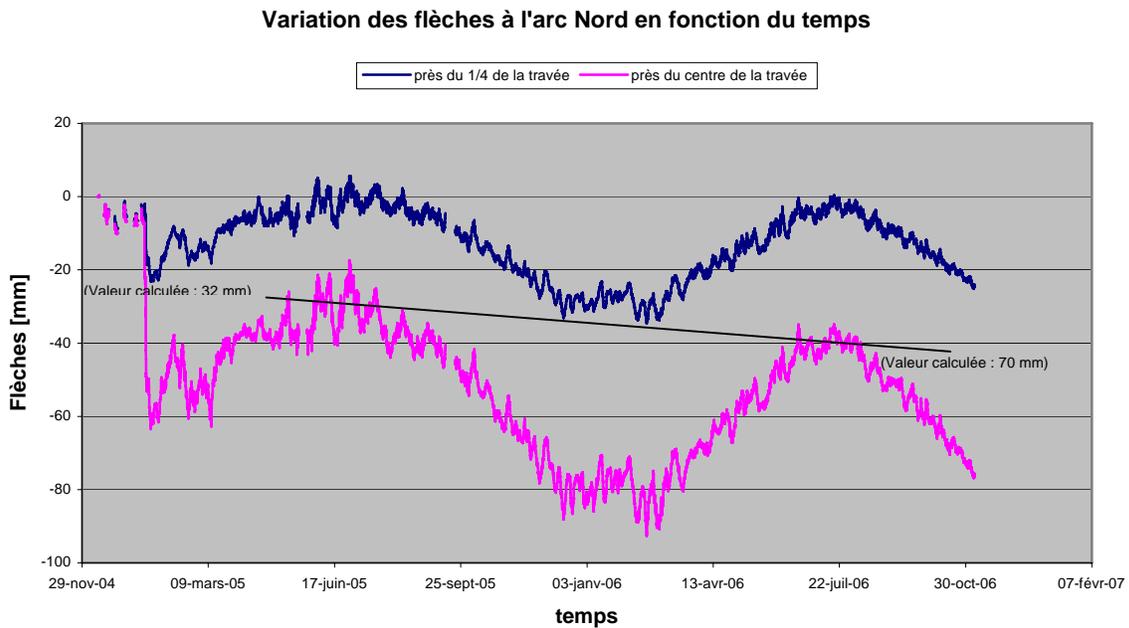


Figure 9 : Diaphragme en acier

Lorsque les déformations à long terme seront stabilisées, suite au suivi des déformations par le Ministère, les joints des diaphragmes seront complétés et les diagonales seront fixées à la membrure inférieure. À noter que la dalle peut suivre facilement les déformations et ne peut transmettre d'effort excessif aux caissons existants.

La figure 10 montre les déformations enregistrées par le Ministère entre novembre 2004 et octobre 2006. Le graphique montre aussi que les déformations verticales des arcs sont grandement influencées par les variations de température. En considérant les déformations moyennes des mois d'été, le graphique indique que la flèche était d'environ 30 mm, 6 mois après le décoffrage, ce qui est près de la flèche instantanée calculée (32 mm). La flèche mesurée après 18 mois était de 40 mm, ce qui représente 57 % de la flèche calculée (70 mm) selon la figure 7. Ceci semble indiquer que la norme S6-00 surévalue l'influence du fluage et que les normes ACI-1992 et AASHTO-1994 seraient plus près de la réalité.



CONSTRUCTION DU NOUVEL ARC

Pour la construction du nouvel arc, l'entrepreneur a supporté les coffrages à l'aide d'une fausse charpente en acier. Comme montré à la figure 11, une partie des coffrages repose directement sur le sol et une autre sur la fausse charpente.

La méthode préconisée au début par l'entrepreneur était de faire la mise en place du béton par étape à partir de chaque côté en progressant vers le centre. Cette méthode aurait été adéquate si l'arc avait été coulé en une seule étape, ce qui était impossible. La fausse charpente en acier étant moins rigide que l'arc lui-même, la mise en place du béton dans la partie centrale aurait produit une flèche verticale impossible à suivre par les béquilles supportées par les étaielements reposant directement sur le sol et près des appuis de la fausse charpente. L'analyse de cette méthode a montré qu'elle engendrait des efforts de flexion dans les béquilles aux endroits montrés à la figure 11 de beaucoup supérieurs à leur capacité en flexion.

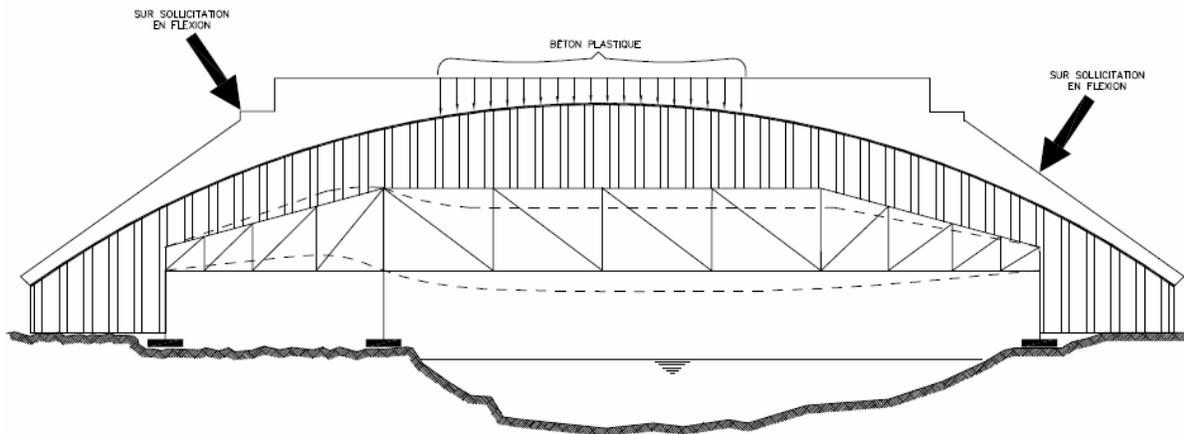


Figure 11 : Sur sollicitation des béquilles en flexion

Il a été demandé à l'entrepreneur de modifier sa méthode de construction afin de minimiser les efforts dans la structure. La méthode soumise et acceptée consistait à construire l'arc par étape de façon à permettre la déflexion de la fausse charpente sans engendrer d'efforts de flexion élevés dans les caissons des béquilles. Pour ce faire, l'entrepreneur a établi des étapes de coulée (voir figure 12) afin de charger au maximum la fausse charpente avant de compléter les béquilles. Un modèle d'analyse a été utilisé par ses ingénieurs en considérant la rigidité des tronçons durcis et construits aux coulées précédentes. L'analyse des contraintes dans le béton durci à chaque nouvelle coulée permettait de suivre leur évolution et de vérifier que la capacité structurale des caissons n'était pas dépassée. Les béquilles ont été complétées (coulées 7 et 8) juste avant la dernière coulée qui consistait à fermer l'arc à l'axe 3. La

déflexion totale obtenue selon cette méthode était près de la déflexion calculée en considérant le poids total de l'arc non durci, soit 132 mm (mesurée) vs 114 mm (calculée).

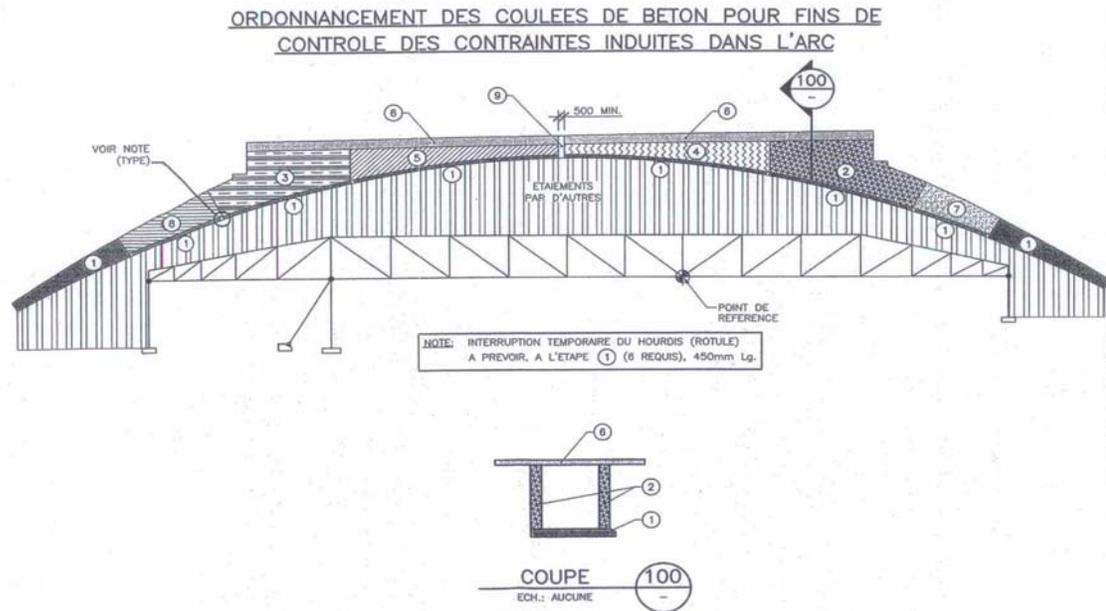


Figure 12 : Étape de mise en place du béton

DÉMOLITION ET RECONSTRUCTION DE LA DALLE SUR LES CAISSONS EXISTANTS

Les caissons existants ont été supportés lors de leur construction en 1962 avant leur mise en charge. La démolition de la dalle de tablier de ces caissons, qui est participante à reprendre les efforts de compression et de flexion longitudinaux de l'arc, causait un problème sérieux. La méthode initiale consistait à installer la fausse charpente sous l'arc. La fausse charpente, quoique rigide, est cependant beaucoup plus flexible que le caisson – même sans dalle de tablier – et agissait plutôt comme un filet de sécurité.

Suite à la perte de la fausse charpente par les glaces lors de la construction de l'arc Nord, la façon de procéder a été revue avec les ingénieurs du Ministère, de l'entrepreneur et de GENIVAR. La solution retenue et réalisée a été de construire une nouvelle dalle à l'intérieure du caisson, avant la démolition de la dalle existante, afin d'avoir en tout temps un caisson fermé comme montré à la figure 13.

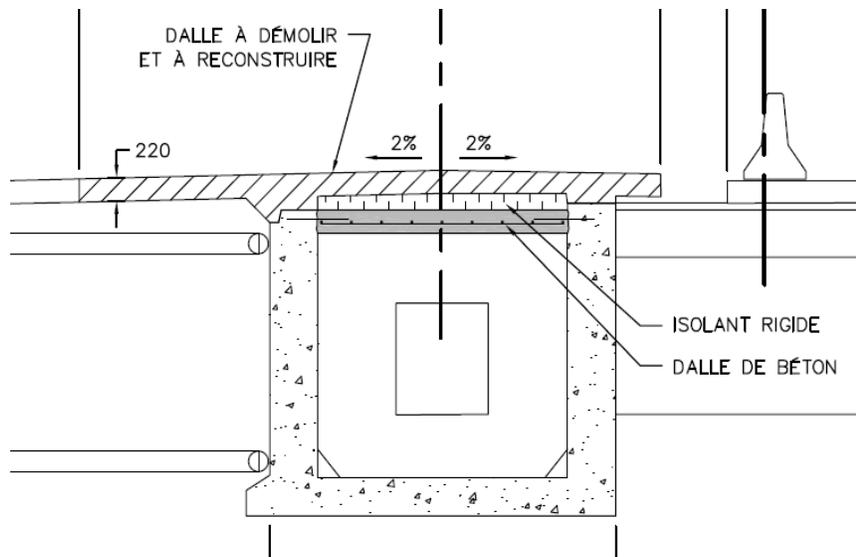


Figure 13 : Méthode utilisée pour le remplacement de la dalle de tablier sur les caissons existants

CONCLUSION

Les travaux d'élargissement et de réparation des ponts en arc ont demandé des analyses approfondies à plusieurs niveaux. Une analyse poussée du fluage a permis de déterminer la façon de raccorder le nouvel arc au pont existant pour ne pas induire d'efforts excessifs dans ce dernier. Cette analyse devait aussi servir à déterminer l'élévation à laquelle le nouvel arc devait être construit par rapport au pont existant. Ces analyses ont permis de constater aussi que la norme S6-00 est plus sévère que les normes utilisées à titre comparatif. Les résultats des déformations mesurées sur le nouvel arc par le Ministère tendent aussi vers cette conclusion.

La construction de l'arc a demandé de la part de l'entrepreneur une méthode de construction par étapes bien établie et des analyses structurales à chaque étape afin de suivre l'évolution des contraintes pour que la capacité structurale des caissons des béquilles ne soit pas excédée.

Le remplacement des dalles de tablier sur les arcs existants a aussi demandé une attention particulière afin de conserver l'intégrité structurale des caissons.

Les ponts en arc situés sur l'autoroute 20 au-dessus de la rivière Chaudière sont donc des structures singulières qui ont demandé des interventions en ingénierie non usuelles.