

19^{ième} Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art

Conception du nouveau pont levant no 9 au-dessus du canal de Chambly

**Tony Mailhot, ing., M.Sc. – GENIVAR
Stéphane Nadeau, ing. – GENIVAR
René Bernard, ing. – Parcs Canada**

Résumé :

Le projet a consisté à concevoir et construire, pour le compte de Parcs Canada, un nouveau pont levant enjambant le canal de Chambly à la limite des municipalités de Carignan et de Saint-Jean-sur-Richelieu, en remplacement du pont 9 existant construit à la fin du 19^{ième} siècle.

Diverses alternatives furent analysées quant au choix de la structure, dont la reconstruction d'un pont rotatif semblable à celui déjà existant. Toutefois, les quelque quinze (15) mètres séparant le canal Chambly de la route 223 rendaient cette solution difficilement réalisable.

GENIVAR a donc retenu la construction d'un pont levant, avec contre poids dont le mouvement est activé par un système hydraulique. Ce pont complexe, malgré ses dimensions modestes, a exigé une grande précision en termes de calculs et une coordination importante des principaux intervenants. Bien que recensé à quelques endroits en Europe, la conception de ce pont serait unique au Canada, voire même en Amérique du Nord.

1. LE CANAL DE CHAMBLY, LIEU HISTORIQUE NATIONAL DU CANADA

Épine dorsale du commerce entre la vallée du lac Champlain et celle du Saint-Laurent, le parcours du Richelieu n'en est pas moins ponctué d'obstacles naturels. Parmi ces entraves à la navigation, les tumultueux rapides de Chambly en sont les plus formidables. Dès 1831, on entreprend de les contourner au moyen d'un canal, puis en 1835, les travaux sont suspendus jusqu'en 1841. Deux (2) ans plus tard, les embarcations peuvent enfin l'emprunter sur ses 19,31 kilomètres de long. Composante clé du vaste réseau de voies navigables du Nord-Est américain, le bois et le foin, puis le papier y vogueront vers le Sud tandis que le charbon descendra ses neuf (9) écluses en sens inverse.



Figure 1 – Vue du canal à Saint-Jean-sur-Richelieu à l'occasion du Festival des montgolfières

De dimensions réduites, soit de 36,7 mètres de longueur sur 7 à 7,4 mètres de largeur, avec une hauteur sur les seuils d'à peine 2 mètres; le manque d'envergure de ses écluses en restreindra l'accès aux petits navires. Bien que la question de l'élargissement du canal soit maintes fois posée, rien n'y fait; son gabarit demeurera intact. Résultat : au XIX^e siècle, les goélettes et les barges seront les principales embarcations à y écluser, puis au siècle suivant, l'omniprésence des barges en fera un *barge canal*. Vers les années 1950, le trafic fluvial commercial sur le Richelieu s'érode jusqu'à s'estomper dans les années 1970. Fort heureusement, la navigation de plaisance donne encore vie à un canal qui a conservé presque intacts son tracé ancien et ses structures historiques datant du XIX^e et du XX^e siècle (réf. figures 1 et 2 ainsi qu'une vue géographique aux figures 3 à 5).



Figure 2 – Vue d'une des nombreuses écluses en opération du canal

Si l'on emprunte ce canal du bassin de Chambly au port de Saint-Jean, on peut remarquer à son embouchure les spectaculaires écluses en escalier construites entre 1841 et 1842. En arpentant sa piste polyvalente ou naviguant sur ses flots, on ne peut manquer l'un des ponts mobiles et l'une des écluses qui ponctuent ce paysage. En dépit de leur taille modeste, plusieurs des logettes servent encore d'abri, d'entrepôt et de poste de travail pour les éclusiers et les pontiers du canal. De style néo Queen-Anne, les logettes des ponts n° 2, 3, 5 et des écluses n° 1, 3, 7 et 8 ont vu leur valeur patrimoniale être reconnue par le Canada en 1990 et 1997. Il en va de même de l'ancien atelier du canal, mais en 1989, cette fois.

Désigné lieu d'importance historique nationale en 1929 par le gouvernement du Canada, le canal demeure la seule composante opérationnelle du réseau des canaux historiques du Québec à avoir conservé son gabarit d'antan. Depuis 1972, l'Agence Parcs Canada veille à sa protection et à sa mise en valeur. Fait à noter : la Société canadienne de génie civil inscrit ce site dans sa courte liste de 25 lieux historiques nationaux de génie civil, puis elle y appose en 1997 une plaque.

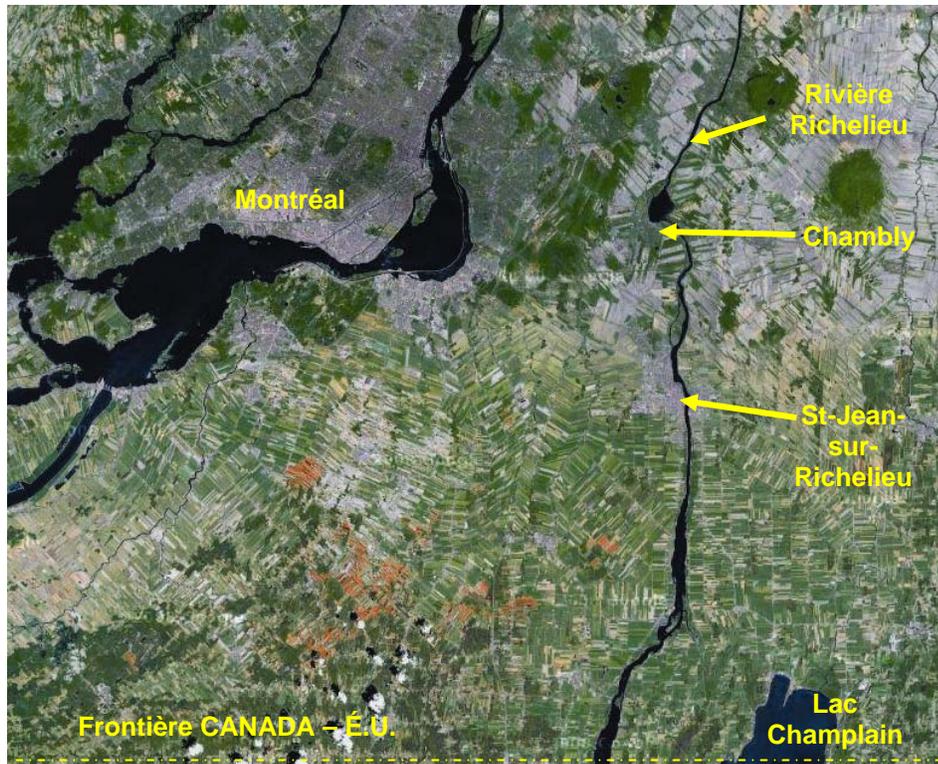


Figure 3 – Vue aérienne régionale

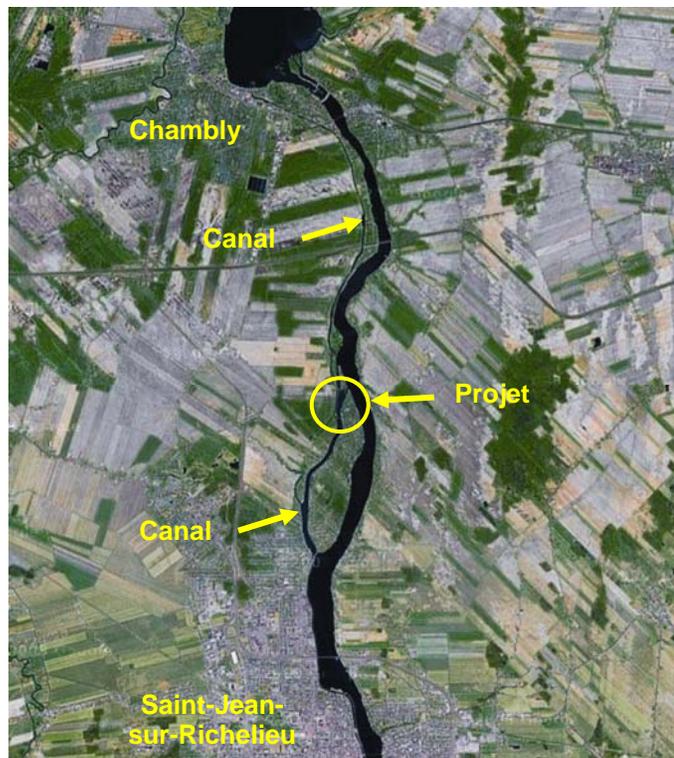


Figure 4 – Vue aérienne – Canal de Chamby

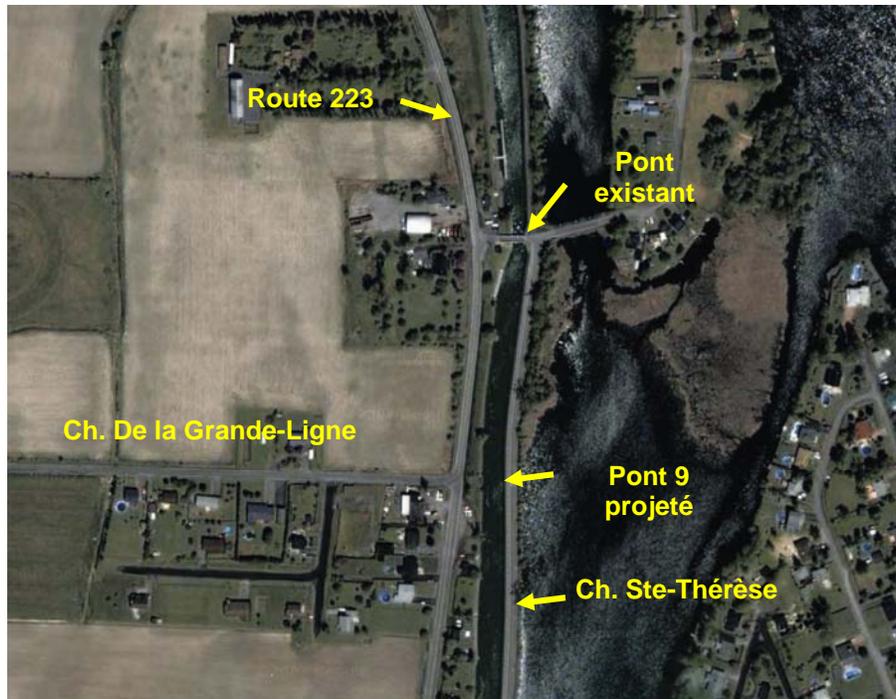


Figure 5 – Localisation du projet

2. LE PONT 9 EXISTANT

Construit par la Montreal Bridge Works en 1887-1888, le Pont n°9 existant était le plus ancien de tous les ponts du canal de Chambly. Les caractéristiques structurales et architecturales de ce pont tournant en font un élément à la fois représentatif et rare des constructions du XIXe siècle (voir figures 6 et 7 du pont existant). Dans l'ensemble du réseau des canaux historiques canadiens, le Pont n°9 demeure le plus vieux des ponts tournants à travées inégales, munis de fermes de type « Pony-Pratt », avec des montants carrés aux extrémités. Le canal de Chambly, situé le long du Richelieu, constitue un ensemble historique remarquable.

La construction d'un nouveau pont au canal de Chambly et la conservation de l'ancien permet à Parcs Canada d'insérer dans le paysage historique une réalisation moderne, véritable phare de la technologie contemporaine. Elle offre, aux générations actuelles et futures, un aperçu des réalisations techniques propres à notre époque tout en conservant l'intégrité commémorative du lieu historique.

Le vieux pont 9, reconnu comme une ressource culturelle par Parcs Canada, sera conservé et préservé pour les générations actuelles et futures. À la mise en service du nouveau pont faisant l'objet de cet article, il sera positionné parallèlement au canal et stabilisé sur la terre ferme sur de nouvelles fondations. Son platelage composé de bois et d'asphalte, sera remplacé et son ossature sera repeinte.



Figure 6 – Vue d'ensemble du Pont 9 existant sur le canal de Chambly



Figure 7 – Vue de la voie carrossable du Pont 9 existant

3. JUSTIFICATION DE LA RECONSTRUCTION

L'objectif premier du projet était de remplacer le pont n° 9 qui était à la fin de sa durée de vie utile. Sa capacité avait été diminuée de 25 tonnes à 5 tonnes et la circulation y était contrôlée et surveillée. Avec un nouveau pont, les coûts de surveillance et d'entretien seraient réduits. Le Pont n° 9 était utilisé quotidiennement par 5 000 usagers de Saint-Jean-sur-Richelieu et de Carignan. De plus, il ne répondait plus aux exigences de la circulation, tant au niveau de l'achalandage que pour l'accès des véhicules d'urgence et du type de transport.

Depuis 2005, Parcs Canada a entrepris des démarches afin de trouver une solution de «remplacement» du pont actuel. Parcs Canada a été sensible au fait que les besoins municipaux ont grandement changé. En 2006, une étude de circulation a été réalisée. Par la suite, différentes options ont été analysées; parmi celles-ci, la possibilité de reconstruire le pont dans son axe actuel et celle de le reconstruire dans l'axe du chemin de la Grande-Ligne (environ 200 mètres en amont du pont actuel) s'avéraient les plus intéressantes. Celles-ci ont été étudiées de façon plus approfondie quant à la faisabilité au niveau du type de structure et de la géométrie des approches. En février 2009, les partenaires ont arrêté leur choix sur l'option d'un pont levant dans l'axe du chemin de la Grande-Ligne. Le nouveau pont devait être conforme aux normes du Ministère des Transports du Québec. Par la présence de voies multifonctions unidirectionnelles protégées, il éliminera le conflit d'utilisation entre les automobiles, les cyclistes et les piétons.

4. NOUVEAU PONT 9

4.1 Description

Un des principaux critères ayant mené au choix du concept du nouveau pont 9 fut l'espace physique disponible au site du futur pont. En effet, à cet endroit, le canal s'y trouve très près de la route 223 et du chemin Sainte-Thérèse, rendant difficile l'utilisation d'un pont tournant similaire au pont existant. La figure 8 montre une vue en plan du site.

Le nouveau pont devait donc préférentiellement s'ouvrir verticalement de manière à demeurer dans son axe. Le type de pont retenu est le pont à bascule à deux points de rotation, tel que ceux illustrés sur la figure 9. Le nouveau pont 9 a donc été conçu selon ce principe peu utilisé en Amérique du Nord, lequel permet la construction d'un pont d'une largeur plus importante que le pont existant et ce, dans un espace plus restreint. Le pont 9 est illustré sur les figures 10, 11, 12 et 13.

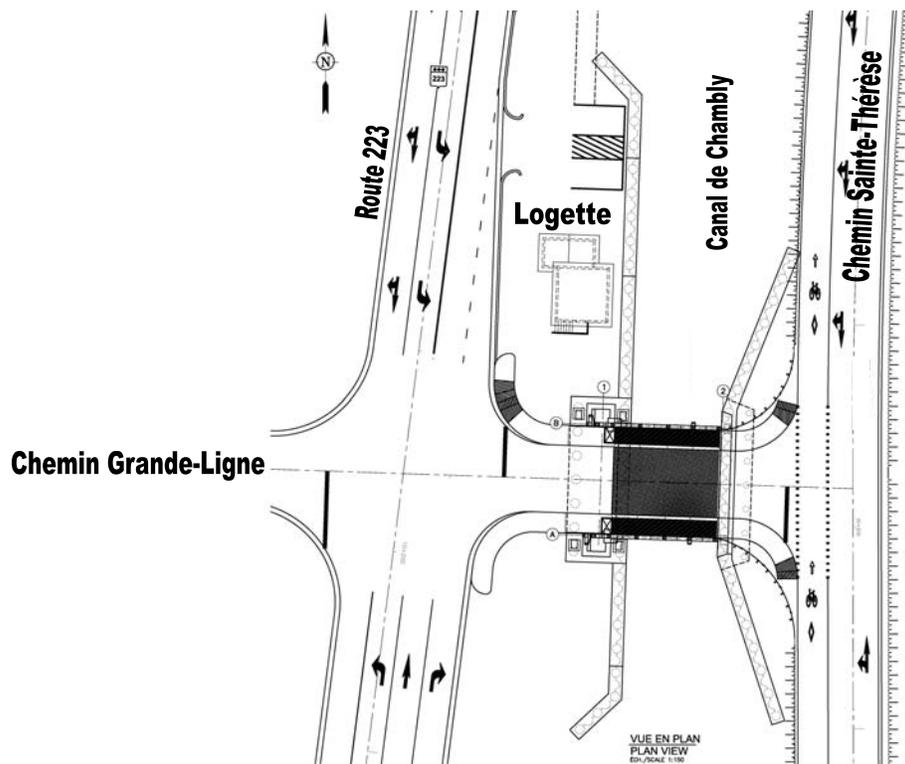


Figure 8 – Vue en plan du site du pont 9 projeté



Figure 9 – Type de pont retenu pour le pont 9 du canal de Chambly [réf. : Ponts à bascule des écluses de Cardiff, Pays de Galles]

Le pont retenu est composé des éléments suivants :

- Le tablier offrant une largeur carrossable de 6,7 mètres et de deux (2) pistes multifonctions unidirectionnelles permettant le passage des piétons et cyclistes ;
- Les supports en A (piliers) ;
- Les bras supérieurs et le contrepoids d'une masse totale de 95 tonnes;
- Les tirants assurant la liaison entre les bras supérieurs et le tablier ;
- Les cylindres hydrauliques permettant l'activation et le contrôle du mouvement du pont ;
- Les dispositifs de centrage ;
- Les amortisseurs ;
- Les dispositifs de blocage.

Afin d'assurer le plein gabarit minimal de navigation du canal, le pont se lève jusqu'à une inclinaison de 80 degrés par rapport à l'horizontal.

Le pont est appuyé sur des pieux caissons et palplanches formant une paroi communément appelée « mur combiné ». Ce mur se poursuit le long du canal de manière à guider les navires à l'approche du pont. Les pieux caissons sont encastrés au roc, alors que les palplanches y sont foncées au refus.



Figure 10 –Élévation sud du nouveau pont 9



Figure 11 –Nouveau pont 9 – Vue du canal



Figure 12 – Nouveau pont 9 – Rive Est



Figure 13 – Le nouveau pont 9 – Ouverture max. (80 degrés) pour navigation

4.2 Mécanisme de fonctionnement et conditions balancées

En analysant le mouvement simultané des bras supérieurs et du tablier, on observe le schéma de levage montré sur la figure 14. Ainsi, pour assurer un mouvement sécuritaire sans surcharger les tirants, il est nécessaire que les arcs de cercles formés par le mouvement du tablier et des bras supérieurs soient parfaitement parallèles. Ainsi, la distance entre les points d'attache des tirants demeure constante à toutes les positions.

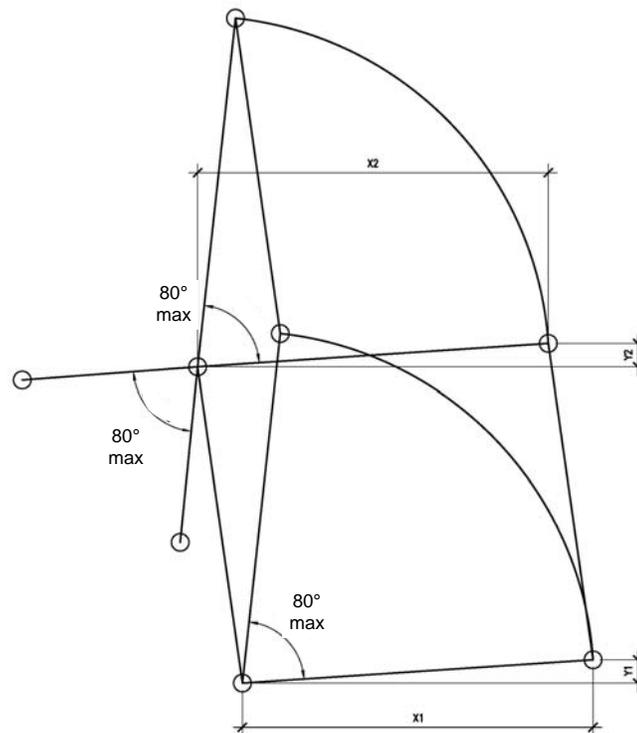


Figure 14 – Schéma du mouvement - Nouveau pont 9

Pour assurer une condition balancée du pont, c'est-à-dire, que la force des cylindres soit constante et de même sens pendant tout le mouvement, la géométrie des bras supérieurs et la masse totale du contrepoids ont été étudiées et optimisées par modélisation numérique 3D de manière à ce que les droites reliant les centres de gravité globale inférieur et supérieur et leur pivot respectif soient parallèles. De cette manière, un pont à bascule à deux points de rotation dont la masse du contrepoids est correctement évaluée, est parfaitement balancé à toutes ses positions lorsque la vitesse des vents est nulle. Les cylindres hydrauliques, permettant d'activer le mouvement, assurent le mouvement sécuritaire du pont lorsque celui-ci doit être opéré lors de grands vents. Les cylindres hydrauliques du pont 9 ont d'ailleurs été conçus pour les charges de vent spécifiées au chapitre 13 de la norme CAN/CSA-S6-06. Cette charge correspond à des rafales de vent de plus de 100 km/hre. La figure 15 illustre schématiquement la position optimale des centres de gravité pour obtenir une condition balancée.

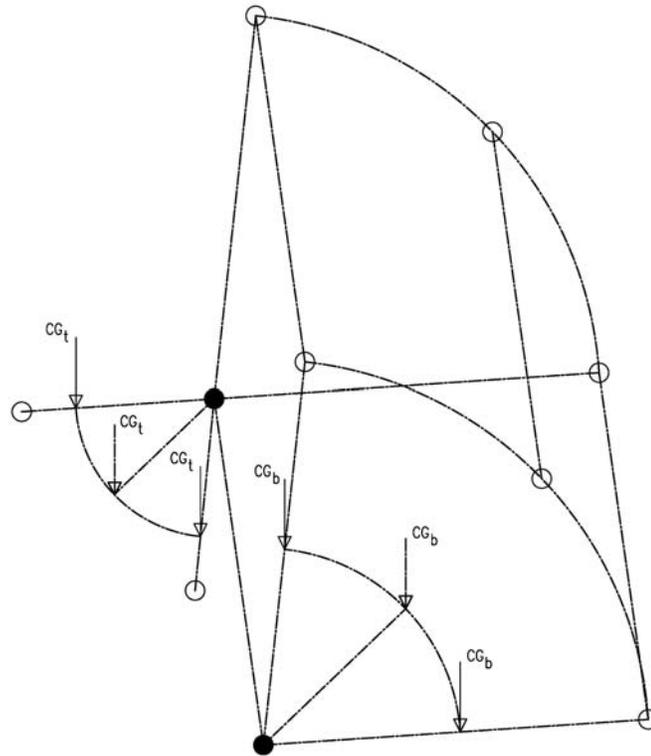


Figure 15 – Conditions balancées – Pont 9

Bien que des modèles numériques 3D aient été utilisés pour calculer les poids et centres de gravité théoriques des divers éléments composant le pont, le contreponds a tout de même été conçu pour permettre l'ajout de masse lors du balancement final du pont avant sa mise en service. Des masses y ont été ajoutées afin que la condition d'équilibre recherchée soit atteinte, soit un effort minimal en poussée des cylindres au démarrage du mouvement. Notons que tout le pont, incluant les pièces mécaniques ainsi que la structure, a été conçu en conformité avec la norme CAN/CSA-S6-06.

La figure 16 illustre le pont lors des premiers essais dans sa pleine ouverture.



Figure 16 – Pont à pleine ouverture lors des premiers essais

4.3 Travaux en usine

Les travaux d'assemblage et d'usinage en usine se sont déroulés sur une période d'environ 9 mois. Parmi les pièces les plus imposantes, notons le contrepoids (figures 17, 18 et 19), les bars supérieurs (figure 20), les pivots supérieurs (figures 21, 22 et 23), les poutres caissons formant le tablier (figures 24 et 25), de même que les supports en « A » (figures 26 et 27).



Figure 17 – Contrepoids en cours d'assemblage

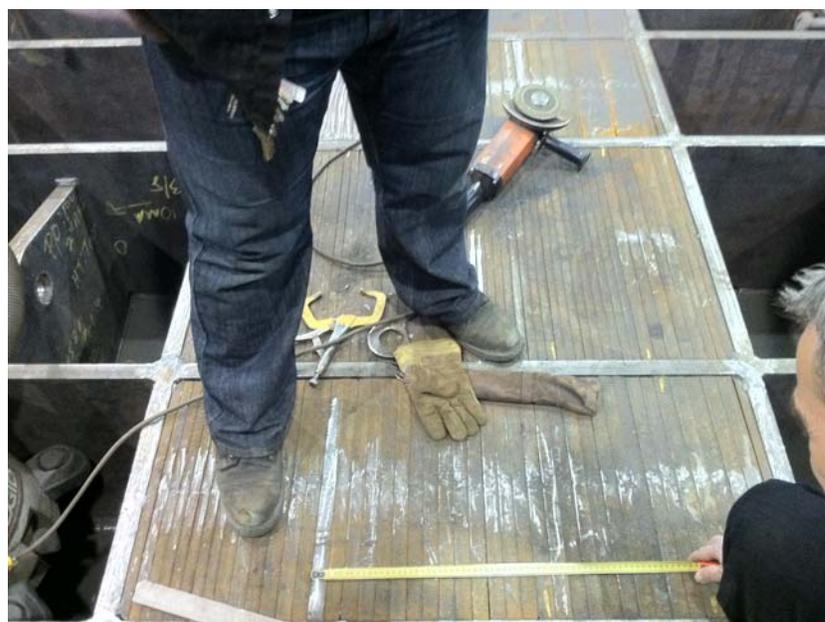


Figure 18 – Plaques internes au contrepoids pour atteinte de la masse totale désirée



Figure 19 – Contrepoids sur son fardier spécial



Figure 20 – Pré-assemblage des éléments supérieurs en usine



Figure 21 – Assemblage de la chambre du pivot supérieur



Figure 22 – Pivot supérieur en cours d'usinage



Figure 23 – Contrôle de la température du pivot supérieur lors de la soudure de la bride d'assemblage



Figure 24 – Assemblage d'une des deux poutres-caisson formant le tablier



Figure 25 – Poutre caisson – Extrémité du pivot inférieur et du point d'appui du cylindre



Figure 26 – Un des supports en « A » en cours d'assemblage



Figure 27 – Les supports en « A » sur leur fardier

4.4 Travaux au chantier

Les travaux au chantier ont débuté en mars 2010 avant l'ouverture de la période navigation.

Les travaux ont d'abord consisté à construire les fondations du futur pont, ainsi que les murs-quais en bordure du canal. Puisqu'il était anticipé que les travaux se poursuivent lors de la période de navigation du canal, la construction de ces ouvrages devait pouvoir se poursuivre tout en assurant la largeur libre minimale du canal, soit 9 m. L'utilisation de murs combinés composés de pieux et de palplanches s'imposait puisque cette technique ne nécessite aucune excavation ni batardeau, donc aucun rétrécissement de la voie navigable tel que l'illustrent les figures 28 et 29.

Tel que mentionné précédemment, les pieux utilisés sont de type pieux caissons forés au roc.



Figure 28 – Construction des murs-quais simultanément au passage de bateaux de plaisance.



Figure 29 – Vue d'ensemble du chantier lors de la construction des murs-quais nord-ouest en période de navigation.

Un autre élément important lors du bétonnage des fondations fut la mise en place des pivots inférieurs. Ces éléments cruciaux au bon fonctionnement du pont ont été bétonnés en seconde phase afin que les faibles tolérances spécifiées soient rencontrées. Toutefois, des travaux d'usinage sur place avaient été spécifiés aux plans et ont été réalisés afin que ces points d'appui inférieurs soient parfaitement alignés et positionnés à l'intérieur du millième de millimètre (voir la figure 30).

L'érection de la charpente a pu débuter au printemps de la deuxième saison de construction, tout juste avant l'ouverture de la saison de navigation. Les cadres en « A » ont d'abord été mis en place (figure 31). Le tablier a, quant à lui, été assemblé au-dessus du canal. Les éléments supérieurs, soit les bras et le contrepoids, ont été assemblés au sol puis déposés sur les cadres en « A » à l'aide d'une grue d'une capacité de 600 tonnes.



Figure 30 – Usinage sur place des plateaux des pièces encastrées recevant les pivots inférieurs du tablier



Figure 31 – Tablier en cours d'assemblage et cadres en « A » en place



Figure 32 – Assemblage au sol des éléments supérieurs



Figure 33 – Levage et mise en place des éléments supérieurs



Figure 33 – Levage et mise en place des éléments supérieurs (suite)



Figure 34 – Corde vibrante installée aux fibres extrêmes des bras supérieurs

4.6 Instrumentation et balancement final

Pour balancer le pont, les bras supérieurs ont été instrumentés afin que soient mesurées les contraintes à leur fibre extrême. Le balancement a donc pu être analysé rapidement grâce aux résultats obtenus des jauges de déformation (corde vibrante) et des pressions mesurées aux cylindres hydrauliques.

Ces éléments nous ont permis de confirmer le balancement du système et d'évaluer les efforts et contraintes dans les tirants et les bras supérieurs à différentes étapes du mouvement du pont.



Figure 35 – Vue des cylindres et des puits

4.5 Éléments mécaniques

Les éléments mécaniques de ce pont incluent, entre autres, les rotules aux pivots supérieurs et inférieurs, les rotules aux extrémités des tirants, de même que celles aux extrémités des cylindres. Ces rotules de type « sans entretien », ont nécessité des travaux spécialisés, tant sur le terrain qu'en usine, réalisés par des mécaniciens experts.



Figure 36 – Assemblage des rotules au chantier par « shrinkfit »

Les autres éléments mécaniques sont, évidemment, les cylindres permettant d'activer et de contrôler le mouvement ainsi que les dispositifs de sécurité installés à l'extrémité mobile du tablier (figure 38) :. Ces derniers sont composés de :

- Un dispositif de centrage
- Deux amortisseurs
- Deux dispositifs de blocage.



Figure 37 – Détail de construction au pivot supérieur



Figure 38 – Dispositifs de sécurité à l'extrémité mobile du tablier

5. UN PROJET MULTIDISCIPLINAIRE

Outre la conception du pont et des murs-quais, ce projet a nécessité l'apport de nombreuses autres disciplines :

- Génie civil, voirie et géométrie routière pour la modification de l'intersection du chemin de la Grande-Ligne et la route 223;
- Bâtiments (architecture, structure et mécanique du bâtiment) : logette des opérateurs du pont;
- Automatisation et contrôle (barrières de contrôle, activation des dispositifs de blocage, etc.)
- Génie mécanique : rotules, cylindres et dispositifs de sécurité;
- Électricité et éclairage : feux de navigation, caméras, éclairage routier;

6. CONCLUSION

La construction du pont levant no 9 au-dessus du canal de Chambly dans les municipalités de Saint-Jean-sur-Richelieu et de Carignan s'est avéré un défi d'ingénierie intéressant puisque peu d'exemples similaires existent dans le monde.

Ce type de structure nécessite une grande minutie, tant dans la conception que dans la construction. Contrairement à un ouvrage conventionnel fixe, la mobilité des éléments exige du concepteur, une grande maîtrise de la géométrie puisqu'un seul changement, si minime soit-il, peut entraîner des conflits avec les éléments mobiles et immobiles du système (fondation). Les conflits potentiels doivent donc être vérifiés continuellement lors du processus de conception.

Outres les analyses structurales usuelles, le calcul des masses et des centres de gravité est également très important pour ce type de structure. À ce titre, aucune masse ne doit être négligée, incluant la masse des revêtements (galvanisation et peinture). La localisation des masses à ajouter lors du balancement est également un critère important afin que les centres de gravité soient peu déplacés par rapport à leur position théorique.

Finalement, le succès dans la construction d'un pont de ce type passe inévitablement par l'utilisation d'une main-d'œuvre spécialisée hautement qualifiée lors de la construction et l'installation des divers éléments structuraux et mécaniques, ainsi que dans le contrôle géométrique dont les tolérances de construction sont peu compatibles avec celles rencontrées dans un ouvrage conventionnel. Pour ce projet, un des facteurs ayant mené au bon fonctionnement du pont est sans contredit le recours à des arpenteurs spécialisés dans les relevés de haute précision. Ils ont été en mesure de vérifier les critères géométriques assurant le bon fonctionnement du pont avec une très grande précision, le résultat de leurs travaux ayant été confirmé par l'utilisation de cordes vibrantes placées à des endroits stratégiques sur les bras supérieurs du pont.