

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DU PONT DU BOULEVARD DE LA CONCORDE

Bruno Massicotte
Professeur titulaire

Emre Yildiz
Étudiant au doctorat

Viacheslav Koval
Ingénieur de laboratoire

Groupe de recherche de génie des structures
École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succursale Centre-Ville
Montréal (Québec), H3C 3A7

RÉSUMÉ : Suite à l'effondrement du pont de la Concorde, plusieurs études expérimentales et numériques ont été faites pour identifier les causes de l'accident. Ces études ont permis de faire ressortir certaines caractéristiques structurales qui affectent le comportement des dalles épaisses. L'article d'identifie les principaux paramètres structuraux qui, ajoutés aux déficiences de conception et de construction, ont affecté le comportement du pont du boulevard de la Concorde. L'article porte principalement davantage sur les particularités structurales de l'ouvrage parmi les différentes particularités considérées dans les études: l'effet du biais; l'effet d'échelle; les modes de ruptures ductiles et fragiles.

INTRODUCTION

Le 30 septembre 2006, le tablier Sud du pont du boulevard de la Concorde qui enjambe l'autoroute 19 à Laval s'est effondré. Suite à cet accident, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a formé un groupe d'experts pour étudier le comportement du pont de la Concorde afin de déterminer les causes de l'accident. Le mandat pour la réalisation de l'étude menée par le groupe d'experts a été confié à l'École Polytechnique de Montréal. Un rapport¹ a été déposé puis présenté à la Commission Johnson en juillet 2007.

Durant l'été 2007, le ministère des Transports a procédé à l'évaluation de la capacité portante des dalles épaisses pleines, sans armature de cisaillement, selon le code CSA-S6-06². Les constats tirés de ces évaluations indiquent que les cotes d'évaluation de certaines structures aux géométries particulières suscitent des interrogations. C'est le cas notamment des tabliers à fort biais pour lesquels l'utilisation de méthodes d'analyses linéaires conduit à des répartitions des efforts pénalisantes qui, dans le contexte de l'évaluation de la capacité portante, apparaissent comme non représentatives de la réalité. Le ministère des Transports a ainsi confié à l'École Polytechnique de Montréal le mandat de réaliser un projet de recherche sur la comparaison des méthodes d'évaluation de certains ouvrages.

Le but de l'article est d'identifier les principaux paramètres structuraux qui, ajoutés aux déficiences de conception et de construction, ont affecté le comportement du pont du boulevard de la Concorde et qui ont contribué aux événements de septembre 2006. L'article identifie les problèmes similaires qui peuvent affecter le comportement et la résistance des ponts à dalle épaisse.

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Le pont du boulevard de la Concorde est une structure en béton orientée Est-Ouest et située au-dessus de l'autoroute 19 à Laval. La figure 1 montre une vue en plan et l'élévation principale de l'ouvrage. Ce pont comprend une travée centrale constituée de poutres-caissons supportées par des unités de fondation munies de dalles en porte-à-faux. Le pont a une largeur totale de 27.4 m et a été conçu pour recevoir six voies de circulation et deux trottoirs. L'ouvrage enjambe l'autoroute 19 avec un biais de 20.5°.

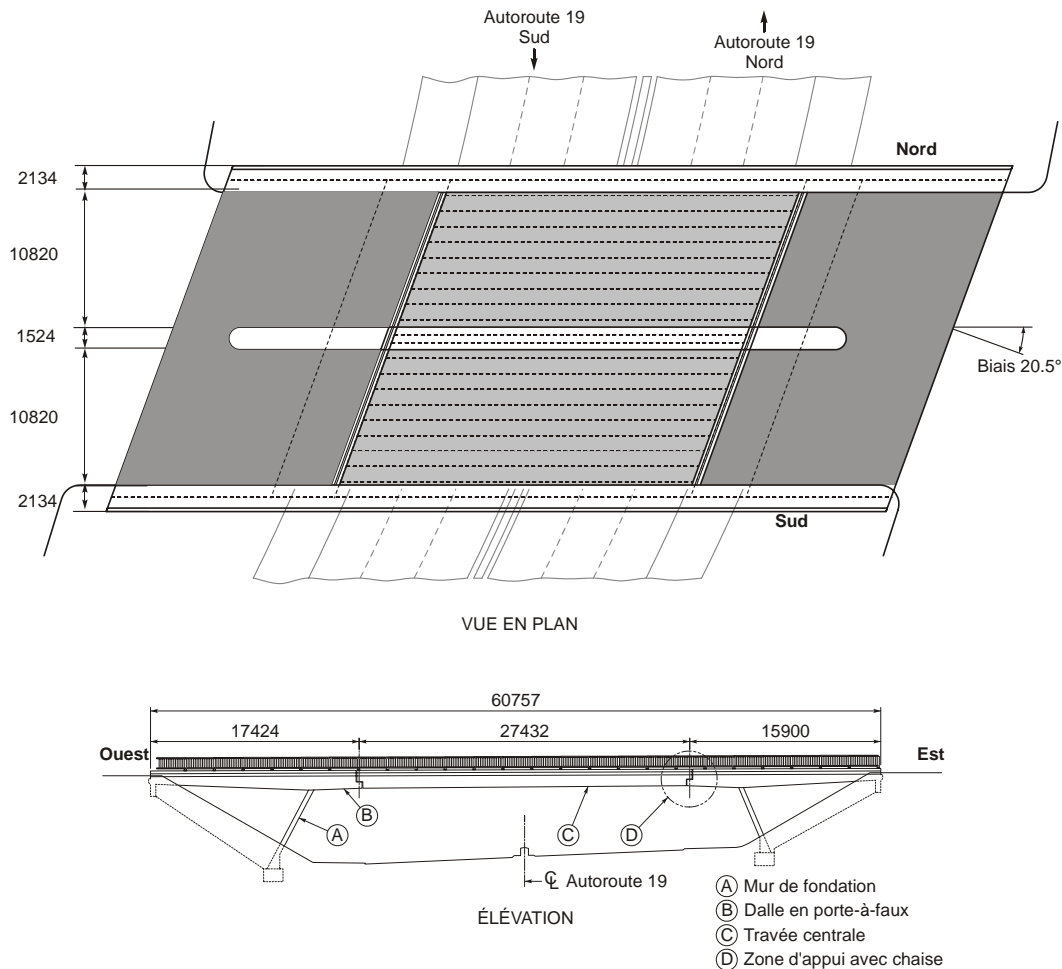


Figure 1 – Géométrie de l'ouvrage

La travée centrale, illustrée à la figure 2, est constituée de deux tabliers indépendants de 27.4 m de longueur supportés par les appuis avec chaises des unités de fondation. Ces tabliers sont constitués de dix poutres-caissons préfabriqués en béton précontraint placés côte à côte et reliés les uns aux autres transversalement par des câbles de précontrainte et longitudinalement par une clé de cisaillement continue entre les poutres. Une dalle de béton relie les poutres à leur partie supérieure. Deux trottoirs s'appuient sur les caissons de rive extérieurs des deux tabliers,

alors qu'une bande médiane vient fermer l'ouverture entre ces deux mêmes tabliers. Un revêtement bitumineux d'une épaisseur nominale de 64 mm recouvre la dalle.

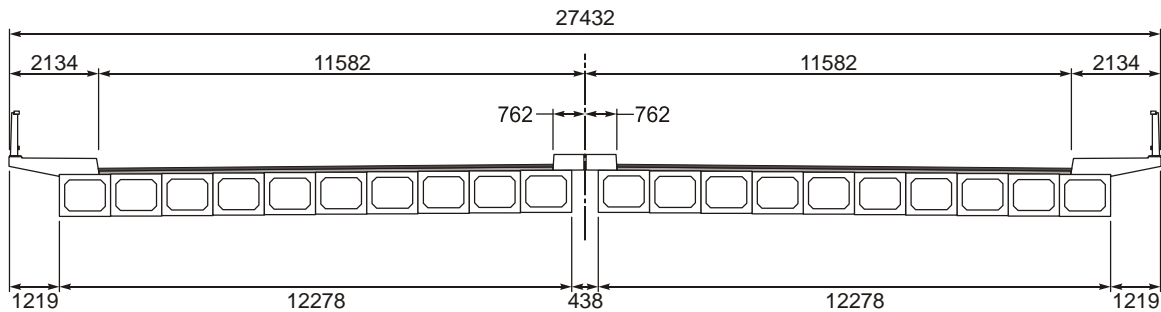


Figure 2 – Coupe de la travée centrale

Les unités de fondation sont situées aux extrémités Ouest et Est de la structure. Ces culées servent d'élément d'encastrement à une dalle en porte-à-faux qui supporte la travée centrale par un appui de type chaise, tel que l'illustre la figure 3. Contrairement aux deux tabliers qui sont séparés et qui forment des systèmes structuraux indépendants, les culées forment un ensemble monolithique à chaque extrémité du pont.

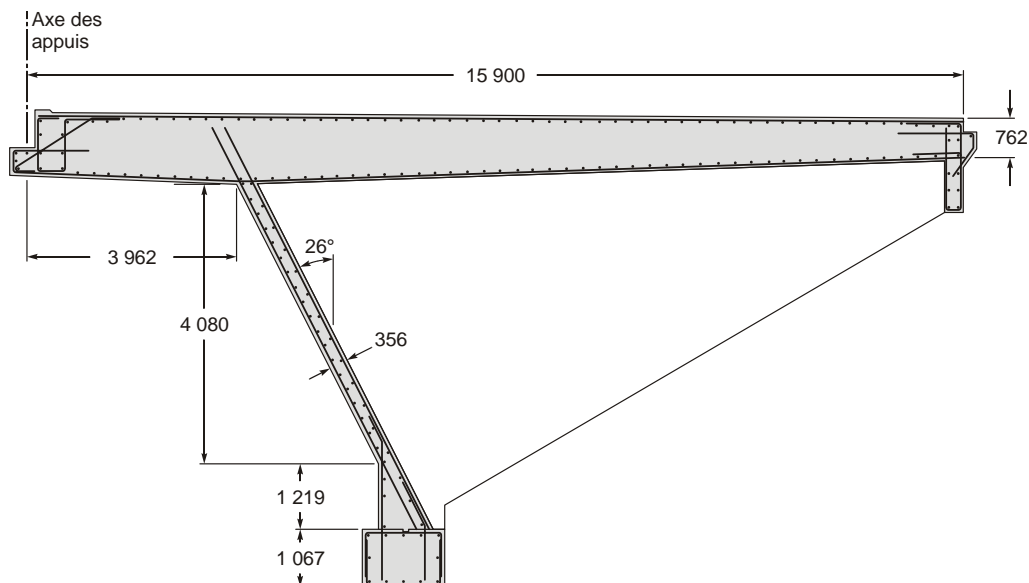


Figure 3 – Vue en coupe de la culée

Le système d'appui sur chaise requiert des dispositions particulières, tant au niveau des poutres-caissons qu'au niveau de la dalle en porte-à-faux des unités de fondation. La partie inférieure de l'extrémité des caissons est tronquée. Elle se termine par un diaphragme épais suivi d'un élément en console d'épaisseur égale à la moitié de celle de la poutre. La dalle en porte-à-faux épouse une

forme opposée à celle de la poutre où la partie supérieure de la dalle est tronquée afin de permettre d'y asseoir la poutre, d'où l'appellation d'appui de type chaise.

L'armature de la dalle en porte-à-faux montrée sur la figure 4 est représentée par quatre groupes de barres placés selon l'axe principal du pont :

- L'armature de la console de la chaise (#10 @ 127);
- Les tirants en U verticaux (#8 @ 254) et les barres inclinées (#6 @ 254);
- L'armature principale en moment négatif (#14 @ 152);
- L'armature transversale (#7 @ 305).

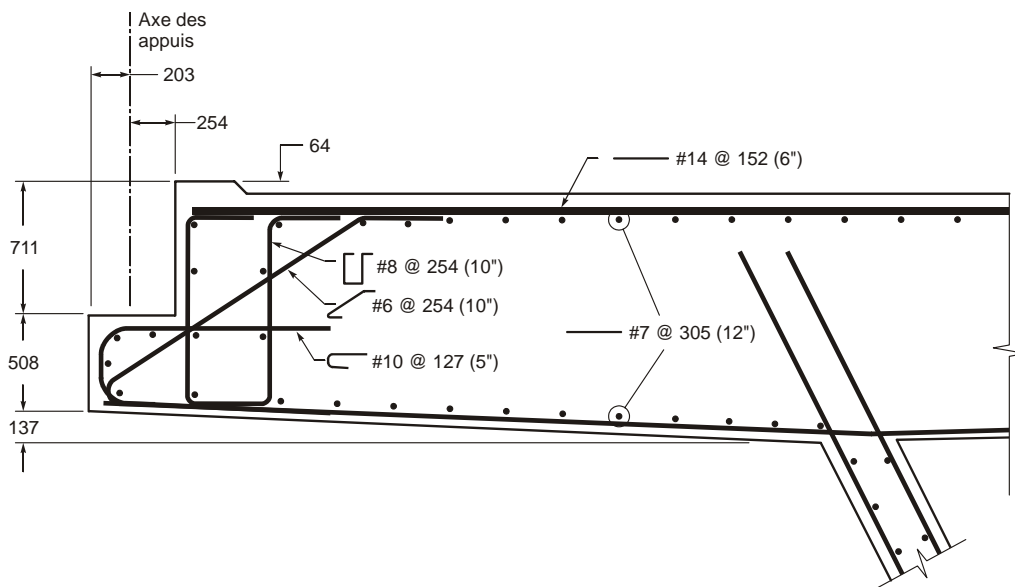


Figure 4 – Armature de la dalle en porte-à-faux et détails de la chaise

EFFONDREMENT DU PONT DE LA CONCORDE

Études suite à l'effondrement

Les travaux réalisés par le groupe d'experts mandatés par le MTQ ont consisté à recueillir, examiner et interpréter l'information disponible et à élaborer et valider des hypothèses expliquant le comportement du pont et les raisons ayant conduit à son effondrement. En plus de recueillir des informations sur le site et d'expertiser certains éléments de la dalle en porte-à-faux, des essais en laboratoire et des analyses raffinées de l'ouvrage ont été réalisées.

L'ensemble des études¹ a permis au groupe d'experts mandatés par le MTQ de dégager des conclusions quant aux causes probables de l'effondrement et à la séquence des événements ayant conduit à cet accident. Cependant, l'objet du présent article porte davantage sur les particularités structurales de l'ouvrage qui ont eu pour effet d'accentuer les causes physiques et les déficiences identifiées dans les études (matériaux, conception et positionnement des armatures, etc.). Ainsi,

parmi les différentes particularités considérées dans les études, trois sont retenues pour discussion pour les fins du présent article:

- l'effet du biais;
- l'effet d'échelle;
- les modes de ruptures ductiles et fragiles.

Effet du biais

En général, le biais a tendance à accentuer les réactions aux appuis dans les coins obtus des tabliers et à les diminuer dans les coins aigus. Les moments fléchissant sont également diminués alors que les efforts de torsion sont généralement augmentés. Non seulement le tablier du pont de la Concorde n'échappait pas à ces tendances, l'effet du biais était encore plus marqué pour cet ouvrage pour deux raisons principales: le type de poutres du tablier et les trottoirs.

Les poutres caissons sont des éléments très rigides en torsion lorsque les diaphragmes internes sont en nombre suffisant, ce qui était le cas pour le pont Concorde. La rigidité en torsion améliore la répartition transversale des efforts. Les efforts dus au poids propre des poutres et de la dalle qui étaient uniformément répartis entre les poutres lors de la construction ont progressivement migrés avec le temps vers les poutres de rive près des coins obtus dus à l'effet combiné du biais et du fluage. Ce transfert d'effort aurait été moins accentué dans le cas d'un tablier de type dalle sur poutres par exemple.

Les larges trottoirs en porte-à-faux du tablier étaient ancrés dans les poutres rives. Vu la grande rigidité des poutres, le poids de ceux-ci était davantage porté par les poutres de rives, augmentant d'autant les réactions d'appuis aux coins obtus. La figure 5 présente la répartition des réactions d'appui sur la culée Est du pont où l'appui 1 correspond au coin obtus du tablier, là où la rupture est survenue. Les réactions moyennes sous chacune des poutres étaient d'environ 300 kN alors que la valeur maximale pouvait atteindre plus du double selon les hypothèses choisies quant aux effets du fluage et du lien mécanique entre les caissons du tablier.

Les effets pénalisant du biais pour les charges vives sont les mêmes que pour le poids propre. Ainsi la grande rigidité torsionnelle du tablier fait en sorte que les coins obtus sont davantage sollicités, l'effet des charges de camions s'ajoutant au poids propre du tablier.

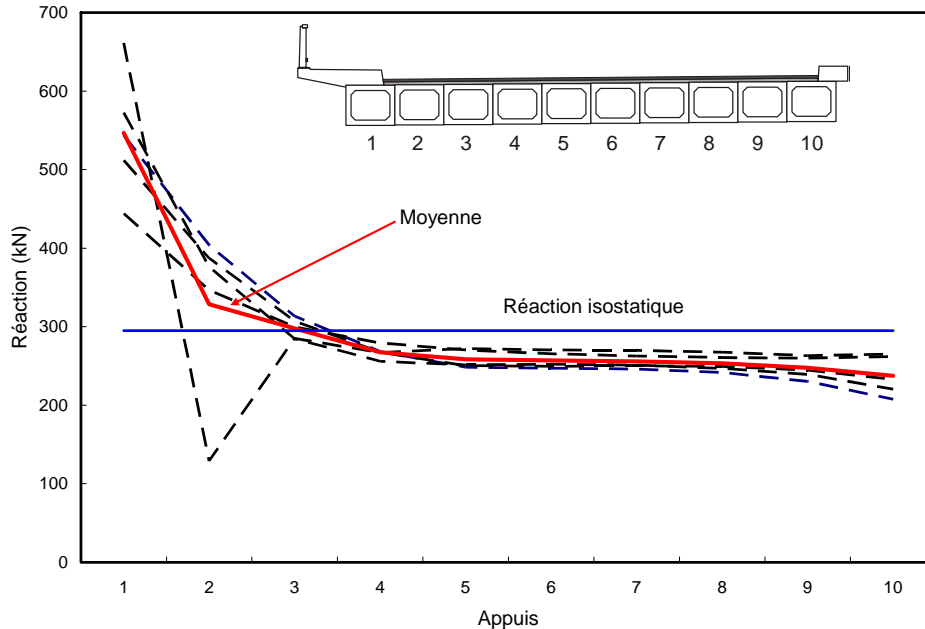


Figure 5 – Réactions d'appui des poutres du tablier sur la dalle en porte-à-faux

Effet d'échelle

Plusieurs paramètres affectent la résistance en cisaillement du béton sans armature d'effort tranchant. Les principaux sont l'effet d'échelle, l'allongement des armatures de flexion et la taille des gros granulats. Ces trois paramètres sont reliés à l'ouverture des fissures de flexion-cisaillement et à la capacité des granulats du béton à transmettre des contraintes de cisaillement de part et d'autre des fissures. Plus les éléments sont de grande taille, plus les fissures à mi-hauteur des éléments deviennent ouvertes en présence des efforts de flexion et de cisaillement. Ceci diminue la capacité des granulats à transmettre les contraintes de cisaillement, réduisant d'autant la résistance du béton en cisaillement. Les dernières éditions des normes et codes canadiens prennent cet effet en considération. Ce n'était toutefois pas le cas en 1970 lors de la conception du pont de la Concorde. La figure 6 illustre la résistance prédite par les codes CSA-S6-00 et CSA-S6-66. Pour des éléments dont la hauteur approche 1200 mm comme le pont de la Concorde, la résistance du code S6-66 surestime d'environ 50% celle du code S6-00.

L'effet d'échelle a fait l'objet de nombreuses études expérimentales comme en témoignent les résultats expérimentaux montrés sur la figure 6. Lors de l'étude sur les causes de l'effondrement, cet aspect a été confirmé de deux façons: par des essais sur des spécimens de grande taille et par des simulations numériques par éléments finis.

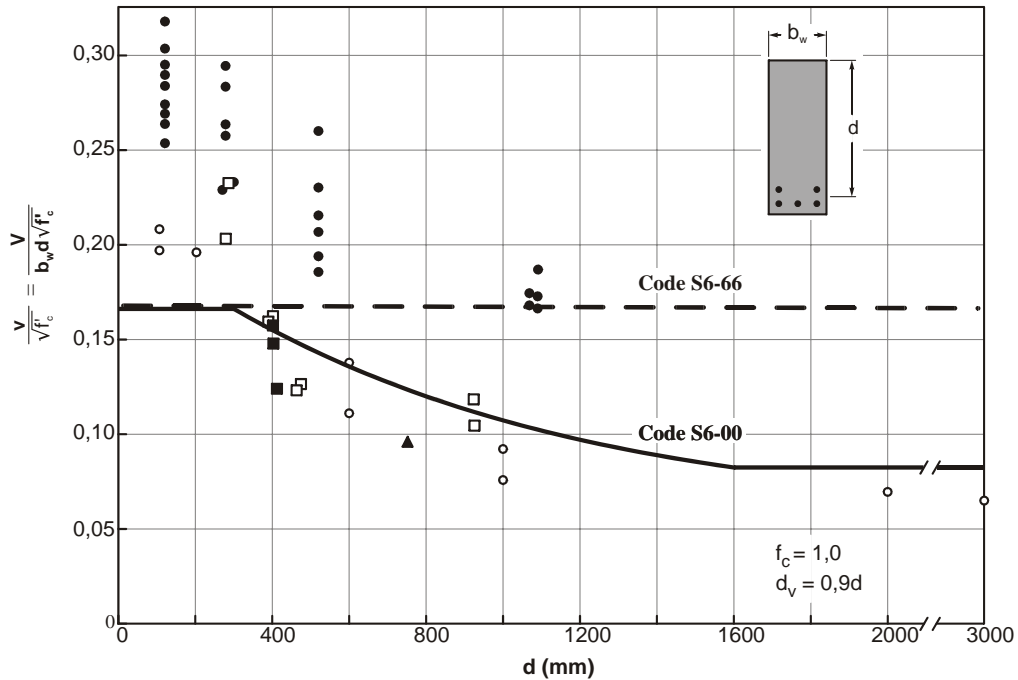


Figure 6 – Effet d'échelle sur la résistance à l'effort tranchant

Le programme d'essais a nécessité la fabrication de trois spécimens à échelle réelle de la dalle des culées du pont de la Concorde. Seule la partie en porte-à-faux de la dalle des culées était visée par le programme d'essais. La figure 7 illustre la partie de la dalle qui a été conservée pour les spécimens. Les trois spécimens avaient les mêmes dimensions. Pour des raisons de faisabilité (poids et taille), les spécimens faisaient 1 219 mm de largeur, représentant ainsi une tranche de la dalle correspondant à la largeur de chacun des éléments préfabriqués de la travée centrale.

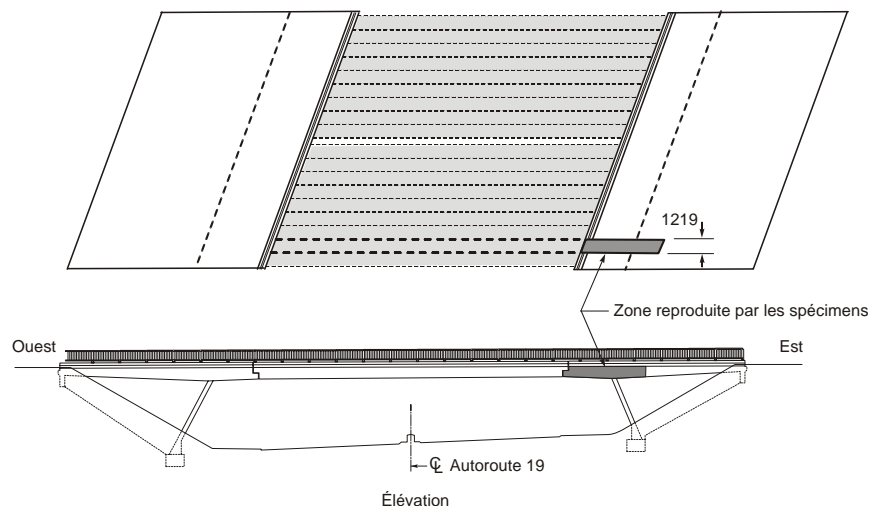


Figure 7 – Emplacement de la portion des culées considérée dans le programme d'essais

Le montage expérimental utilisé pour réaliser le programme expérimental comprenait un cadre de réaction en acier conçu pour reprendre les forces verticales s'exerçant vers le haut, les appareils d'appui et les vérins de chargement. La charge maximale supportée par le spécimen de référence P1 (armatures identiques aux plans) a été de 900 kN. La rupture s'est produite de façon soudaine, sans aucun avertissement. La figure 8 montre le plan de rupture principal dans le spécimen P1 après l'essai. Il s'agit d'une rupture en cisaillement qui s'est développée instantanément, sans aucune reprise d'effort par le spécimen. On peut donc qualifier la rupture de fragile.



Figure 8 – Spécimen P1 après l'essai

La fissure de cisaillement ayant conduit à la rupture est apparue de manière instantanée, sans signes précurseurs. Dans le dernier relevé de fissuration réalisé à 700 kN (soit plus de deux fois la charge permanente moyenne), aucune fissure de cisaillement significative n'était observable entre les axes B et F, alors que le plan de rupture final du spécimen est localisé dans cette zone (figure 9).

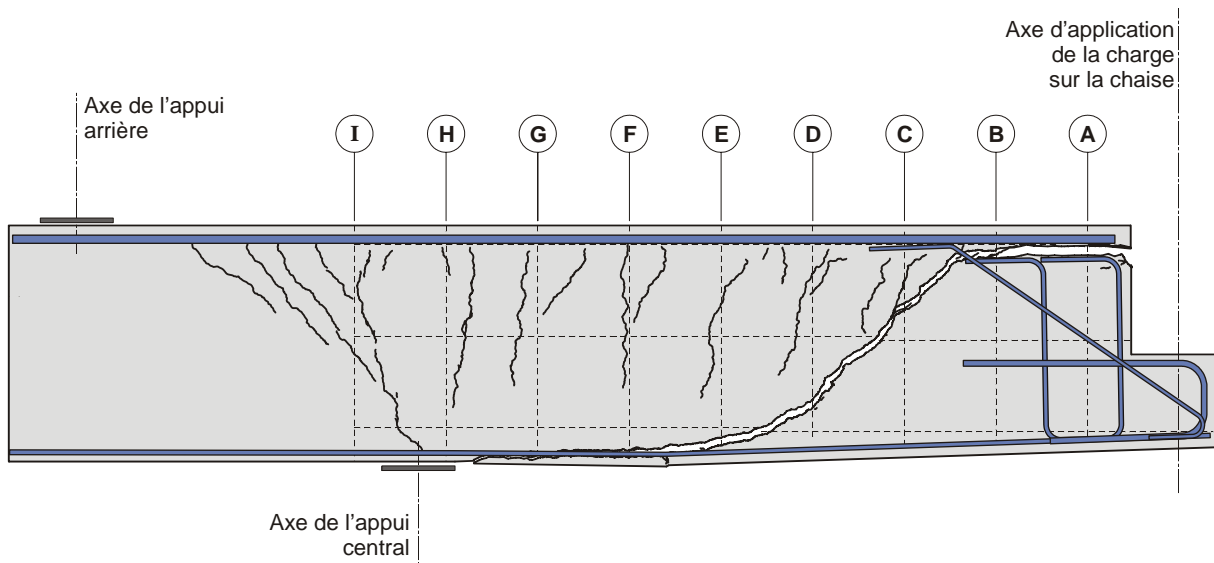


Figure 9 – Spécimen P1 après l'essai

Les modèles numériques réalisées dans le cadre du mandat d'expertise ont permis d'arriver aux mêmes conclusions, tant pour le mode de rupture que pour l'effet d'échelle. La figure 10 illustre le patron des résistances résiduelles en traction, un paramètre fourni par le logiciel *EPM3D*³ utilisé pour les analyses non-linéaires par éléments finis. La couleur rouge indique un béton non fissuré alors que la couleur bleu correspond à une fissure localisée qui serait normalement visible à l'œil nu. Les couleurs verte et jaune témoignent d'une fissuration diffuse fine qui serait pratiquement indétectable visuellement. Il convient de noter que la taille des fissures illustrées sur les figures est amplifiée.

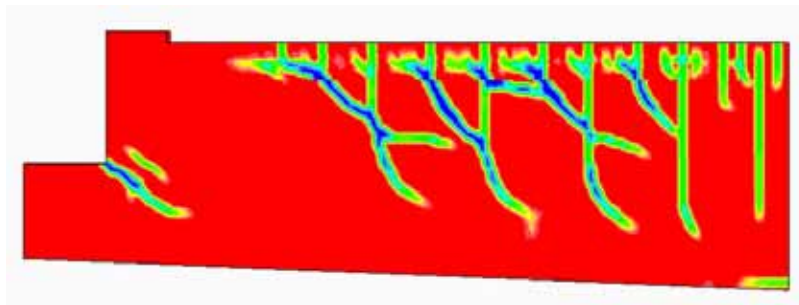


Figure 10 – Endommagement du béton en traction juste avant la rupture – Spécimen P2

Ainsi, tant les études expérimentales et numériques ont fait ressortir l'effet d'échelle. Pour le spécimen P1, la charge maximale reprise par le spécimen correspond à 1.08 fois la valeur prédite par la méthode générale du code CSA-S6-06 et à 67% la valeur prédite par le code CSA-S6-66.

Modes de ruptures fragiles et ductiles

L'effondrement du pont de la Concorde a clairement mis en évidence le caractère subit d'une rupture non ductile et des conséquences qui peuvent en découler. Il a aussi mis en évidence que certaines structures peuvent présenter un comportement non ductile dans l'éventualité d'une défaillance structurale majeure. Une telle situation est catastrophique dans le cas de structures présentant peu de redondance structurale.

La dalle en porte-à-faux du pont de la Concorde ne présentait en apparence aucune redondance. Toutefois, les observations in situ ont montré l'existence de plans de fissuration de grande étendue à différents endroits dans les deux culées du pont de la Concorde, de même que dans l'une des culées du pont De Blois, localisé moins d'un kilomètre au nord du pont de la Concorde et dont le système structural était identique à ce dernier. Malgré ces plans de faiblesse dans les deux ouvrages, il semble que la structure ait pu s'adapter et redistribuer les charges vers les portions encore saines du porte-à-faux. Ceci a pu être en partie possible grâce à la rigidité du tablier qui a possiblement réparti différemment les charges entre les appuis des poutres, particulièrement dans les instants qui ont précédés l'effondrement. La dalle en porte-à-faux a donc présenté un certain niveau d'adaptation, indice d'une certaine redondance. Toutefois, celle-ci était nettement insuffisante.

La présence d'éléments ayant des modes de rupture fragile est souvent inévitable: les poteaux en compression, les assemblages des constructions métalliques, les câbles porteurs des ponts suspendus, etc. Dans plusieurs cas il est également impossible de compter sur la redondance. Dans ces situations, il importe de s'assurer que les modes de ruptures ductiles surviennent à des niveaux de charge inférieurs à ceux des modes fragiles. C'est le principe adopté pour la résistance parasismique des piles de ponts. L'écart doit être d'autant plus grand pour les systèmes structuraux non redondants.

COMPORTEMENT DES PONTS À DALLE ÉPAISSE

Tous les ponts à dalle épaisse ne présentent pas les caractéristiques du pont de la Concorde. Il importe donc de pouvoir établir lors de l'évaluation des ouvrages existants, les caractéristiques géométriques et structurales qui peuvent affecter, favorablement ou défavorablement le comportement et la résistance d'un ouvrage. Les trois points retenus plus haut sont repris.

Effet du biais

Une étude récente⁴ a été réalisée afin de comparer divers méthodes d'analyses. Parmi les méthodes considérées, l'étude a comparé l'effet de la continuité aux appuis. Un modèle d'éléments finis linéaires fait d'éléments de plaque a été utilisé pour analyser l'ouvrage. Le modèle montré sur la figure 11. Les appuis sont situés sur les bords longs, parallèles à l'axe y. L'effet du choix des conditions frontières modifie la distribution des efforts. L'importance de cet effet a été prise en considération en variant les conditions frontières appliquées au modèle, soit en considérant les appuis simplement supportés ou encasté. La condition simplement supportée

suppose que les rotations autour de l'axe y sur la figure 11 sont libres, alors que pour la condition encastrée ces rotations sont empêchées. Dans les deux cas la dalle est encastrée en torsion, ce qui signifie que la rotation autour de l'axe x est bloquée. Les conditions aux limites sont appliquées sur les rives horizontales du modèle. La disposition montrée sur la figure 11 a été choisie parce qu'elle permet de définir les conditions aux limites le long de lignes parallèles aux axes du modèle. Un modèle de grillage a également été fait.

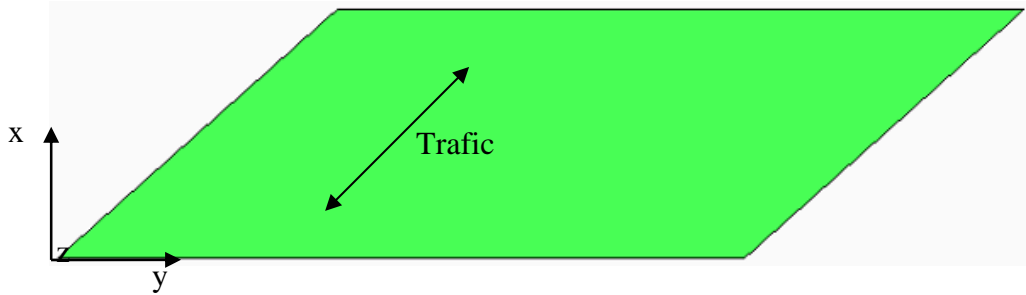


Figure 11 – Modèle de dalle biaise

Les analyses par éléments finis et les analyses de grillages ont montré les mêmes tendances. Les résultats des réactions d'appuis pour les deux types d'analyse sont montrés sur la figure 12 qui présente la comparaison entre les réactions d'appui verticales pour quatre analyses: deux analyses de grillage et deux analyses par éléments finis pour lesquelles deux conditions d'appui simplement supportée (rotulée) et encastrée ont été considérées.

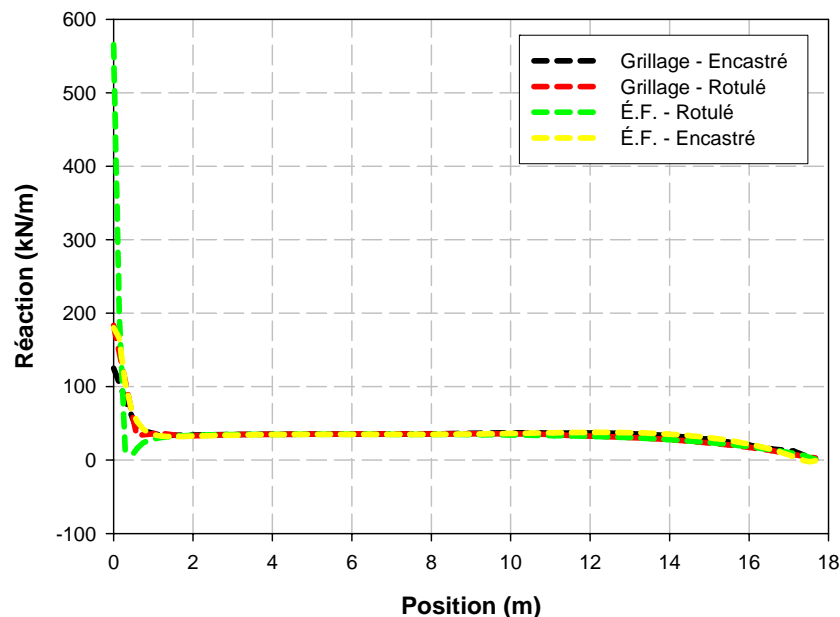


Figure 12 – Comparaison des réactions verticales – coin obtus du côté gauche

Les résultats des analyses de plaque mettent en évidence que la zone affectée par l'accroissement des efforts tranchant causé par la présence d'un biais est relativement restreinte, de longueur moindre que 1.0 m dans le cas présent. De plus, dans le cas de la condition encastree, la continuité aux appuis amène une réduction des réactions d'appui. Les résultats des analyses permettent d'anticiper qu'il est probable que l'effet du biais pourrait très bien être limité au cas des appuis simples dans une zone d'étendue limitée. On a noté le même phénomène pour le pont de la Concorde où c'est principalement la réaction sous la première poutre de rive qui présentait une amplitude s'écartant de la moyenne. L'étude toujours en cours, devra être étendue aux cas des tabliers continus, des cadres rigides avec la prise en considération de différents patrons de chargement.

Effet d'échelle

L'effet d'échelle est bien réel dans les dalles épaisses. Il convient toutefois de noter, dans le cas d'ouvrages neufs, qu'il peut être réduit, voire éliminé, de manière simple. Il a été démontré que des armatures horizontales, par exemple à mi-hauteur de la section, atténuent grandement les effets d'échelle. Lorsqu'applicable, cette solution peut s'avérer plus économique que l'ajout d'étriers. Une telle approche augmente la résistance du béton en cisaillement. Elle n'ajoute cependant pas la composante verticale des étriers.

Une autre approche pourrait consister à ajouter des fibres métalliques au mélange. En dosage suffisant, les fibres peuvent agir en partie comme armature de cisaillement. Le code ACI 318 2008 reconnaît cette capacité du béton renforcé fibres comme armature minimale de cisaillement.

Il convient toutefois de noter que les relations introduites dans le code CSA-S6-06 conduisent à des résultats réalistes en regard des essais et analyses sur spécimens de toute taille. Ces relations prennent en considération les armatures à mi-hauteur mais ne permettent pas de compter sur les fibres pour ajouter une résistance additionnelle.

Modes de ruptures fragiles et ductiles

L'identification des modes de rupture fragiles et ductiles demande de l'expérience. Cette étape essentielle nécessite une bonne connaissance du comportement des ouvrages et de la mécanique du béton armé. Pour les structures neuves, il apparaît évident que leur conférer une hiérarchie des modes de ruptures telle que les ruptures ductiles surviennent en premier s'avère la solution idéale. À défaut de pouvoir atteindre cet objectif, la redondance structurale est une solution. Cependant, la multiplicité d'éléments fragile n'est pas nécessairement garante d'un comportement adéquat.

La considération d'autres facteurs peut également accroître la marge de sécurité. En l'occurrence pour les dalles épaisses, les efforts axiaux générés par les restraints aux appuis peuvent procurer une résistance additionnelle tant en flexion qu'en cisaillement. L'utilisation des éléments finis non-linéaires est une solution qui s'insère graduellement dans la pratique courante. Toutefois, le choix des outils de calcul est délicat, seuls des modèles bien éprouvés permettant de capter les différents modes de rupture et les séquences d'effondrement doivent être utilisés.

CONCLUSION

L'effondrement du pont du boulevard de la Concorde a été l'occasion de revoir et remettre en question les méthodes traditionnelles d'évaluation des ponts à dalle épaisse. Les outils modernes à notre disposition doivent pouvoir être utilisés par les ingénieurs pour réaliser les analyses sur le comportement et l'étude de capacité portante des ouvrages.

Les exigences du code CSA-S6 devront également être revues en fonction des leçons apprises suite à l'effondrement du pont de la Concorde. En particulier le traitement des effets de biais ainsi que la nécessité de prévoir une hiérarchie des modes de ruptures sont des aspects importants qui mériteront l'attention des différents comités techniques responsables du code.

RÉFÉRENCES

- [1] Massicotte, B., Tremblay, R., Ghali, A., Grenier, J. et Blouin, B. 2007. "Étude des causes de l'effondrement du pont du boulevard de la Concorde". Rapport CDT-ST07-11, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, 105p.
- [2] CSA 2006. "Code Canadien sur le calcul des ponts routiers – CAN/CSA-S6-06". Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario.
- [3] Massicotte, B., Nour, A., BenFtima, M. et Yildiz, E. A. 2007. "EPM3D – A user-supplied constitutive model for the nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures", Rapport SR07-10, École Polytechnique de Montréal.
- [4] Massicotte, B. et Yildiz, E. A. 2008. "Étude comparative des méthodes d'évaluation traditionnelles et non-linéaires pour les ponts à dalle épaisse", Rapport SR08-01, Groupe de recherche en génie des structures, École Polytechnique de Montréal.