

An aerial photograph showing a multi-lane road with a collapsed concrete bridge section. The bridge has a large gap, and the remaining concrete structure is heavily damaged and tilted. Several pieces of heavy machinery are present: a yellow excavator with a long boom is positioned near the debris, a red crane is on the right side, and a white utility truck is at the bottom left. A white police car is parked on the road near the bridge. The scene is cordoned off with orange safety tape. In the background, there are residential buildings and a sidewalk with some people.

Rapport sur les causes techniques de l'effondrement du viaduc de la Concorde

Rapport complémentaire sur le viaduc de Blois

Rédigé par :

Jacques Marchand, ing., Ph.D.
Denis Mitchell, ing., Ph.D.

Mai 2007

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION..... | 1 |
| 2 | CONCEPTION | 1 |
| 3 | OPÉRATIONS RÉALISÉES SUR LE VIADUC DE BLOIS..... | 2 |
| 4 | PROPRIÉTÉS ET ÉVALUATION DE LA DÉGRADATION DU BÉTON ... | 4 |
| 4.1 | Exigences concernant les matériaux | 4 |
| 4.2 | Sites de prélèvement de béton | 4 |
| 4.3 | Programme des essais réalisés sur le béton | 5 |
| 4.4 | Résumé des données obtenues pour le béton | 6 |
| 4.5 | Contamination et dégradation du béton des sections en porte-à-faux.... | 7 |
| 4.5.1 | Teneur en ions chlore totaux (soluble à l'acide) dans le béton (ASTM C1152)..... | 7 |
| 4.5.2 | Dégradation observée lors de l'analyse pétrographique..... | 8 |
| 4.6 | Propriétés physiques du béton | 9 |
| 4.6.1 | Porosité du béton (ASTM C642)..... | 9 |
| 4.6.2 | Caractéristiques du réseau de bulles d'air (ASTM C457)..... | 10 |
| 4.7 | Propriétés mécaniques du béton | 10 |
| 4.7.1 | Résistance à la compression (CSA A23.2-9C)..... | 10 |
| 4.7.2 | Module d'élasticité en compression du béton (ASTM C469-02).... | 11 |
| 4.7.3 | Résistance à la traction par écrasement latéral (CSA A23.2-13C) | 11 |
| 4.8 | Propriétés de transport du béton | 11 |
| 4.8.1 | Perméabilité aux ions chlore (Rapid Chloride Penetration Test) (ASTM C1202)..... | 11 |
| 4.8.2 | Perméabilité aux ions chlore - Migration (ASTM C1202, modifié) . | 12 |
| 4.9 | Signes visuels de la dégradation des culées | 12 |
| 4.10 | Discussion des résultats obtenus pour le béton | 13 |
| 4.10.1 | Commentaires sur les exigences du Devis spécial relatives à la formulation du béton..... | 13 |
| 5 | PROGRAMME DES ESSAIS RÉALISÉS SUR L'ACIER..... | 16 |
| 5.1 | Spécifications en vigueur à l'époque | 16 |
| 5.2 | Prélèvement des barres..... | 16 |
| 5.3 | Propriétés physiques et mécaniques de l'acier..... | 17 |
| 5.3.1 | Détermination de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité..... | 17 |
| 5.3.2 | Détermination de la résistance à l'impact — Essai Charpy | 18 |
| 5.3.3 | Détermination de la composition de l'acier. | 18 |
| 5.4 | Discussion et observations réalisées sur l'acier d'armature | 19 |
| 6 | RÉSULTATS DES RELEVÉS IN-SITU..... | 20 |
| 7 | COMPARAISON AVEC LE VIADUC DE LA CONCORDE ET SOMMAIRE DES OBSERVATIONS | 22 |
| 7.1 | Plans..... | 22 |
| 7.2 | Bétons – Propriétés et dégradation | 24 |
| 7.3 | Observations à l'intérieur des fenêtres | 24 |
| 7.4 | Données de circulation | 26 |
| 7.5 | Analyse structurale | 26 |

1 INTRODUCTION

Dans le cadre du mandat d'expertise qui a été confié par la Commission d'enquête sur le viaduc de la Concorde (CEVC) aux experts MM. Jacques Marchand, ing. Ph.D. et Denis Mitchell, ing. Ph.D., signataires du présent rapport, ceux-ci devaient étudier les caractéristiques et les propriétés du viaduc de Blois.

Ce rapport représente un complément au *Rapport sur les causes techniques de l'effondrement du viaduc de la Concorde* (ci-après le «rapport principal») que nous avons remis à la Sûreté du Québec et à la CEVC.

Le viaduc de Blois était situé à environ 1 km au nord du viaduc de la Concorde et prolongeait le boulevard de Blois à Laval, en enjambant l'autoroute 19. Peu après notre arrivée sur les lieux de l'effondrement du viaduc de la Concorde, le 1^{er} octobre 2006, nous avons effectué une inspection sommaire du viaduc de Blois. Celle-ci a permis de constater que ce dernier présentait les mêmes signes de détérioration que le viaduc de la Concorde. Ainsi, de la fissuration et des traces d'efflorescence étaient visibles sur les quatre parois latérales des porte-à-faux, près des extrémités.

Suite à l'effondrement du viaduc de la Concorde et en raison des similitudes entre les deux viaducs, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a procédé, le 22 octobre 2006, au démantèlement du viaduc de Blois.

2 CONCEPTION

Le viaduc de Blois était, à plusieurs points de vue, le «jumeau» du viaduc de la Concorde. Les deux ouvrages ont été construits à peu près en même temps, selon le même contrat, le même devis et par les mêmes intervenants, soit la firme Desjardins, Sauriol & Associés (DSA) pour la conception et la surveillance des travaux et l'entrepreneur Inter State Paving Inc. (ISP) pour la réalisation des travaux.

Le viaduc de Blois a été conçu selon les plans et devis élaborés par DSA (voir pièces COM-19, COM-20A, COM-20B, COM-20C).

Le viaduc de Blois et le viaduc de la Concorde, tels que vus en coupe, étaient à peu de choses près identiques. Le viaduc de Blois était toutefois moins large (2 voies de circulation au lieu de 6 dans le cas du Viaduc de la Concorde) et son axe croisait celui de l'autoroute 19 selon un angle de presque 90°, éliminant du même coup la présence d'un biais aux coins des culées. D'autres différences mineures ont été observées en étudiant les plans des deux viaducs. Celles-ci seront expliquées plus en détails ultérieurement au cours du présent rapport.

3 OPÉRATIONS RÉALISÉES SUR LE VIADUC DE BLOIS

Parallèlement aux opérations menées sur le site du viaduc de la Concorde, les activités suivantes ont été réalisées sur le site du viaduc de Blois durant la période du 1^{er} au 20 octobre:

- Inspection sommaire des fissures et de l'efflorescence sur les parois latérales;
- Prélèvement d'éprouvettes de béton et d'échantillons de barres d'acier;
- Ouverture de fenêtres d'observation.

Tel que souligné précédemment, nous avons procédé à une inspection sommaire des parois latérales du viaduc de Blois le 1^{er} octobre 2006 en fin d'après-midi. Ayant observé la présence de fissures et d'efflorescence, nous avons fait part aux représentants du Ministère des Transports (MTQ) qu'il y avait un risque que le viaduc de Blois soit affecté par les mêmes problèmes que ceux ayant affecté le viaduc de la Concorde.

Quelques heures plus tard, les ingénieurs du MTQ prenaient les mesures requises pour installer des supports temporaires sous les sections en porte-à-faux du viaduc de Blois. La circulation sous le viaduc fut par la suite interdite.

Des carottes de béton ont été prélevées à quatre endroits sur le viaduc de Blois, selon un plan d'échantillonnage élaboré par le MTQ. Les sites d'échantillonnage sont présentés à la Figure 3.1. Ces carottes ont été identifiées et documentées sur place par le MTQ, puis remises aux représentants de Service d'Expertise en Matériaux (S.E.M.) inc. afin de procéder à la prise de photographies, au mesurage et à l'observation visuelle de chaque carotte. Quelques semaines plus tard, tel que convenu lors des opérations de carottage, un peu moins de la moitié des carottes ont été remises aux ingénieurs du MTQ pour la réalisation de leurs essais. Le détail des prélèvements est donné au Tableau 3.1. Des échantillons de barres d'acier ont aussi été recueillis et remis aux représentants du MTQ.

Tableau 3.1 – Sommaire des carottes prélevées sur le viaduc de Blois

| Site | Emplacement | Carottes prélevées | Carottes remises au MTQ | Carottes conservées |
|--------------|------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 | Face sud, culée ouest | 2 | 1 | 1 |
| 2 | Face nord, culée ouest | 2 | 1 | 1 |
| 3 | Surface culée ouest | 17 | 6 | 11 |
| 6 | Surface culée est | 16 | 8 | 8 |
| Total | | 37 | 16 | 21 |

Finalement, au cours de la période du 1^{er} au 20 octobre, des fenêtres d'observation verticales et horizontales ont été pratiquées par les ingénieurs du

MTQ (en présence de nos représentants) dans les culées est et ouest du viaduc de Blois (Figure 3.2).

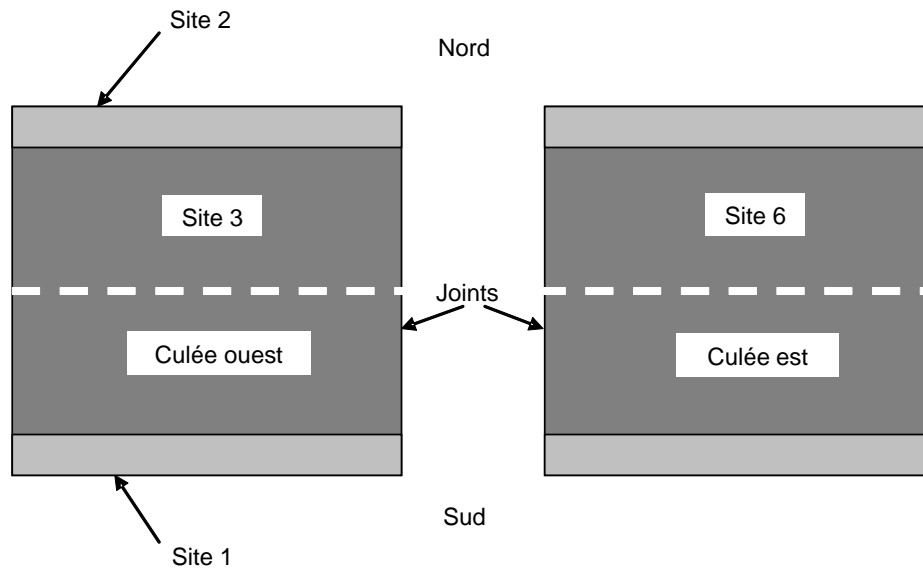


Figure 3.1 – Localisation des 4 sites d'échantillonnage de béton sur les culées du viaduc de Blois



Figure 3.2 – Fenêtres d'observation sur de Blois (DSC5625 CEVC010953 et DSC5632 CEVC010960)

4 PROPRIÉTÉS ET ÉVALUATION DE LA DÉGRADATION DU BÉTON

4.1 Exigences concernant les matériaux

Les exigences concernant les matériaux utilisés pour la construction des viaducs de la Concorde et de Blois étaient semblables en tous points puisqu'elles faisaient l'objet d'un même devis, prévu à la section 203 du Devis spécial transmis aux soumissionnaires (voir pièce COM-20A, p. 105).

Les exigences relatives au béton en vigueur au moment de la construction avaient été définies par les ingénieurs de DSA. Elles sont décrites ci-après dans le Tableau 4.1. Ces exigences étant les mêmes que celles définies pour la construction du viaduc de la Concorde, les commentaires et discussions portant sur ce dernier et qui se trouvent à la section 6.2.1 du rapport principal, s'appliquent également au viaduc de Blois pour les fins du présent rapport.

Tableau 4.1 – Exigences concernant les caractéristiques du béton apparaissant à l'article 203 du Devis spécial (pièce COM-20A, p. 105)

| Affaissement 3"±½" | | Béton coulé dans l'air et exposé à l'air | | |
|--|-------|--|------|------|
| Pourcentage d'air occlus en volume : ±1% | | | | |
| Gros agrégats | pouce | 1½ | ¾ | 1/2 |
| Rapport maximum eau/ciment | | 0.56 | 0.56 | 0.56 |
| Ciment minimum | lb | 480 | 525 | 570 |
| Air occlus | % | 4.5 | 6 | 7 |
| Type d'exposition | | A | | |

| | Capacité fc | Gros agrégat | Air occlus | Affaissement |
|------------------------------------|-------------|--------------|------------|--------------|
| Empattements et dalles d'approches | 3000 psi | 1½" | 4 % | 3" |
| Culées | 4000 psi* | ¾" | 4 à 6 % | 4"* |
| Tablier, trottoir et mail central | 4000 psi | ¾" | 6 à 7 % | 3" |
| Poutres précontraintes | 5000 psi | ½" | 7% | 4" |

*Note 4000 psi = 27,8 MPa, ¾ pouce = 19 mm et 4 pouces = 100 mm

4.2 Sites de prélèvement de béton

Afin d'évaluer les propriétés et l'état de dégradation des matériaux constituant le viaduc de Blois, des essais en laboratoire ont été réalisés sur le béton. L'Annexe B1 intitulée « *Essais de caractérisation de matériaux prélevés sur le viaduc de Blois (Essais comparatifs)* » présente tous les résultats des essais réalisés sur les matériaux. L'Annexe B3 intitulée « *Analyse pétrographique de spécimens de béton prélevés dans les culées du pont De-Blois situé à Laval (Québec, Canada)* » présente les résultats des analyses pétrographiques.

Des carottes de béton ont été prélevées en différents endroits du viaduc de Blois. Au total, 37 carottes réparties sur 4 sites ont été prélevées avant la démolition de la structure. Les sites de carottage sont présentés à la Figure 4.1 Le détail des carottes prélevées est fourni à l'Annexe B1.

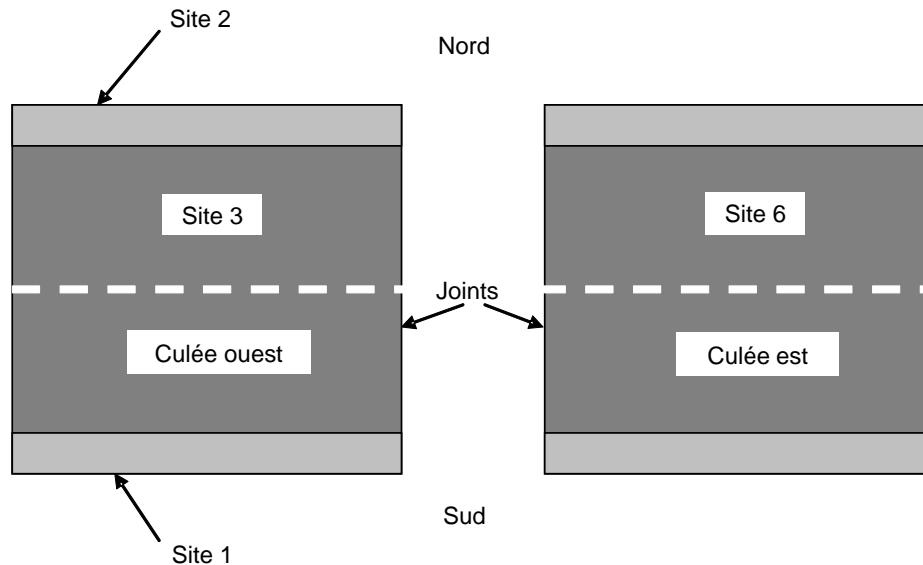


Figure 4.1 – Localisation des 4 sites d'échantillonnage de béton sur les culées du viaduc de Blois

4.3 Programme des essais réalisés sur le béton

L'ensemble des carottes prélevées a été soumis à des essais visant à déterminer les caractéristiques du béton du viaduc de Blois (voir pièce COM-57). Certaines procédures expérimentales ont été réalisées pour évaluer l'état de contamination et la dégradation du béton. Le programme expérimental comprenait également des essais visant à déterminer les propriétés physiques et mécaniques du béton prélevé, de même que ses propriétés de transport.

La liste des essais réalisés est la suivante :

Étude de la contamination et de la dégradation du béton

- Détermination de la teneur en ions chlore totaux (soluble à l'acide) dans le béton (*ASTM C1152 – Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*)
- Analyse pétrographique (*ASTM C856 — Standard Method for Petrographic Examination of Concrete Samples*)

Détermination des propriétés physiques du béton

- Détermination de la porosité du béton (*ASTM C642 — Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*)
- Détermination des caractéristiques du réseau de bulles d'air (*ASTM C457 (06) — Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*)

Détermination des propriétés mécaniques du béton

- Détermination de la résistance à la compression (*CSA A23.2-9C — Détermination de la résistance en compression d'éprouvettes de béton cylindriques*)
- Détermination du module d'élasticité en compression (*ASTM C469 — Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*)
- Détermination de la résistance à la traction par écrasement latéral (*CSA A23.2-13C — Détermination de la résistance à la traction par écrasement latéral d'éprouvettes de béton cylindriques*)

Détermination des propriétés de transport du béton

- Détermination de la perméabilité aux ions chlore (*ASTM C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*)
- Détermination de la perméabilité aux ions chlore - Migration (*ASTM C1202, modifié*)

Tous les essais ont été effectués en utilisant des procédures normalisées, à l'exception de l'essai de migration (ASTM C 1202, modifié). Ce dernier essai a été réalisé en suivant un protocole modifié, ayant fait l'objet de nombreuses publications scientifiques.

La description des essais ainsi que les résultats détaillés sont présentés à l'Annexe B1. Les renseignements relatifs à l'analyse pétrographique sont présentés à l'Annexe B3.

4.4 Résumé des données obtenues pour le béton

Les essais mentionnés ci-haut ont tous été réalisés pour 2 des 4 sites, soit les sites 3 et 6 situés sur le dessus des culées (dalle épaisse en porte-à-faux). Pour les sites 1 et 2, seulement deux carottes ont été recueillies et l'une d'elles a été remise au MTQ; une seule carotte était ainsi disponible pour les fins de nos essais. Cette carotte a été utilisée pour un essai de résistance à la compression et une analyse pétrographique.

Un résumé des principaux résultats obtenus est présenté au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 – Résumé des résultats d'essais/Viaduc de Blois

| Essai | 1 | 2 | 3 | 6 | Moyenne |
|---|----------|----------|----------|----------|----------------|
| Résistance à la compression, MPa | 44,0 | 39,3 | 38,4 | 30,6 | 38,1 |
| Module d'élasticité, GPa | – | – | 19,6 | 20,1 | 19,9 |
| Résistance à la traction, MPa | – | – | 2,6 | 2,2 | 2,4 |
| Porosité du béton, % | – | – | 15,1 | 15,2 | 15,2 |
| Absorption du béton, % | – | – | 6,93 | 6,95 | 6,94 |
| Facteur d'espacement, μm | – | – | 240 | 190 | 215 |
| Teneur en air, % | – | – | 7 | 7 | 7 |
| Perméabilité aux ions chlore, (Haute ou Très Haute) | – | – | H-TH | H-TH | H-TH |
| Coefficient de diffusion ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) | – | – | 44,5 | 40,0 | 42,3 |

4.5 Contamination et dégradation du béton des sections en porte-à-faux

4.5.1 Teneur en ions chlore totaux (soluble à l'acide) dans le béton (ASTM C1152)

Des profils de la teneur totale en ions chlorure (solubles dans l'acide) ont été réalisés pour les sites d'échantillonnage situés dans la dalle pleine du porte-à-faux (voir Figure 4.2). Une seule carotte semble avoir été contaminée par les ions chlore, soit la carotte 3 E-1. Celle-ci a été extraite du centre du viaduc, à 1,72 m du joint. La carotte 3 O-1, non contaminée, a été prélevée à 1,33 m du joint. Il est possible que l'importante disparité entre les concentrations en chlorures des deux carottes, qui ont été prélevées à proximité l'une de l'autre, soit due à la présence d'un défaut localisé dans le revêtement bitumineux. Il est également possible que cette différence soit reliée à la réparation du béton. La présence d'un treillis, qui constitue un indice d'une réparation, a été observée sur la carotte 3 O-1. Une différence de coloration du béton a de plus été observée entre les carottes 3-E1 et 3 O-1.

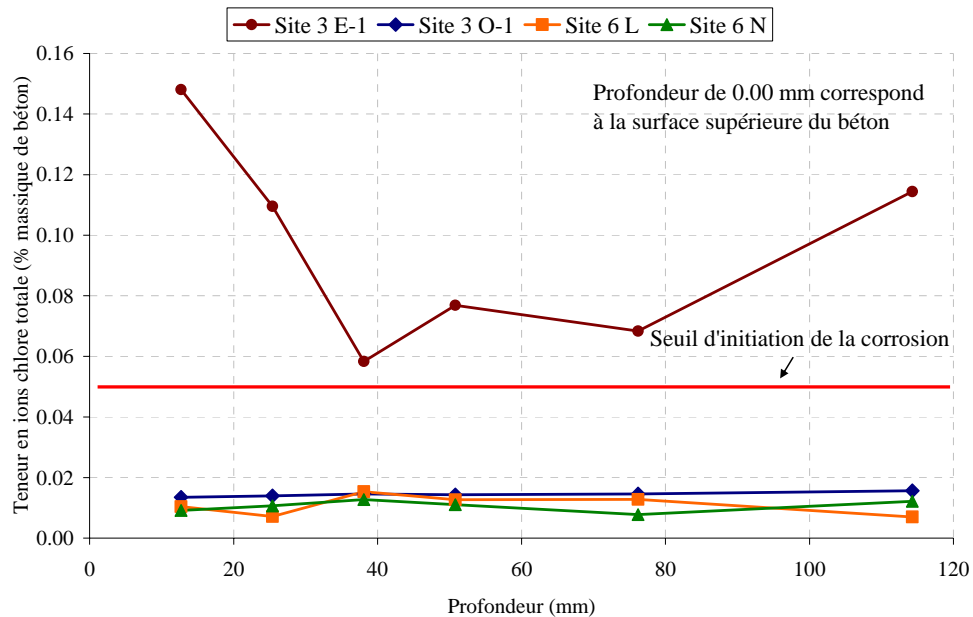


Figure 4.2 – Profils de chlore des sites 3 et 6 – Carottes verticales

4.5.2 Dégradation observée lors de l'analyse pétrographique

Six carottes (provenant des quatre sites) ont été transmises au Dr. Marc-André Bérubé pour qu'il puisse procéder à un examen pétrographique du béton. Cette analyse n'a pas mis en lumière une dégradation très avancée du béton des porte-à-faux. Des fissures ont été observées sur deux carottes provenant de la surface de chacun des porte-à-faux (sites 3 et 6). Le béton au voisinage de la surface était micro fissuré à la fois perpendiculairement et parallèlement à la surface. D'après les photographies présentées à l'Annexe B3, les fissures macroscopiques pénètrent jusqu'à environ 80 mm sous la surface. On a pu observer une autre fissure sur la même carotte, laquelle, d'après les relevés de réception des carottes, se trouvait à 113 mm de la surface.

Des signes mineurs de réaction alcali-granat (RAG) ont également pu être observés sous forme de micro rosettes ou de dépôts siliceux de gel. La réaction était à peine amorcée et les signes de RAG étaient peu abondants.

L'examen pétrographique a également permis d'observer quelques bulles d'air remplies d'ettringite, mais dans la plupart des cas, la surface des bulles n'est tapissée que d'une mince couche de ce produit. La formation d'ettringite serait attribuable à la perméabilité élevée du béton. L'eau, en circulant à travers la pâte de ciment, dissout des phases solides riches en sulfate et favorise la précipitation d'ettringite dans les gros pores et les vides d'air. Toutefois, le nombre de vides contenant de l'ettringite est réduit.

L'examen pétrographique a également permis de constater la présence de deux bétons différents pour les sites 3 et 6. L'analyse démontre, en effet, que pour chacun de ces sites on retrouve des zones de béton d'origine et d'autres constituées d'un béton de réparation. Ce constat s'appuie sur une différence observée au niveau de la nature des gros granulats. En effet, les caractéristiques de ces deux séries de granulats seraient compatibles avec la même formation rocheuse mais à des profondeurs différentes, ce qui implique que les agrégats des deux bétons ne dateraient pas de la même époque.

4.6 Propriétés physiques du béton

4.6.1 Porosité du béton (ASTM C642)

Comme nous avons pu le mentionner dans le rapport principal, le béton est un matériau poreux. Son volume poreux (ou porosité) est déterminé par les vides contenus dans les granulats, par la porosité propre de la pâte de ciment hydraté et par la présence de bulles d'air entraîné. La porosité est une caractéristique importante du béton qui influence à la fois ses propriétés mécaniques et sa durabilité. En plus de réduire la résistance du béton, une augmentation du volume poreux favorise la pénétration de l'eau et des ions chlore, ce qui réduit la durabilité du béton exposé aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants (chlorures). Le volume des vides perméables doit donc être limité afin d'obtenir un béton à la fois résistant et durable.

Comme on peut le voir au Tableau 4.2, la porosité moyenne pour l'ensemble des sites testés est de 15,2 %. Les porosités des sites d'échantillonnage sont de 15,1 % et 15,2 %. L'absorption moyenne après ébullition du béton est de 6,9 % alors que les valeurs pour chacun des sites sont de 6,9 % et 7,0 %. On constate que les valeurs sont ainsi très similaires pour les deux sites.

Ces valeurs sont élevées pour un béton devant être exposé à des cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, particulièrement si l'on considère que les granulats utilisés dans la fabrication du béton étaient peu poreux. À titre comparatif, la porosité d'un béton sain, produit à un rapport eau/ciment de 0,40 (tel que spécifié par la norme canadienne CSA A23.1-04 en vigueur actuellement) et avec des granulats peu poreux, serait significativement plus faible, soit généralement de l'ordre de 12 %¹. Dans le cas du béton du viaduc de Blois, la porosité moyenne est nettement supérieure à cette valeur. Selon le Manuel d'entretien des structures (pièce COM-30I – p. 160), un béton dont l'absorption est inférieure à 6,5% est considéré comme étant de qualité acceptable. Globalement, les résultats obtenus indiquent que le béton du viaduc

¹ S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, N.F. MacLeod, et R.J. McGrath, *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, EB101, 7ième édition, Association canadienne du ciment, Ottawa, Ontario, Canada, 2004, 368 pages.

de Blois présentait une porosité et une absorption élevées pour un béton devant être exposés à des cycles de gel et dégel en présence de sels fondants.

4.6.2 Caractéristiques du réseau de bulles d'air (ASTM C457)

La teneur en air et le facteur d'espacement du béton durci ont été mesurées par des examens au microscope optique à un grossissement de l'ordre de 100X. Les observations ont été effectuées sur la surface polie d'un échantillon de béton. La procédure est décrite par la norme ASTM C 457.

Les essais démontrent que le béton a une teneur en air moyenne de 7 % (mesurée aux deux sites), alors que le facteur d'espacement moyen est de 215 μm . Le facteur d'espacement varie de 190 μm à 240 μm . Les valeurs de surface spécifique des bulles mesurées, égales à 17,9 et 19,8 mm^{-1} . Ces derniers résultats sont représentatifs de bulles d'air de dimension moyenne. Puisqu'elles favorisent l'obtention d'un facteur d'espacement des bulles d'air plus faible, l'obtention de bulles d'air de petite dimension est préférable afin de bien protéger le béton contre le gel.

Dans le cas du viaduc de Blois, les caractéristiques du réseau de bulles d'air respectent les spécifications au Devis spécial. Les valeurs obtenues se situent tout juste à la limite nécessaire pour procurer au béton une résistance contre les pressions générées par les mouvements d'eau survenant lors du gel. Dans un cas sur deux, le facteur d'espacement est supérieur à la limite admissible — 230 μm selon la norme CSA A23.1-04 actuellement en vigueur — pour l'obtention d'un béton durable et résistant aux cycles de gel et de dégel, en présence ou non de sels fondants².

4.7 Propriétés mécaniques du béton

4.7.1 Résistance à la compression (CSA A23.2-9C)

Nous avons vu précédemment (voir Tableau 4.1) que, selon les exigences stipulées au plans et devis des viaducs de la Concorde et de Blois, le béton du tablier et des culées devait développer une résistance à la compression minimale de 28 MPa (4000 psi) à 28 jours. Les résultats de nos essais de résistance à la compression démontrent que la résistance moyenne du béton constituant le viaduc de Blois est de 38,1 MPa. Les résistances à la compression varient de 30,6 MPa à 44 MPa selon les sites. La variabilité observée dans les résultats pourrait être due à une qualité hétérogène du béton, à une différence dans les

² Selon le Manuel d'entretien des structures (pièce COM-30I – p. 159), le réseau de bulles d'air d'un béton peut être considéré comme acceptable si la teneur en air est supérieure à 4%, le facteur d'espacement des bulles d'air est inférieur à 300 μm et la surface volumique des vides dépasse 25 mm^{-1} .

méthodes de placement ou à une dégradation localisée. Toutefois, cette dernière hypothèse devrait être écartée puisque les examens pétrographiques indiquent clairement que la plupart des éprouvettes avaient été prélevées dans des sites où le béton était sain. Par ailleurs, une grande variabilité des résultats a été observée pour les éprouvettes provenant du site 3. Il est possible que les carottes prélevées proviennent de deux bétons différents puisque la présence de réparations a été détectée lors de l'examen pétrographique.

4.7.2 Module d'élasticité en compression du béton (ASTM C469-02)

Le module élastique moyen du béton constituant le viaduc de Blois est de 19,9 GPa alors que les sites 3 et 6, le module est de 19,6 GPa et 20,1 GPa respectivement. Généralement, pour un béton non endommagé, le module élastique est fonction de la résistance à la compression. L'article 8.6.2.3 de la norme canadienne CSA A23.3 permet d'évaluer le module élastique selon l'équation suivante :

$$E = 4500 \sqrt{f'_c}$$

Selon cette équation, le module élastique d'un béton non endommagé ayant une résistance à la compression de 38,1 MPa (résistance moyenne obtenue pour le béton du viaduc de Blois) devrait être de 27,8 GPa. Presque tous les résultats de module d'élasticité obtenus sur le béton du viaduc de Blois sont inférieurs à 27,8 GPa.

4.7.3 Résistance à la traction par écrasement latéral (CSA A23.2-13C)

Tel qu'indiqué au Tableau 4.2, les résultats obtenus lors de cet essai démontrent que la résistance moyenne à la traction par écrasement latéral est de 2,4 MPa. Les valeurs moyennes pour chacun des sites varient de 2,2 MPa à 2,6 MPa. La relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par écrasement latéral se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$f_t = 0,3 f'_c{}^{2/3}$$

Selon cette relation, pour un béton de 31,1 MPa, la résistance à la traction devrait être de 3,4 MPa. Le résultat moyen obtenu est inférieur à cette valeur.

4.8 Propriétés de transport du béton

4.8.1 Perméabilité aux ions chlore (Rapid Chloride Penetration Test) (ASTM C1202)

Afin d'évaluer la résistance du béton à la pénétration d'agents agressifs tels les chlorures, nous avons procédé à des essais de perméabilité aux ions chlore, effectués selon les exigences de la norme ASTM C1202. Cet essai consiste à

mesurer l'intensité d'un courant électrique, engendré par une différence de potentiel de 60 Volt et maintenue constante pendant 6 heures, à travers une éprouvette cylindrique de béton préalablement saturée dans une solution d'eau. La version actuelle de la norme canadienne A23.1 stipule qu'un béton exposé à des cycles de gel-dégel doit avoir une « perméabilité aux ions chlores » inférieure à 1500 Coulombs après 56 jours de cure humide.

Les résultats des essais de perméabilité aux ions chlore réalisés selon la norme ASTM C1202 sont variables; la « perméabilité » du béton variant de haute ou très haute³. Toutes les valeurs obtenues sont supérieures à la limite de 4 000 Coulombs. Sur les 4 essais réalisés sur les différents sites d'échantillonnage, 2 essais ont dû être écourtés en raison de la température élevée (>90°C) de la solution. Ces résultats sont explicables par la porosité élevée du béton testé.

Ces résultats tendent à démontrer que le béton des culées du viaduc de Blois était poreux et perméable.

4.8.2 Perméabilité aux ions chlore - Migration (ASTM C1202, modifié)

L'essai de migration est un essai similaire à celui de la perméabilité aux ions chlore présenté à la section précédente. Cette version modifiée et améliorée permet toutefois d'évaluer plus efficacement la capacité du béton à résister à la pénétration d'un agent agressif comme les ions chlore.

Nos mesures indiquent que le coefficient de diffusion moyen est de $42,3 \times 10^{-12}$ m²/s et les résultats moyens sur les sites 3 et 6 sont de 40 et $44,5 \times 10^{-12}$ m²/s respectivement.

Les coefficients de diffusion mesurés sur le viaduc de Blois sont élevés. À titre comparatif, l'expérience démontre que le coefficient de diffusion d'un béton de rapport eau/ciment de 0,40 (tel que spécifié par la version actuelle de la norme canadienne) est généralement inférieur à 20×10^{-12} m²/s. De tels coefficients de diffusion démontrent que le béton des culées du viaduc de Blois n'avait pas les caractéristiques requises pour résister adéquatement à la pénétration des ions chlore.

4.9 Signes visuels de la dégradation des culées

Tel que mentionné antérieurement, nous avons pu procéder à une inspection très sommaire des parois latérales du viaduc de Blois le 1^{er} octobre 2007 en fin d'après-midi. Ayant observé la présence de fissures et d'efflorescence, nous avons fait part aux représentants du MTQ qu'il y avait un risque que le viaduc de

³ Selon la norme ASTM C1202, une perméabilité aux ions chlore est dite « haute » lorsque l'unité de charge électrique est supérieure à 4 000 Coulombs. Elle est dite « très haute » lorsque la température dépasse 90°C et que l'essai doit être arrêté.

Blois soit affecté par les mêmes problèmes que le viaduc de la Concorde. Tel que mentionné précédemment, les ingénieurs du MTQ prenaient alors les mesures requises pour installer des supports temporaires sous les sections en porte-à-faux du viaduc de Blois et interdire toute circulation sous le viaduc.

Le MTQ a procédé rapidement à l'étañonnement des culées et à la réalisation des fenêtres d'observation horizontales et verticales sur les culées est et ouest. Les détails des analyses reliées aux fenêtres d'observation sont présentés à l'Annexe B2 «*Fenêtres d'observation réalisées sur le viaduc de Blois*». À l'intérieur des fenêtres, nous avons pu apercevoir sur la culée ouest, au centre du tablier, une fissure diagonale similaire à la fissure ayant été observée sur la culée est du viaduc de la Concorde.

À l'examen visuel des carottes réalisés lors de leur réception à nos laboratoires, nous avons pu apercevoir, sur certaines des carottes provenant des deux culées, des fissures parallèles à la surface supérieure. Des fissures perpendiculaires à la surface ont aussi été observées lors de l'analyse pétrographique.

4.10 Discussion des résultats obtenus pour le béton

4.10.1 Commentaires sur les exigences du Devis spécial relatives à la formulation du béton

Tel que souligné à la section 6.2.1 du rapport principal, les rédacteurs du Devis spécial n'ont pas tenu compte du fait que le viaduc serait exposé à des cycles de gel-dégel en présence de sels fondants lorsqu'ils ont défini les exigences relatives à la composition du béton. En conséquence, les spécifications contenues au Devis spécial sont peu restrictives et limitent notamment le rapport eau/ciment à une valeur maximale de 0,56⁴. Tel que mentionné dans le rapport principal, cette valeur est supérieure à celles spécifiées par la norme CSA A23.1-1967 en vigueur lors de la construction de l'ouvrage⁵. De plus, cette valeur est largement supérieure à celle stipulée par la version 2006 de la norme CSA A23.1.

Le Devis spécial était également confus quant aux exigences relatives à la teneur en air entraîné du béton. Certaines dispositions du devis permettaient la production d'un béton avec une teneur en air aussi basse que 4%. Les travaux sur le sujet démontrent qu'une réduction de la teneur en air est un autre facteur qui contribue généralement à augmenter la susceptibilité au gel des bétons.

De nos jours, les spécifications utilisées pour le béton du viaduc de Blois apparaissent comme étant peu restrictives et incomplètes. La norme canadienne

⁴ À maniabilité égale, une augmentation du rapport eau/ciment contribue généralement à réduire la teneur en ciment du béton.

⁵ Il convient de préciser que l'influence négative des sels fondants était bien mentionnée dans la norme A23.1-1967.

actuelle «A23.1-04/A23.2-04 - Béton : Constituants et exécution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton» recommanderait plutôt les exigences suivantes pour un tablier de pont (Classe C-1):

- Rapport eau-ciment maximum de 0,40;
- Résistance à la compression de 35 MPa à 28 jours;
- Facteur d'espacement des bulles d'air de 230 µm;
- Teneur en air de 5 à 8%;
- Perméabilité aux ions chlore de 1500 coulombs.

Ce point est traité de manière plus détaillée au Chapitre 6 du rapport principal.

4.10.1.1 Propriétés du béton en place

Dans l'ensemble, les résultats des essais de caractérisation démontrent que le béton ayant servi à la construction des culées du viaduc était poreux mais relativement bien protégé contre les effets des cycles de gel-dégel en présence de sels fondants. En effet, les caractéristiques moyennes du réseau de bulles d'air sont conformes aux exigences actuelles. Donc, le béton était très perméable à l'eau et aux ions chlore mais les effets néfastes du gel-dégel en présence ou non de sels fondants étaient limités par le bon réseau de bulles d'air.

Les résultats des essais indiquent également que la résistance à la compression mesurée sur les carottes extraites du viaduc de Blois excède la résistance à 28 jours spécifiée dans les plans et devis de l'époque. Dans la documentation technique, on considère généralement que la résistance à la compression d'un béton mature et bien hydraté peut facilement être de 30 à 50% supérieure à celle mesurée à 28 jours⁶.

Dans le cas présent, il est raisonnable de croire que le béton, en s'hydratant au cours des 36 dernières années, aurait pu développer une résistance à la compression moyenne de l'ordre de 39 MPa⁷, ce qui est très proche de la résistance moyenne de 38,1 MPa mesurée.

L'analyse pétrographique a mis en évidence la présence de fissures sous la surface, attribuables à l'action du gel. Cette analyse n'a permis de constater aucun autre mécanisme majeur de dégradation. Des dépôts d'ettringite ont été observés à l'intérieur des bulles mais ces dépôts sont mineurs et ne seraient pas

⁶ Ces valeurs sont valables pour des bétons fabriqués avec un ciment portland sans ajouts minéraux. Ces estimés prennent en considération le fait que la résistance à la compression mesurée sur des carottes peut être, dans certains cas, inférieure à celle obtenue pour des cylindres.

⁷ Cet estimé est d'autant plus raisonnable si l'on considère le témoignage de M. Deschamps de Prud'homme et frères, le producteur de béton, selon lequel le mélange de béton livré au chantier était généralement conçu pour développer une résistance à la compression à 28 jours de 20% supérieure à la valeur spécifiée.

à l'origine des dégradations observées. Des signes mineurs de RAG ont également été détectés mais la réaction n'aurait pas causé de microfissuration.

5 PROGRAMME DES ESSAIS RÉALISÉS SUR L'ACIER

5.1 Spécifications en vigueur à l'époque

Le Devis spécial ne contenait aucune exigence particulière en ce qui concerne l'acier d'armature. Par contre, on retrouve à l'article E-4.12.1 du *Devis de construction des ouvrages d'art majeurs* (voir pièce COM-20C, p. 48) une note indiquant qu'à moins d'un avis contraire spécifique, ces armatures devaient être de type crénelé et faites d'acier de catégorie mi-dur. Également, les propos portant sur les exigences relatives à l'acier pour le viaduc de la Concorde, tels que rapportés à la section 6.2.1 du rapport principal, demeurent ainsi pertinents pour les fins de l'analyse des caractéristiques du viaduc de Blois.

L'article 13.04 de la version du CCDG en vigueur à l'époque de la construction du viaduc stipulait également que les barres d'acier employées comme armature dans le béton de ciment devaient satisfaire aux exigences du Bulletin G-30-1930 de la Canadian Engineering Standard Association (voir pièce COM-20B, p. 69). Cet article précisait que, lors de sa mise en place dans le béton, l'armature devait être exempte d'écaillés, de graisse, de peinture, d'excès de rouille ou de toute autre matière susceptible de l'empêcher d'adhérer au béton.

5.2 Prélèvement des barres

Pour la réalisation de notre programme d'essai, des échantillons de barres d'acier ont été prélevés à différents endroits sur le viaduc de Blois. Afin d'évaluer les propriétés de l'acier, les essais suivants ont été réalisés :

- Détermination de la résistance à la traction (CSA G30 18-M92; ASTM A370);
- Détermination de la résistance à l'impact — Essai Charpy (ASTM C370);
- Détermination de la composition (Combustion / infra-rouge et torche au plasma (Inductively Coupled Plasma).

Les barres ont été prélevées dans les fenêtres d'observation réalisées sur le dessus des culées du viaduc de Blois. L'information relative aux barres prélevées est donnée au Tableau 5.1. Parmi les 6 barres prélevées, 4 ont été soumises aux essais.

Tableau 5.1 – Caractéristiques des barres d'acier prélevées

| Nombre de barres | Identification | Site | Grosueur | Dimensions (mm) |
|------------------|-----------------------------|--------------------------|----------|-----------------|
| 1 | Barre #14 Bande Centrale | Culée ouest | #14 | 1710 |
| 2 | Barre #6 / Bande sud-ouest | Culée ouest | #6 | 1150 et 820 |
| 1 | Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est | Culée est | #8 | 900 |
| 2 | Barre #14 / Remise par MTQ* | Culée est (non-confirmé) | #14 | 1240 et 1130 |

* Prélevée sur le viaduc de Blois, selon Michel Blouin, ing., du MTQ, et remise par lui-même

5.3 Propriétés physiques et mécaniques de l'acier

5.3.1 Détermination de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité

La résistance à la traction et la limite d'élasticité de tous les échantillons d'acier ont été mesurées selon les exigences de la norme CSA G30 18-M92 — *Barres d'acier en billettes pour l'armature du béton* qui à son tour renvoie à la norme ASTM A370 — *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Le détail complet de l'essai est présenté à l'Annexe B1.

Les résultats de limite d'élasticité, de résistance à la traction et de module élastique sont présentés au Tableau 5.2. Pour chaque barre, deux essais ont été réalisés. Les nuances d'acier mentionnées dans la norme sont données au Tableau 5.3. La limite d'élasticité varie de 342 à 465 MPa, la résistance à la traction varie de 674 à 785 MPa et le module élastique varie de 174 à 238 GPa. Selon les résultats, l'acier serait de type 400R pour trois des quatre barres. Les résultats obtenus pour la barre n° 3 sont plus faibles (342 et 348 MPa) et ne respectent pas les exigences de la norme pour cette nuance d'acier.

Tableau 5.2 – Limite d'élasticité (fy), résistance à la traction (ft) et module élastique (E)

| Barre | Identification | fy (MPa) | | ft (MPa) | | E (GPa) | |
|-------|----------------------------------|----------|-----|----------|-----|---------|-----|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est | 408 | 412 | 726 | 729 | 212 | 184 |
| 2 | Barre #6 / Bande sud-ouest (1/2) | 445 | 444 | 724 | 722 | 189 | 174 |
| 3 | Barre #14 Remise par MTQ (1/2) | 342 | 348 | 674 | 689 | 238 | 221 |
| 4 | Barre #14 Bande Centrale | 465 | 465 | 781 | 785 | 188 | 207 |

Tableau 5.3 – Caractéristiques des nuances d'acier
(selon CSA G30 18 M-92)

| | Nuance 300R | Nuance 400R | Nuance 500R | Nuance 400W | Nuance 500W |
|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Résistance minimale à la traction (MPa) | 405 | 540 | 675 | 540 | 625 |
| Limite d'élasticité (MPa) | Sans être inférieure à 1,15 fois la limite d'élasticité | | | | |
| minimale | 300 | 400 | 500 | 400 | 500 |
| maximale | --- | --- | --- | 525 | 625 |

R = Regular (Régulier)

W = Weldable (Soudable)

5.3.2 Détermination de la résistance à l'impact — Essai Charpy

La résistance à l'impact a été mesurée selon les exigences de la norme ASTM A370 — *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Le détail complet de l'essai est présenté à l'Annexe B1. Les résultats obtenus sont résumés au Tableau 5.4. Les valeurs mesurées pour l'énergie absorbée varient de 7 à 28 Joules. Les résultats obtenus pour la barre n° 2 sont plus variables que ceux obtenus pour les autres barres.

Tableau 5.4 – Énergie absorbée lors de l'essai de résistance à l'impact de type Charpy

| Barre | Identification | Énergie (Joules) | |
|-------|----------------------------------|------------------|----|
| | | 1 | 2 |
| 1 | Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est | 11 | - |
| 2 | Barre #6 / Bande sud-ouest (1/2) | 17 | 28 |
| 3 | Barre #14 / Remise par MTQ (1/2) | 7 | 8 |
| 4 | Barre #14 Bande Centrale | 16 | 11 |

5.3.3 Détermination de la composition de l'acier.

La norme CSA G30 18-M92 — *Barres d'acier en billettes pour l'armature du béton* recommande certaines limites quant à la teneur de différents éléments dans la composition de l'acier (Tableau 4.5). Ces limites sont imposées aux fabricants d'acier lors d'analyses réalisées sur coulée, pour des fins de contrôle de la qualité. Les essais sont décrits à l'Annexe B1 et les résultats d'analyses de composition sont présentés au Tableau 5.6.

Pour le carbone et le soufre, les teneurs dans les barres prélevées ont été déterminées par combustion et infra-rouge (Combustion and Infrared) et pour le phosphore et le manganèse, la méthode utilisée est celle de la torche au plasma (Inductively Coupled Plasma). La teneur en silicium n'a pas été mesurée.

Selon les résultats obtenus, l'acier satisfait toutes les exigences du type R; l'acier prélevé serait donc de type régulier.

Tableau 5.5 – Exigences de composition de l'acier d'armature pour différentes nuances

| Élément | Nuances 300R, 400R et 500 R | Nuances 400W et 500 W |
|-----------|--------------------------------|-----------------------|
| | % maximal | % maximal |
| Carbone | —* | 0,30 |
| Manganèse | —* | 1,60 |
| Phosphore | 0,05 | 0,035 |
| Soufre | —* | 0,045 |
| Silicium | —* | 0,50 |

* Non spécifié

Tableau 5.6 – Teneurs en carbone, manganèse, soufre et phosphore mesurées sur différentes barres d'acier

| Barre | Identification | Teneur (%) | | | |
|-------|-------------------------------------|------------|-------|-------|-------|
| | | C | S | Mn | P |
| 1 | Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est | 0,500 | 0,048 | 0,700 | 0,027 |
| 2 | Barre #6 / Bande sud-ouest (1/2) | 0,420 | 0,019 | 1,000 | 0,008 |
| 4 | Barre #14 Bande Centrale | 0,464 | 0,020 | 1,100 | 0,020 |

5.4 Discussion et observations réalisées sur l'acier d'armature

D'après les résultats obtenus, l'acier d'armature utilisé pour bâtir le viaduc de Blois serait de nuance 400R, à l'exception de la barre n° 3. Rappelons que cette dernière barre n'a pas été échantillonnée par Service d'Expertise en Matériaux (S.E.M.) inc. mais nous a plutôt été fournie par le MTQ; nous ne pouvons ainsi en confirmer avec exactitude la provenance. Les observations n'ont pas permis de détecter une présence significative de corrosion. De légères traces de corrosion ont été observées sur quelques barres #14 à l'intérieur des fenêtres d'observation. Dans l'ensemble, les barres semblaient en bon état.

6 RÉSULTATS DES RELEVÉS IN-SITU

Les résultats des mesures réalisées à l'intérieur des fenêtres d'observation sont décrits à l'Annexe B2. Cinq fenêtres d'observation horizontales ont été pratiquées sur la surface du viaduc de Blois. Trois de ces fenêtres étaient situées sur le dessus du porte-à-faux ouest et deux sur le dessus du porte-à-faux est. La Figure 6.1 indique schématiquement les positions des fenêtres d'observation. Dans la partie ouest, les fenêtres étaient situées au nord, au centre et au sud du porte-à-faux; dans la partie est, elles étaient situées au centre et au nord du porte-à-faux. La fenêtre nord-ouest, de petite dimension, a été réalisée afin de vérifier la présence de treillis. Le type de treillis observé témoigne de la présence de réparations localisées à la surface des deux culées, documentées également à la suite de l'analyse pétrographique (Annexe B3). Au moment des observations visuelles, réalisées à l'intérieur des fenêtres, la présence de réparations en surface n'a pu être établie avec certitude, sauf par la présence du treillis.



Figure 6.1 – Emplacement des fenêtres d'observation pratiquées sur la surface du viaduc de Blois

Les barres #14 suivent une trajectoire descendante vers le joint à chacune des quatre fenêtres réalisées. Les différences moyennes entre des mesures prises à 1500 mm et 600 mm du joint varient de 15,8 mm à 26,9 mm selon les fenêtres.

Dans trois cas sur quatre, les résultats obtenus démontrent que la partie supérieure des suspentes en U #8 suit un plan incliné qui ne coïncide pas avec le plan horizontal des barres #14 tel que requis par les plans. La différence atteint 156 mm pour la fenêtre nord-ouest. La fenêtre nord-est fait toutefois exception et, dans ce cas, les parties horizontales des suspentes en U sont à peu près au même niveau que les barres #14. Une telle disposition implique que les deux branches de la suspente en U se retrouvent au-dessus du rang supérieur des barres #7 transversales. Ce cas serait le seul documenté où l'armature est disposée de la sorte. En revanche, la barre diagonale est quand même placée sous les barres transversales. On remarque, dans cette même fenêtre, une différence appréciable entre la longueur des ancrages des branches 1 et 2 des suspentes en U.

On observe également en quelques endroits que la partie horizontale de la diagonale est parfois plus haute que les suspentes en U ou à la même hauteur.

La présence d'une large fissure longeant le plan déterminé par la partie supérieure des suspentes a été observée dans la fenêtre centre-ouest (Figure 6.2). Cette fissure est positionnée au même endroit que la surface de rupture du porte-à-faux sud-est du viaduc de la Concorde. Aucune fissure n'a été détectée dans les autres fenêtres.



Figure 6.2 – Fissure le long des suspentes dans la fenêtre centre-ouest (gauche : face nord et droite : face sud)

Dans le cas du porte-à-faux est, la présence d'une membrane d'étanchéité a été observée le long du joint sur une distance d'environ 500 mm. La présence d'une membrane n'a pu être établie avec certitude du côté ouest.

Des fenêtres d'observation verticales ont aussi été pratiquées sur le viaduc de Blois, mais aucune mesure n'y a été prise. Une fenêtre a été réalisée sur chacune des faces nord et sud de la culée ouest afin d'observer la position des armatures. Ces fenêtres ont permis de confirmer les observations et les mesures réalisées en surface, c'est-à-dire que la partie supérieure des suspentes en U #8 suivait un plan incliné et différent de celui des barres #14. Certaines informations utiles à la comparaison avec le viaduc de la Concorde ont été recueillies suite à l'observation de ces fenêtres (voir chapitre 6).

7 COMPARAISON AVEC LE VIADUC DE LA CONCORDE ET SOMMAIRE DES OBSERVATIONS

7.1 Plans

L'examen des dessins des ingénieurs-conseils DSA montre une très grande similitude entre les deux structures. Le même devis a servi aux deux constructions (Pièces COM-19, COM-20A, COM-20B, COM-20C).

Les deux viaducs affichent la même portée de poutres et les porte-à-faux sont de même géométrie. Le renforcement des assises est également similaire du moins, selon les plans, quant à la dimension et à l'espacement des barres (suspente en U #8, barre diagonale #6, épingle de l'assise #10). Les deux ponts sont renforcés de la même façon dans les parties supérieure et inférieure, longitudinalement (barres #14 en haut et #8 en bas) et transversalement (barres #7).

On peut toutefois noter certaines différences entre les plans des deux structures :

- Les angles d'intersection entre l'autoroute 19 et les viaducs sont différents. L'axe du boulevard de la Concorde fait un angle de 69° 30' avec l'Autoroute 19 alors que celui du boulevard de Blois fait un angle presque droit de 89°, 59' ,15" avec l'Autoroute. Vues en plan, les culées du viaduc de la Concorde étaient en forme de parallélogramme tandis que celles du viaduc de Blois étaient rectangulaires.
- La largeur des viaducs et des éléments composant la chaussée ne sont pas les mêmes. Les voies du boulevard de la Concorde, dans chaque direction, ont une largeur de 10,8 m (35 pieds et 6 pouces), les trottoirs font 2,1 m (7 pieds) et la bande médiane fait 1,6 m (5 pieds) de largeur. Les dimensions des voies et des trottoirs du boulevard de Blois sont respectivement de 7,0 m (23 pieds) et 1,8 m (6 pieds); il n'y a pas de bande médiane. Les trottoirs du viaduc de Blois sont aussi un peu plus minces de 37 mm (1 ½ pouce).
- Étant donné que le viaduc de la Concorde est plus large, il comporte un joint longitudinal et le tablier de ce pont est ainsi séparé en deux parties. Chacune des deux parties du tablier compte 10 poutres-caisson précontraintes. Ce joint ne se retrouve pas sur le viaduc de Blois, dont le tablier compte 13 poutres et supporte les 2 voies de circulations. On peut remarquer toutefois qu'aucun des deux viaducs ne compte de joint longitudinal dans les culées.
- La couronne comporte une pente de 0,8 % à 1,2 % au viaduc de la Concorde, selon les endroits, alors qu'elle est de 1,8 % partout au viaduc de Blois. À titre informatif, mentionnons que la norme canadienne CAN/CSA-S6-06 intitulée "Code canadien sur le calcul des ponts routiers" (COM 29-B) requiert à la clause 1.8.2.2.1 une pente de dévers minimale de 2%.

- La largeur en porte-à-faux des trottoirs est de 1,22 m (4 pieds) au viaduc de la Concorde alors qu'elle est de 857 mm (2 pieds 9 $\frac{3}{4}$ pouces) au viaduc de Blois.
- Les longueurs des culées sont légèrement différentes. La longueur du porte-à-faux, mesurée parallèlement à la direction du trafic, est de 4,0 m (13 pieds) pour le viaduc de la Concorde et de 3,7 m (12 pieds) pour le viaduc de Blois. Cependant, les parties situées entre les murs inclinés parallèles à l'autoroute et les tirants ancrés dans le roc aux extrémités des culées varient; ces parties, au viaduc de la Concorde, mesurent 11,9 m (39 pieds et 2 pouces) à la culée est et 13,5 m (44 pieds et 2 pouces) à la culée ouest, alors qu'au viaduc de Blois, elles sont respectivement de 10,7 m (35 pieds) et 11,9 m (39 pieds) pour l'est et l'ouest.
- Les largeurs hors-tout des tabliers des culées sont différentes, soit 25,0 m (82 pieds) pour le viaduc de la Concorde et 15,9 m (52 pieds 4 $\frac{1}{2}$ pouces) pour le viaduc de Blois. Il n'y a ainsi qu'un mur de soutènement intérieur aux culées du viaduc de Blois, contrairement à deux au viaduc de la Concorde. On remarque aussi une différence dans le ferrailage horizontal sur la face extérieure des murs inclinés parallèles à l'autoroute.
- Sur les plans de construction, la spécification de la pierre concassée à l'endroit des drains en bas des culées est différente. Au viaduc de Blois, de la pierre de grosseur 25-100 mm (1-4 pouces) a été spécifiée, alors qu'aucune grosseur particulière n'est mentionnée au viaduc de la Concorde.
- À l'exception du biais et des largeurs, les tabliers des travées suspendues sont identiques au niveau de l'épaisseur de revêtement bitumineux et de celle de la chape de béton. Les poutres-caisson sont aussi identiques sur les deux viaducs. Les dimensions, les torons, la résistance du béton, les suspentes, les entretoises et la post-contrainte dans les entretoises sont les mêmes dans les deux cas. La portée des poutres est, pour les deux viaducs, de 27,4 m (90 pieds) au centre des appuis, leur largeur est de 1,2 m (4 pieds) et leur hauteur est de 1,1 m (3 pieds et 6 pouces).
- La qualité du béton spécifiée, l'épaisseur des dalles de même que la disposition des barres d'armature dans la zone de l'assise, dans la partie supérieure ainsi que dans la partie inférieure des dalles, sont semblables pour les deux viaducs. On ne note que de légères différences au niveau de la longueur totale des épingles de l'assise et des barres diagonales, qui sont plus longues sur le viaduc de la Concorde. L'épaisseur des dalles épaisses diffère aussi légèrement. Elle est, sur la culée est du viaduc de la Concorde, de 1,16 m (45 $\frac{1}{2}$ pouces) au joint de dilatation (excluant la surépaisseur) et de 1,29 m (50 $\frac{7}{8}$ pouces) à l'origine du porte-à-faux. Sur la culée ouest du viaduc la Concorde, l'épaisseur est également de 1,16 m (45 $\frac{1}{2}$ pouces) au joint de dilatation mais de 1,32 m (52 $\frac{1}{8}$ pouces) à l'origine du porte-à-faux.

Pour le viaduc de Blois, l'épaisseur varie transversalement puisque la couronne n'est présente que sur la partie supérieure du tablier. L'épaisseur de la dalle, à la jonction du mur, varie de 1,29 m (50,72 pouces) à 1,42 m (55,76 pouces) du côté est et de 1,30 m (51,20 pouces) à 1,43 m (56,24 pouces) du côté ouest. Pour obtenir l'épaisseur à l'assise (excluant la surépaisseur), on doit retrancher 152 mm (6 pouces) aux valeurs données ci-haut.

7.2 Bétons – Propriétés et dégradation

Les deux viaducs présentaient des signes de fissuration et d'efflorescence. Dans l'ensemble, le béton d'origine du viaduc de Blois semble de meilleure qualité que celui du viaduc de la Concorde. Pour l'ensemble des propriétés de transport du béton, les résultats sont comparables. Cependant, la résistance à la compression est significativement supérieure pour le viaduc de Blois. C'est toutefois au niveau des paramètres du réseau de bulles d'air que la différence est la plus marquante; le béton du viaduc de Blois est mieux protégé contre les effets du gel que celui du viaduc de la Concorde. En effet, le béton du viaduc de Blois satisfait presque aux normes actuelles en matière de teneur en air et de facteur d'espacement..

D'après les résultats, la présence de fissuration serait également beaucoup plus limitée sur le viaduc de Blois. Un plan de fissuration a été observé à un seul endroit, au centre de la culée ouest, à proximité du joint. Dans trois autres fenêtres, aucune fissure n'a été détectée.

7.3 Observations à l'intérieur des fenêtres

En général, l'armature a été disposée de façon similaire sur les viaducs de Blois et de la Concorde. La disposition erronée des barres d'armature constatée sur le viaduc de la Concorde a également été observée sur le viaduc de Blois. Les suspentes en U #8 et les barres diagonales #6 étaient placées sous les barres transversales #7.

De plus, certaines différences mineures ont été observées au niveau de la disposition des armatures sur les deux viaducs (voir Figure 7.1) :

- Sur le viaduc de la Concorde, la partie courbée, située en bas à l'avant des barres diagonales, est à l'intérieur des suspentes en U et n'entoure pas de barre. Sur le viaduc de Blois, cette partie courbée dépasse l'avant des suspentes et entoure la barre la plus basse au bord de l'assise, tel qu'indiqué au plan;
- Sur le viaduc de la Concorde, la longueur des ancrages des suspentes en U est uniforme, alors que sur le viaduc de Blois, elle est variable par endroits;
- Sur le viaduc de la Concorde, la barre #7 transversale sur laquelle s'appuie la diagonale #6, à la hauteur du dessus de l'assise, est plus éloignée du joint que sur le viaduc de Blois;

- Sur le viaduc de la Concorde, la suspente en U est plus éloignée du joint que sur le viaduc de Blois;
- Sur le viaduc de la Concorde, l'ancrage de la barre diagonale suit le plan de l'ancrage des suspentes en U, alors que sur le viaduc de Blois, elle est parfois située au-dessus des suspentes.

Viaduc de la Concorde



Porte-à-faux nord-est Concorde montrant la position de la suspente en U par rapport au joint, la position de la partie basse de la barre diagonale et la barre #7 sur laquelle s'appuie la diagonale.



Fenêtre nord-ouest sur Concorde montrant l'uniformité de la longueur des ancrages des suspentes en U

Viaduc de Blois



Porte-à-faux sud-ouest de Blois montrant la position de la suspente en U par rapport au joint, la position de la partie basse de la barre diagonale et la barre #7 sur laquelle s'appuie la diagonale.



Fenêtre nord-est sur de Blois montrant la différence de longueur des ancrages des suspentes en U



Diagonale plus élevée que la suspente en U sur de Blois (fenêtre centre-ouest)

Figure 7.1 – Particularités des aciers d'armature dans la région de l'assise

7.4 Données de circulation

Selon le rapport d'expertise préparé par M. Jean Hamaoui, ing. pour le compte de la CEVC, la circulation des véhicules sur le viaduc de Blois est beaucoup moins importante que celle sur le viaduc de la Concorde. En effet, les débits de tous les véhicules sur le viaduc de la Concorde sont approximativement 10 fois supérieurs à ceux estimés pour le viaduc de Blois. Pour les véhicules lourds, les débits estimés pour le viaduc de la Concorde sont 15 fois supérieurs à ceux estimés pour le viaduc de Blois.

7.5 Analyse structurale

On retrouve à la section 9 de l'annexe A7 (au rapport principal) une analyse de la conception du viaduc de Blois. Les défauts concernant l'ancrage des suspentes #8 notés pour le viaduc de la Concorde étaient également présents au viaduc de Blois. Les vérifications faites selon les exigences de la norme actuelle S6-2006 indiquent que des étriers seraient également requis dans la dalle pleine du viaduc de Blois, non seulement pour le véhicule de référence actuel CL-625 mais également pour le véhicule de référence (le camion H20-S16) beaucoup plus léger de l'époque.