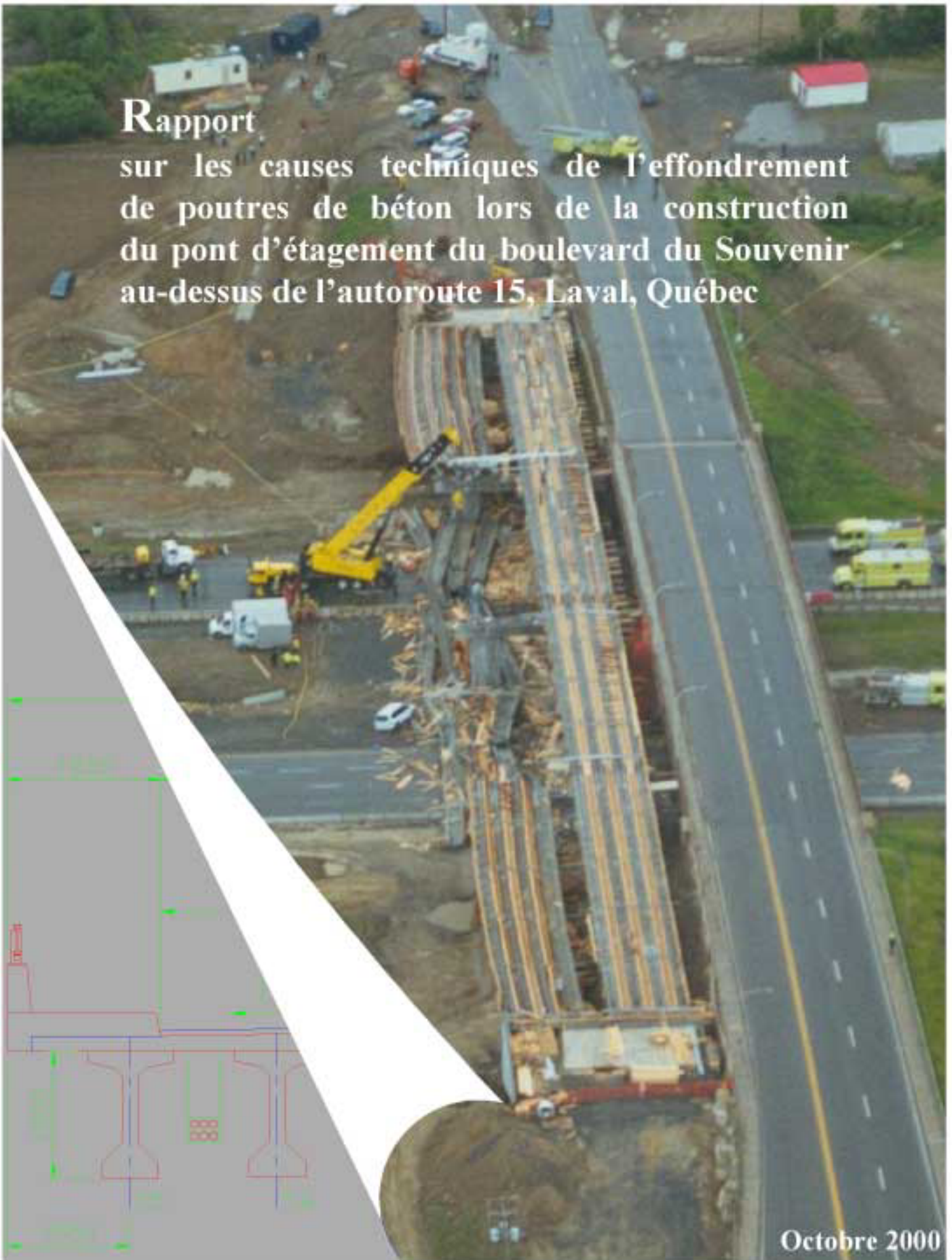


**Rapport**  
sur les causes techniques de l'effondrement  
de poutres de béton lors de la construction  
du pont d'étagement du boulevard du Souvenir  
au-dessus de l'autoroute 15, Laval, Québec



Octobre 2000

# Rapport

## sur les causes techniques de l'effondrement de poutres de béton lors de la construction du pont d'étagement du boulevard du Souvenir au-dessus de l'autoroute 15, Laval, Québec

par :

**Robert Tremblay, Ph.D., ing.**

Coordonnateur

Département des génies civil, géologique et des mines

École Polytechnique, Montréal

**Denis Mitchell, Ph.D., ing.**

Département de génie civil et de mécanique appliquée

Université McGill, Montréal

**Jocelyn Labbé, ing.**

Direction des structures

Ministère des Transports du Québec

**Jacques Prévost, M.Sc., ing.**

Direction des structures

Ministère des Transports du Québec

Soumis à

**Monsieur André Trudeau, sous-ministre**

**Ministère des Transports, Québec**

**Octobre 2000**

## Sommaire

Le 18 juin 2000, sur le chantier de construction du nouveau pont d'étagement du boulevard du Souvenir à Laval, huit des 32 poutres en béton qui avaient été installées sur la structure se sont écroulées sur les voies nord et sud de l'autoroute 15. L'accident fait un mort et deux blessés. Huit autres poutres se sont aussi déplacées mais ont été retenues de façon précaire par des murs de garde aménagés aux culées du pont.

La structure de ce pont est d'un type fréquemment utilisé pour la construction des ponts au Québec et en Amérique du Nord. Il s'agit d'un pont à quatre portées dont le tablier est fait de poutres préfabriquées en béton précontraint qui supportent une dalle de béton. Sur quatre des cinq points appuis, les poutres reposaient sur des appareils à élastomère confiné qui permettent la rotation des poutres de même que les mouvements longitudinaux du pont induits par les variations de température. Dans le sens de la largeur du pont, les appareils d'appui des quatre premières poutres à partir de la rive permettaient aussi un mouvement dans la direction transversale.

Au moment de l'accident, les poutres étaient installées sur les appareils d'appui et on préparait les coffrages pour la coulée des entretoises et de la dalle. Des tiges métalliques avaient été posées aux extrémités des poutres, au niveau de leur semelle supérieure, pour les retenir les unes aux autres. Lors de l'installation des poutres, des appuis temporaires avaient été placés sous les poutres, près des appareils d'appui, aux trois appuis intermédiaires. Ces appuis temporaires avaient été enlevés durant la première semaine de juin. Les poutres étaient alors en état d'équilibre précaire car elles pouvaient pivoter par rapport à leur base et, pour les quatre poutres de rive, se déplacer latéralement sans qu'il n'y ait opposition suffisante des tiges de retenue ni des éléments de coffrage que l'on était à installer avant l'effondrement.

Le 18 juin au matin, les poutres de rives se sont déplacées, par glissement et rotation au niveau des appareils d'appui, probablement dû à l'effet du vent, combiné ou non à d'autres effets, provoquant un effondrement progressif de huit poutres. Cet accident est survenu parce que les poutres n'étaient pas contreventées adéquatement lors de la construction du pont. Un système structural aurait dû être installé pour empêcher le déplacement des poutres durant la construction.

# Table des matières

Sommaire	ii
Table des matières	iii
<b>1.0 INTRODUCTION</b>	<b>1-1</b>
1.1 Contexte	1-1
1.2 Formation et mandat du comité d'experts	1-1
1.3 Méthodologie	1-2
1.3.1 Cueillette et étude d'information	1-3
1.3.2 Prise de mesures et d'échantillons	1-3
1.3.3 Essais en laboratoire	1-3
1.3.4 Calculs structuraux et analyses du comportement de la structure	1-4
1.4 Organisation du rapport	1-4
<b>2.0 DESCRIPTION DU PROJET</b>	<b>2-1</b>
2.1 Introduction	2-1
2.2 Description du pont	2-1
2.2.1 Structure	2-1
2.2.2 Appareils d'appui	2-8
2.2.2.1 Coussin en élastomère	2-10
2.2.2.2 Appuis à élastomère confiné	2-12
2.3 Construction du pont	2-20
2.3.1 Fabrication et installation des poutres	2-20
2.3.1.1 Calendrier des travaux	2-20
2.3.1.2 Conditions d'appui des poutres	2-23
2.3.1.3 Retenue latérale des poutres	2-23
2.3.1.4 Soudure des plaques d'assise des poutres aux appareils d'appui	2-23
2.3.2 Travaux de coffrage des entretoises et de la dalle	2-27
2.3.2.1 Plancher de sécurité et entretoises	2-27
2.3.2.2 Coffrage de la dalle	2-30
2.3.2.3 État d'avancement des travaux	2-33
<b>3.0 DESCRIPTION DE L'EFFONDREMENT DES POUTRES</b>	<b>3-1</b>
3.1 Vue d'ensemble	3-1
3.2 Témoignages	3-7
3.3 Description des dommages subis par la structure	3-8
3.3.1 Éléments du tablier	3-8
3.3.2 Appareils d'appui	3-12
3.3.3 Piles	3-20
3.4 Mesure de la rotation des poutres 5 à 8	3-22
3.5 Reconstitution de la chute des poutres	3-25

<b>4.0</b>	<b>CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES</b>	4-1
4.1	Conditions climatiques	4-1
4.2	Conditions sismiques	4-4
<b>5.0</b>	<b>CAUSES PROBABLES DE L'EFFONDREMENT</b>	5-1
5.1	Introduction	5-1
5.2	Revue de la structure du pont	5-1
5.2.1	Qualité des matériaux	5-1
5.2.2	Revue de la conception du pont	5-1
5.2.3	Appareil d'appuis	5-2
5.3	Rupture par instabilité des poutres	5-3
5.3.1	Système de contreventement temporaire	5-3
5.3.2	Sollicitations	5-5
5.3.2.1	Pressions dues au vent	5-5
5.3.2.2	Turbulence causée par la circulation	5-6
5.3.2.3	Vibrations causées par la circulation	5-6
5.3.2.4	Imperfections géométriques	5-7
5.3.2.5	Effets des vibrations de la température et du rayonnement solaire	5-9
5.3.3	Étude de la stabilité sous l'effet du vent , des imperfections géométriques et des variations de température	5-9
5.3.4	Remarques	5-13
<b>6.0</b>	<b>CONCLUSIONS</b>	6-1
<b>7.0</b>	<b>REMERCIEMENTS</b>	7-1
<b>8.0</b>	<b>RÉFÉRENCES</b>	8-1

## **1.0 INTRODUCTION**

### **1.1 Contexte**

En juin 2000, un nouveau pont d'étagement était en construction au-dessus de l'autoroute 15 pour permettre le passage du boulevard du Souvenir à ville de Laval. Le pont comprenait 4 travées orientées d'ouest en est. Les travaux étaient en première phase de réalisation et on avait procédé à la mise en place de 32 poutres préfabriquées en béton précontraint soit 8 poutres par travée.

Le 18 juin, peu avant 11h du matin, huit poutres des 4 premières rangées situées du côté sud du pont s'écroulent sur les voies nord et sud de l'autoroute 15. Ces poutres sont localisées sur les travées 2 et 3. L'accident fait un mort et deux blessés. Les 4 poutres les plus au sud sur la travée 1 et la travée 4 se sont aussi déplacées mais ont été retenues de façon précaire par des murs de garde aménagés dans les culées du pont. Les 16 autres poutres sont demeurées en place mais étaient cependant inclinées. Afin de garantir la sécurité des lieux et des usagers de l'autoroute 15, on décide de démanteler toutes les poutres restantes.

### **1.2 Formation et mandat du comité d'experts**

Suite à cet accident, M. Guy Chevrette, Ministre des Transports du Québec, a mandaté la Direction des structures pour faire la lumière sur les causes de l'effondrement des poutres. Il a également mis à la disposition du coroner ses experts en structures pour l'aider à sécuriser les lieux.

Le 28 juin 2000, M. André Trudeau, sous-ministre au ministère des Transports, formait un comité d'experts pour déterminer les causes techniques de l'accident. Le mandat du comité comprenait la collecte et l'analyse de l'information relative à l'effondrement des poutres, les études et expertises jugées requises, et la préparation d'un rapport présentant les résultats et conclusions de ces travaux.

Le comité d'experts comprenait quatre membres dont deux professeurs en génie des structures, Robert Tremblay, de l'École Polytechnique, coordonnateur et porte-parole du comité, Denis Mitchell, de l'Université McGill, et deux ingénieurs de la Direction des structures du ministère des Transports du Québec, Jocelyn Labbé et Jacques Prévost.

À ce comité s'est greffé plusieurs spécialistes du ministère des Transports du Québec qui ont étudié divers aspects particuliers de ce mandat. Chacun de ces spécialistes a remis un rapport au comité accompagné, le cas échéant, de documents complémentaires tels des notes de calcul. Les constats de ces spécialistes ont été revus par les professeurs Tremblay et Mitchell.

Au cours de ses travaux, le comité a eu accès à divers documents produits par plusieurs des intervenants qui ont été impliqués dans le projet de construction du pont dont des plans, dessins d'atelier, mémos, notes de calcul, photos, etc. De ces informations, seules celles qui étaient liées directement à l'effondrement des poutres ont été traitées par les membres du comité et sont citées dans le présent rapport.

Finalement, bien que le comité se juge satisfait des informations obtenues et des constats qu'il en a tirés, il demeure possible que des faits n'aient pas été portés à son attention ou que de nouveaux éléments ne soient révélés qu'après le dépôt de ce rapport. Les conclusions de cette étude pourraient alors être modifiées en conséquence.

### **1.3 Méthodologie**

Le travail du comité a consisté à recueillir, examiner et interpréter l'information disponible et à élaborer et valider des scénarios expliquant l'effondrement des poutres. Deux avenues principales ont été identifiées dès le départ afin d'établir un plan de travail: l'effondrement dû à la rupture d'un élément structural et l'effondrement dû à un état d'équilibre instable des poutres. Le comité a également examiné la possibilité qu'une autre cause telle un chargement exceptionnel ou un événement extraordinaire puisse avoir produit l'effondrement des poutres.

La structure du pont du boulevard du Souvenir est un type fréquemment utilisé au Québec et en Amérique du Nord. La vérification de la capacité structurale des principaux éléments de la charpente a consisté à faire les calculs des efforts et de la résistance de ces éléments et à vérifier la qualité des matériaux utilisés. On a aussi examiné l'historique de la construction pour vérifier la possibilité d'un problème antérieur à l'accident.

L'étude de la stabilité des poutres a nécessité un travail de recherche plus important. Il fallait reconstituer les conditions qui prévalaient sur le chantier avant l'effondrement, déterminer les caractéristiques et le comportement structural de certaines des composantes de la structure et procéder à des analyses plus particulières. Des essais ont notamment été réalisés sur les appareils d'appui. On a aussi examiné les effets thermiques sur les poutres du pont.

Les principales étapes du travail peuvent se résumer comme suit :

- la cueillette et l'étude d'information;
- la prise de mesures et d'échantillons;
- les essais en laboratoire;
- les calculs structuraux et les analyses du comportement de la structure.

### **1.3.1 Cueillette et étude d'information**

Les membres du comité ont étudié les documents qui ont été recueillis et fournis par le corps policier de Laval. Ces documents sont :

- les documents obtenus des intervenants dans le projet: plans, dessins, journal de chantier, avis et mémos, lettres, photos, etc.;
- les photos prises par les corps de sécurité publique après l'accident;
- les témoignages et les dépositions;
- les conditions climatiques et sismiques.

Le comité a aussi fait une recherche bibliographique concernant le comportement des appareils d'appui ainsi que les effets thermiques sur les ouvrages de béton.

### **1.3.2 Prise de mesures et d'échantillons**

Les membres du comité ont demandé des prises de mesures et de matériaux. Ces travaux se résument comme suit :

- les relevés des dommages aux éléments de la structure en place et des éléments endommagés;
- les relevés dimensionnels d'éléments de la structure restés en place;
- le prélèvement d'échantillons de matériaux dans les principaux éléments de la structure;
- la mesure des vibrations induites par la circulation routière;
- la mesure des variations de la température du béton des poutres dues aux changements de température extérieure et du rayonnement solaire.

### **1.3.3 Essais en laboratoire**

Les essais en laboratoire ont été réalisés sur :

- les matériaux (béton et acier);
- les tiges de retenue transversale des poutres;
- les appareils d'appui.

### **1.3.4 Calculs structuraux et analyses du comportement de la structure**

Le comité a procédé aux études suivantes :

- la revue de la conception des principaux éléments des fondations et de la structure;
- l'étude de la stabilité des poutres lors de la construction, prenant en compte des effets suivants :
  - le vent;
  - les changements de température et le rayonnement solaire;
  - les imperfections géométriques.

### **1.4 Organisation du rapport**

Le présent rapport contient un résumé des principaux résultats et observations découlant des travaux réalisés et les conclusions sur les causes probables de l'effondrement des poutres.

Dans le chapitre 2, on décrit la structure et les étapes de construction du pont en insistant sur les éléments qui sont associés à l'effondrement des poutres. On présente également dans ce chapitre les conditions qui prévalaient le 18 juin 2000 et au cours des jours précédents.

L'effondrement des poutres et les dommages causés à la charpente sont décrits au chapitre 3. Les conditions climatiques et sismiques qui prévalaient dans les jours précédents l'accident sont résumées au chapitre 4.

Au chapitre 5, on présente brièvement les études qui ont été réalisées pour identifier les causes de l'effondrement. Les résultats de ces études sont présentés et discutés et on conclut sur les causes probables de l'effondrement. Finalement, le comité présente ses conclusions au chapitre 6.

## **2.0 DESCRIPTION DU PROJET**

### **2.1 Introduction**

Les travaux de construction du pont d'étagement du boulevard du Souvenir font partie d'un important plan d'amélioration de l'autoroute 15 sur le territoire de la ville de Laval. Ce plan comprenait la construction de quatre nouvelles structures, l'ajout de nouveaux collecteurs et de bretelles ainsi que le prolongement et l'amélioration de boulevards existants. Ce projet était financé conjointement par le ministère des Transports et la ville de Laval. La ville de Laval agissait comme donneur d'ouvrage.

Le pont du boulevard du Souvenir devait remplacer un pont existant enjambant l'autoroute 15. La préparation des plans et devis et la surveillance des travaux pour ce nouveau pont avaient été confiées à la firme Dessau-Soprin et l'entrepreneur général pour ce projet était la compagnie Beaver Asphalte.

### **2.2 Description du pont**

#### **2.2.1 Structure**

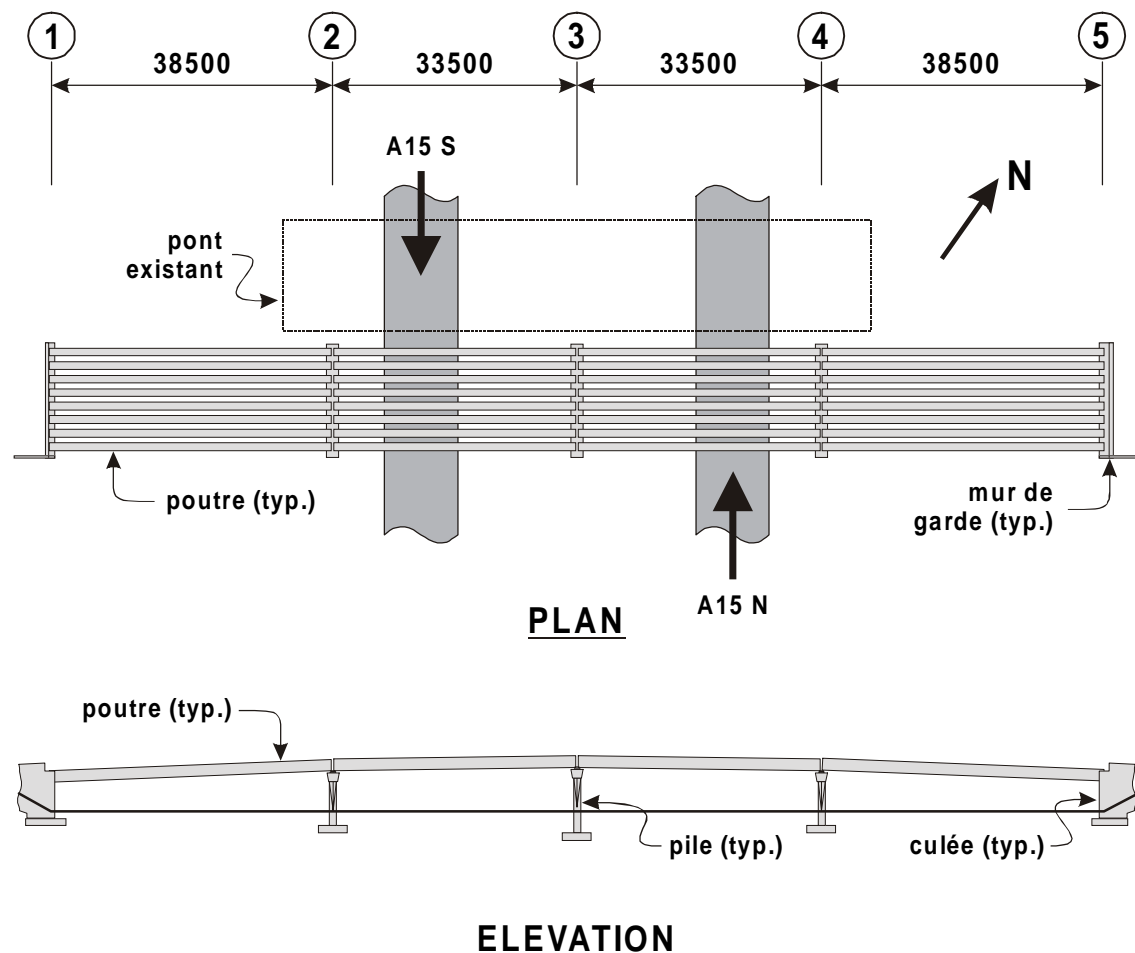
Le pont du boulevard du Souvenir est une structure en béton à quatre travées qui est orientée ouest-est. La figure 2.1 montre une vue en plan et l'élévation principale de l'ouvrage, dans l'état d'avancement des travaux juste avant l'accident.

Les travées d'extrémité (travées 1 et 4, respectivement entre les axes 1 et 2 et entre les axes 4 et 5) font 38.5 m de longueur alors que les deux travées centrales (travées 2 et 3) mesurent 33.5 m. Les voies sud et nord de l'autoroute 15 passent respectivement sous les travées 2 et 3 de la structure. En élévation, le profil du pont est en pente de chaque côté à partir du centre de la structure. La pente des poutres des travées 1 et 4 est de 4% alors que la pente dans les travées 2 et 3 est de 1.3%.

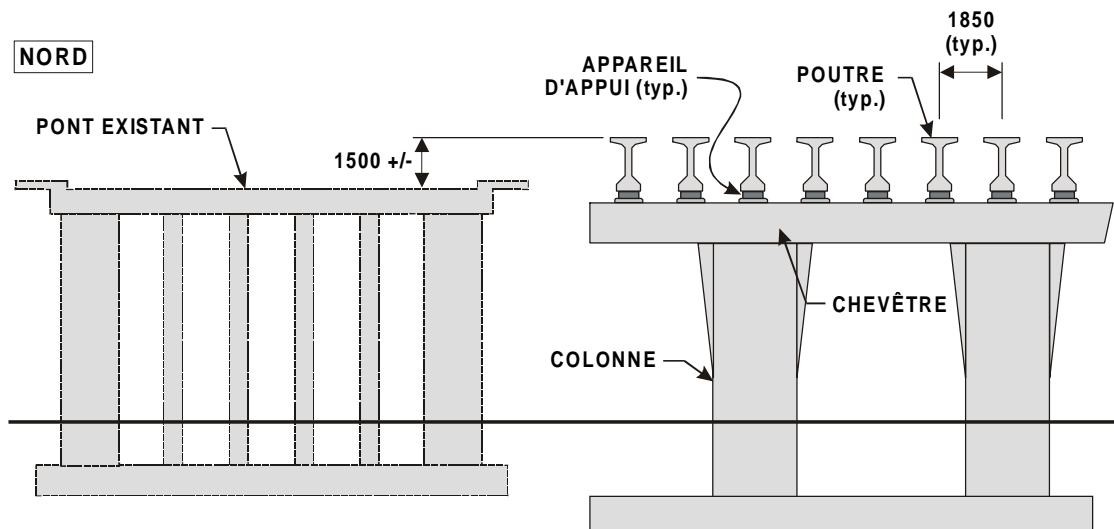
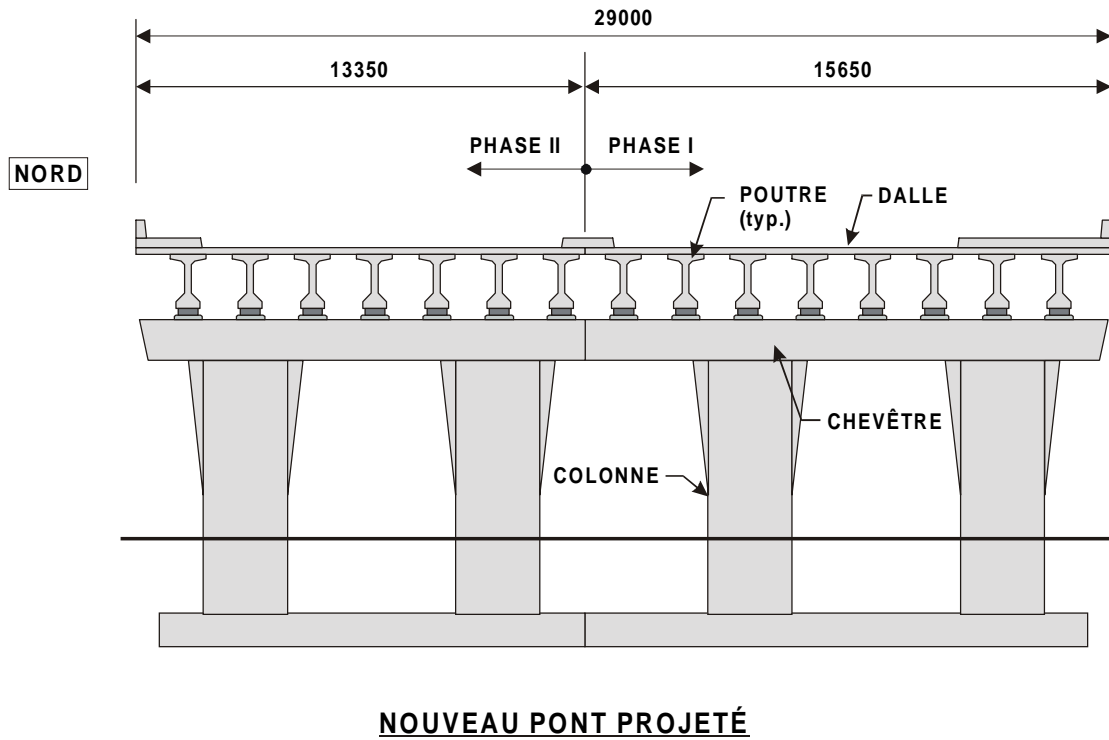
La construction de ce pont devait se faire en deux phases. Dans un premier temps, on construisait une première largeur de pont au sud du pont existant. Une fois cette étape complétée, on déviait la circulation de l'ancienne structure vers la nouvelle. On pouvait alors démolir l'ancien pont pour procéder à la deuxième phase de construction du nouveau pont. Au moment de l'effondrement, on travaillait à compléter la première phase des travaux. La figure 2.2 montre la coupe transversale du pont projeté (phases I et II) et de la phase I du pont. Les principales caractéristiques du pont projeté sont résumées au tableau 2.1.

Le tablier du pont (poutres et dalle) repose sur cinq unités de fondation : deux culées et trois piles. Ces unités sont identifiées par le numéro d'axe correspondant indiqué sur la figure 2.1 : la culée 1 est celle située à l'extrémité ouest du pont, les piles 2 à 4 suivent d'ouest en est et, finalement, on retrouve la culée 5 du côté est. Les culées sont principalement faites de murs en béton qui supportent le tablier et retiennent les remblais d'approche du pont. Les piles comprennent des colonnes qui supportent un chevêtre sur lequel on dépose les poutres. Ces unités structurales reposent sur une semelle en béton armé qui transfère les charges au sol. Le sol en place est de bonne capacité portante.

Le tablier du pont est fait d'une dalle de béton et de poutres préfabriquées en béton précontraint. Un total de 32 poutres (4 travées x 8 rangées) ont été installées lors de la phase I des travaux. L'espacement transversal entre les poutres est le même sur toute la largeur du pont (1850 mm).



**Figure 2.1** Éléments de la structure du pont en place le 18 juin 2000



**Figure 2.2** Coupe transversale de la structure à la pile 3  
(haut : phases I et II projetées; bas : phase I)

**Tableau 2.1** Principales caractéristiques du pont

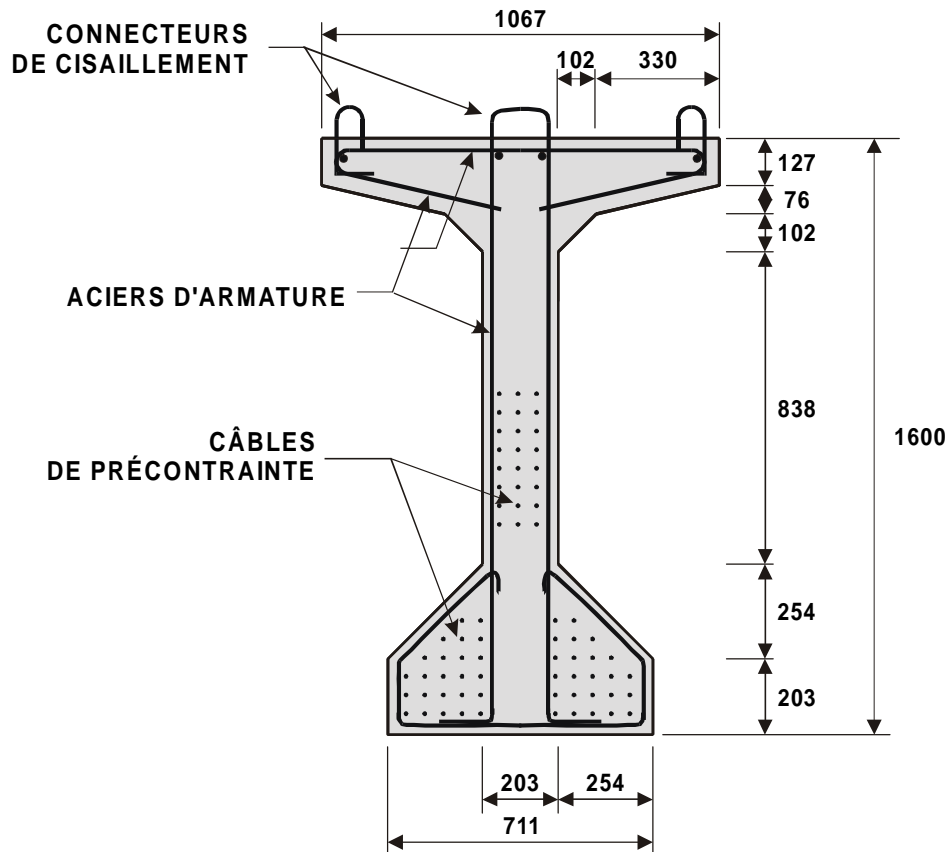
Type de pont	Poutres préfabriquées en béton précontraint avec dalle participante
Longueur totale	$38.5 + 33.5 + 33.5 + 38.5 = 144$ m
Largeur totale	29.0 m
Largeur de la voie carrossable	22.5 m (incluant la bande médiane)
Nombre de voies	4 (2 voies dans chaque direction)
Nombre de trottoirs	2
Largeur des trottoirs	Sud : 4205 mm, nord : 1575 mm
Largeur de la bande médiane	1500 mm
Nombre de poutres	4 travées x 15 = 60 poutres
Type de poutres	AASHTO Type V (voir figure 2.3)
Type de fondation	Fondation superficielle sur sol (till brun)
Dégagement vertical sous les poutres	5.5 m au-dessus de l'autoroute 15

Les poutres du pont étaient des éléments normalisés AASHTO de type V. Ces éléments sont fabriqués en usine et transportés au chantier. Une coupe type de ces poutres est montrée à la figure 2.3. Elles ont une hauteur totale de 1600 mm et leur largeur maximale est de 1067 mm au niveau de la semelle supérieure. La résistance en flexion de ces poutres provient essentiellement de la présence de nombreux câbles d'acier à haute résistance (acier de précontrainte) qui sont mis sous tension avant la coulée du béton. Des aciers d'armature passive sont aussi utilisés dans les poutres. Certains de ces aciers, que l'on désigne connecteurs de cisaillement, excèdent le dessus de la semelle supérieure pour créer un lien mécanique avec la dalle de béton.

Deux longueurs différentes de poutres sont utilisées pour s'adapter aux travées du pont. Une vue en élévation et les caractéristiques nominales de ces deux types de poutres (longueur et masse) sont données à la figure 2.3. Au chantier, les poutres sont déposées sur des appareils d'appui qui sont préalablement placés sur des socles en béton construits à même le chevet des piles et l'assise des culées. Ces appareils d'appui sont décrits plus en détail dans la prochaine section.

Une fois les poutres installées et stabilisées, on construit la dalle ainsi que les entretoises. La dalle est en béton coulé sur place et son épaisseur est de 200 mm. Les entretoises sont des poutres en béton qui sont coulées en place entre les poutres principales du pont, dans la direction transversale. Leur rôle principal est de stabiliser les poutres et de répartir latéralement les charges sur celles-ci. Tel qu'illustré à la figure 2.4, une entretoise est placée à chaque culée et au droit de chacune des piles. De plus, des entretoises intermédiaires sont placées à intervalle régulier le long des travées. Pour le pont du boulevard du Souvenir, il y avait quatre entretoises intermédiaires dans les travées 1 et 4 et trois dans les travées 2 et 3. Des aciers d'armature font le lien entre les entretoises et la dalle et entre les entretoises et les poutres principales, tout comme entre la dalle et les poutres principales. La dalle, les poutres et les entretoises forment un ensemble monolithique une fois que tous ces éléments sont en place.

Ce type de structure est très fréquent sur les réseaux routiers nord-américains puisqu'il constitue souvent la solution la plus économique pour la construction de ponts ayant des travées d'une longueur variant entre 20 et 40 m. Au Québec, on compte plus de 700 structures de ce type.



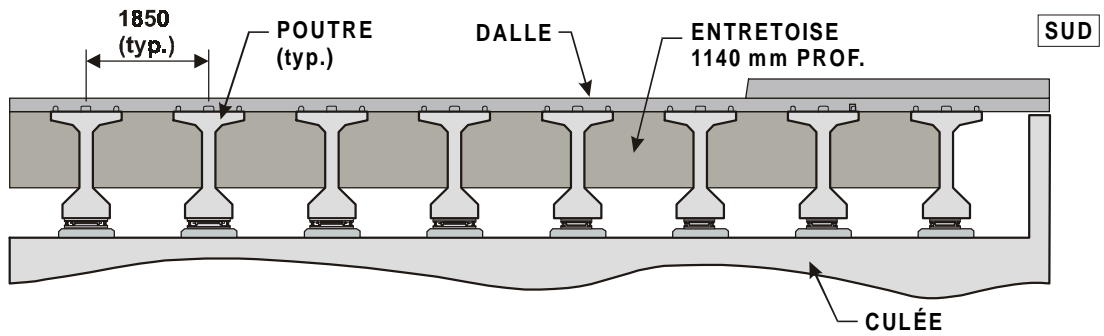
TRAVÉES 1-2 ET 4-5 : longueur = 38 680 mm - masse = 60 700 kg



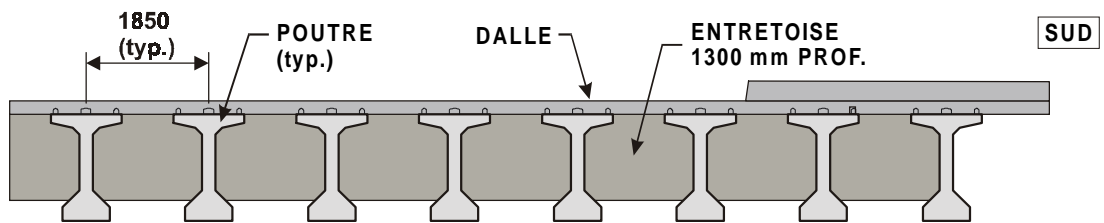
TRAVÉES 2-3 ET 3-4 : longueur = 33 200 mm - masse = 52 100 kg



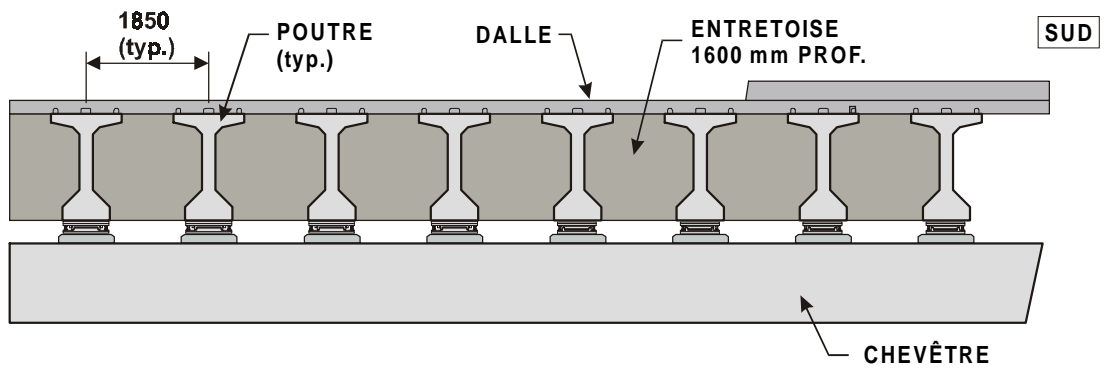
**Figure 2.3** Dimensions nominales des poutres préfabriquées en béton



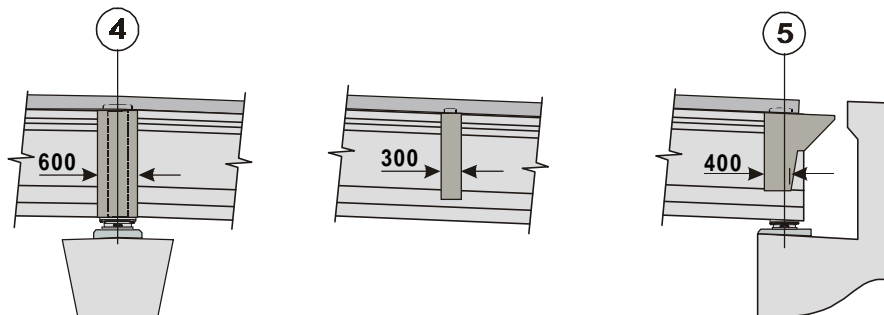
**ENTRETOISE AUX CULÉES (CULÉE 5 MONTRÉE)**



**ENTRETOISE INTERMÉDIAIRE**



**ENTRETOISE AUX PILES**



**COUPE LONGITUDINALE PARTIELLE (PILE 4 À CULÉE 5)**

**Figure 2.4** Entretoises et dalle du tablier

## 2.2.2 Appareils d'appui

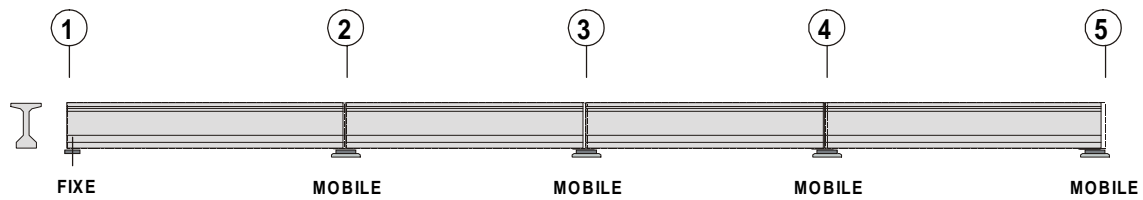
Les appareils d'appui assurent le transfert des charges du tablier aux piles et culées. Ces charges comprennent des charges verticales, dont le poids du tablier et celui des véhicules circulant sur le pont, et des charges horizontales dont celles dues aux vents, aux séismes, au freinage des véhicules, etc.

Les appareils d'appui doivent en plus permettre les mouvements anticipés du tablier. Ceux-ci comprennent la rotation des poutres à leurs extrémités, lorsqu'elles fléchissent sous l'action des charges de gravité. Les déformations horizontales du tablier dues au retrait et au fluage du béton et celles dues aux variations de température doivent également être accommodées par les appareils d'appui. Pour permettre ces mouvements horizontaux, on doit aussi prévoir des joints de dilatation dans le tablier mais, dans la mesure du possible, on cherche à minimiser le nombre de ces joints car ils requièrent de l'entretien et peuvent causer des difficultés au niveau de la durabilité de l'ouvrage.

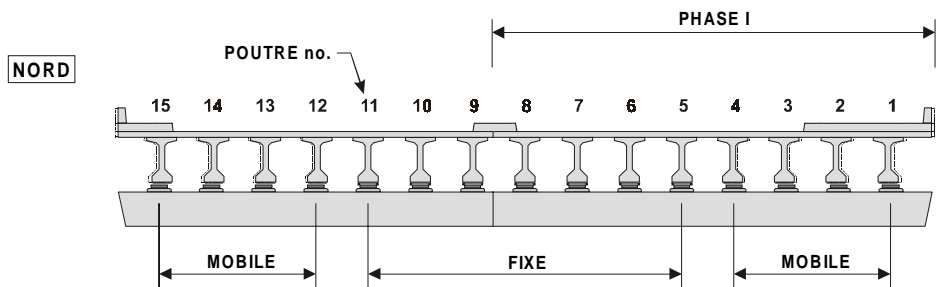
Le concept utilisé au niveau des appuis du pont du boulevard du Souvenir est illustré à la figure 2.5. Le pont fait 144 m de longueur et le concepteur a prévu un seul joint de dilatation à la culée 5 pour permettre les mouvements dans la direction longitudinale. Les appareils d'appui à la culée 1 ont été posés fixes alors que tous ceux localisés aux piles 2 à 4 et à la culée 5 sont mobiles pour permettre le mouvement longitudinal du tablier.

Dans la direction transversale, le tablier est d'un seul bloc, sans joint de dilatation. Pour permettre les déformations du tablier dans cette direction, on a spécifié des appareils mobiles transversalement pour les poutres 1 à 4 et pour les poutres 12 à 15, tel qu'illustré à la figure 2.5. Cette configuration permet le rétrécissement et la dilatation transversales du tablier lorsqu'il subit un changement de température et elle est valable aux deux culées et aux trois piles. On notera que dans ce rapport, les rangées de poutres ont été numérotées de 1 à 15 du sud vers le nord.

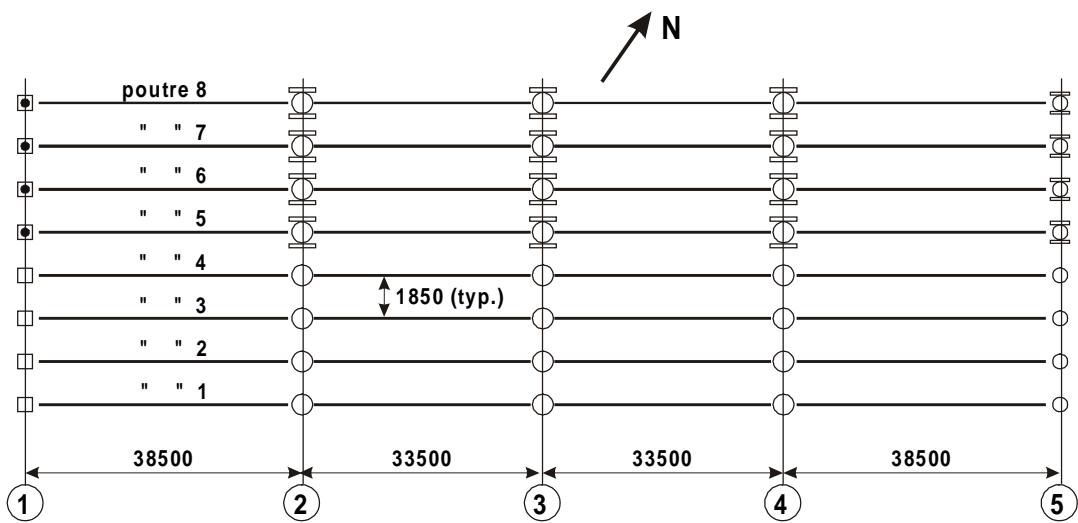
Selon cette configuration, les charges horizontales s'exerçant dans la direction transversale (nord-sud) sont reprises par les appareils d'appui des poutres 5 à 11 sur toutes les unités de fondation. Les charges horizontales qui agissent dans la direction longitudinale (ouest-est) sont reprises par les appareils d'appui des poutres 5 à 11 de la culée 1.



**DIRECTION LONGITUDINALE**  
(dalle, entretoises et pentes non montrées, échelle verticale exagérée)



**DIRECTION TRANSVERSALE (PHASES I ET II)**



- appui élastomère (GOODCO série ER)
- appui élastomère (GOODCO série ER) avec tige de fixation
- appui à élastomère confiné multi-directionnel (GOODCO série PM)
- ⊗ appui à élastomère confiné unidirectionnel (GOODCO série PMG)

**VUE EN PLAN DU SYSTÈME D'APPUIS (PHASE I)**

**Figure 2.5** Types d'appareils d'appui

Les différents types d'appareils qui ont été utilisés dans la phase I sont montrés au bas de la figure 2.5. À la culée 1, on a retenu un coussin en élastomère. Pour les poutres 5 à 8, une tige d'ancrage verticale en acier a été ajoutée pour assurer le transfert des charges horizontales dans les deux directions. Aux piles 2 à 4 et à la culée 5, des appuis à élastomère confiné ont été choisis. Ces appareils étaient munis d'un mécanisme de glissement pour permettre le mouvement horizontal. Pour les poutres 5 à 8, les appareils comportaient des guides longitudinaux pour empêcher les mouvements horizontaux dans la direction transversale.

### **2.2.2.1 Coussin en élastomère**

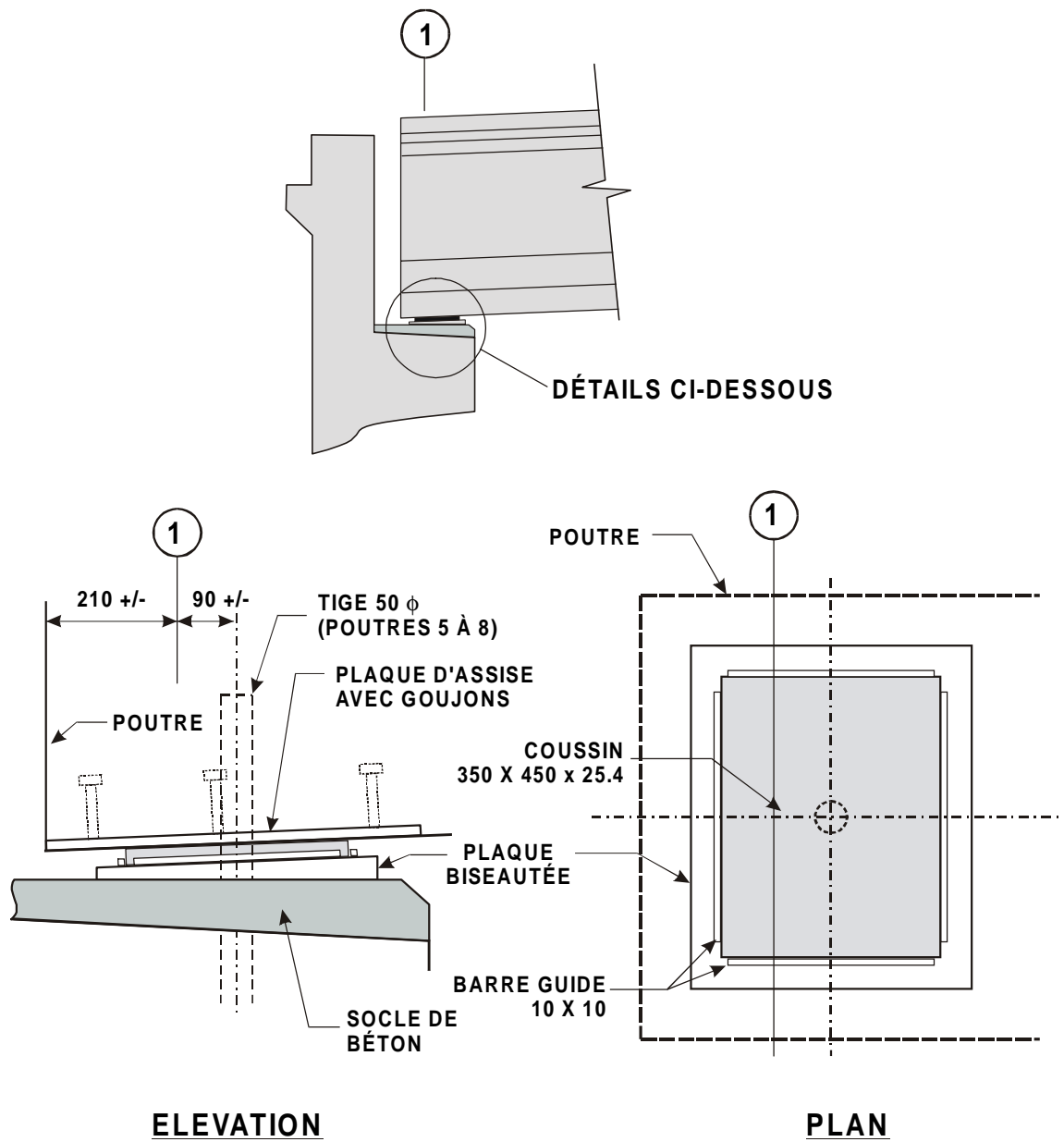
La figure 2.6 illustre l'appareil d'appui utilisé à la culée 1. Il s'agit d'un coussin en élastomère renforcé de fibres synthétiques de 25 mm d'épaisseur. Une plaque d'acier biseautée (plaque d'épaisseur variable) est ajoutée pour compenser la pente des poutres. Des barres guide sont soudées sur la plaque biseautée en périphérie du coussin.

Pour les poutres 5 à 8 (phase I), on remarque la tige d'acier de 50 mm de diamètre qui est ajoutée pour reprendre les charges horizontales. Une niche de 54 mm de diamètre x 300 mm de hauteur est aménagée dans les poutres pour insérer la tige.

Le mouvement transversal des poutres 1 à 4 pouvait se produire par déformation en cisaillement du coussin en élastomère. Pour ce coussin, le manufacturier permet une déformation de 19 mm, ce qui excède les mouvements anticipés spécifiés aux plans (+10 mm, -5 mm).

Toutes les poutres sont munies à leurs extrémités d'une plaque d'assise en acier qui est incorporée dans le béton au moment de la fabrication. Cette plaque est ancrée au béton des poutres par l'intermédiaire de goujons. Les poutres reposaient donc sur les coussins en élastomère via la plaque d'assise.

La figure 2.6 illustre l'appareil et la poutre tels qu'ils ont été installés au chantier. Le coussin en élastomère a été placé sur la plaque biseautée alors que l'on spécifiait l'inverse aux plans. Également, les appareils avec tige ont été déplacés d'environ 90 mm vers l'est, principalement parce que les poutres de la travée 1 étaient plus courtes que prévues.



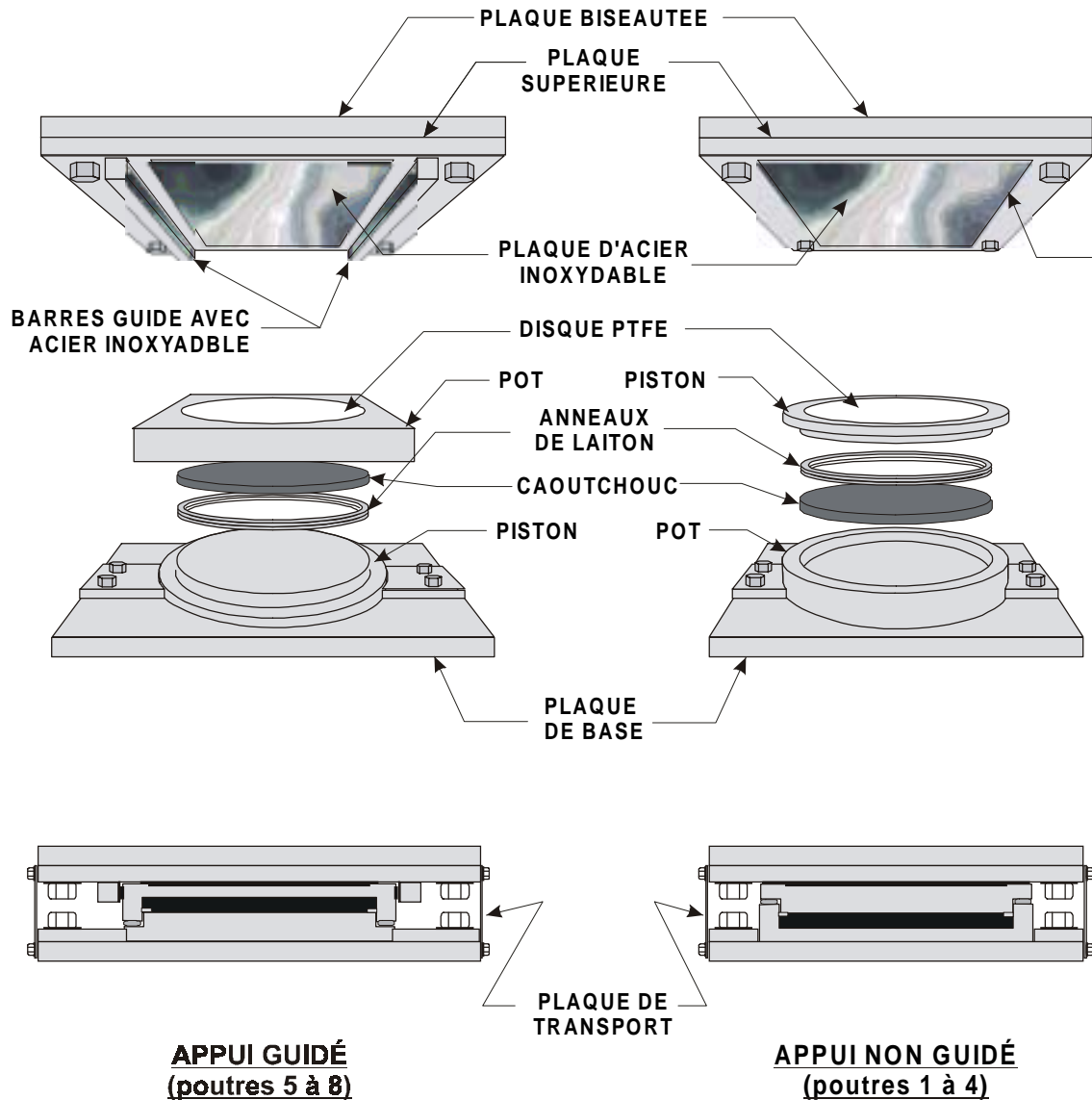
**Figure 2.6** Détail de l'appareil d'un appareil d'appui avec tige à la culée 1  
(position des poutres 5 à 8 telles qu'installées)

### 2.2.2.2 Appuis à élastomère confiné

Les deux modèles d'appareil à élastomère confiné utilisés dans le projet sont illustrés à la figure 2.7. L'appareil non guidé (schéma de droite sur la figure) comprend un pot circulaire en acier dans lequel on place un coussin de caoutchouc naturel sur lequel on vient déposer un piston en acier. Le caoutchouc est confiné dans le pot et trois anneaux de laiton sont utilisés pour sceller le piston. Ces anneaux empêchent le caoutchouc de fuir en périphérie sous l'effet de la pression. Un scellant en caoutchouc mousse compressible est aussi placé sur le dessus de la paroi du pot pour prévenir la contamination du piston. Le pot est fixé sur une plaque de base en acier, laquelle est déposée sur les socles de béton de la structure.

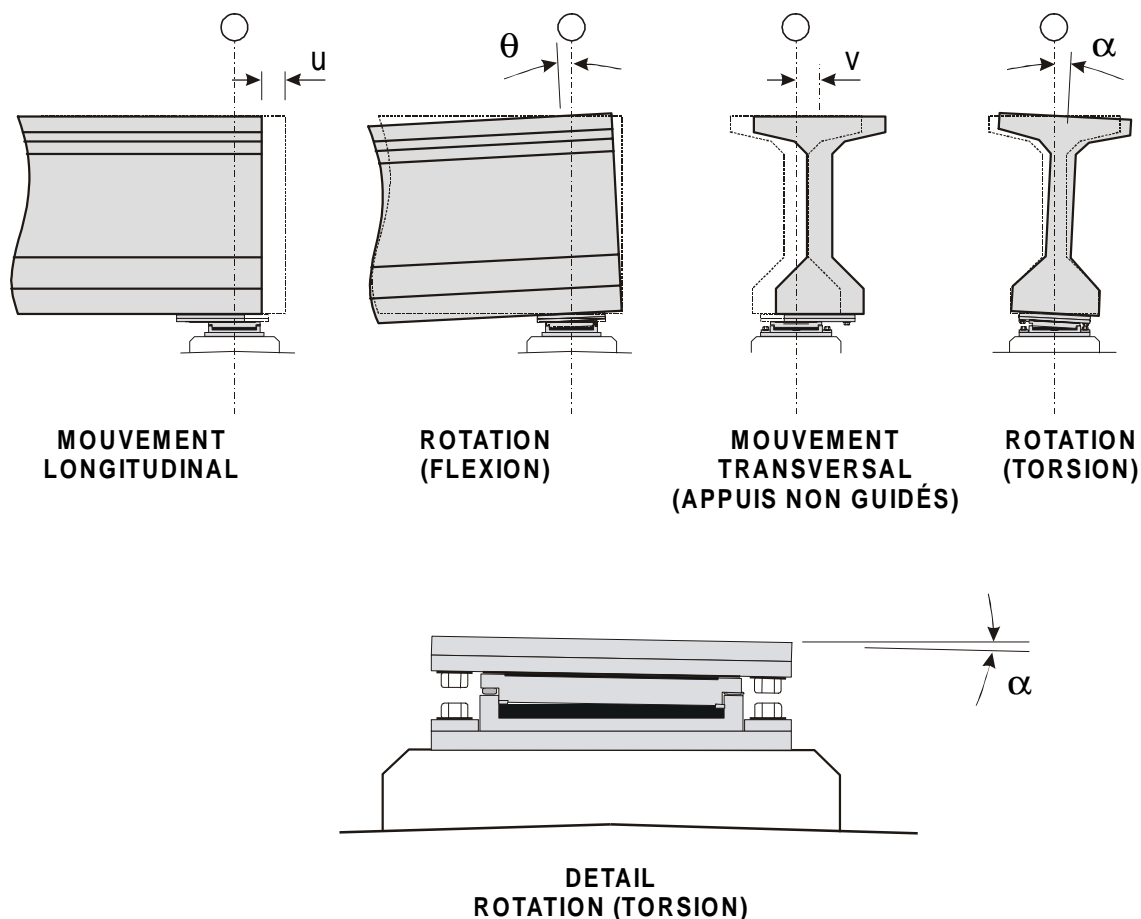
Sous une charge verticale, le caoutchouc confiné se comporte comme un liquide, c'est-à-dire qu'il ne change pas de volume, ou très peu, et qu'il permet la rotation (inclinaison) du piston dans toutes les directions, tel que montré à la figure 2.8. Dans les appareils fournis dans le projet, le disque de caoutchouc était lubrifié avec une graisse pour minimiser la friction entre le caoutchouc et le pot et ainsi faciliter davantage la rotation du piston.

Pour permettre le mouvement horizontal, on place sur le dessus du piston un disque fait d'un polymère de tétrafluoréthylène (PTFE) et on ajoute une plaque supérieure sous laquelle on a soudé une mince plaque d'acier inoxydable poli. Dans les appareils fournis pour le projet, on a employé un PTFE vierge (non renforcé), le disque était lubrifié avec un produit à base de silicone et on a utilisé de l'acier inoxydable ayant un fini de catégorie *miroir*. Toutes ces caractéristiques permettaient d'obtenir un coefficient de friction très bas.



**Figure 2.7** Appuis à élastomère confiné (vue de l'ouest sur le pont)

L'appui unidirectionnel (ou appui guidé, montré à gauche sur la figure 2.7) a été employé pour les poutres 5 à 8 de la phase 1. Pour cet appui, l'ensemble pot caoutchouc piston est inversé par rapport à celui de l'appui non guidé : le piston est maintenant fixé à la plaque de base, le pot est placé à l'envers sur le caoutchouc et le disque de PTFE est placé sur la face supérieure du pot. Le principe de l'appareil est cependant le même que dans l'appui non-guidé, c'est-à-dire qu'il permet la rotation dans toutes les directions de la poutre qu'il supporte et le mouvement horizontal de la plaque supérieure. Des barres guide sont toutefois ajoutées pour empêcher le mouvement dans la direction transversale du pont. L'interface entre les barres guide et les bords du pot est aussi une combinaison PTFE et acier inoxydable pour minimiser la friction au mouvement longitudinal.



**Figure 2.8** Mouvements des poutres permis par les appareils d'appui à élastomère confiné

Des appareils identiques ont été utilisés aux piles 2 à 4 alors que des appareils de plus petites dimensions ont été choisies pour la culée 5. Les principales caractéristiques des appuis sont données au tableau 2.2. Les identifications PM (Pot Mobile) et PMG (Pot Mobile Guidé) s'appliquent respectivement aux appuis non guidés et guidés.

Tous les appareils ont été entièrement assemblés en usine et les parties inférieure et supérieure de chaque appareil étaient maintenues en position par deux plaques verticales que l'on désigne plaques de transport. Ces deux plaques étaient placées sur les côtés de l'appareil qui sont parallèles à la longueur du pont (figure 2.7). Elles avaient une épaisseur de 3 mm et étaient fixées à la plaque de base et à la plaque supérieure au moyen de 2 boulons de 9.5 mm de diamètre (deux boulons en haut et deux boulons en bas). Ces plaques doivent être enlevées lorsque l'installation des poutres sur les appareils est complétée.

**Tableau 2.2** Caractéristiques des appuis à élastomère confiné

Paramètre	Piles 2, 3 et 4 Modèles PM300 et PMG300	Culée 5 Modèles PM150 et PMG150
Critères de calcul (selon les plans de conception)		
Charge verticale totale en service (kN)	1815	975
Charge transversale en service (kN) <sup>(1)</sup>	250	150
Mouvement longitudinal (mm)	+20, -90	+25,-125
Mouvement transversal (mm) <sup>(2)</sup>	+10, -5	+10, -5
Rotation (rad.)	0.02	0.02
Dimensions (selon les plans d'atelier)		
Diamètre intérieur du pot (mm)	360	255
Diamètre du PTFE (mm)	340	230
Épaisseur de l'élastomère (mm)	25	20

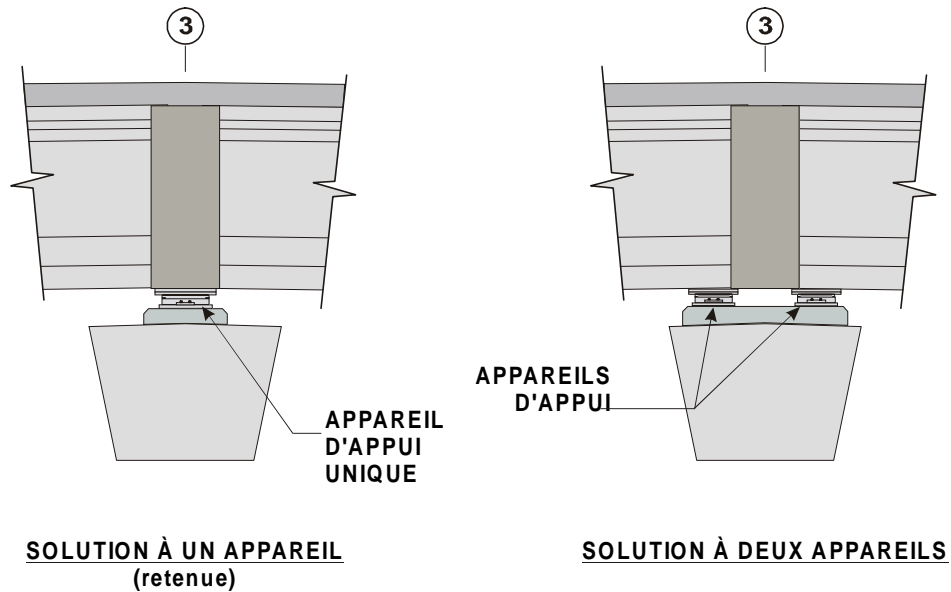
<sup>(1)</sup> Appuis guidés seulement (poutres 5 à 8)

<sup>(2)</sup> Appuis non guidés seulement (poutres 1 à 4)

### **Piles 2 à 4**

Aux piles 2 à 4, le concepteur a retenu une solution avec un seul appareil d'appui pour asseoir les deux poutres présentes. Cette façon de faire est valable mais diffère de la pratique utilisée au Québec qui consiste à utiliser un appareil pour chacune des deux poutres, tel que montré à la figure 2.9.

Le détail proposé prévoit un espace de 300 mm entre les deux poutres et que des aciers d'armature en U excèdent l'extrémité des poutres au niveau de la semelle inférieure. Lors de la coulée de l'entretoise, qui fait 600 mm de largeur au-dessus des piles, cet espace est rempli de béton et la continuité entre les deux poutres à la semelle inférieure est alors assurée par les barres qui sont noyées dans le béton.

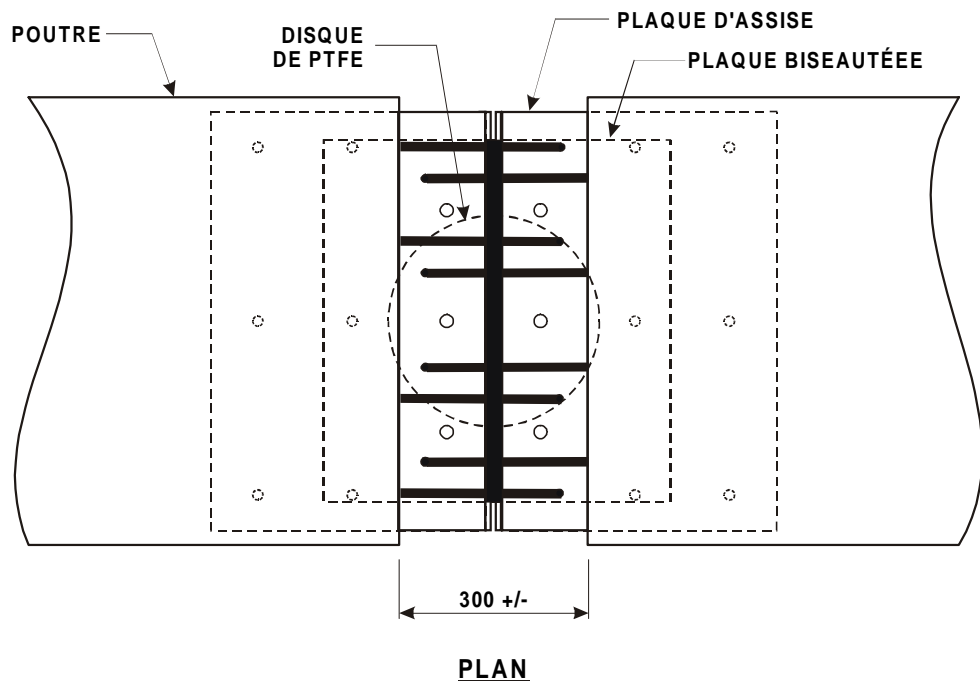
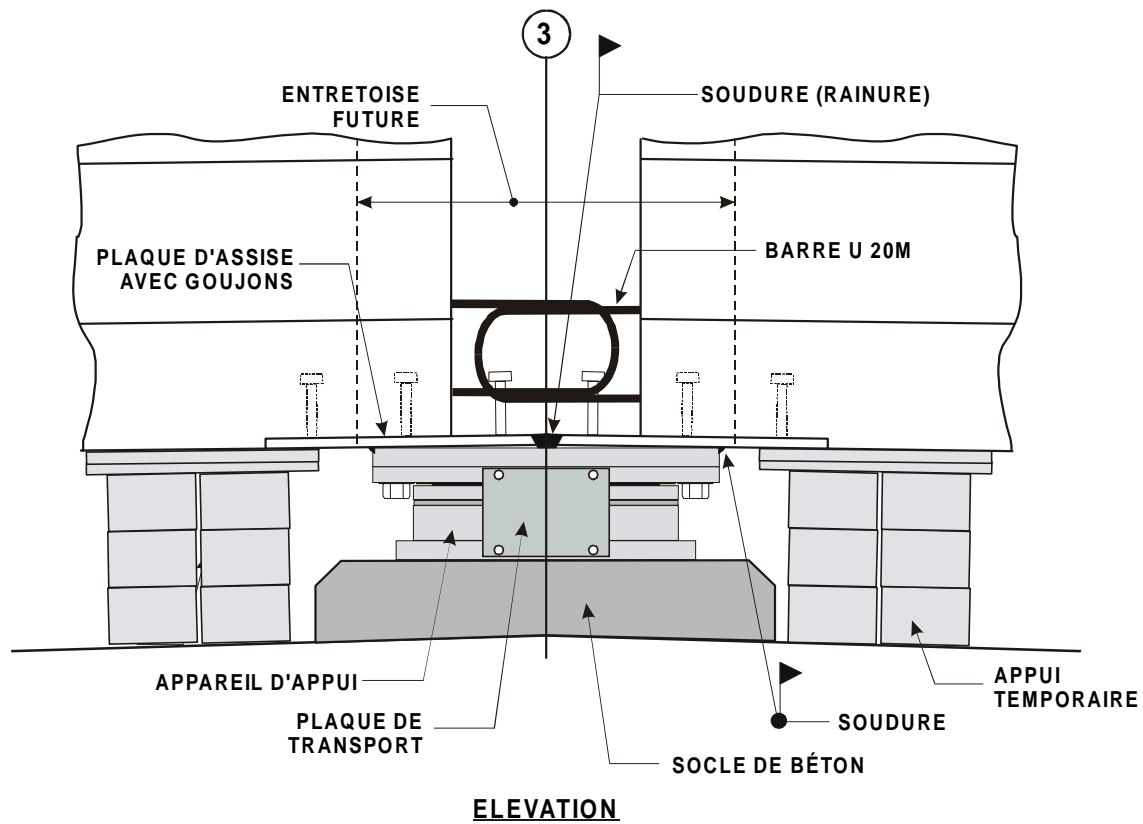


**Figure 2.9** Concept d'appui pour les piles 2 à 4 (pile 3 montrée)

Les plaques d'assise des poutres excèdent l'extrémité des poutres de façon à pouvoir les joindre bout à bout par le biais d'une soudure à rainure (soudure en V). Les plaques d'assise devaient aussi être soudées à la plaque supérieure de l'appareil d'appui sur tout le périmètre de cette dernière.

On notera qu'à la pile 3, la plaque biseautée est en fait d'épaisseur constante puisque la pile se trouve au point sommet de la courbe verticale du pont. La figure 2.11 montre le même détail à la pile 4 où, cette fois la plaque biseautée est d'épaisseur variable. Sur cette photo, la soudure des plaques n'est pas effectuée et on voit la taille inclinée du bout des plaques d'assise pour permettre la soudure en V.

Les poutres sont mises en place une à la fois. Afin d'éviter de soumettre l'appareil d'appui à une charge excentrique lors de l'installation des poutres, ce qui pourrait causer une rotation excessive de la partie supérieure de l'appareil, on doit utiliser des appuis temporaires sous les poutres. Dans le cas du pont du boulevard du Souvenir, on a utilisé des pièces de bois, tel que montré à la figure 2.10.



**Figure 2.10** Détail des appuis aux piles 2 à 4  
(poutres 1 à 4 à la pile 3 montrées)



**Figure 2.11** Vue vers le sud de l'appui des poutres 8 à la pile 4  
(Photo 330.1.21<sup>1</sup>)

On remarque enfin sur les figures 2.10 et 2.11 les plaques de transport utilisées pour les appareils. Aux piles 2 et 3, les trous pour les boulons de fixation des plaques de transport étaient circulaires (voir aussi figure 2.19). À la pile 4, comme à la culée 5, on a utilisé des trous ovalisés pour la fixation des plaques de transport à la plaque supérieure (figures 2.11 et 2.12), dans le but de permettre un ajustement final au chantier de la position longitudinale de la plaque supérieure à ces deux appuis.

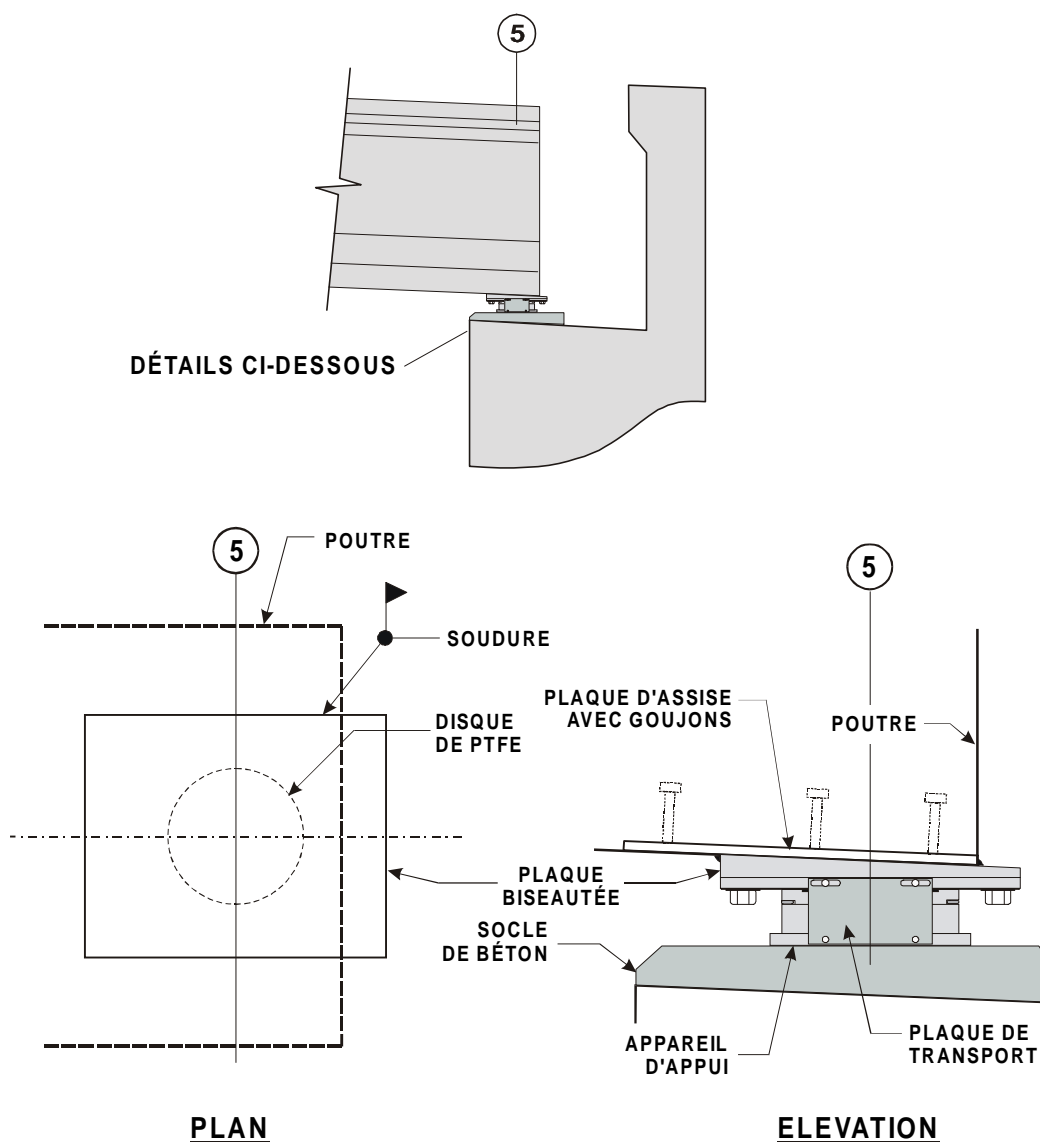
---

<sup>1</sup> La numérotation des photos dans le rapport est celle établie par la Police de Laval.

## Culée 5

À la culée 5, les poutres sont déposées sur la plaque biseautée de l'appareil d'appui, sans recours à un appui temporaire, tel qu'illustré à la figure 2.12. La plaque d'assise devait être soudée sur tout le périmètre de la plaque biseautée.

La figure montre la position approximative d'une poutre sur l'appui telle qu'observée au chantier. Les poutres de la travée 4 étaient plus courtes que prévu et l'écart a été entièrement repris à la culée 5 en modifiant la distance entre le centre de l'axe 5 et le bout de la poutre (les appareils d'appui n'ont pas été déplacés).



**Figure 2.12** Appareil d'appui à la culée 5  
(Position des poutres telles qu'installées)

## 2.3 Construction du pont

Les travaux de la phase I ont débuté en octobre 1999. Durant l'automne et l'hiver, on a réalisé les travaux d'excavation et procédé à la construction des culées et des piles. Les appareils d'appui ont été mis en place au début du mois d'avril 2000 et l'installation des poutres s'est faite du 3 mai au 5 juin 2000. Les travaux de coffrage des entretoises et de la dalle ont débuté au début du mois de mai et étaient en voie d'être achevés au moment de l'accident. Les phases d'installation des poutres et du coffrage des éléments du tablier sont décrites dans les deux prochaines sous-sections.

### 2.3.1 Fabrication et installation des poutres

#### 2.3.1.1 Calendrier des travaux

Le tableau 2.3 présente les principales étapes de la fabrication et de l'installation des poutres. Les poutres ont été fabriquées en usine puis transportées au chantier par camion. Elles ont été déposées à l'aide de grues sur les appareils d'appui aux culées 1 et 5 et sur les appuis temporaires aux piles 2 à 4. Deux difficultés sont survenues lors de la pose des poutres :

- Les poutres des travées 1 et 4 étaient trop courtes d'environ 90 mm par rapport à la longueur requise. Pour la travée 1, on ne réalise le problème qu'au moment de l'installation des poutres. À la culée 1, on a positionné l'extrémité des poutres à l'endroit prévu, en raison de la restriction imposée par les tiges d'ancrage verticales qui devaient s'insérer dans les poutres, et on constate que la position de l'extrémité à la pile 2 ne coïncide pas avec la position prévue. Dans les jours qui suivent, on soulève les poutres et on déplace les appareils d'appui de la culée 1 vers la pile 2 et on replace les poutres de façon à ce que leurs extrémités soient bien placées à la pile 2. Pour la travée 4, l'erreur est absorbée à la culée 5, tel que décrit précédemment. La figure 2.13 illustre la pose de la première poutre (no. 8) de la travée 1 et le mauvais alignement de son extrémité sur l'appareil à la pile 2.
- Les huit socles de la pile 3 étaient localisés environ 250 mm au sud de la position prévue. On se rend compte de l'erreur une fois que toutes les poutres de la phase I sont posées. Pour corriger le problème, on soulève l'extrémité des 16 poutres appuyées à la pile 3, on allonge les socles d'environ 250 mm vers le nord, on déplace les appareils d'appui et on dépose les poutres sur les appareils d'appui qui sont maintenant en bonne position. Pendant la levée des poutres, on utilise des profilés tubulaires carrés en acier pour supporter temporairement les poutres et les glisser vers leur position finale. La figure 2.14 illustre le rallongement des socles et le déplacement des appareils d'appui à la pile 3.

**Tableau 2.3** Calendrier de fabrication et d'installation des poutres de la phase I

Date	Activité
1 novembre au 29 novembre 1999	Fabrication des poutres des travées 1 et 4
9 février au 2 mars 1999	Fabrication des poutres des travées 2 et 3
30 mars au 7 avril 2000	Installation des appareils d'appui sur les socles
Nuit du 3 au 4 mai 2000	Installation des huit poutres de la travée 1
Nuit du 4 au 5 mai 2000	L'extrémité des poutres 5 à 8 à la culée 1 est déplacée à côté de l'appareil d'appui Installation des huit poutres de la travée 2
5 mai 2000	Déplacement vers la pile 2 de quatre appareils d'appui de la culée 1 (poutres 5 à 8)
Nuit du 5 au 6 mai 2000	Déplacement des poutres 5 à 8 de la travée 1 Installation des huit poutres de la travée 3
6 mai 2000	Installation des huit poutres de la travée 4
26 mai 2000	Soulèvement des poutres 6 à 8 à la pile 3 Début des modifications aux socles de la pile 3
29 mai 2000	Soulèvement des poutres 1 à 5 à la pile 3
30 mai 2000	Enlèvement des appuis temporaires aux piles 2 à 4
2 juin 2000	Déplacement des appareils d'appui à la pile 3
5 juin 2000	Mise en place finale de l'extrémité des 16 poutres des travées 2 et 3 à la pile 3 Enlèvement des appuis temporaires à la pile 3
13 juin au 16 juin 2000	Soudure des plaques d'assise des poutres aux appareils d'appui de la pile 2
17 juin 2000	Soudure des plaques d'assise des poutres aux appareils d'appui de la pile 3



**Figure 2.13** Installation de la poutre no.8 de la travée 1 (Photo CSST.4)



**Figure 2.14** Allongement des socles de béton et déplacement des appareils d'appui à la pile 3 (Photo DES.151)

### **2.3.1.2 Conditions d'appui des poutres**

La figure 2.15 illustre les conditions d'appui des poutres qui ont prévalu à partir de leur installation jusqu'au 18 juin. On remarque qu'à partir du 30 mai, il n'y a plus d'appuis temporaires aux piles 2 et 4 et qu'à partir du 5 juin, les appuis temporaires à la pile 3 sont enlevés à leur tour.

### **2.3.1.3 Retenue latérale des poutres**

Lors de leur installation, les poutres ont été reliées entre elles, dans la direction transversale, par des tirants en acier. Ces tirants étaient localisés aux extrémités des poutres, au niveau de leur semelle supérieure, et étaient faits d'une tige métallique à filetage sans fin de 13 mm de diamètre nominal. Ce type de tige, que l'on désigne couramment «tige lagstud» ou «tige LAGCT», est fréquemment utilisé dans la fabrication de coffrages pour les structures en béton. Ces tiges étaient insérées dans les connecteurs de cisaillement situés en bordure de la semelle supérieure des poutres et elles étaient bloquées à chaque bout au moyen d'une plaque d'acier et d'un écrou.

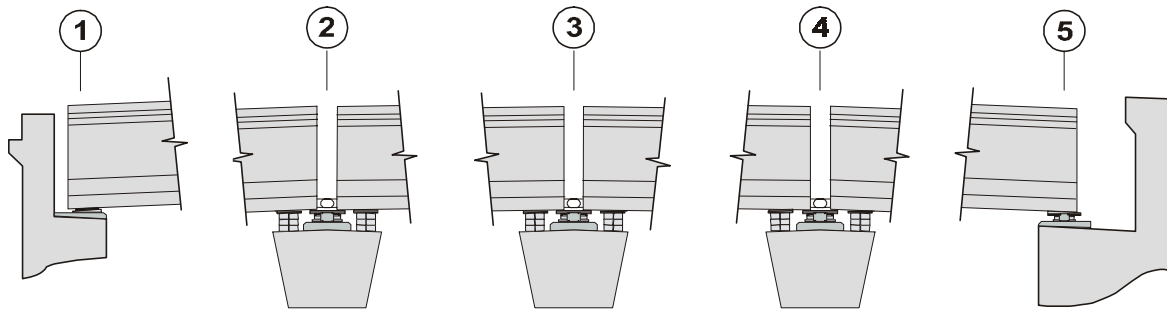
Tel qu'illustré à la figure 2.16, les tiges devaient être préalablement courbées à leurs extrémités pour réaliser cet assemblage. À proximité de chaque tige, on plaçait une pièce de bois de 89 mm x 89 mm de section pour bloquer les poutres entre elles.

### **2.3.1.4 Soudure des plaques d'assise des poutres aux appareils d'appui**

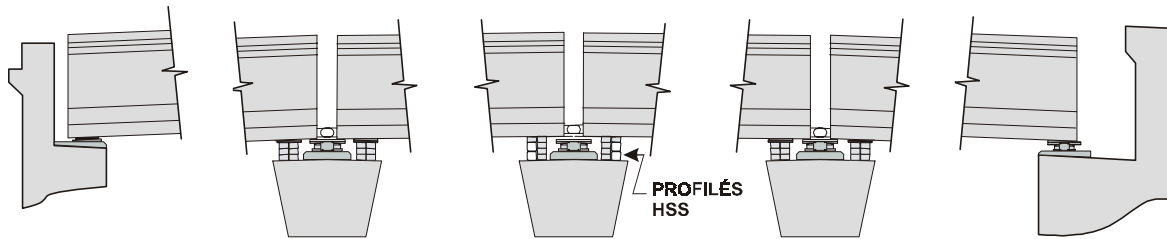
Les travaux de soudage des plaques d'assise des poutres à la plaque biseautée des appareils d'appui à élastomère confiné ont débuté le 13 juin 2000 et n'étaient pas complétés au moment de l'accident. Les soudures étaient terminées à la pile 2 et étaient en cours à la pile 3 (figure 2.18). Aucune soudure n'avait été réalisée à la pile 4 et à la culée 5. Les soudeurs ont quitté le chantier le samedi 17 juin, vers 15h.

Au moment de réaliser les soudures, les boulons de toutes les plaques de transport avaient été enlevés à la pile 3 et, probablement, à la pile 2. Les appuis temporaires avaient été enlevés aux piles 2 à 4.

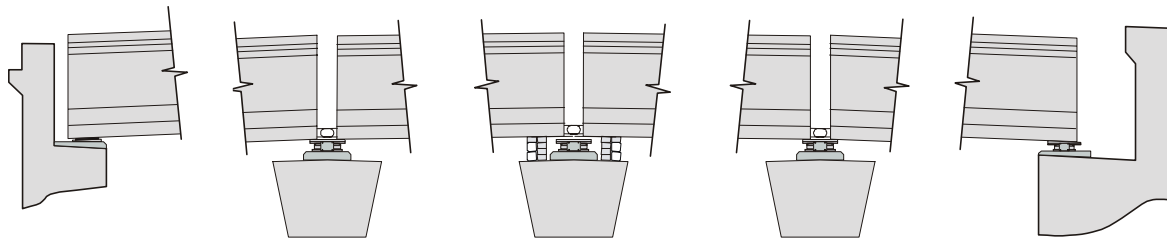
La figure 2.19 illustre la soudure à un des appuis à la pile 3. On remarque la soudure à rainure au centre et on note que les boulons entre la plaque de transport et la plaque supérieure sont enlevés avant le soudage.



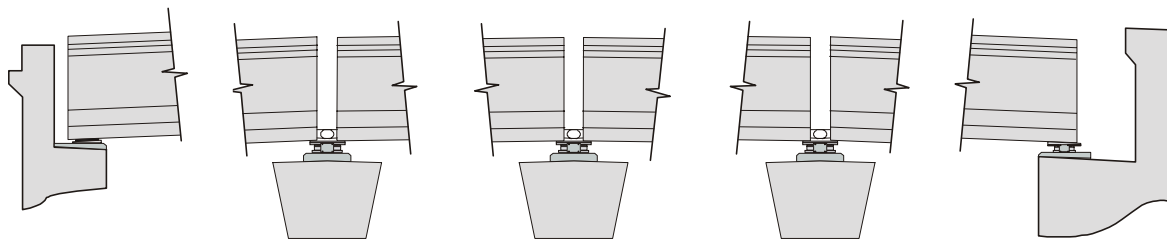
**DE LA POSE DES POUTRES AU 26 MAI**



**26 MAI - 30 MAI**

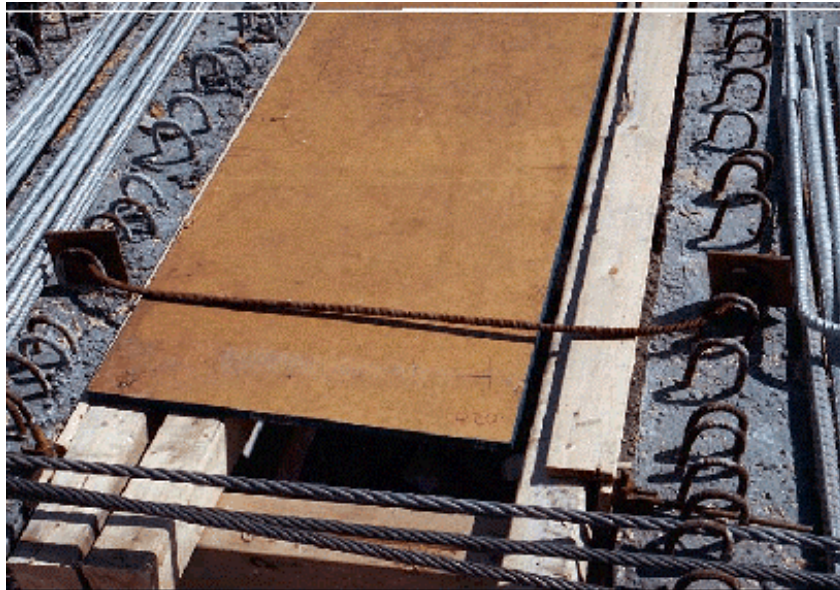


**30 MAI - 5 JUIN**

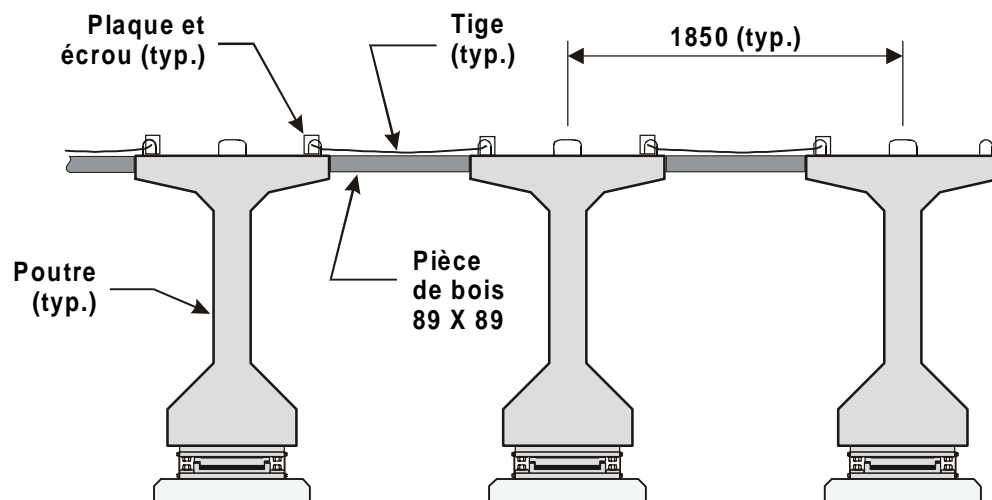


**5 JUIN - 18 JUIN**

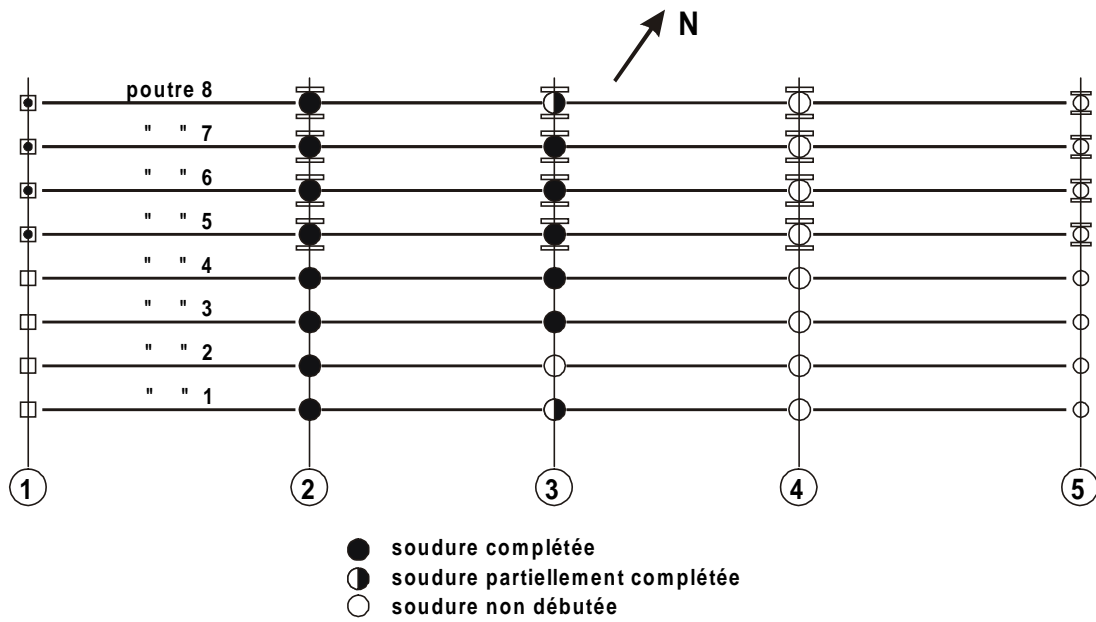
**Figure 2.15** Évolution des conditions d'appui des poutres de leur installation jusqu'au 18 juin



**Figure 2.16** Tige entre les poutres du pont  
(photo 330.8.15, prise après le 18 juin, une fois que les poutres en place ont été stabilisées avec des câbles d'acier)



**Figure 2.17** Schéma montrant les tirants et les pièces de blocage en bois posés aux deux extrémités des poutres



**Figure 2.18** Avancement des travaux de soudure des appareils d'appui aux piles 2 à 4 et à la culée 5



**Figure 2.19** Soudure des plaques d'assise des poutres à un appui à la pile 3 (Photo DES.212)

## **2.3.2 Travaux de coffrage des entretoises et de la dalle**

Les travaux de coffrage ont débuté dès la mise en place des poutres. Ces travaux comprenaient :

- la mise en place des planchers de sécurité au-dessus des voies de l'autoroute;
- le coffrage des entretoises intermédiaires et des entretoises aux appuis;
- le coffrage de la dalle entre les poutres et des sections de dalle en porte-à-faux le long des côtés sud et nord du pont.

### **2.3.2.1 Plancher de sécurité et entretoises**

Les figures 2.20 et 2.21 illustrent la construction des planchers de sécurité et des coffrages des entretoises intermédiaires à la travée 3. La même construction a été utilisée à la travée 2. On remarque que le plancher (feuilles de contreplaqué supportées sur des pièces de 89 mm x 89 mm) repose sur le dessus incliné de la semelle inférieure des poutres.

Les parois verticales du coffrage des entretoises intermédiaires sont faites de planches individuelles de 19 mm d'épaisseur. Ces planches sont fixées à des pièces de bois verticales individuelles de 38 mm x 89 mm, lesquelles sont maintenues par deux membrures horizontales faites d'une pièce de 38 mm x 89 mm et d'une pièce de 89 mm x 89 mm. L'espacement entre les deux parois verticales est maintenu à l'aide de tiges d'acier reliant les deux membrures horizontales. Le fond du coffrage est fait en renforçant localement le plancher de sécurité.

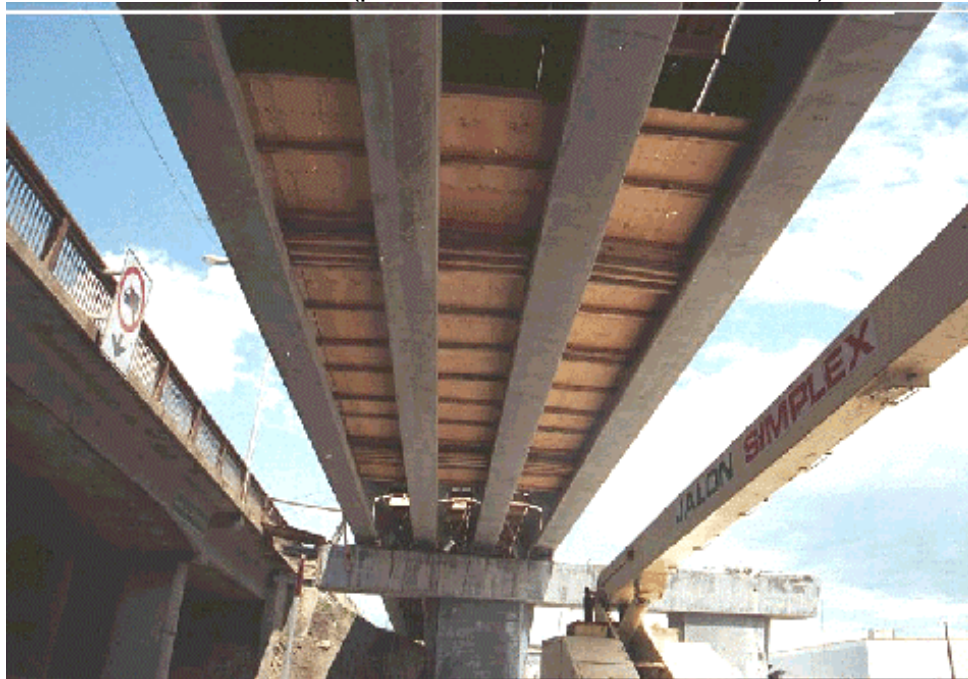
La figure 2.22 montre les coffrages utilisés pour la construction des entretoises intermédiaires dans les travées 1 et 4. La construction est similaire à celle des travées 2 et 3 sauf le fond des coffrages qui est fait de façon indépendante.

Dans les quatre travées, les coffrages des entretoises intermédiaires reposent sur le dessus incliné de la semelle inférieure des poutres. Il n'y avait pas de fixation mécanique (boulons d'ancrages) entre ces coffrages et les poutres de béton.

La paroi verticale des coffrages des entretoises aux culées qui est placée entre les poutres est construite de la même manière, tel qu'illustré sur la figure 2.23.



**Figure 2.20** Plancher de travail et coffrage des entretoises intermédiaires à la travée 3 (photo DES.216, vue vers l'ouest)



**Figure 2.21** Plancher de sécurité et fond du coffrage des entretoises intermédiaires sur la travée 3 (photo 280.2.23, prise après l'accident)



**Figure 2.22** Coffrage de la dalle et des entretoises intermédiaires de la travée 4 (Photo 280.2.22, prise après l'accident)



**Figure 2.23** Coffrage de l'entretoise à la culée 1 (photo 330.1.04, prise après l'accident)

### 2.3.2.2 Coffrage de la dalle

Le coffrage des parties de la dalle situées entre les poutres est principalement fait de feuilles de contreplaqué supportées par trois pièces de bois 89 mm x 89 mm qui sont parallèles aux poutres. Les pièces de 89 mm x 89 mm sont appuyées sur des poutrelles régulièrement espacées le long des poutres (figures 2.24 et 2.25).

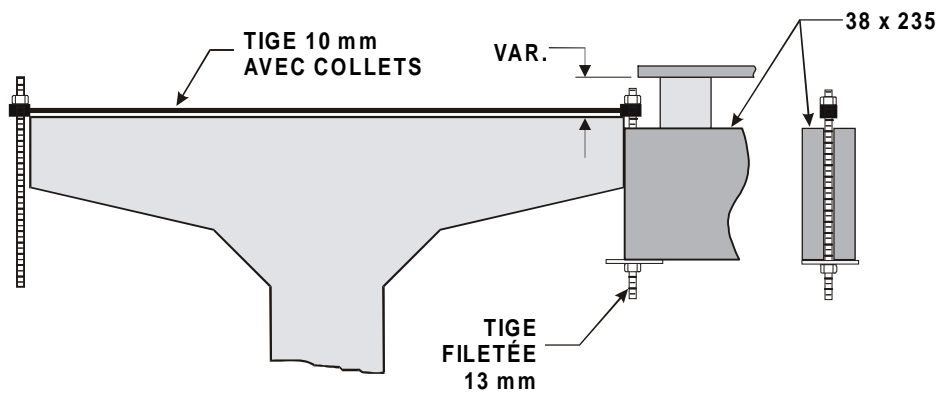


**Figure 2.24** Construction du coffrage du tablier entre les poutres sur la travée 4 (photo DES.159)



**Figure 2.25** Coffrage de la dalle entre les poutres  
(photo 280.8.20, prise après l'accident)

Le schéma de la figure 2.26 illustre la construction des poutrelles. Elles sont faites de 2 pièces parallèles 38 mm x 235 mm assemblées par l'intermédiaire de petites pièces de contreplaqué. Les poutrelles sont supportées verticalement à chaque bout par une tige métallique à filetage sans fin de 13 mm de diamètre nominal, ce qui permet d'ajuster le niveau du coffrage par rapport à celui du dessus des poutres. Les tiges filetées sont insérées dans un collet soudé aux bouts de tiges de 10 mm de diamètre qui sont déposées sur la semelle supérieure des poutres (figure 2.27).



**Figure 2.26** Fixation des poutrelles aux poutres



**Figure 2.27** Coffrage de la dalle terminé dans la partie ouest (photo DES.186)

La figure 2.28 montre la construction du coffrage de la partie de la dalle en porte-à-faux du côté sud du pont. Ce coffrage comprenait des feuilles de contreplaqué déposées sur des membrures longitudinales 89 mm x 89 mm, elles-mêmes étant supportées par des équerres en acier fixées sur le côté des poutres. Le même type de construction a été utilisé du côté nord.



**Figure 2.28** Coffrage du porte-à-faux du côté sud, sur la travée 1  
(photo DES.204)

### 2.3.2.3 État d'avancement des travaux

Au 18 juin, l'état d'avancement des travaux de coffrage du tablier peut se résumer comme suit :

- le plancher de travail au-dessus des voies de l'autoroute 15 est terminé;
- le coffrage des entretoises intermédiaires est terminé;
- le coffrage des entretoises aux culées 1 et 5 est en construction;
- le coffrage des entretoises aux piles 2 à 4 n'est pas commencé (prévu après le soudage des plaques d'assise des poutres);
- le coffrage de la dalle entre les poutres est terminé;
- le coffrage de la dalle en porte-à-faux du côté sud est terminé sur la travée 1 (surface horizontale seulement);
- le coffrage de la dalle en porte-à-faux du côté nord est en cours, il est complété sur environ 15% de la travée 1 à partir de la culée 1 (surface horizontale seulement) , les équerres métalliques sont placées sur le reste de la travée 1 et à proximité de la pile 3.

Les ouvriers travaillant à la préparation des coffrages ont quitté le chantier vers midi le samedi 17 juin.

### 3.0 DESCRIPTION DE L'EFFONDREMENT DES POUTRES

#### 3.1 Vue d'ensemble

Les figures 3.1 et 3.2 montrent des vues d'ensemble du pont peu de temps après l'effondrement. On note que les poutres 1 à 4 des travées 2 et 3 sont tombées au sol, que les poutres 1 à 4 des travées 1 et 4 se sont déplacées vers le sud mais reposent toujours sur les piles et les culées et, finalement, que les poutres 5 à 8 sont demeurées en place.

Les figures 3.3 à 3.6 et 3.14 montrent que les poutres des travées 1 et 4 se sont déplacées vers le sud sur les appareils d'appui mais qu'elles ont été freinées par le mur de garde aux culées 1 et 5. Les figures 3.7 et 3.8 montrent que la poutre 1 des travées 2 et 3 est tombée au sud des piles qui la supportaient. La semelle inférieure des poutres 1 tombées au sol se retrouve du côté sud. Les figures 3.9 et 3.10 montrent que les poutres 2 à 4 des mêmes travées sont tombées entre les piles et leur semelle inférieure est située du côté nord. On remarque de plus que la poutre 1 est située sous la poutre 2 dans les deux travées.



**Figure 3.1** Vue du pont vers l'ouest après l'effondrement (photo SQ-A16)



**Figure 3.2** Vues du côté sud du pont après l'effondrement  
(photos SQ-C12 et SQ-C13)



**Figure 3.3** Vue des poutres 1 à 4 de la travée 4 (Photo SQ-B11)



**Figure 3.4** Vue aérienne des poutres 1 à 4 à la pile 4 (photo 308.3.12)



**Figure 3.5** Vue des poutres 1 à 4 de la travée 1 à la pile 2 (Photo SQ-B12)



**Figure 3.6** Vue des poutres 1 à 4 de la travée 1 à la culée 1 (photo pom.26)



**Figure 3.7** Vue vers le nord vis-à-vis de la pile 3 des poutres 1 et 2 des travées 2 et 3 (photo SQ-B7)



**Figure 3.8** Vue vers l'ouest des poutres 1 et 2 des travées 2 et 3 (photo SQ-B6)



**Figure 3.9** Vue vers le sud des poutres 2 à 4 de la travée 2 tombées sur la voie sud de l'autoroute 15 (photo SQ-B31)



**Figure 3.10** Vue vers le sud des poutres 2 à 4 de la travée 3 tombées sur la voie nord de l'autoroute 15 (photo SQ-B37)

Pour des raisons de sécurité, on a provoqué l'effondrement des poutres 1 à 4 des travées 1 et 4 dans les heures qui ont suivi l'accident. Les murs de garde qui maintenaient ces poutres montraient des signes de faiblesse, particulièrement celui de la culée 5, ce qui a nécessité l'enlèvement des poutres. Cette opération a été effectuée en brisant l'extrémité des poutres à la culée 1 et le mur de garde à la culée 5. Les poutres 5 à 8 ont été enlevés quelques jours après l'accident.

### 3.2 Témoignages

Plusieurs automobilistes circulant sur les voies nord et sud de l'autoroute ont assisté à l'effondrement des poutres du pont.

Dans la voie nord, plusieurs ont vu des pièces de bois tomber avant les poutres. Un automobiliste, qui est passé juste avant que les poutres ne tombent, mentionne que sa voiture a frappé des madriers qui étaient déjà sur le sol (troisième voie) et qu'il a vu tomber une dizaine de feuilles de contreplaqué. Les pièces de bois que l'on voit sur la route au nord du pont sur la figure 3.11 pourraient avoir été heurtées par son véhicule. Un autre automobiliste raconte qu'une feuille de contreplaqué est tombée dans le pare-brise de son véhicule au moment où il passait sous le pont. Un troisième témoin dit que des pièces de bois sont aussi tombées sur son véhicule alors qu'il était sous le pont. Ce dernier a également vu les poutres tomber dans son rétroviseur.



**Figure 3.11** Vue vers le sud-ouest du pont après l'effondrement (photo SQ-C14)

Il semble aussi que l'effondrement se soit produit graduellement, de l'est vers l'ouest sur la longueur du pont. Un témoin conduisant un véhicule sur la voie nord mentionne en effet que les poutres sont tombées en commençant de l'est. Le passager du même véhicule raconte que les pièces de bois, puis les éléments de béton, sont tombées comme un jeu de dominos, de la droite vers la gauche (est vers ouest). Une personne qui marchait sur le pont existant en direction «est» croit voir entre les barricades et le garde-fou la chute des poutres se propager d'est en ouest. Une automobiliste qui circulait dans la voie sud a remarqué que la chute des feuilles de contreplaqué se faisait de la gauche vers la droite (est vers ouest). Ce dernier témoin mentionne avoir noté que les poutres basculaient sur le côté avant de tomber au sol.

Il ne semble y avoir eu aucun signe annonciateur sauf dans le cas de deux ouvriers qui ont ressenti des vibrations le samedi 17 juin. Un menuisier perçoit en effet des vibrations sur la poutre 1 dans la travée 1, comme si des autos passaient sur le pont. Un soudeur, assis sur le pilier central, a ressenti une vibration à deux reprises.

### **3.3 Description des dommages subis par la structure**

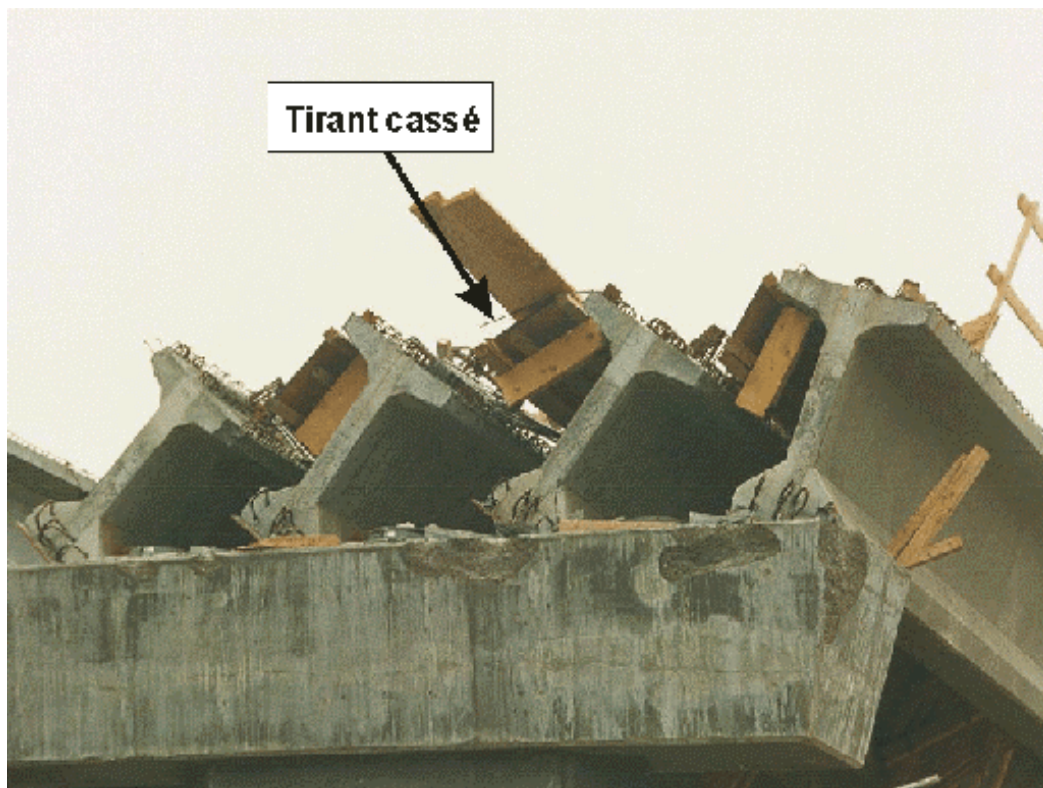
#### **3.3.1 Éléments du tablier**

En tombant, les poutres 1 à 4 des travées 2 et 3 se sont écrasées sur les glissières rigides en béton (figure 3.12). On note sur cette figure qu'au droit de la pile 4, les poutres de la travée 4 sont fortement inclinées et se sont déplacées vers le sud. La poutre 1 de cette travée est courbée, également vers le sud. Cette poutre 1 est retenue latéralement par le mur de garde de la culée 5 et les poutres 2 à 4 sont appuyées contre cette poutre, probablement via le coffrage des entretoises.

On peut penser que les poutres des travées 2 et 3 se sont déplacées de la même façon mais que leur chute n'a pu être freinée.



**Figure 3.12** Vue de la pile 3 vers la culée 5 (photo pom.88)



**Figure 3.13** Vue rapprochée du bout des poutres 1 à 4 de la travée 4 (photo SQ-B20)

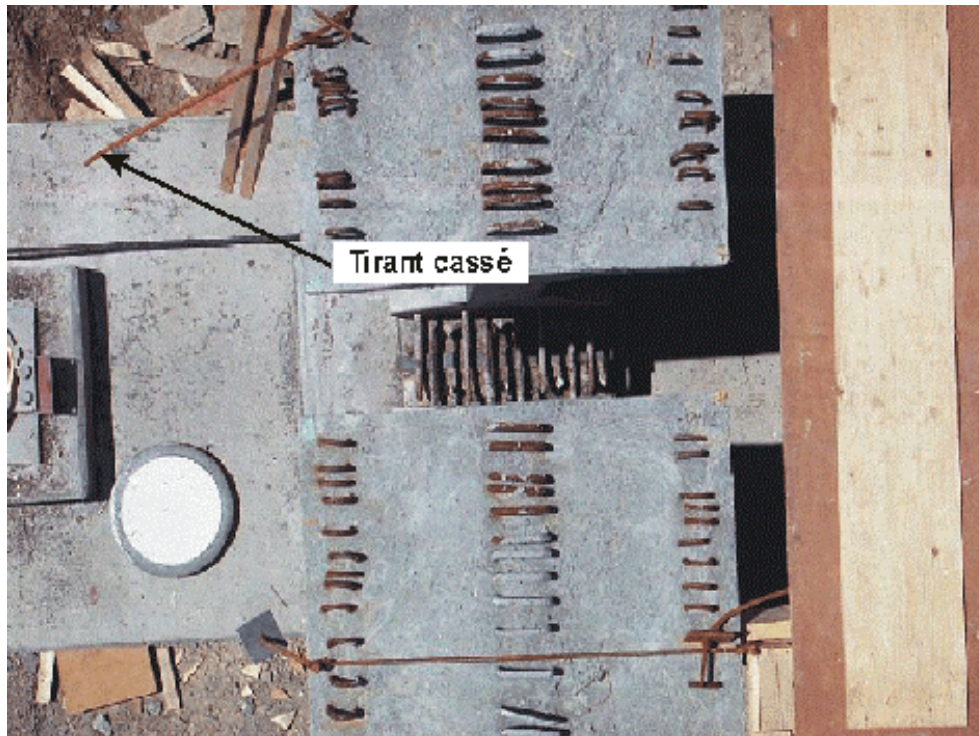


**Figure 3.14** Vue rapprochée du bout des poutres de la travée 1 à la pile 2  
(photo 308.2.20)

Sur la figure 3.13, on remarque que le tirant reliant les poutres 2 et 3 est cassé. On a aussi observé que des connecteurs de cisaillement où étaient attachés les tirants entre les poutres étaient fortement pliés. La figure 3.15 montre un tirant cassé entre les poutres 4 et 5 à la pile 3. Plusieurs tirants cassés ont été observés dans les débris des poutres 1 à 4 et le long du côté sud des poutres 5 des quatre travées.

Dans la partie supérieure de la figure 3.16, on voit à la semelle supérieure de la poutre 5 des supports métalliques utilisés pour le coffrage de la dalle. On remarque que les tiges verticales sont inclinées, due à la déformation des tiges horizontales et du jeu entre les tiges verticales et les collets.

Sur la figure 3.17, on note que les coffrages des entretoises intermédiaires entre les poutres 1 à 4 se sont déformées en cisaillement mais sont toujours en place entre les poutres. De par leur construction, ces coffrages se sont déformés comme un mécanisme sans pouvoir offrir de résistance significative au mouvement relatif des poutres.



**Figure 3.15** Vue en plan des poutres 5 à la pile 3 (photo 330.11)



**Figure 3.16** Flexion des tiges métalliques qui supportaient le coffrage de la dalle (photo 330.2.12)



**Figure 3.17** Déformation des coffrages des entretoises entre les poutres de la travée 4 (photo SQ.B22)

### 3.3.2 Appareils d'appui

La figure 3.18 montre la position relative des poutres, des plaques supérieures et pots des appareils d'appui à la pile 4. Les quatre plaques supérieures des appuis se sont déplacées latéralement vers le sud et se sont inclinées dans la même direction, pour finalement heurter le chevêtre. Les poutres, qui n'étaient pas soudées aux plaques supérieures, ont poursuivi le mouvement amorcé, en glissant le long des plaques supérieures des appuis.



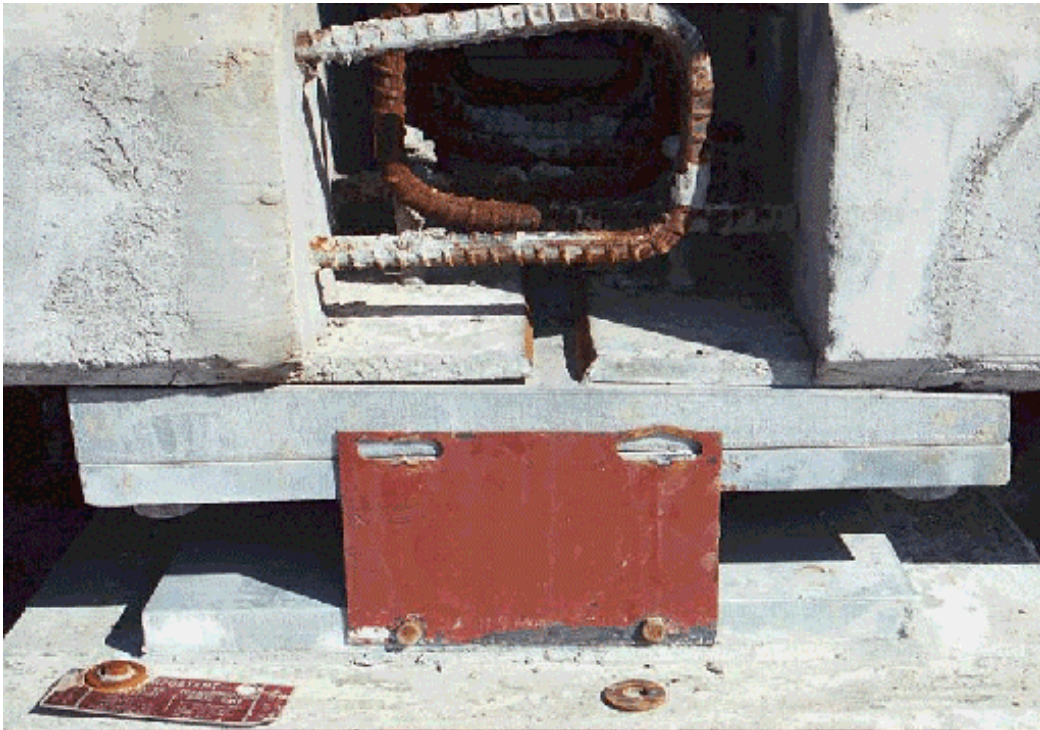
**Figure 3.18** Vue de l'extrémité des poutres 1 à 4 à la pile 4 (photo 308.3.13)



**Figure 3.19** Extrémité sud de la pile 4 après enlèvement des poutres de la travée 4 (photo 330.8.08)

La figure 3.19 montre le chevêtre de la pile 4 après que l'on ait provoqué la chute des poutres de la travée 4. On voit, au sud de chaque appareil d'appui, les plaques supérieures qui ont glissé sur le disque de PTFE des pistons. Sur le côté nord des appareils d'appui, on voit que les trous oblongs des plaques de transport ont été déchirés vers le haut. Ceci est dû à la rotation des appareils d'appui vers le sud, rotation qui a causé le mouvement vers le haut des boulons qui reliaient les plaques de transport aux plaques supérieures. La tête de ces boulons a provoqué, lors du glissement des plaques supérieures, les deux rainures parallèles que l'on peut voir sur les disques de PTFE. Les plaques de transport du côté sud des appuis ont été pliées complètement par les plaques supérieures.

La figure 3.20 montre le côté sud de la poutre 5 à la pile 4. On voit que les boulons des plaques de transport ont été cisailés suite au mouvement vers le bas de la plaque supérieure. Ce mouvement a été causé par la rotation de l'appareil d'appui vers le sud.



**Figure 3.20** Poutre 5 à la pile 4 (photo 330.8.09)

La figure 3.21 montre les appareils d'appui des poutres 1 à 4 à la culée 5 après l'enlèvement des débris et le nettoyage des lieux. L'appareil d'appui de la poutre 4 a été démonté pour inspection. La disposition des plaques supérieures des poutres 1 à 3 indiquent un mouvement des poutres similaire à celui décrit pour la pile 4. Ce mouvement était moins prononcé car il a été circonscrit par le mur de garde.

Sur la figure 3.22, on remarque les mêmes caractéristiques qu'à la pile 4 : plaque de transport pliée du côté sud, trous oblongs déchirés dans la plaque de transport du côté nord, stries dans le disque de PTFE et marques sur le côté sud du piston.



**Figure 3.21** Vue de la culée 5 après nettoyage et démontage de l'appareil d'appui de la poutre 4 (photo 280.3.11)



**Figure 3.22** Composantes de l'appareil d'appui de la poutre 4 à la culée 5  
(photo 280.5.07)

Les figures 3.23, 3.24 et 3.25 illustrent les chevêtres des piles 2 et 3 après inspection des appareils d'appui. Les appareils sur ces piles ont subi des dommages similaires à ceux observés à la pile 4. On note cependant deux différences. À l'exception de la poutre 2 à la pile 3, les plaques supérieures étaient soudées aux plaques d'assise des poutres et, par conséquent, sont tombées avec les poutres. L'autre différence est que les plaques de transport n'étaient probablement plus boulonnées aux plaques supérieures des appareils d'appui. On n'a pas observé de stries dans les disques de PTFE, comme à la pile 4 et à la culée 5. Des déchirures de l'acier en bordure des trous des plaques n'ont été observées qu'aux poutres 2 et 4 de la pile 2. Les autres trous étaient intacts, tel qu'illustré à la figure 3.25.

On a aussi observé des signes évidents du glissement à l'interface acier inoxydable et PTFE, tels que les marques laissées dans le lubrifiant de silicone utilisé dans les appareils d'appui fournis dans ce projet (figure 3.26).



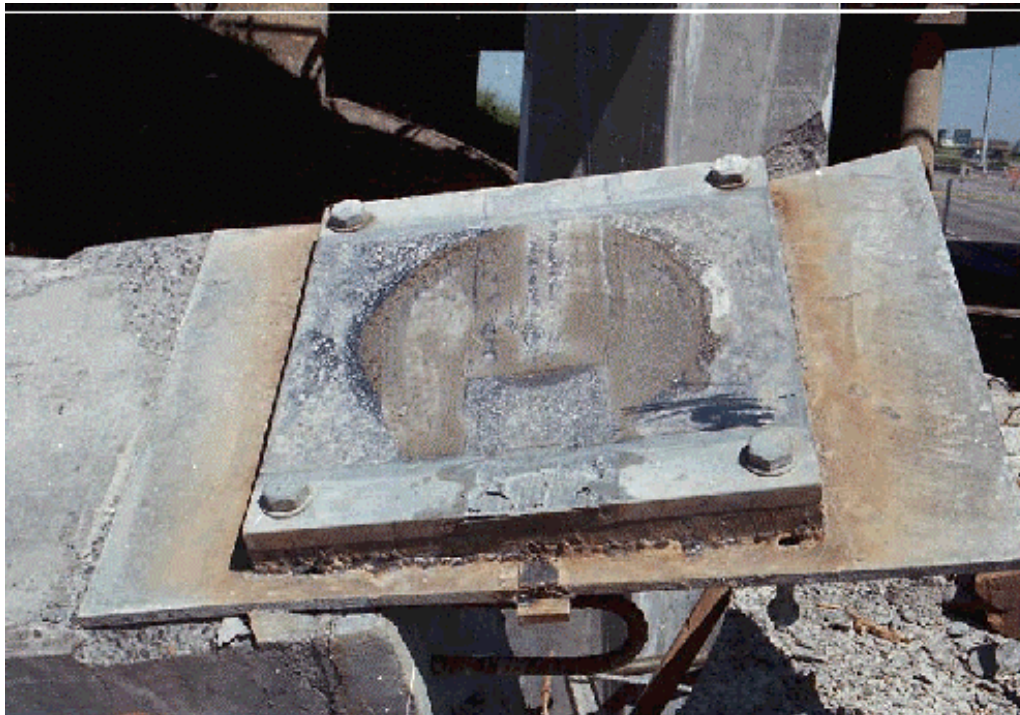
**Figure 3.23** Vue de l'extrémité sud de la pile 3 (photo 280.1.19)



**Figure 3.24** Vue de l'extrémité sud de la pile 2  
(photo 280.3.01, prise après enlèvement des poutres de la travée 1)



**Figure 3.25** Détail de l'appareil d'appui de la poutre 1 à la pile 2 (photo 280.3.03)



**Figure 3.26** Dessous de la plaque de la poutre 1 à la pile 2 (photo 330.2.20)

À la culée 1 (figure 3.27), les coussins en élastomère des poutres 1 à 4 étaient tous en place sur les plaques biseautées en acier. Comme le montre la figure 3.6, ces poutres ont glissé vers le sud jusqu'à heurter la surface horizontale de la culée, à côté des socles de béton. Comme à la culée 5, la chute des poutres a été empêchée par la présence du mur de garde.

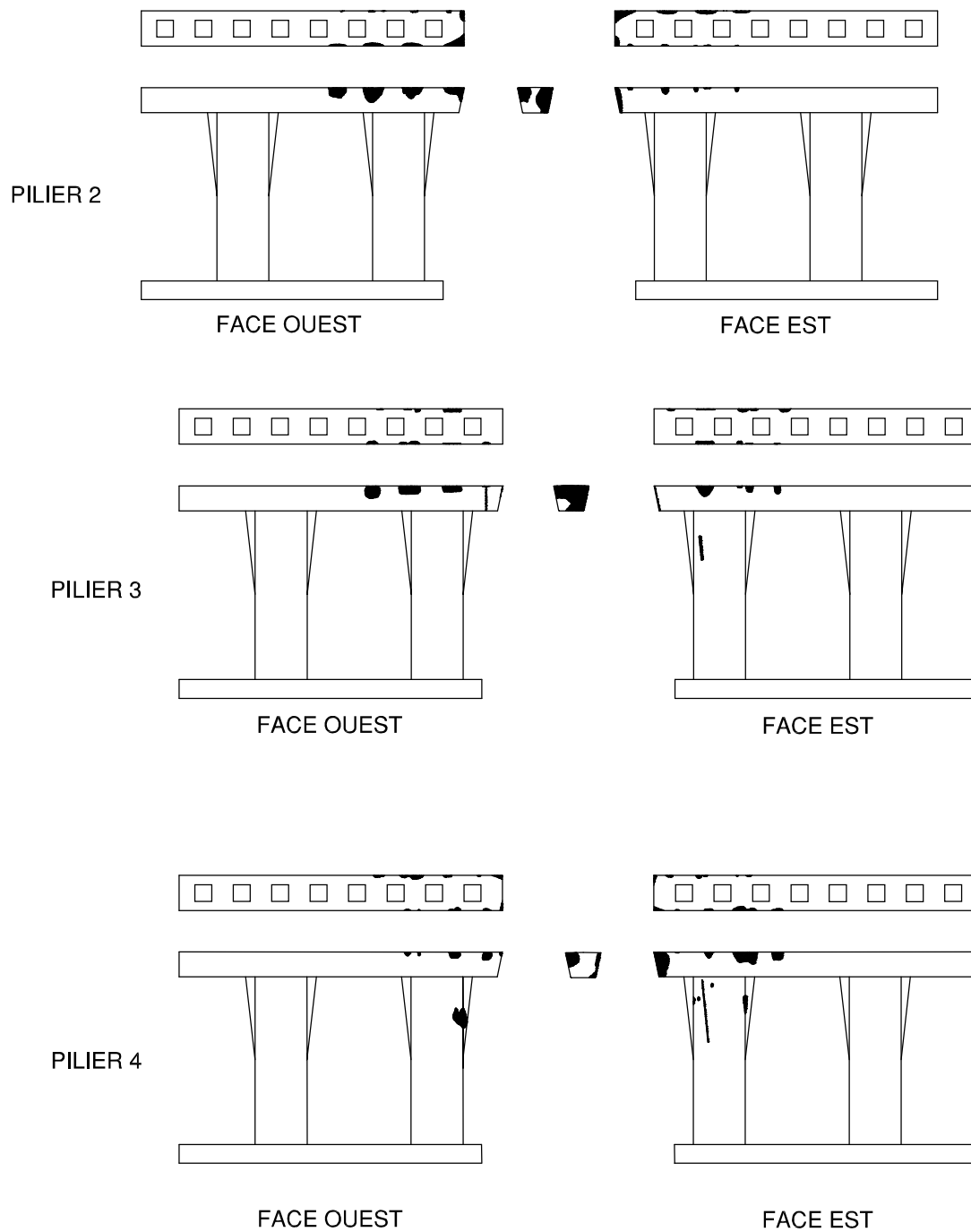


**Figure 3.27** Vue vers le sud des appareils d'appui des poutres 1 à 4 à la culée 1 (photo 280.3.06)

### 3.3.3 Piles

Le choc des plaques supérieures et des poutres contre les structures des culées et des piles a causé des dommages à ces éléments structuraux. La figure 3.28 montre un relevé des éclats de béton sur les trois piles.

Les marques que l'on peut voir en bordure et au bout des chevêtres sur cette figure et sur les figures 3.7, 3.8, 3.18, 3.19, 3.23 et 3.24, de même que la position au sol des poutres 1 à 4 des travées 2 et 3, sont des indices qui permettent de recréer le mouvement des poutres lors de leur chute. Après que l'aile inférieure ait buté contre le chevêtre, les poutres auraient tourné complètement sur le côté. L'aile supérieure des poutres 2 à 4 a alors heurté les chevêtres tandis que les poutres de la rangée 1 ont basculé autour de l'extrémité sud des chevêtres.

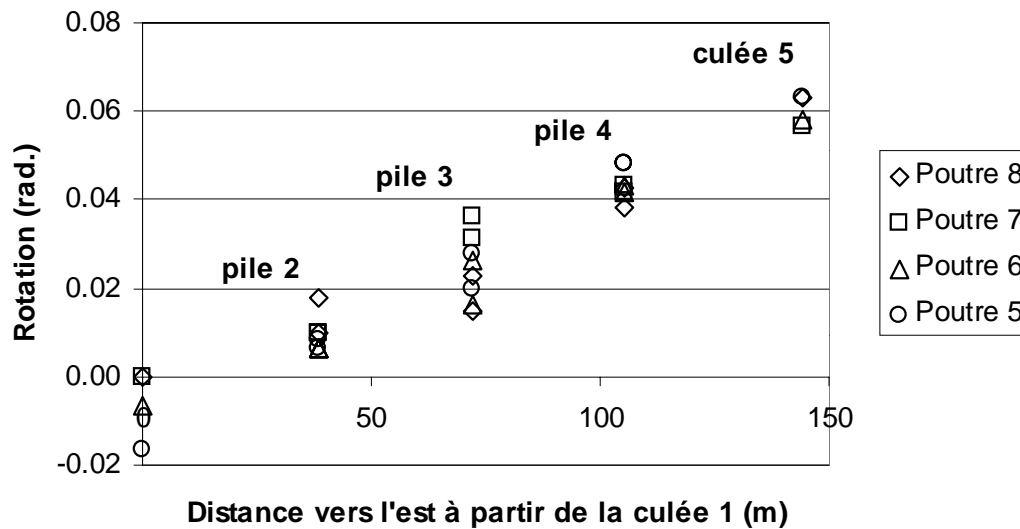


**Figure 3.28** Vue des dommages aux piles

### 3.4 Mesure de la rotation des poutres 5 à 8

Des mesures géométriques ont été prises sur les poutres 5 à 8 avant leur démantèlement afin de déterminer la rotation subie par ces poutres autour de leur axe longitudinal (angle  $\alpha$  sur la figure 2.8).

La figure 3.29 présente la rotation mesurée à chacune des extrémités des poutres à toutes les unités de fondation. Ainsi, deux mesures ont été effectuées aux piles 2 à 4. Une valeur positive indique une rotation vers le sud, c'est-à-dire que la semelle supérieure s'est déplacée vers le sud par rapport à la semelle inférieure. On peut observer la rotation vers le sud des poutres 5 à 8 sur la figure 3.30.



**Figure 3.29** Rotation des poutres 5 à 8 mesurée aux appuis



**Figure 3.30** Rotation vers le sud des poutres 5 à 8 à la pile 4  
(photo 280.7.02, vue vers l'est après enlèvement des  
poutres de la travée 3 et les poutres 1 à 4 de la travée 4)

On remarque sur le graphique qu'à chacune des trois piles, l'inclinaison est sensiblement la même d'une poutre à l'autre mais que l'inclinaison diminue graduellement de la culée 5 vers la culée 1. La valeur maximale d'inclinaison mesurée est de l'ordre de 0.06 radians à la culée 5.

La rotation diminue vers la culée 1 à cause de la présence des tiges d'ancrage verticales qui étaient insérées dans les poutres 5 à 8 à cet appui (figure 3.31). La faible tolérance entre le diamètre des tiges et celui des trous dans les poutres empêchait, à toutes fins utiles, la rotation des poutres à la culée 1.

La variation de la rotation sur la longueur du pont indique que les poutres étaient continues aux piles, du point de vue de leur comportement en torsion.



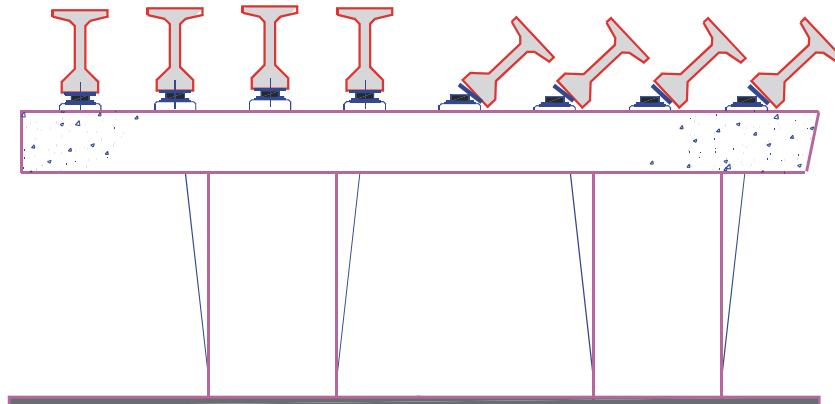
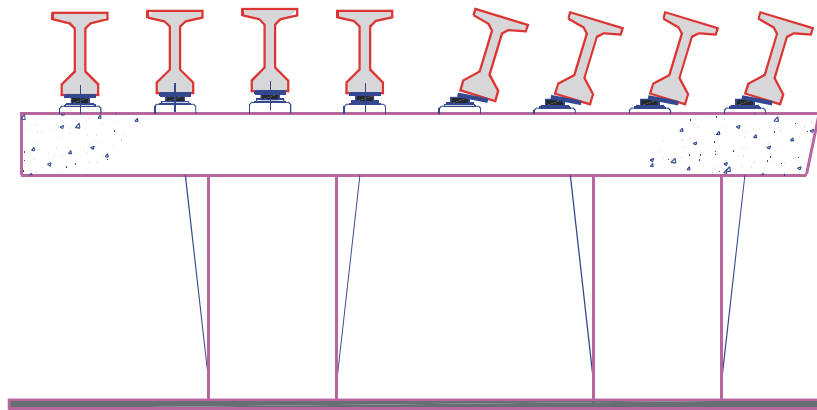
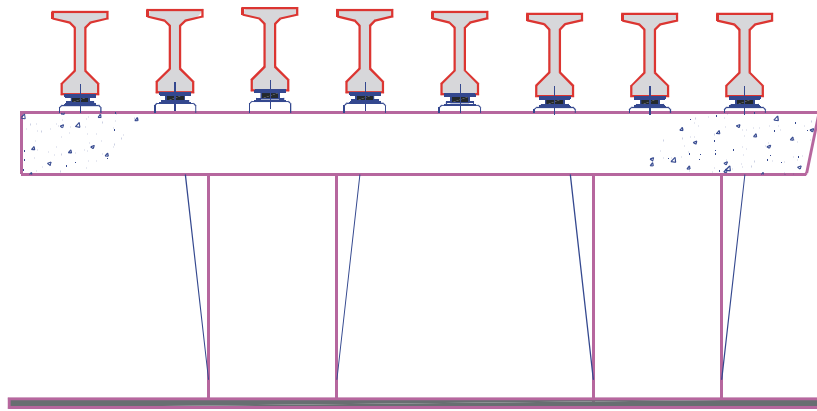
**Figure 3.31** Tige d'ancrage des poutres 5 à 8 à la culée 1 (photo 280.9.18)

### 3.5 Reconstitution de la chute des poutres

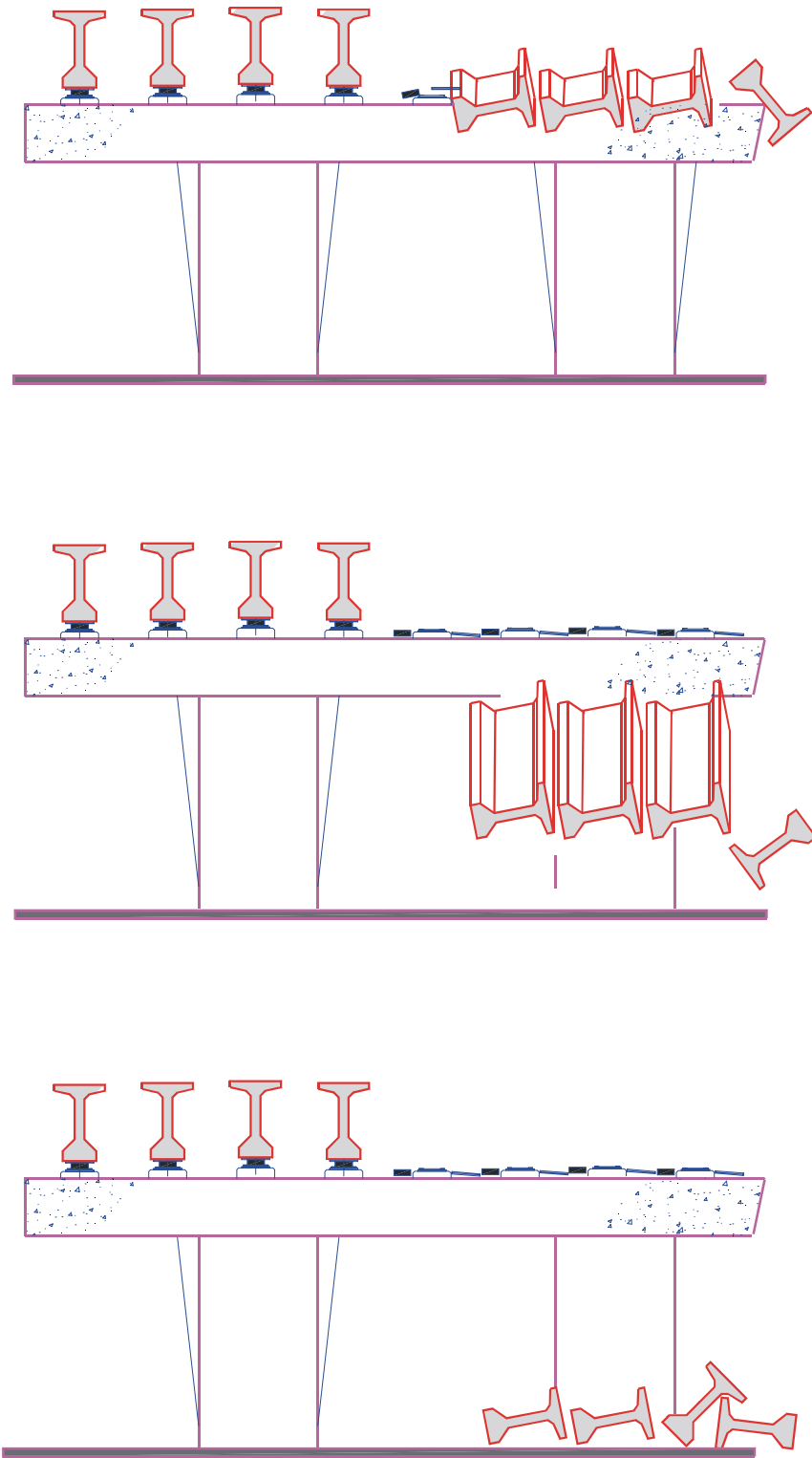
Les observations faites sur le site et les témoignages indiquent que l'effondrement s'est vraisemblablement produit selon la séquence suivante :

- Les plaques supérieures des appareils d'appuis des poutres 1 à 4 se sont déplacées latéralement vers le sud, par glissement à l'interface acier inoxydable-PTFE, tout en s'inclinant dans la même direction pour finalement heurter le chevêtre.
- Suite à ce mouvement, les tirants de retenue latérale entre les poutres 4 et 5 se sont cassés. Les poutrelles supportant le coffrage de la dalle se sont séparées des supports métalliques qui les fixaient aux poutres. Les coffrages des entretoises intermédiaires ont perdu leur appui, de même que les planchers de sécurité situés au-dessus des voies de l'autoroute. Le tout est alors tombé directement au sol.
- La force horizontale induite par les poutres 1 à 4 a fait se pencher légèrement les poutres 5 à 8 vers le sud. Ces dernières sont cependant demeurées en place parce que leurs appareils d'appui ne permettaient pas le glissement dans la direction nord-sud. De plus, à la culée 1, la rotation des poutres 5 à 8 étaient bloquée par les tiges d'ancrage verticales posées à cet endroit. On remarque d'ailleurs que la rotation des poutres 5 à 8 augmente progressivement en s'éloignant de la culée 1 vers la culée 5.
- Aux culées 1 et 5, le mouvement des poutres a été interrompu par la présence du mur de garde localisé au sud des culées. Aux piles 2 à 4, les poutres des travées 2 et 3 ne bénéficiaient pas d'une telle retenue et ont poursuivi leur mouvement.
- Les poutres 2 à 4 des travées 2 et 3 ont pivoté par rapport au point de contact chevêtre semelle inférieure jusqu'à ce que le bord de leur semelle supérieure frappe le chevêtre. Ces poutres devaient alors supporter leur poids propre autour de leur axe faible, plus les forces d'impact, et elles se sont probablement brisées en flexion, puisque la précontrainte n'est pas efficace dans cet axe, pour ensuite tomber au sol entre les piles.
- La poutre 1 des travées 2 à 3 a aussi pivoté sur sa base mais a basculé dans le vide au bout sud du chevêtre. Comme rien n'entravait son mouvement, elle a atteint le sol avant la poutre 2, ce qui explique la position relative de ces deux poutres.

Une vue schématique de la façon dont les poutres sont probablement tombées est donnée aux figures 3.32 et 3.33.



**Figure 3.32** Séquences 1, 2 et 3 de la chute des poutres



**Figure 3.33** Séquences 4, 5 et 6 de la chute des poutres

## 4.0 CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Dans cette section, on présente les conditions climatiques et sismiques qui prévalaient dans les jours qui ont précédé l'effondrement des poutres.

### 4.1 Conditions climatiques

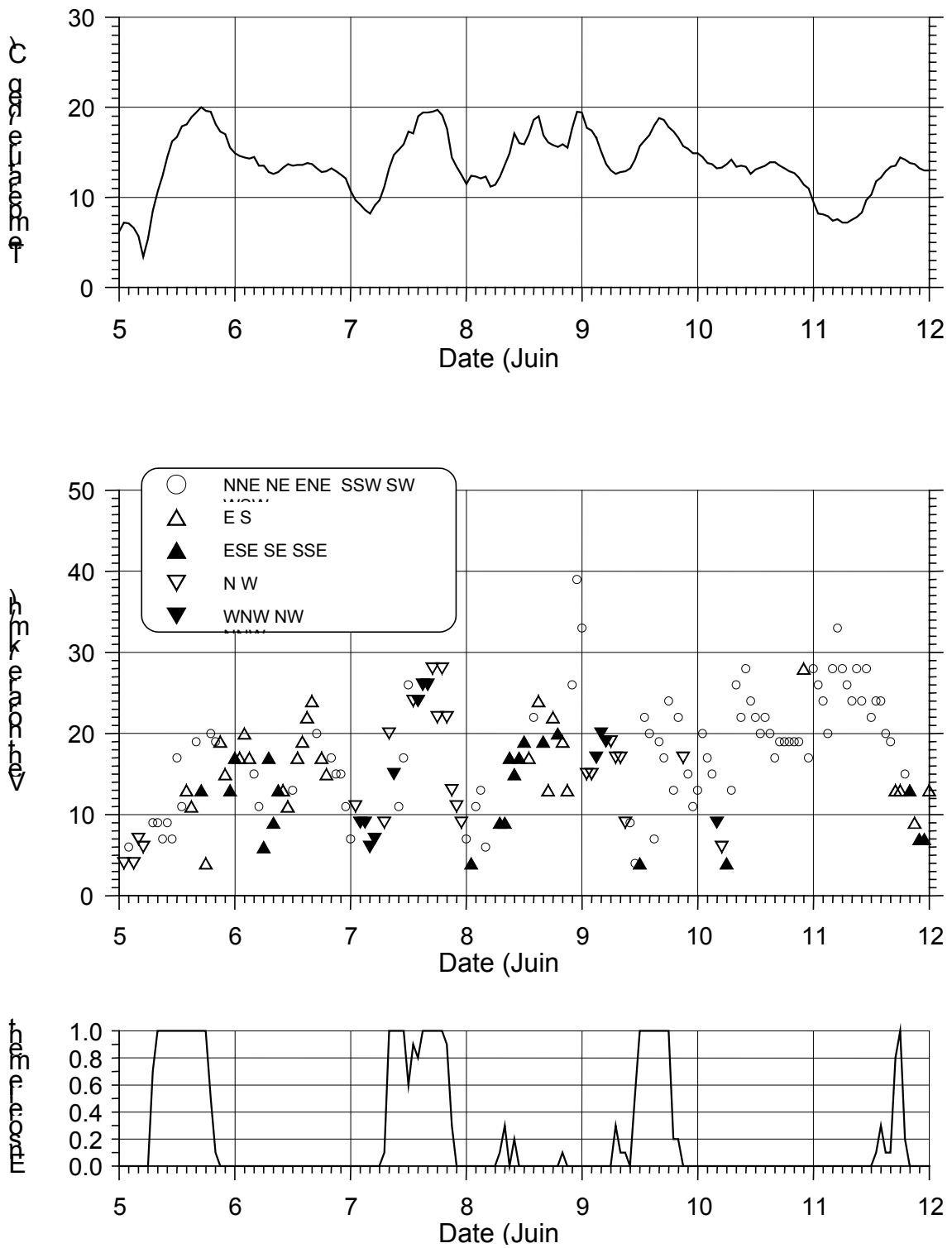
Les conditions climatiques sont basées sur les observations recueillies à la station météorologique la plus rapprochée du pont du boulevard du Souvenir, soit celle de Montréal-Dorval de la direction de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada. Cette station est située à l'aéroport international de Dorval, à environ 2 km à l'ouest et 10 km au sud du pont. L'altitude de cette station (36 m) est approximativement la même que celle du site (environ 38 m) et les conditions locales y sont similaires (terrain généralement plat et dégagé).

Les figures 4.1 et 4.2 donnent la température de l'air ambiant, la vitesse horaire de vent (sans rafale) et le niveau d'ensoleillement pour la période du 5 au 18 juin 2000, soit à partir du moment où les appuis temporaires ont tous été enlevés et le jour de l'effondrement des poutres. Pour le vent, les valeurs ont été regroupées en trois catégories : les vents approximativement perpendiculaires au pont dont l'origine va du sud à l'est, les vents qui sont aussi approximativement perpendiculaires au pont mais dont l'origine va du nord à l'ouest et, finalement, les autres vents qui, eux, soufflent parallèlement à la longueur du pont. Pour les deux premières catégories, on a aussi distingué entre les directions qui sont plus près de la perpendiculaire parfaite des autres directions (ex. ESE, SE et SSE distincts de E et S). On notera que, tel qu'illustré aux figures 2.1 et 4.3, le pont est orienté approximativement SO-NE.

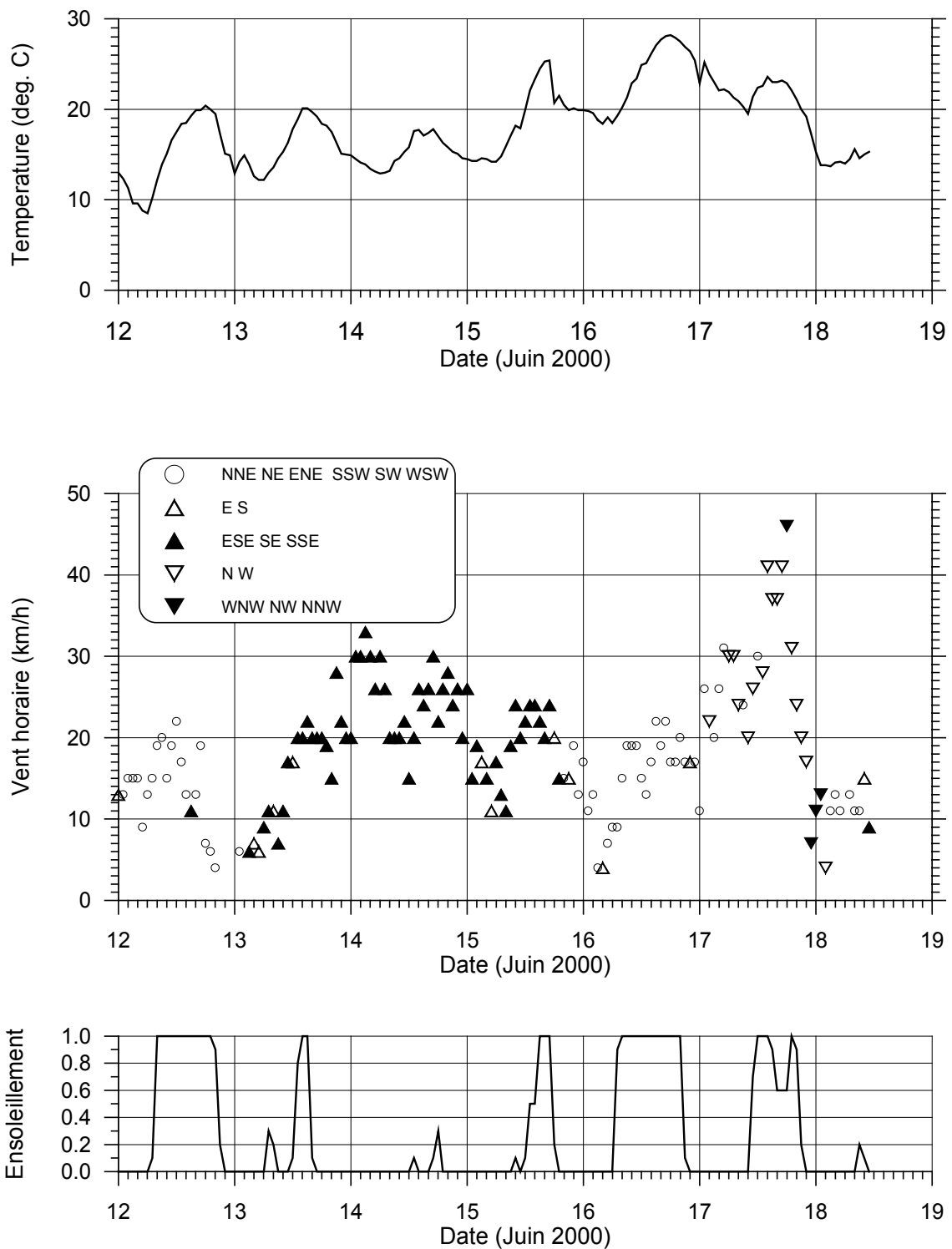
La Fig. 4.3 donne la direction et l'amplitude des rafales de vent maximales enregistrées entre le 3 et le 18 juin et qui sont d'amplitude égale ou supérieure à 50 km/h.

On note que les journées du 15, 16 et 17 juin sont les plus chaudes et que la température se refroidit considérablement dans la soirée du 17. La température demeure fraîche le 18 au matin.

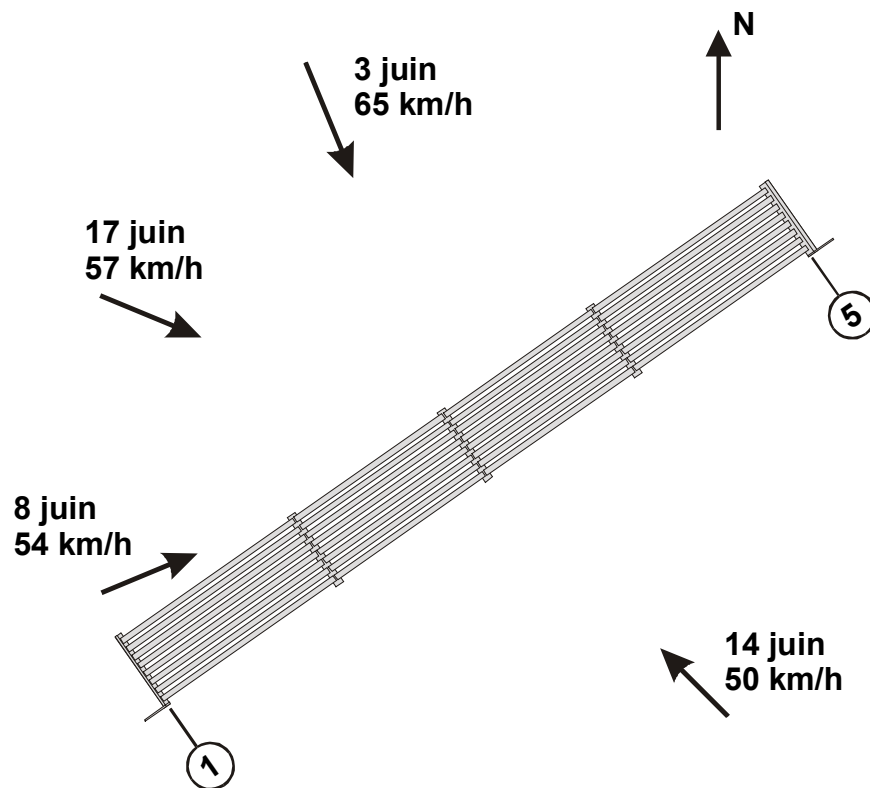
Les vents horaires maximum (plus de 40 km/h) sont enregistrés à la fin de la journée du 17 juin. Ces vents soufflent dans la direction généralement perpendiculaire à l'axe du pont, en provenance de l'ouest et du ouest-nord-ouest. La journée du 18 juin, les vents sont légers et on n'enregistre aucune rafale. On note que les rafales de vent les plus importantes se produisent le plus souvent dans la direction perpendiculaire au pont. Les 3 et 17 juin, ces rafales soufflent respectivement du nord-nord-ouest et du ouest-nord-ouest. Le 14 juin, des rafales importantes sont enregistrées du sud-est. Les rafales du 17 juin sont enregistrées vers 18h, après que les ouvriers aient quitté le chantier.



**Figure 4.1** Température de l'air, vitesse horaire de vent et niveau d'ensoleillement pour la période du 5 au 12 juin 2000.



**Figure 4.2** Température de l'air, vitesse horaire de vent et niveau d'ensoleillement pour la période du 12 au 18 juin 2000



**Figure 4.3** Vitesse et direction des rafales de vent de 50 km/h et plus entre le 3 et le 18 juin

Les 16 et 17 juin sont des journées généralement ensoleillées. Le 18 juin, le soleil ne perce que légèrement le matin entre 8h et 10h. Des observations à l'hôtel de ville de Laval indiquent que le ciel était généralement couvert le matin du 18 juin. Des averses ont débuté sur le site vers 12h30 ce jour là.

#### 4.2 Conditions sismiques

Les rapports de la commission géologique du Canada indiquent qu'un séisme de magnitude mN 3.7 s'est produit dans la région de Charlevoix le 15 juin 2000. Il s'agit du seul séisme enregistré au Québec et en Ontario peu avant l'effondrement du pont.

## **5.0 CAUSES PROBABLES DE L'EFFONDREMENT**

### **5.1 Introduction**

Deux possibilités ont été examinées pour expliquer l'effondrement des poutres du pont : la défaillance d'un élément structural et l'instabilité des poutres. Ces deux possibilités sont présentées et analysées dans ce chapitre.

D'autres causes possibles ont aussi été examinées mais n'ont pas été retenues après vérification. Parmi celles-ci, on retrouvait :

- Collision d'un véhicule circulant sur l'autoroute 15 avec le tablier du pont. Cette hypothèse a été écartée car le dégagement vertical sous les poutres du nouveau pont est plus élevé de 0.6 m que celui du pont existant.
- Séisme. Le tremblement de terre du 15 juin était trop faible et son épiceutre trop éloigné du site pour causer des vibrations appréciables à Laval (il n'a été ressenti que dans la région immédiate de l'épicentre).
- Acte de vandalisme ou de sabotage. Aucun indice n'a été recueilli qui aurait pu indiquer qu'un tel geste ait été posé.

### **5.2 Revue de la structure du pont**

#### **5.2.1 Qualité des matériaux**

On a procédé à la revue des rapports d'essais préparés en cours de chantier par les différents laboratoires impliqués dans le projet de même qu'à des essais sur des échantillons prélevés sur le site après l'effondrement. Les matériaux qui ont été examinés sont les bétons employés dans les culées, les piles et les poutres, l'acier de précontrainte des poutres et les aciers des poutres. Les informations obtenues indiquent que les matériaux examinés étaient conformes aux exigences des plans et devis du projet.

#### **5.2.2 Revue de la conception du pont**

Les éléments de la charpente qui ont été étudiés sont : les fondations, les culées, les piles, les appareils d'appui des poutres, les poutres et la dalle du tablier. La vérification comprenait le calcul des efforts induits par les charges et la vérification de l'adéquation des éléments structuraux.

La norme CAN/CSA-S6-88 «Calculs des ponts-routes» (ACNOR 1990) a été retenue comme référence de conformité et on a basé la revue sur les plans de Dessau-Soprin émis pour construction (1<sup>er</sup> octobre 1999) et les modifications à ces plans effectuées au cours des travaux. Les dessins d'atelier des poutres produits par la Compagnie Bétons Préfabriqués du Lac inc. (dessins B-1, B-2, B-4, B-5, B-7, B-8, B-10 et B11 émis le 1 septembre 1999 et annotés par Dessau Soprin le 25 octobre 1999) et les dessins des appareils d'appui produits par la Compagnie Goodco inc. (dessin 1/6 du 13 octobre 1999 et dessins 2/6 à 6/6 du 27 octobre 1999, avec annotations de Dessau-Soprin du 5 novembre 1999) ont aussi été consultés.

La revue de la conception de l'ouvrage, complétée par les observations faites sur le site, a permis de conclure que l'effondrement n'est pas le résultat de la rupture d'un des éléments structuraux principaux du pont. La revue du projet a aussi permis de constater qu'il fallait apporter une attention particulière à la stabilité de l'ouvrage durant la construction. Cet aspect est abordé à la section 5.3.

### **5.2.3 Appareil d'appuis**

On a procédé, après l'accident, à un examen visuel de tous les appareils d'appui des poutres 1 à 4. On a porté une attention particulière aux coussins en élastomère de la culée 1 et aux disques de caoutchouc de tous les appuis à élastomère confiné. Aucun vice ni défaut n'a pu être décelé sur ces appareils. Des essais au duromètre shore A ont été effectués sur certains des disques de caoutchouc des appuis à élastomère confiné et la dureté obtenue dans tous les cas était conforme à la valeur spécifiée.

Des essais en laboratoire ont aussi été réalisés pour déterminer les propriétés des appareils d'appui à l'état neuf. Les spécimens ont été tirés parmi les appareils qui avaient été produits pour la phase II des travaux. Ces essais ont été réalisés sous les charges verticales qui étaient appliquées au moment de l'accident. Ceux-ci ont révélé que le comportement des appareils était tel qu'anticipé, c'est-à-dire qu'ils offraient un coefficient de friction très bas et une faible résistance à la rotation. L'influence de la présence des plaques de transport sur ces deux propriétés a également pu être quantifiée.

## 5.3 Rupture par instabilité des poutres

### 5.3.1 Système de contreventement temporaire

Durant la construction, les éléments de la charpente doivent être stabilisés jusqu'à l'achèvement de l'ouvrage. Suite à l'effondrement du pont du boulevard du Souvenir, on a procédé à l'examen de la charpente afin d'identifier les éléments qui pouvaient, au moment de l'accident, contribuer au contreventement temporaire des poutres dans la direction transversale. Les propriétés de ces éléments ont ensuite été déterminées par calculs ou à l'aide d'essais. En se référant à la description de l'ouvrage donnée au chapitre 2, on retrouvait :

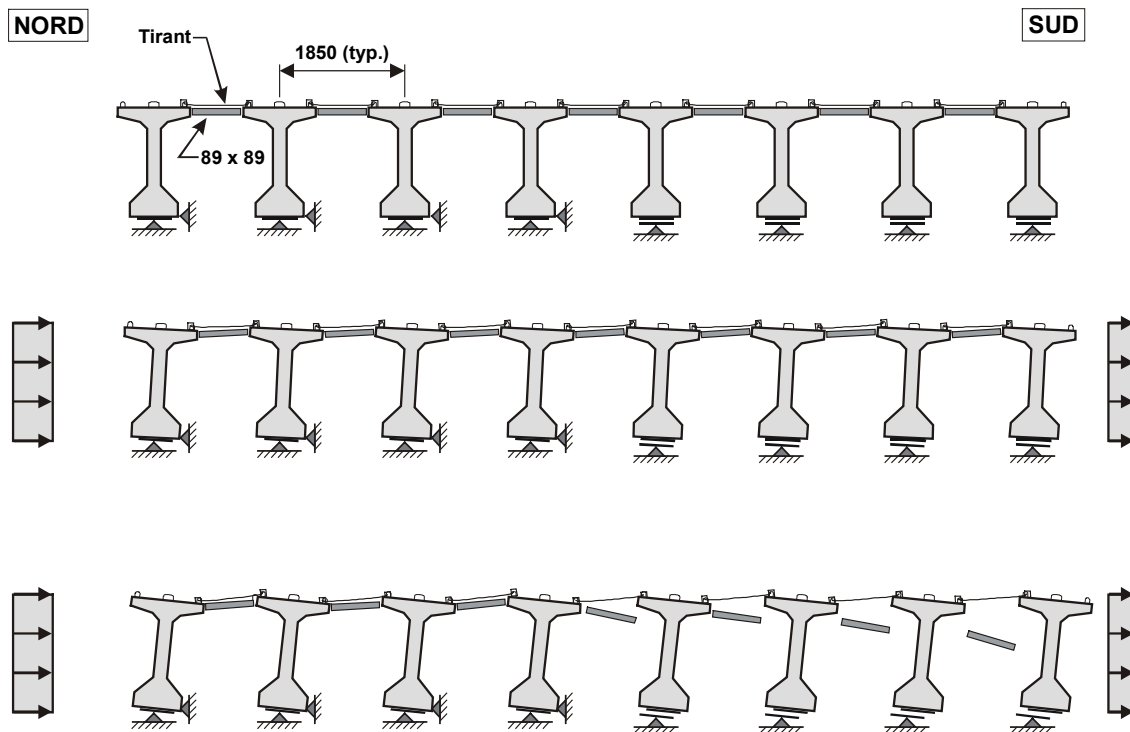
- Les tirants qui étaient présents entre les semelles supérieures des poutres. Ceux-ci devaient s'opposer à l'éloignement des poutres les unes des autres. Les essais réalisés sur les tirants ont révélé qu'en raison du pliage aux extrémités de la tige, ils étaient entre 100 et 900 fois plus flexibles qu'une tige d'acier droite équivalente de la même longueur et que leur résistance variait entre 14% et 41% de celle d'une tige d'acier droite équivalente. La rigidité était principalement influencée par la force de serrage appliquée lors de l'installation.
- Les pièces de bois 89 x 89 posées à proximité des tirants, de même que les poutrelles en bois qui supportaient le coffrage de la dalle entre les poutres. Ces pièces empêchaient les poutres de se rapprocher les unes des autres au niveau de leur semelle supérieure.
- Les tiges métalliques qui supportaient les coffrages de la dalle entre les poutres. On peut démontrer par calcul que ces pièces offraient une résistance et une rigidité en traction négligeable au mouvement latéral des poutres.
- Les coffrages des entretoises. Ceux-ci ne pouvaient empêcher l'éloignement relatif ni la rotation relative des poutres puisqu'ils n'étaient pas fixés aux poutres et n'offraient pas de résistance au cisaillement.
- Les tiges d'ancrage verticales utilisées à la culée 1 pour les poutres 5 à 8. Celles-ci empêchaient le déplacement transversal ainsi que la rotation des poutres 5 à 8 à cet endroit, tel que confirmé par les mesures in situ de la rotation subie par ces poutres lors de l'effondrement.

- Les appareils d'appui à élastomère confiné supportant les poutres 5 à 8 aux piles 2 à 4 et à la culée 5. Le déplacement transversal de la base des poutres 5 à 8 était empêché par les guides de ces appareils d'appui. Ces appareils n'offraient cependant qu'une très faible résistance à la rotation des poutres par rapport à leur base, résistance qui a été mesurée en laboratoire. La rigidité en rotation des appareils fournis aux piles 2 à 4 était de 150 kN-m/rad alors que celle des appareils à la culée 5 était de 50 kN-m/rad. Une force horizontale de 0.9 kN et 0.3 kN, respectivement, appliquée à la semelle supérieure d'une poutre, était donc suffisante pour augmenter la rotation de la poutre ( $\alpha$  sur la figure 2.8) de 0.01 radian pour ces deux modèles d'appareils.
- Les appareils d'appui à élastomère confiné supportant les poutres 1 à 4 aux piles 2 à 4 et à la culée 5. Ces appareils ne comprenaient pas de guide et la résistance au mouvement latéral n'était fournie que par la friction, très faible, à l'interface du disque de PTFE et de l'acier inoxydable. La résistance à la rotation de ces appareils d'appui était aussi très faible. Les coefficients de friction ont été mesurés en laboratoire et sont donnés à la section 5.3.4.
- Les coussins en élastomère supportant les poutres 1 à 4 à la culée 1. Ces appareils offraient une certaine résistance à la rotation des poutres. Cette résistance a été mesurée par des essais en laboratoire. Le mouvement transversal des poutres à cet endroit était empêché par la friction entre le coussin et les plaques d'assise.

Si on néglige la résistance à la rotation fournie par les appareils d'appui, on constate que le système en place devient un mécanisme. C'est-à-dire qu'il peut se déformer tel que montré à la figure 5.1, sans offrir de résistance, sous l'effet d'une sollicitation horizontale comme les pressions causées par le vent soufflant du nord schématisées sur la figure.

Ce mécanisme est d'autant plus vulnérable lorsque l'inclinaison des appareils d'appui à élastomère confiné des poutres 1 à 4 excède le coefficient de friction de l'appareil, ces poutres peuvent alors glisser, tel que montré sur cette figure. L'amorce de ce mouvement par rapport aux poutres 5 à 8 est permis par la grande flexibilité des tirants. L'excentricité qui se crée alors entre le centre de la largeur des poutres et le centre des appareils d'appui contribue à accentuer la rotation des appuis, ce qui précipite le mouvement des poutres.

Seule la résistance à la rotation des appareils d'appui pouvait contribuer à réduire les déformations horizontales du système. Cependant, les appareils à élastomère confiné n'offraient qu'une très faible rigidité en rotation et on peut penser que le mécanisme de la figure 5.1 pouvait être activé sous de faibles sollicitations.



**Figure 5.1** Mécanisme des poutres du tablier

### 5.3.2 Sollicitations

En plus de la pression du vent, les pressions de l'air causées par la turbulence, les vibrations dues au passage des véhicules sur l'autoroute 15, ainsi que les imperfections géométriques et les déformations thermiques de la structure étaient susceptibles de produire des déformations similaires à celles montrées à la figure 5.1. Ces sollicitations sont brièvement décrites dans ce qui suit.

#### 5.3.2.1 Pressions dues au vent

Le vent soufflant dans une direction perpendiculaire à la structure peut causer une pression sur la face verticale de la poutre de rive au vent et une succion sur la poutre de rive située du côté sous le vent. Dans le cas du pont du boulevard du Souvenir, les vents se dirigeant généralement dans la direction sud sont les plus critiques car la force du vent sur la poutre 1 cherche à faire glisser davantage cette poutre sur ses appareils d'appui (figure 5.1).

Lorsque l'on examine les conditions climatiques présentées au chapitre 4, on remarque que les vents horaires les plus importants dans la direction la plus critique se sont produits en fin de journée, le samedi 17 juin. Les rafales de vent à ce moment ont atteint 57 km/h. On note que des rafales plus importantes ont été enregistrées dans la même direction le 3 juin (figure 4.3) mais des appuis temporaires étaient toujours en place à la pile 3 (figure 2.15) ce qui contribuait à stabiliser les poutres.

À la section 5.3.3, on présente les résultats d'une étude où on a appliqué à la structure les pressions causées par les rafales mesurées le 17 juin.

### **5.3.2.2 Turbulence causée par la circulation**

Les camions circulant à vive allure sur les routes causent des turbulences dans l'air qui peuvent à leur tour produire des pressions sur les structures situées à proximité. Par exemple, dans une norme AASHTO, on spécifie une pression additionnelle de 0.24 kPa pour le calcul des structures temporaires situées au dessus de voies de circulation. Le matin du 18 juin, la circulation était fluide sur l'autoroute 15 et il est probable que des pressions de vent de cette amplitude aient été appliquées sur une partie des poutres du pont.

Pour fin de comparaison, notons que dans l'exemple montré à la section 5.3.3, on a imposé une succion égale à 0.13 kPa à la poutre 1 pour simuler l'effet des rafales de vent enregistrées le samedi 17 juin.

### **5.3.2.3 Vibrations causées par la circulation**

Le 13 juillet dernier, on a effectué des mesures de l'accélération induite dans le chevêtre de la pile 4 par la circulation sur l'autoroute 15. Les accélérations maximales enregistrées dans les deux directions horizontales étaient de l'ordre de 0.0025 g. Ces accélérations sont très faibles mais, tel que discuté à la section 5.3.3, celles-ci pouvaient contribuer au mouvement des poutres.

Les caractéristiques dynamiques de la structure au moment de la prise de ces lectures étaient bien sûr différentes de celles du 18 juin puisque les piles ne supportaient plus de poutres. Ces enregistrements permettent tout de même d'obtenir un ordre de grandeur de l'influence des vibrations du sol sur l'ouvrage.

### 5.3.2.4 Imperfections géométriques

On retrouve dans toutes les structures des imperfections géométriques et certaines peuvent causer des efforts et des déformations de la charpente. Par exemple, une poutre qui ne serait pas déposée au centre d'un appareil d'appui à élastomère confiné pourrait causer une inclinaison de la plaque supérieure de cet appui.

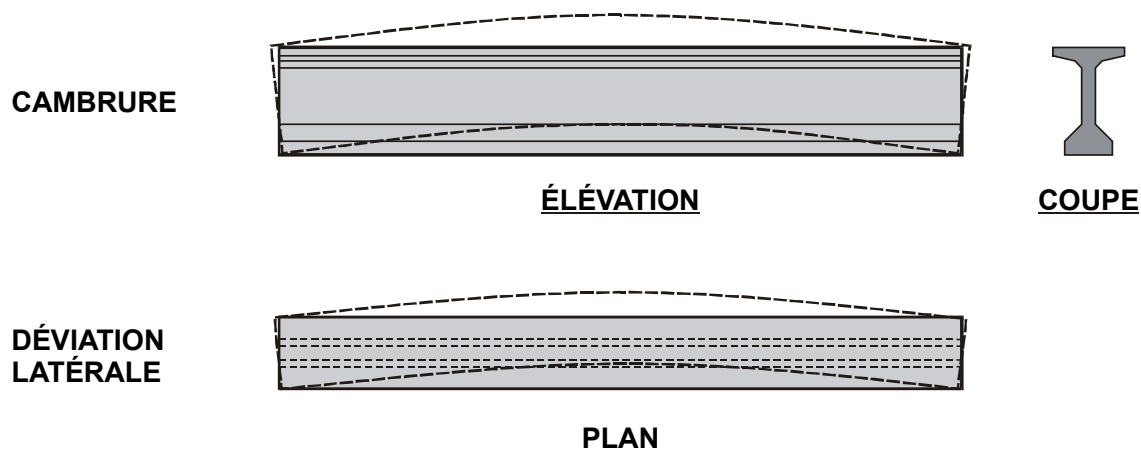
On a mesuré plusieurs imperfections géométriques de la structure du pont du boulevard du Souvenir afin de pouvoir évaluer leur effet possible sur la stabilité des poutres. Toutes les mesures relatives aux poutres ont été prises sur les poutres 5 à 8 et on fait l'hypothèse que celles-ci sont représentatives de l'ensemble de la structure. La valeur moyenne de certains de ces paramètres est présentée au tableau 5.1, accompagnée des tolérances qui sont spécifiées dans le Cahier des charges et devis généraux du ministère des Transports du Québec (MTQ 1997).

**Tableau 5.1** Imperfections géométriques mesurées dans la charpente

Paramètre	Valeur moyenne	Tolérance du CCDG
Appuis à élastomère confiné Excentricité des poutres sur les appuis (mm)	5.3	-
Poutres 5 à 8 Déviation latérale (x longueur)	0.00092	0.001
Pente des plaques d'assise (radian)	0.0045	0.002

Le premier paramètre correspond à la distance dans la direction nord-sud entre le centre de la largeur de la semelle inférieure des poutres 5 à 8 et le centre de la plaque biseautée des appuis à élastomère confiné.

Dans les documents de suivi du chantier, on a rapporté des cambrures et des déviations latérales excessives des poutres. La cambrure est une déformation en flexion vers le haut qui est principalement causée par l'action des câbles de précontrainte (figure 5.2). Cette déformation n'a pas influencé la stabilité des poutres en cours de montage. Par contre, la déviation latérale est plus critique car elle a un effet similaire à celui d'une excentricité des poutres sur un appareil d'appui puisque le centre de gravité de la poutre se trouve placé à l'extérieur de la ligne droite joignant les deux extrémités de la poutre.



**Figure 5.2** Cambrure et déviation latérale des poutres

Les mesures des déviations latérales des 16 poutres 5 à 8 ont été effectuées au niveau de l'âme, par temps couvert. Les poutres reposaient alors sur des appuis en bois, après leur enlèvement du pont. La déviation latérale moyenne est de  $0.00092 L$  ( $L$  est la longueur des poutres) et les valeurs maximum et minimum sont respectivement de  $0.00137 L$  et  $0.00055 L$ . Pour quelques poutres, la déviation latérale excédait la tolérance du CCDG qui est de  $0.001L$ , et devaient, par conséquent, être redressées.

Des mesures de la déviation latérale avaient été prises par l'entrepreneur avant l'installation des poutres (27 mars 2000). Ces valeurs sont données dans le Tableau 5.2. On remarque que, sauf pour la poutre 8 de la travée 4, ces valeurs sont comparables à celles mesurées après l'effondrement, ce qui confirme que les poutres avaient, avant l'effondrement, des déviations latérales de l'ordre de  $0.001 L$ .

**Tableau 5.2** Comparaison des déviations latérales mesurées avant et après l'accident

Travée	Poutre	No.	Déformation latérale (mm)	
			Avant	Après
1	7	P2 5/7	54	48
2	1	P4 1/1	43	-
3	6	P8 5/7	40	46
3	5	P8 6/7	50	45
3	2	P8 2/7	40	-
3	1	P7 1/1	40	-
4	8	P11 7/7	85	40

Le troisième paramètre dans le tableau 5.1 (pente des plaques d'assise) est une autre imperfection géométrique qui peut influencer la stabilité des poutres. Dans la direction nord-sud, la plaque d'assise et l'âme des poutres doivent être perpendiculaires l'une par rapport à l'autre. La valeur donnée au tableau 5.1 correspond à l'écart moyen entre l'angle mesuré sur les poutres et la perpendiculaire. Si la plaque d'assise n'est pas parfaitement perpendiculaire à l'âme de la poutre, celle-ci, une fois en place, sera inclinée ou encore reposera sur un appareil d'appui dont la plaque supérieure sera inclinée, deux conditions qui favorisent le mouvement des poutres dans la direction nord-sud.

### **5.3.2.5 Effets des variations de la température et du rayonnement solaire**

Le béton est un matériau qui se déforme lorsque sa température change suite à une variation de la température ambiante ou sous l'influence du rayonnement solaire. Pour les poutres du pont, les variations de la température extérieure se traduisent principalement par des changements de leur longueur, changements qui sont accommodés par les appareils d'appui.

L'effet du rayonnement solaire sur des poutres dépend de la partie de leur surface qui est exposée au soleil. Une poutre qui est réchauffée d'un côté a tendance à se courber du même côté, c'est-à-dire que la partie chaude est à l'extérieur de la courbe. Les poutres 1 et 8 avaient un côté et leur semelle supérieure qui pouvaient être réchauffées par les rayons solaires. Le côté exposé de la poutre 1 faisait face au sud-est et était ainsi le plus exposé en matinée. Pour cette poutre, l'effet du réchauffement de son côté exposé était donc similaire à celui d'une déviation latérale vers le sud.

Suite à l'accident, on a procédé à des essais in situ pour mesurer les variations de la température dans les poutres du pont qui étaient induites par le rayonnement solaire. On a ensuite réalisé des simulations numériques en considérant les conditions de température enregistrées dans les jours précédents le 18 juin (chapitre 4) et on a constaté que la déviation latérale maximale sur une des poutres de rive pouvait être de l'ordre de 10 mm vers le sud.

### **5.3.3 Étude de la stabilité sous l'effet du vent, des imperfections géométrique et des variations de température**

Afin de valider l'hypothèse que le mouvement des poutres se soit amorcé selon le mode montré à la figure 5.1 sous les conditions qui prévalaient avant l'accident, on a calculé à l'aide d'un modèle numérique de la structure du pont le coefficient de friction qui était requis à la base de la poutre 1 pour prévenir son glissement sous les rafales de vent du 17 juin.

Le modèle numérique comprenait les 32 poutres du pont, les tirants qui les re-liaient entre elles au niveau de la semelle supérieure et les appareils d'appui. Pour ces derniers, on a considéré les propriétés en rotation qui ont été obtenues des essais en laboratoire. On a aussi tenu compte de la présence des plaques de transports à la pile 4 et à la culée 5 sur la résistance à la rotation. La contribution des tiges d'ancrages verticales à la culée 1 (poutres 5 à 8) a aussi été prise en considération dans le modèle.

On a appliqué au modèle les charges de gravité qui étaient présentes le jour de l'accident (poids des poutres et des coffrages) et on a appliqué les pressions de vent induites par une rafale de 57 km/h.

Les résultats de trois simulations sont présentés ici. Dans le premier cas, la structure ne présente aucune imperfection géométrique et on a utilisé la rigidité des tirants obtenue pour un serrage moyen des écrous d'assemblage. Dans la seconde analyse, on a considéré une rigidité moindre pour les tirants, correspondant à un serrage minimal. Finalement, on a repris la première analyse mais en déplaçant de 20 mm vers le sud la poutre 1 de la travée 4. Cette dernière analyse avait pour but d'évaluer les effets combinés d'une excentricité de la poutre sur les appareils d'appui, d'une déviation latérale et du rayonnement solaire. La valeur de 20 mm représente un estimé réaliste lorsque l'on examine les valeurs présentées précédemment pour chacun de ces paramètres.

Les résultats sont comparés aux coefficients de friction qui ont été mesurés lors des essais sur les appareils d'appui (tableau 5.3). Le coefficient de friction statique lors du premier cycle correspond à la résistance au glissement offerte lors du premier mouvement après l'application de la charge verticale sur l'appareil d'appui. Pour ce genre d'interface, ce coefficient de friction est habituellement beaucoup plus élevé que dans les cycles suivants et, comme le montre le tableau 5.3, ce phénomène a été observé pour les appareils fabriqués pour ce projet. Les appareils d'appui du pont ont subi quelques cycles de mouvements dans les jours qui ont précédé l'accident et le coefficient de friction statique obtenu lors des cycles subséquents dans les essais doit être retenu ici.

Le coefficient de friction dynamique est mesuré une fois le mouvement amorcé. Les valeurs indiquées couvrent des cas de mouvements rapides (63 mm / min.) et très lents (0.1 mm / min.). Un coefficient de friction près du coefficient de friction dynamique est celui qu'il faudrait considérer dans la direction nord-sud si un mouvement longitudinal était en cours simultanément dans la direction longitudinale du pont.

Les résultats des trois analyses sont donnés au tableau 5.4. Le coefficient de friction indique le coefficient requis pour empêcher le glissement dû à la rotation de l'appui et l'effet du vent sur la poutre. Les résultats montrent clairement que les appareils d'appui étaient sur le point de glisser ou que le glissement s'est amorcé le samedi 17 juin. Dans le dernier cas, on peut penser que ce mouvement a été interrompu pour reprendre plus tard sous l'effet d'une autre sollicitation ou lorsqu'un bris est survenu dans un des éléments s'opposant au mouvement (tirant, etc.).

**Tableau 5.3** Valeurs moyennes et intervalles du coefficient de friction (%) entre le disque PTFE et l'acier inoxydable des appareils d'appui à élastomère confiné

Condition	Appareil d'appui	
	PM-300 Avec ou sans plaques de transport (piles 2 à 4)	PM-150 Avec plaques de transport (culée 5)
Statique (premier cycle)	4.5 (4.1 – 4.9)	3.5 (2.9 – 4.1)
Statique (cycles subséquents)	1.6 (0.86 – 2.5)	1.4 (0.6 – 2.4)
Dynamique	0.8 (0.46 – 1.2)	1.4 (1.1 – 2.1)

**Tableau 5.4** Prédiction de la possibilité de glissement de la poutre 1 sous l'effet du vent

Conditions	Serrage des tirants de retenue	Coefficient de friction requis (%)	État d'équilibre
Poussée du vent Aucune imperfection géométrique	Moyen	1.5	1.5 % $\cong$ 1.6 % Glissement imminent
	Minimal	2.1	2.1 % > 1.6 % Glissement probable
Poussée du vent Poutre 1 de la travée 4 avec imperfection géométrique moyenne	Moyen	1.7	1.7 % > 1.6 % Glissement probable

Il faut aussi noter que les essais en laboratoire ont démontré que les appareils d'appui à élastomère confiné ont tendance à demeurer inclinés après qu'on leur ait imposé une rotation. Pour l'exemple considéré ici, les analyses montrent que la rotation résiduelle sous l'action du vent est de l'ordre de 0.01 radian (pente de 1%) dans le cas où l'imperfection de la poutre 1 de la travée 4 a été considérée. Une telle inclinaison était suffisante pour produire le glissement de la poutre vers le sud si l'appui subissait déjà un glissement longitudinal dû aux variations de température du béton. Dans la nuit du 17 au 18 juin, la baisse importante de température a probablement causé un tel glissement des appuis aux piles 2 à 4 et à la culée 5 et on peut penser qu'un glissement vers le sud était probable aux piles 2 à 4 et imminent à la culée 5 dans les heures qui ont suivi les vents du 17 juin.

Sur la base de ces résultats, il est permis de croire que l'effondrement a débuté par le mouvement vers le sud de la poutre 1 sous l'effet du vent. Cette poutre a alors exercé une force dans cette même direction sur les poutres adjacentes, provoquant un mouvement progressif des poutres 1 à 4 semblable à celui montré à la figure 5.1.



**Figure. 5.5** Vue de la travée 4 et de la culée 5 après l'effondrement  
(photo 280.2.20)

### 5.3.4 Remarques

Les récits des témoins, les observations sur le site (chap. 3 et figure 5.5) et les analyses indiquent que la rupture se serait produite selon le scénario décrit à la section précédente. De plus, un comportement similaire (rotation de poutres supportées sur des appuis à élastomère confiné) s'est produit en 1994 lors de la construction d'un pont d'étagement sur l'autoroute 30. Cet incident n'avait pas eu de conséquences puisque des correctifs avaient été apportés à temps, mais montre la vulnérabilité de ce système durant la construction.

On ne peut cependant pas affirmer avec certitude que l'effondrement se soit produit de cette façon. L'exemple ne visait qu'à démontrer que les poutres étaient dans une condition d'équilibre précaire et pouvaient se déplacer sous une sollicitation de faible amplitude. Ainsi, dans la région de Montréal, on conçoit les structures pour résister, avec un facteur de sécurité approprié, à des rafales de vent dont la vitesse est environ le double de la vitesse de rafale utilisée dans l'exemple (57 km/h). Dans de telles conditions, plusieurs combinaisons de facteurs étaient susceptibles de provoquer la chute des poutres de la structure.

## 6.0 CONCLUSIONS

Les informations recueillies sur le site après l'accident et les faits qui ont été portés à l'attention du comité indiquent que les poutres du pont du boulevard du Souvenir étaient dans un état d'équilibre précaire le 18 juin dernier. Cet équilibre pouvait être rompu par une sollicitation de faible amplitude due à l'effet de l'un, ou d'une combinaison, des facteurs suivants : vent, variation de température, turbulences ou vibrations dues au passage des véhicules ou imperfections géométriques, et c'est vraisemblablement ce qui s'est passé ce matin-là.

L'effondrement aurait débuté par une légère inclinaison vers le sud des poutres de rive du côté sud du pont, par rotation au niveau de leurs appareils d'appui. Ces poutres se sont aussi déplacées transversalement, dans la même direction, par glissement au niveau de leurs appareils d'appui, entraînant les poutres des trois rangées adjacentes. Le mouvement des poutres s'est poursuivi jusqu'à ce qu'elles heurtent la structure sous-jacente (pile ou culée) et les murs de garde aux culées. Les quatre poutres des travées 2 et 3 se sont finalement effondrées sur les voies sud et nord de l'autoroute 15.

Les appareils d'appui étaient conçus pour permettre avec un minimum de restriction la rotation et le glissement des poutres qu'ils supportaient. Le 18 juin, il n'y avait pas de système de contreventement adéquat pour empêcher de tels mouvements des poutres et assurer l'intégrité de la structure.

## **7.0 REMERCIEMENTS**

Les auteurs du rapport désirent remercier sincèrement tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude. En particulier, on doit souligner l'excellent travail de Jean Grenier, ing., de la Direction des structures au ministère des Transports qui s'occupait de la cueillette et de la gestion des documents ainsi que des contacts avec les différents intervenants. Nous remercions également les autorités policières de la ville de Laval pour leur collaboration continue dans la recherche d'information et les photographies, la compagnie Schokbéton pour l'assistance fournie pour les mesures effectuées sur les poutres entreposées à leur usine et la compagnie Goodco qui a fourni information technique et spécimens d'essai afin de déterminer le comportement des appareils d'appui. Finalement, les auteurs désirent souligner l'importante la contribution des personnels techniques du ministère des Transports du Québec, de l'École Polytechnique et de l'Université McGill à la prise des mesures et réalisation des diverses expertises.

## **8.0 RÉFÉRENCES**

ACNOR 1990. CAN/CSA-S6-88, Calcul des ponts-routes. Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario, 1990.

MTQ. 1997. Cahier des charges et devis généraux. Direction du soutien aux infrastructures, Ministère des Transports, Publications du Québec, Sainte-Foy, Québec.