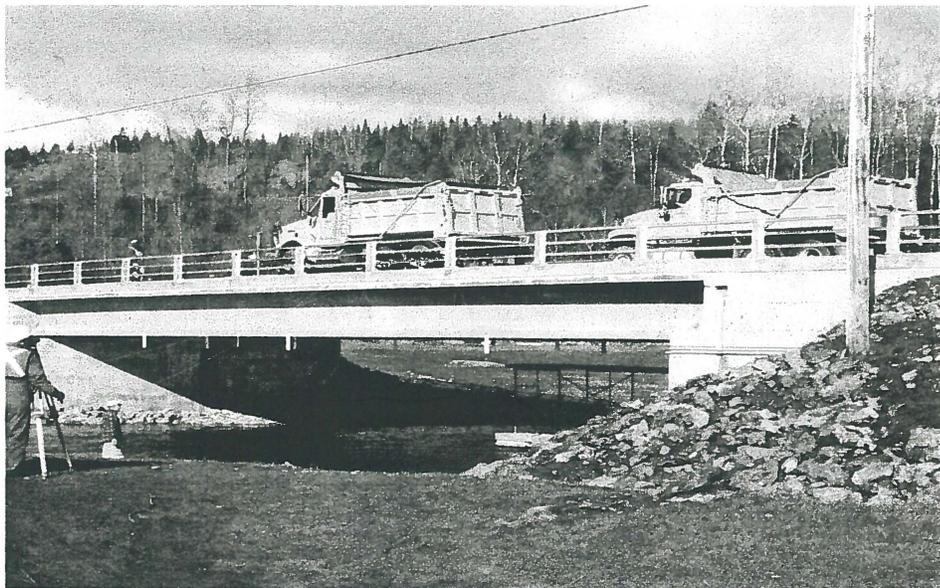


**CHAIRE DE RECHERCHE DU CRSNG SUR LE RENFORCEMENT EN MATÉRIAUX
COMPOSITES DE PRF POUR LES STRUCTURES EN BÉTON**
Contrat : 1220-00-BD08

**TABLIER DE PONT EN BÉTON ARMÉ À L'AIDE
DE MATÉRIAUX COMPOSITES –PHASE 3 : APPLICATION À
UN PONT DANS LA MUNICIPALITÉ WOTTON (QUÉBEC)**

Rapport final



Préparé par

B. Benmokrane, E. El-Salakawy, C. Kassem, et R. Masmoudi
ISIS-Sherbrooke, Département de Génie Civil, Faculté de Génie
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
Tél. : (819) 821-7758
Fax. : (819) 821-7974
E-mail: Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca



ISIS CANADA

The canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures
Le réseau canadien de Centres d'excellence sur les innovations en structures avec système de détection intégré

Décembre 2002 © Benmokrane et al.

Préambule

Ce projet de recherche, réalisé dans le cadre du contrat de recherche 1220-00-BD08 entre le ministère des Transports du Québec (Direction des structures) et l'Université de Sherbrooke (Département de génie civil), s'inscrit dans la continuité de 2 Phases précédentes (Phases 1 et 2) qui ont permis d'évaluer la performance mécanique et structurale de différents types d'armatures en matériaux composites de polymères renforcés de fibres (PRF) pour leur utilisation dans les dalles de tabliers de ponts en béton armé.

La Phase 1 du projet de recherche (contrat de recherche 1220-99-BD02) a traité des essais préliminaires effectués sur l'armature en matériaux composites à base de fibre de carbone Isorod, produite par la compagnie ADS Le Groupe Composites/Pultrall inc. (Thetford Mines, Québec), durant sa phase de développement et d'optimisation des propriétés mécaniques et structurales). Ces essais visaient à optimiser les propriétés mécaniques et structurales de la nouvelle barre en fibre de carbone en terme de taux optimum en fibre de carbone d'une part, et de la mise au point d'un nouveau procédé pour le revêtement extérieur de l'armature afin d'assurer une bonne adhérence au béton structural, d'autre part.. Les essais préliminaires effectués comprenaient des essais de traction uniaxiale, des essais de durabilité (armature sous tension en milieu alcalin), des essais d'adhérence armature/béton et des essais de flexion sur des poutres en béton armé. Les résultats préliminaires obtenus dans la Phase 1 du projet (Rapport technique '*Tabliers de ponts en béton armés avec de l'armature en fibre de carbone Isorod*' soumis au MTQ, mars 2000, Laoubi et al., 2000), ont été très satisfaisants, ce qui a permis la poursuite du projet de recherche.

Le rapport final (Phase 2 du contrat de recherche 1220-99-BD02) '*Renforcement de la dalle du tablier à l'aide de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone Isorod*' (Kassem et al., 2001) remis au ministère des Transports du Québec (Direction des structures) en juillet 2001, a porté sur les résultats d'essais effectués sur l'armature en fibre de carbone Isorod optimisée. Les résultats d'essais de traction, d'essais d'adhérence d'armature noyée dans le béton et d'essais de chargements statiques effectués sur des poutres en béton armé à l'aide d'armature en matériaux composites et avec de l'armature conventionnelle en acier ont été décrits et analysés.

Un complément d'information au rapport final (Phases 1 et 2) (El-Salakawy et al., 2002), remis au ministère des Transports du Québec (Direction des structures) en mars 2002, a porté sur les résultats d'essais de flexion à quatre points sous charge statique effectués sur six dalles unidirectionnelles (3100mm x 1000mm x 200mm) en béton. La configuration de l'armature des dalles (lit inférieur et lit supérieur) a été choisie pour simuler différentes configurations d'armature en matériaux composites et en acier pour les dalles de tablier de ponts en béton.

Les résultats d'essais effectués en laboratoire (Phases 1 et 2 du contrat de recherche 1220-99-BD02) ont montré la bonne performance de l'armature en matériaux composites pour son utilisation dans les tabliers de ponts en béton armé.

Ce projet de recherche (Phases 1 et 2 du contrat de recherche 1220-99-BD02) s'est donc poursuivi par la mise en application de cette armature dans un projet pilote comportant un pont en béton armé sur le terrain (Phase 3 du projet de recherche : contrat de recherche 1220-00-BD08). Le pont qui a été retenu pour ce projet par le ministère des Transports du Québec se situe sur le chemin du 6^e

Rang Ouest, au-dessus de la rivière Nicolet-Centre à Wotton (Québec). De concert avec les ingénieurs du ministère des Transports du Québec (Direction des Structures) et du consultant chargé du projet de reconstruction de ce pont (Le Groupe Teknika), ce projet pilote comprend l'utilisation de l'armature en matériaux composites dans une partie de la dalle et du chasse-roue du pont. Un premier rapport technique de la Phase 3 '*Tablier de pont en béton armé à l'aide de matériaux composites –phase 3 : Application à un pont dans la municipalité de Wotton (Québec)*' (Kassem et al., 2001), remis au ministère des Transports du Québec (Direction des structures) en septembre 2001, a porté sur l'avancement des travaux relativement à ce projet pilote ainsi que l'échéancier des travaux et études.

Le présent rapport (rapport final de la Phase 3; contrat de recherche 1220-00-BD08) présentera un récapitulatif des travaux de construction et d'instrumentation du pont ainsi que les résultats des essais statiques et dynamiques réalisées sur le pont à l'aide de camions calibrés. Les variations de déformations et de températures enregistrées durant les 15 premiers mois de service du pont (septembre 2001 à décembre 2002) y font aussi partie de ce rapport.

Mots clés : Dalle de tablier de pont, béton armé, armature en matériaux composites, polymères renforcés de fibres, fibres de carbone, fibres de verre, capteurs à fibre optique, instrumentation, essais de chargement statique et dynamique, déformation, contrainte, construction.

TABLE DES MATIÈRES

<u>1. INTRODUCTION</u>	1
<u>2. PROJET DE RECHERCHE SUR L'ARMATURE À BÉTON EN MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LES TABLIERS DE PONTS</u>	2
<u>3. OBJECTIFS DU PROJET</u>	4
<u>4. TRAVAUX DE RECONSTRUCTION DU PONT</u>	5
4.1 Localisation et détails géométriques du pont	5
4.2 Plans et devis de l'armature en matériaux composites de PRF	5
4.3 Instrumentation du pont	6
4.4 Travaux de reconstruction du pont	7
<u>5. ESSAIS STATIQUES ET DYNAMIQUES SUR LE PONT WOTTON</u>	8
5.1 Résultats des essais statiques	8
5.2 Résultats des essais dynamiques	9
5.3 Enregistrement des déformations et températures sous conditions de service et télé-surveillance à distance	9
<u>6. CONCLUSION</u>	11
<u>REMERCIEMENTS</u>	13
<u>RÉFÉRENCES</u>	14

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 1. Vue générale du pont avant sa reconstruction</u>	16
<u>Figure 2. Coupe transversale du tablier du pont</u>	16
<u>Figure 3. Vue en plan: armature du lit supérieur de la dalle</u>	16
<u>Figure 4. Vue en plan: armature du lit inférieur de la dalle</u>	16
<u>Figure 5. Instrumentation de l'armature du lit inférieur</u>	16
<u>Figure 6. Instrumentation de l'armature du lit supérieur</u>	16
<u>Figure 7. Capteurs de déformation noyés dans le béton, capteurs de déformation collés sur les poutres et capteurs de température à fibre optique</u>	16
<u>Figure 8. Capteurs de déformation noyés dans le béton et capteurs de déformation collés sur les poutres</u>	16
<u>Figure 9. Vue d'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone ISOROD instrumentée à l'aide de capteurs à fibres optique</u>	16
<u>Figure 10. Capteurs à fibre optique noyés dans le béton et sur l'armature</u>	16
<u>Figure 11. Capteurs à fibre optique collés sur la surface du béton de la poutre</u>	16
<u>Figure 12. Installation des poutres maîtresses</u>	16
<u>Figure 13. Installation des barres courbes ISOROD (fibre de verre)</u>	16
<u>Figure 14. Ferrailage complet de la dalle du tablier du pont prête pour le coulage du béton</u>	16
<u>Figure 15. Dalle du tablier du pont pendant le coulage du béton</u>	16
<u>Figure 16. Vue du pont après sa reconstruction en date du 16 novembre 2001</u>	16
<u>Figure 17. Dimensions et charges des essieux des deux camions utilisés lors des essais statiques et dynamiques</u>	16
<u>Figure 18. Essai de chargement statique sur le pont à l'aide des 2 camions (16 Novembre 2001)</u>	16
<u>Figure 19. Système d'acquisition de données durant les essais statiques et dynamiques</u>	16
<u>Figure 20. Mesure des déflexions à l'aide d'un théodolite durant les essais de chargement statique</u> 16	
<u>Figure 21. Identification des différents cheminements des camions durant les essais</u>	16
<u>Figure 22. Emplacements des camions pour l'essai statique et positions des accéléromètres pour l'essai dynamique</u>	16
<u>Figure 23. Vue d'un camion sur le pont lors d'un essai de chargement statique</u>	16
<u>Figure 24. Déformation maximum enregistrée dans le béton</u>	16

<u>Figure 25. Déformation en traction maximum dans les armatures du lit supérieur</u>	16
<u>Figure 26. Déformation en traction maximum dans les armatures du lit inférieur</u>	16
<u>Figure 27. Profil des déformations dans la poutre principale intermédiaire à mi-portée du pont</u>	16
<u>Figure 28. Positions pour les mesures des déflexion de la dalle et des poutres principales</u>	16
<u>Figure 29. Déformations maximum dans les armatures du lit inférieur enregistrées lors des essais dynamique (vitesse du camion 5 km/h)</u>	16
<u>Figure 30. Effet des vitesses de passage des camions sur le pont durant l'essai dynamique sur les déformations de l'armature en PRF de carbone du lit inférieur (cheminement B1)</u>	16
<u>Figure 31. Déformations enregistrées durant un cycle d'un an de service du pont</u>	16
<u>Figure 32. Déformations enregistrées à partir du bureau à l'université de Sherbrooke entre le 05 et le 11 Décembre 2002</u>	16
<u>Figure 33. Remise du Prix d'Innovation Technologique en Infrastructures</u>	16

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 1. Pont Wotton : Bordereau de l'armature en matériaux composites et en acier.....</u>	15
--	----

RÉSUMÉ

Un nouveau pont en béton a été construit dans la municipalité de Wotton (Wotton, Québec) durant l'été 2001 en utilisant des barres d'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone et de fibres de verre pour le renforcement de la dalle du tablier. Le pont a été instrumenté à l'aide de capteurs à fibre optique à des endroits spécifiques pour mesurer les déformations et les températures. Un système d'acquisition de données relié à un modem a été installé sur place pour permettre la télésurveillance à distance du comportement du pont en service. Aussi, le pont a été testé pour évaluer son comportement sous charges statiques et dynamiques en utilisant des camions à poids calibré comme spécifié dans le nouveau Code canadien pour le calcul des ponts routiers. Ce projet réalisé en collaboration avec le ministère des Transports du Québec (Direction des structures), dans le cadre du contrat de recherche 1220-00-BD08, permet l'évaluation sur le terrain et à long terme de différents types de barres en matériaux composites utilisées comme armature pour le renforcement de la dalle du tablier ainsi qu'une comparaison directe avec des armatures en acier sous les mêmes conditions environnementales et de service. Ce rapport final présente les détails ayant trait au design de la dalle de pont en béton armé de barres en matériaux composites, à l'instrumentation du pont (armature, béton, poutres-mâîtresses) et à la construction de la dalle du pont. Les résultats d'essais de chargement statique et dynamique effectués sur le pont (après sa construction et ouverture au trafic) ainsi que les variations de température et de déformations sous charge de service (plus d'un an) font aussi partie de rapport.

1. INTRODUCTION

Les tabliers de ponts en béton armé sont parmi les structures les plus exposées aux conditions favorisant la corrosion de l'armature d'acier, la fissuration du bitume et l'éclatement du béton. En Amérique du Nord et plus particulièrement au Québec, la corrosion occasionnée par l'épandage de sel de déglacage est le premier facteur réduisant la durée de vie de l'ouvrage et engendrant des coûts de réparation très grands.

Il faut donc trouver une solution durable pour prolonger la durée de vie des structures de béton armé et pour réduire les coûts de réparation sans cesse croissants. L'une des solutions envisagées pour éliminer le problème de corrosion est l'utilisation d'armatures en matériaux composites à base de polymères renforcés de fibres (PRF).

On fait maintenant de plus en plus appel à cette nouvelle technologie des armatures en matériaux composites constitués de polymères renforcés de fibres pour les structures en béton armé dont les tabliers de ponts (Benmokrane and Rahman, 1998; Japan Concrete Institute, 1997; Neale et Labossière, 1992; Saadatmanesh H., et Ehsani, 1996). En plus d'être très résistantes à la corrosion, les armatures en matériaux composites présentent d'autres avantages par rapport à l'armature conventionnelle en acier en termes de légèreté, de résistance mécanique et de neutralité électromagnétique. L'armature à béton en matériaux composites peut donc constituer une solution très avantageuse pour les tabliers de ponts (dalles et poutres) (GangaRao et al., 1997; Rizkalla et al., 1998; Rizkalla et Tadros, 1994; Hassan et al., 1999). Ces nouvelles armatures à béton font maintenant l'objet d'une nouvelle Section (Section 16) dans le nouveau Code canadien pour le calcul de ponts routiers (CAN/CSA-S6-00, 2000).

À la suite du vieillissement et de la dégradation importante du pont situé sur le chemin du 6^e Rang Ouest, au-dessus de la rivière Nicolet-Centre à Wotton (Québec), la municipalité de Wotton a entrepris en juillet 2001, en collaboration avec le ministère des Transports du Québec, les travaux de reconstruction complète du pont. Ces travaux consistaient à détruire l'ancien pont et à reconstruire un nouveau pont en béton armé. Dans ce contexte, l'implantation de la technologie de l'armature à béton en matériaux composites combinée à celle des capteurs à fibres optiques a été retenue. Cette utilisation des deux technologies permet de concevoir des structures non-corrosives, durables et dites intelligentes.

2. PROJET DE RECHERCHE SUR L'ARMATURE À BÉTON EN MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LES TABLIERS DE PONTS

Ce projet de recherche, réalisé dans le cadre du contrat de recherche 1220-00-BD08 entre le ministère des Transports du Québec (Direction des structures) et l'Université de Sherbrooke (Département de génie civil), s'inscrit dans la continuité de 2 Phases précédentes (Phases 1 et 2) qui ont permis d'évaluer la performance mécanique et structurale de différents types d'armatures en matériaux composites de polymères renforcés de fibres (PRF) pour leur utilisation dans les dalles de tabliers de ponts en béton armé.

La Phase 1 du projet de recherche (contrat de recherche 1220-99-BD02) a traité des essais préliminaires effectués sur l'armature en matériaux composites à base de fibre de carbone Isorod, produite par la compagnie ADS Le Groupe Composites/Pultrall inc. (Thetford Mines, Québec), durant sa phase de développement et d'optimisation des propriétés mécaniques et structurales. Ces essais visaient à optimiser les propriétés mécaniques et structurales de la nouvelle barre en fibre de carbone en terme de taux optimum en fibre de carbone d'une part, et de la mise au point d'un nouveau procédé pour le revêtement extérieur de l'armature afin d'assurer une bonne adhérence au béton structural, d'autre part.. Les essais préliminaires effectués comprenaient des essais de traction uniaxiale, des essais de durabilité (armature sous tension en milieu alcalin), des essais d'adhérence armature/béton et des essais de flexion sur des poutres en béton armé. Les résultats préliminaires obtenus dans la Phase 1 du projet (Rapport technique '*Tabliers de ponts en béton armés avec de l'armature en fibre de carbone Isorod*' soumis au MTQ, mars 2000, Laoubi et al., 2000), ont été très satisfaisants, ce qui a permis la poursuite du projet de recherche.

Le rapport final (Phase 2 du contrat de recherche 1220-99-BD02) '*Renforcement de la dalle du tablier à l'aide de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone Isorod*' (Kassem et al., 2001 (a)) remis au ministère des Transports du Québec (Direction des structures) en juillet 2001, a porté sur les résultats d'essais effectués sur l'armature en fibre de carbone Isorod optimisée. Les résultats d'essais de traction, d'essais d'adhérence d'armature noyée dans le béton et d'essais de chargements statiques effectués sur des poutres en béton armé à l'aide d'armature en matériaux composites et avec de l'armature conventionnelle en acier ont été décrits et analysés.

Un complément d'information au rapport final (Phases 1 et 2) (El-Salakawy et al., 2002), remis au ministère des Transports du Québec (Direction des structures) en mars 2002, a porté sur les résultats d'essais de flexion à quatre points sous charge statique effectués sur six dalles unidirectionnelles (3100mm x 1000mm x 200mm) en béton. La configuration de l'armature des dalles (lit inférieur et lit supérieur) a été choisie pour simuler différentes configurations d'armature en matériaux composites et en acier pour les dalles de tablier de ponts en béton.

Les résultats d'essais effectués en laboratoire (Phases 1 et 2 du contrat de recherche 1220-99-BD02) ont montré la bonne performance de l'armature en matériaux composites pour son utilisation dans les tabliers de ponts en béton armé.

Ce projet de recherche (Phases 1 et 2 du contrat de recherche 1220-99-BD02) s'est donc poursuivi par la mise en application de cette armature dans un projet pilote comportant un pont en béton armé

sur le terrain (Phase 3 du projet de recherche : contrat de recherche 1220-00-BD08). Le pont qui a été retenu pour ce projet par le ministère des Transports du Québec se situe sur le chemin du 6^e Rang Ouest, au-dessus de la rivière Nicolet-Centre à Wotton (Québec). De concert avec les ingénieurs du ministère des Transports du Québec (Direction des Structures) et du consultant chargé du projet de reconstruction de ce pont (Le Groupe Teknika), ce projet pilote comprend l'utilisation de l'armature en matériaux composites dans une partie de la dalle et du chasse-roue du pont. Un premier rapport technique de la Phase 3 '*Tablier de pont en béton armé à l'aide de matériaux composites –phase 3 : Application à un pont dans la municipalité de Wotton (Québec)*' (Kassem et al., 2001 (b)), remis au ministère des Transports du Québec (Direction des structures) en septembre 2001, a porté sur l'avancement des travaux relativement à ce projet pilote ainsi que l'échéancier des travaux et études.

Le présent rapport (rapport final de la Phase 3; contrat de recherche 1220-00-BD08) présentera un récapitulatif des travaux de construction et d'instrumentation du pont ainsi que les résultats des essais statiques et dynamiques réalisées sur le pont à l'aide de camions calibrés. Les variations de déformations et de températures enregistrées durant les 15 premiers mois de service du pont (septembre 2001 à décembre 2002) y font aussi partie de ce rapport.

3. OBJECTIFS DU PROJET

Les objectifs de ce projet de recherche sont :

- 1) Optimiser les méthodes de design et d'installation de l'armature en matériaux composites dans les tabliers de ponts
- 2) Évaluer le comportement à court et à long terme de l'armature en PRF sous différentes conditions de charge de service et différentes conditions environnementales et effectuer une comparaison directe avec les armatures en acier
- 3) Définir une stratégie d'instrumentation à l'aide de capteurs à fibre optique pour les futurs projets de construction de ponts
- 4) Améliorer et valider les méthodes de design et les codes de calcul tel que le nouveau Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00, 2000)
- 5) Augmenter la confiance des ingénieurs, des autorités gouvernementales et des utilisateurs pour employer ces nouvelles technologies, qui présentent une solution potentielle aux problèmes de corrosion des structures en béton armé.

Le projet de recherche comprend les travaux suivants :

- Essais en laboratoire complémentaires à ceux de la Phase 2
- Conception, calcul et travaux de reconstruction du pont
- Instrumentation et essais sur le pont à l'aide de camions à poids calibré, suivi et analyse des données recueillies.

4. TRAVAUX DE RECONSTRUCTION DU PONT

Notre mandat dans le cadre de ces travaux de reconstruction du pont consistait à:

1. Établir la partie des plans et devis qui concerne le projet de recherche (partie de la dalle en béton armé à l'aide de l'armature en matériaux composites). Cette étape du projet a été réalisée en collaboration avec les ingénieurs du ministère des Transports du Québec et du consultant chargé du projet de reconstruction du pont (Le Groupe Teknika inc., Sherbrooke/Victoriaville, Québec)
2. Diriger la mise en place de l'armature en matériaux composites selon les plans et devis de concert avec l'entrepreneur chargé des travaux de reconstruction du pont (Les Coffrages Carmel inc., Deauville, Québec)
3. S'occuper du volet instrumentation durant la construction de la dalle du pont, pour le suivi du comportement à court et à long termes, et réaliser, en collaboration avec les ingénieurs du ministère, les essais de chargement à l'aide de camions.

4.1 Localisation et détails géométriques du pont

Le pont faisant l'objet de ce projet se situe sur le chemin du 6^e Rang Ouest, au-dessus de la rivière Nicolet-Centre à Wotton (Québec). La figure 1 montre une vue générale du pont avant sa reconstruction. L'ancien pont, datant des années 50, était constitué d'une charpente métallique et d'un tablier en planches de bois et mesurait à peine 4,9 mètres de large.

Le pont projeté (pont portant le code P-10749) pour la reconstruction est un pont biais à une seule travée d'une longueur totale de 30,60 m et d'une largeur de 8,90 m. La dalle du tablier a une épaisseur de 200 mm et repose sur quatre poutres en béton précontraint AASHTO de type IV avec un espacement entre poutres de 2,3 m et un porte à faux de 1 m de chaque côté du tablier. La figure 2 montre une coupe transversale du pont projeté.

4.2 Plans et devis de l'armature en matériaux composites de PRF

L'armature en matériaux composites a été utilisée dans la moitié de la dalle du pont, pour la nappe supérieure, et sur une longueur de 5 m pour la nappe inférieure. De l'armature Isorod à base de fibre de verre (No16 - 15.9 mm) a été utilisée dans toutes les directions excepté dans la direction transversale de la nappe inférieure où de l'armature Isorod à base de fibre de carbone (No10 - 9.5 mm) a été utilisée. Le reste de la dalle du tablier du pont a été renforcée avec des barres en acier de 15M.

Le design de la partie de la dalle du tablier du pont armé à l'aide de l'armature en matériaux composites a été fait conformément à la Clause 16.8.7 du nouveau Code canadien pour le calcul des ponts routiers (CAN/CSA-S6-00, 2000). Ce design a abouti à la configuration d'armature en matériaux composites suivante :

Nappe supérieure

Armature en fibres de verre Isorod No 15 @ 150 mm dans le sens transversal

Armature en fibres de verre Isorod No 15 @ 165 mm dans le sens longitudinal

Nappe inférieure

3 barres d'armature en fibres de carbone Isorod No 10 pré-assemblées @ 90 mm dans le sens transversal

Armature en fibres de verre Isorod No 15 @ 165 mm dans le sens longitudinal.

Plus de détails sur cette disposition de l'armature de la dalle du pont sont donnés dans les figures 3 et 4. Le bordereau de l'armature en matériaux composites et en acier est donné dans le Tableau 1.

Les détails de calcul de la partie de la dalle du pont armé à l'aide de l'armature en matériaux composites Isorod ainsi que les plans et le bordereau d'armature ont été envoyés par courrier électronique durant le mois d'avril 2001 au ministère des Transports du Québec (Direction des structures) et au consultant chargé du projet (Le GroupeTeknika inc., Sherbrooke) pour la préparation de l'Appel d'Offres pour la reconstruction du pont.

Il est à noter que de l'armature droite et courbée en matériaux composites à base de fibre de verre Isorod (No16 - 15.9 mm) a été aussi utilisée pour le renforcement du béton du chasse-roue sur une longueur correspondant à la moitié du pont; l'autre moitié du chasse-roue a été armée avec de l'armature conventionnelle en acier.

4.3 Instrumentation du pont

L'instrumentation retenue dans le cadre de ce projet permet de déterminer l'influence précise des différentes sollicitations que pourra subir le pont sur une longue période de temps. Quel que soit le type de sollicitation que le pont subira: thermique, mécanique, impact, vibration, etc., les instruments de mesure utilisés permettront d'évaluer l'effet spécifique de chaque type de sollicitation et d'enregistrer des données. Par ailleurs, l'instrumentation retenue permettra d'établir une comparaison directe entre le comportement de l'armature en matériaux composites à celui de l'armature en acier sous l'effet des efforts du trafic et des sollicitations environnementales.

La stratégie d'instrumentation retenue est montrée dans les figures 5 à 8. Ces figures illustrent les positions des capteurs à fibre optique utilisés dans le cadre de ce projet. Comme on peut le voir, cette instrumentation comprend:

- 30 capteurs de déformation à fibre optique pour l'instrumentation de l'armature en matériaux composites et de l'armature en acier (voir figure 9)
- 6 capteurs de déformation à fibre optique noyés dans le béton (voir figure 10)
- 12 capteurs de déformation à fibre optique collés sur les poutres (voir figure 11)
- 2 capteurs de température à fibre optique noyés dans le béton.

Tous les capteurs à fibre optique utilisés dans ce projet sont de Type Fabry-Perot commercialisés par la compagnie Roctest Ltée (Saint-Lambert, Québec). Un système d'acquisition de données (DMI 32 canaux), équipé d'un modem téléphonique, a été installé à même le pont pour l'enregistrement des données et la surveillance du comportement de l'ouvrage à distance. Il est à noter que les instruments de mesure retenus dans ce projet sont analogues à ceux utilisés précédemment lors de la reconstruction du pont Joffre (Sherbrooke) en 1997 (Benmokrane et al., 2001).

4.4 Travaux de reconstruction du pont

Une réunion de démarrage du projet avec les différents intervenants a été effectuée le 4 juillet 2001 dans les locaux de la Municipalité de Wotton.. L'entrepreneur chargé du projet (Les Coffrages Carmel Inc.) a débuté les travaux de reconstruction du pont le 29 juillet 2001. La durée de construction était de 12 semaines. Les figures 12 à 15 montrent les principales étapes de reconstruction du tablier du pont. On peut voir sur ces figures la pose des armatures en matériaux composites sur la dalle et sur le chasse roue et le coulage final du béton. Un béton normal (Type V MTQ) avec une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 37 MPa a été utilisé pour la dalle du tablier du pont (essais de compression sur cylindres de béton effectués à l'Université de Sherbrooke). Des chaises en plastique ont été espacées à 1.0 m de distance dans les deux directions pour soutenir les barres en matériaux composites et pour maintenir un enrobage de 35 mm pour la partie inférieure et de 65 mm pour la partie supérieure de la dalle. La construction du pont a commencé en fin de juillet et a pris fin à la mi-octobre 2001. La dalle du tablier du pont a nécessité environ 55 m³ de béton. Une photo du nouveau pont est illustrée à la figure 16.

5. ESSAIS STATIQUES ET DYNAMIQUES SUR LE PONT WOTTON

Le pont a été testé pour évaluer son comportement sous charges statiques et dynamiques en utilisant des camions à poids calibré (camion à trois essieux ayant 102 KN sur l'essieu à l'avant et approximativement 116 KN pour chacun des essieux à l'arrière, voir figure 17) comme spécifié dans le nouveau Code canadien pour le calcul des ponts routiers. Les essais de chargement sur le pont ont été effectués le 16 novembre 2001 soit à environ un mois après l'ouverture du pont au trafic de véhicules. Les essais statiques ont été effectués à l'aide de deux camions (voir la figure 18). Un système d'acquisition de données à haute vitesse (1000 Hz) a été installé sous le pont pour enregistrer les données des capteurs à fibre optique pendant les essais comme indiqué sur la figure 19. Aussi pendant les essais statiques et dynamiques, les déflexions de la dalle et des poutres ont été mesurées en utilisant un système de règles et de théodolites (voir figure 20).

Trois différents cheminement dans chaque direction (six cheminements au total) ont été marqués sur le pont comme représenté sur les figures 21 et 22. Neuf stations (arrêts de camion) ont été également marquées le long de la direction longitudinale du pont à des emplacements donnant des déformations maximum dans les barres et les sections de béton instrumentées.

La première étape de l'essai statique a été effectuée à l'aide d'un seul camion (voir figure 23) pour un total de 54 (9 stations \times 6 cheminements) lectures enregistrées pour chaque jauge. Dans la deuxième étape de l'essai, deux camions ont été utilisés simultanément. Seulement deux cheminements ont été utilisés, A-A1 et C1-C1 de sorte à avoir un total de 18 (9 stations \times 2 cheminements) lectures enregistrées pour chaque jauge.

5.1 Résultats des essais statiques

Les figures 24 à 27 montrent les déformations maximum mesurées dans les barres en matériaux composites et les barres en acier, ainsi que dans le béton par rapport à la position du camion le long du pont. Dans ces figures, les valeurs maximum de déformations ne coïncident pas avec la valeur de l'abscisse zéro. Cela provient de l'excentrement du centre de gravité des trois essieux par rapport à l'emplacement de la jauge de déformation. Les valeurs des déformations dépendent du cas de chargement, à savoir la position du camion et le cheminement. Pour chaque graphique, c'est le cheminement qui donne les déformations maximum qui est considéré.

Sur la figure 24, on peut voir qu'une variation de la déformation de $12 \mu\epsilon$ seulement a été mesurée dans le béton quand le camion se déplace sur le pont. Il est à noter que les jauges noyées dans le béton de la dalle ont été placées, entre deux barres, à 65 mm pour la nappe supérieure et à 35 mm pour la nappe inférieure. En utilisant la théorie de la flexion simple, on peut montrer que les déformations en traction dans le béton à la surface supérieure et à la surface inférieure atteignent un maximum de 10 et $25 \mu\epsilon$, respectivement. Ces valeurs de déformations sur les surfaces du béton de la dalle du tablier sont bien au-dessous de la déformation à la fissuration du béton $\epsilon_{fis} = 125 \mu\epsilon$ (pour $f'_c = 35 \text{ MPa}$ and $E_c = 28 \text{ GPa}$).

Sur les figures 25 et 26, on peut voir des variations de la déformation de 4 et $15 \mu\epsilon$ seulement ont été mesurées dans les barres de la nappe supérieure à base de fibre de verre de la nappe supérieure et

dans barres de la nappe inférieure à base de fibre de carbone de la nappe inférieure, respectivement, quand le camion se déplace sur le pont. Ces valeurs représentent moins de 1% de la déformation ultime des matériaux.

La figure 27 montre la distribution des déformations le long de la hauteur de la poutre à la mi portée due à la charge du camion pour différents cheminements. La déformation en traction maximum dans le béton correspond à $45 \mu\epsilon$ approximativement.

Pendant les essais statiques, les déflexions de la dalle et des poutres ont été aussi mesurées aux endroits indiqués à la figure 28. Les déflexions maximum enregistrées pour la dalle et des poutres du pont étaient inférieures à 5 mm et 10 mm, respectivement.

5.2 Résultats des essais dynamiques

L'essai dynamique a été effectué en utilisant les deux camions décrits dans l'essai statique. Les camions roulaient sur le pont en empruntant les trois cheminements dans les deux directions du ponts (figure 21). Les essais dynamiques ont été effectués à quatre vitesses différentes, soit 5, 30, 50, et 70 km/h. À chaque vitesse, les 2 camions ont traversé le pont avec une durée de 30 secondes environ. Pour tous les capteurs à fibre optique, le système d'acquisition de données a été ajusté à un taux de 1000 lectures par seconde. Tandis que, pour les accéléromètres, le système d'acquisition de données était ajusté à un taux de 500 lectures par seconde.

Les valeurs maximum enregistrées des déformations dans les armatures en PRF étaient du même ordre de grandeur que celles enregistrées lors des essais statiques. Les figures 29 (a) et 29 (b) montrent les déformations maximum mesurées sur l'armature du lit inférieur (PRF et acier, respectivement) dues au passage des camions sur le cheminement A1 à une vitesse de 5 km/h. On peut voir que la variation de déformation maximum était de $15 \mu\epsilon$ pour l'armature en PRF de la nappe inférieure tandis qu'elle était de $20 \mu\epsilon$ pour l'armature en acier. La figure 30 présente la variation des déformations de l'armature en PRF (carbone) de la nappe inférieure pour des vitesses de passage des camions de 5 km/h, 30 km/h et 50 km/h pour le cheminement B1. On peut voir que la variation des déformation est plus importante dans le cas du passage des camions à la vitesse réduite de 5 km/h.

5.3 Enregistrement des déformations et températures sous conditions de service et télé-surveillance à distance

Après la réalisation des essais statiques et dynamiques sur le pont, un système d'acquisition de données à 32 canaux pour capteurs à fibre (DMI-32), équipé d'un modem et d'une ligne téléphonique, été installé dans une boîte étanche en fibres de verre dans un emplacement protégé sous le pont (culée de la rive gauche). En utilisant le logiciel d'ordinateur Fiso Commander, fourni par la compagnie Roctest Ltée, notre personnel de recherche peut recueillir les lectures des capteurs à fibre optique périodiquement par l'entremise de la ligne téléphonique à partir de nos bureaux situés à l'Université de Sherbrooke, via un ordinateur.

La figure 31 montre les déformations et les températures mesurées dans le béton de la dalle et les barres d'armature en PRF depuis septembre 2001 à octobre 2002. On peut voir que les déformations dans les barres suivent les mêmes variations que celles de la température. On note une contraction

des déformations en Hiver jusqu'au mois de février où on a enregistré la plus basse température du cycle d'année de mesure (-14°C). La variation absolue des déformations mesurées sur un cycle d'un an (déformation négative moins déformation positive) sont autour de 500 micro-déformations. Ces déformations sont fondamentalement dues aux changements de température (-14 °C à +27 °C). Des analyses plus poussées peuvent être faites pour dissocier les effets de température de ceux, par exemple, du retrait et du fluage du béton.

La figure 32 montre la variation des déformations de l'armature en acier et de l'armature en PRF de la nappe inférieure enregistrée en continu entre le 05 et le 11 Décembre 2002. On peut voir que les déformations suivent la même variation que la température. La variation des déformations pour les armatures en acier sont légèrement supérieures à celles enregistrées pour les armatures en PRF (carbone).

✓ 6. CONCLUSION

Le projet du pont Wotton situé sur le chemin du 6^e Rang Ouest, au-dessus de la rivière Nicolet-Centre à Wotton, constitue une réalisation unique au monde utilisant la technologie des barres d'armature en matériaux composites à base de fibre de carbone et de fibre de verre, alliée à l'emploi de capteurs à fibre optique et à une télé-surveillance à distance. Cette réalisation fournira à tous les partenaires impliqués des données précieuses sur le comportement et la performance, non-seulement sur la technologie des matériaux composites comme armature à béton, mais aussi sur la technologie d'instrumentation des capteurs à fibre optique. L'avantage économique des armatures en matériaux composites en PRF se situe surtout à long terme. En effet l'utilisation de cette technologie permet de réduire les coûts de maintenance de la structure et aussi d'allonger la durée de service comparativement aux structures en béton armé d'acier. Actuellement les études démontrent que la durée de service peut passer d'environ 30 ans à plus de 75 ans. De plus, le coût initial d'une structure utilisant ce type d'armatures ne se trouve fortement augmenté comparativement à celui d'une même structure en béton armé d'acier. En effet, le coût de l'armature ne représente qu'une infime partie du coût globale d'un ouvrage en béton armé (en général inférieur à 5%). Par ailleurs, le prix de l'armature en matériaux composites à base de fibre de verre est très comparable à celui de l'armature en acier galvanisé ou revêtu d'époxyde et en plus leur manutention et installation se trouvent facilités à cause de leur poids léger.

Aussi, les données et l'expertise de ce projet permettront entre autres à toutes les municipalités du Québec et hors Québec et autres organismes d'envisager l'emploi d'armature en matériaux composites non-corrosives et dont la durée de vie est très élevée dans des ouvrages de béton armé comme les ponts, viaducs, garages de stationnement, etc.

La réalisation de ce projet de grande envergure a permis de tirer les conclusions suivantes:

✓ Design et travaux de reconstruction du pont

- Sur la base des résultats obtenus, le design établi à partir d'une équivalence acier-PRF selon le nouveau Code canadien des ponts (CAN/CSA-S6-00, 2000) qui a été retenu pour ce projet s'avère être conservateur. Une meilleure optimisation du Design pourrait être considérée pour les projets futurs.
- Aucun problème de manutention ou de placement relié à l'utilisation des barres en PRF durant la construction du pont n'a été signalé.

✓ Essais statiques et dynamiques et télésurveillance à distance

- La performance des barres en PRF est très similaire à celle des barres en acier.
- Les déformations en traction dans le béton sur la surface supérieure et inférieure atteignent un maximum de 10 et 25 $\mu\epsilon$, respectivement. Ces valeurs sont bien au-dessous de la déformation à la fissuration du béton qui est de 100 à 125 $\mu\epsilon$ pour un béton normal avec une résistance à la compression de 30 à 35 MPa ($E_c = 28$ GPa).

- Durant les essais statiques, la déformation en traction maximum dans les barres en PRF était de 15 $\mu\epsilon$. Cette valeur représente moins de 1% de la déformation ultime du matériau.
- Durant les essais dynamiques la déformation en traction maximum dans les barres en PRF était de 15 $\mu\epsilon$ et de 20 $\mu\epsilon$ pour les barres en acier.
- La déflexion du tablier du pont (dalle et poutres) sous charge statique de camions demeure faible et inférieur à 10 mm.
- Sous des conditions réelles de service, les déformations dans les barres d'armature en PRF et d'acier, dues aux changements de température, étaient 25 à 33 fois plus élevées que celles occasionnées par les charges de camions lors des essais de chargement statique. Ces déformations sont de l'ordre de 500 micro-déformation (variation été-hiver), ce qui représentent seulement 3 à 4% de la déformation ultime du matériau de PRF.
- L'instrumentation du pont à l'aide de capteurs à fibre optique reliés à un acquiiseur de données muni d'un modem permettra de suivre le comportement du pont à distance sur une longue période de temps et de comparer l'armature en matériaux composites à celle en acier sous des conditions réelles de service. Ce système de télésurveillance a permis d'enregistrer les lectures des jauges à partir du bureau à l'Université de Sherbrooke sans aucun problème. Les données recueillies seront d'une grande utilité pour enrichir nos connaissances sur le comportement des ponts.

À la suite de l'application réussie de ces technologies dans ce pont situé dans une municipalité rurale, deux autres ponts de grande envergure viennent d'être complétés (été 2002) en faisant appel à ces nouveaux produits et matériaux développés à l'Université de Sherbrooke. Il s'agit d'un pont sur l'Autoroute 55 Nord près de Magog (Québec) et d'un pont dans l'état du Vermont (USA). Ces deux ponts ont été très documentés dans les médias nord-américains à la suite de leur construction (automne 2002).

Enfin, la Municipalité de Wotton et les différents intervenants dans ce projet de pont ont gagné le Prix d'Innovation Technologique en Infrastructures (novembre 2002) décerné par le ministère des Affaires Municipales et de la Métropole. Ce Prix a été remis à tous les intervenants dans le projet (Municipalité de Wotton, Ministère des Transports du Québec (Direction des structures), Université de Sherbrooke (Groupe de recherche de la Chaire du CRSNG sur les renforcements en matériaux composites pour les structures en béton), Teknika Inc., Les Coffrages Carmel Inc., ADS Le Groupe Composites/Pultrall, Inc. et Roctest Ltée, lors du Gala d'Excellence du 26 novembre 2002 organisé par le CERIU (Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines) – Voir Photo de la figure 33.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le ministère des Transports du Québec (Direction des Structures), la municipalité de Wotton, Teknika Inc. (consultant chargé du projet), pour leur collaboration dans ce projet. Nos remerciements vont également à Pultrall Inc (fournisseur de l'armature en matériaux composites ISOROD), Roctest Ltée (fournisseur des capteurs à fibre optique) et Les Coffrages Carmel Inc. (entrepreneur). Les auteurs remercient aussi le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le réseau de Centres d'excellence sur les innovations en structures avec systèmes de détection intégrés (ISIS-Canada) et l'Université de Sherbrooke (Programme de centres de recherche d'excellence) pour leur financier de ce projet de recherche.

RÉFÉRENCES

- Benmokrane, B., and El-Salakawy, E., eds. (2002) Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, *Proceeding of the second International Conference*, Montreal, Québec, Canada, 715p.
- Benmokrane, B., and Rahman, H., eds. (1998) Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, *Proceeding of the First International Conference*, Sherbrooke, Québec, Canada, 692p.
- Benmokrane, B., Rahman, H., Mukhopadhyaya, R., Masmoudi, R., Zhang, B., Lord, I., and Tadros, G. (2001) Fiber-Optic Sensors Monitor FR-Reinforced Bridge, *ACI International*, American Concrete Institute, Vol. 23, No.6, Detroit, USA, pp. 33-38.
- CAN/CSA-S6-00 (2000) Canadian Highway Bridge Design Code, *Canadian Standard Association*, Rexdale, Toronto, Ontario, Canada, 734p.
- El-Salakawy, E., Kassem, C., Masmoudi, R., et. Benmokrane, B. ``Renforcement de la dalle du tablier à l'aide de l'armature en Matériaux composites à base de fibres de carbone Isorod``, Complément d'information au Rapport final (phases 1 et 2) soumis au ministère des transports du Québec, Mars 2002, contrat 1220-99-BD02, 26p
- GangaRao, H.V.S., Thippesway, H.K., Kumar, S. V., and Franco, J.M. (1997) Design, Construction and Monitoring of the First FRP Reinforced Concrete Bridge Deck in the United States, *Proc.s of the third Int. Symp. (FRPRCS 3) on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, Vol. 1, pp. 647-656.
- Hassan T., Rizkalla S., Abdelrahman A., and Tadros G., " Design Recommendations for Bridge Deck Slabs Reinforced by Fiber Reinforced Polymers", Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-4, ACI-SP-188, 1999, Baltimore, USA, pp.313-323.
- Japan Concrete Institute, ed. (1997) Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, *Proc. of the third Int. Symp. (FRPRCS-3)*, Sapporo Japan, Vol. 1, 728p.
- Kassem, C., Laoubi, K., Tighiouart, B., Masmoudi, R. et Benmokrane, B. (a) ``Renforcement de la dalle du tablier à l'aide de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone Isorod``, Rapport final (phases 1 et 2) soumis au ministère des Transports du Québec, juillet 2001, Contrat 1220-99-BD02, 36p
- Kassem, C., El-Salakawy, E., Masmoudi, R. et Benmokrane, B. (b) ``Tablier de pont en béton armé à l'aide de matériaux composites - phase 3 : application à un pont dans la municipalité de Wotton (Québec)``, Rapport d'étape (phases 3) soumis au ministère des transports du Québec, Septembre 2001, contrat 1220-99-BD02, 24p
- Laoubi, K., Lord, I., Robert, J.F., Masmoudi, R., Benmokrane, B. (2000) Tabliers de ponts en béton armés avec de l'armature en fibre de carbone Isorod, *Rapport technique (Phase 1)*, soumis au ministère des Transports du Québec, Mars, 33p.
- Rizkalla, S., Shehata, E., and Abdelrahman, A. (1998) Design and Construction of a Highway Bridge Reinforced for Shear and Prestressed by CFRP, *American Concrete Institute Seminar on Field Applications of FRP Reinforcement to Concrete: Part I and Part II*, Atlanta, Georgia, 5p.
- Rizkalla, S., and Tadros, G. (1994) First Smart Bridge in Canada, *ACI Concrete International*, Vol. 16., No. 6, June 1994, pp. 42-44.
- Saadatmanesh H., et Ehsani M.R., (eds.) ``International Conference on Composites for Infrastructure``, Proceedings ICCI, 1996, Tucson, Arizona, USA.

Tableau 1. Pont Wotton : Bordereau de l'armature en matériaux composites et en acier

Section d'armature	Identif	Type	Longueur (mm)	No	Quantité
$A_{composite} = 1200 \text{ mm}^2/\text{m}$ 15@ 165 mm $\rho = 0.60\%$	D1A	Isorod (Fibres de Verre)	15475	15	54
Acier 15M@ 225 mm	D1	Acier	15475	15	40
$A_{composite} = 1345 \text{ mm}^2/\text{m}$ 15@150 mm $\rho = 0.67\%$	D2A	Isorod (Fibres de Verre)	10100	15	102
Acier 15M@ 150 mm	D2	Acier	10100	15	102
Acier 15M@ 225mm	D3	Acier	18290	15	40
Acier 15M@ 225mm	D3B	Acier	6260	15	40
Acier 15M @ 150mm	D4	Acier	10100	15	172
$A_{composite} = 2320 \text{ mm}^2/\text{m}$ 3 No 10@ 90 mm $\rho = 1,16\%$	D4A	Isorod (Fibres de Carbone)	10100	10	56
$A_{composite} = 1200 \text{ mm}^2/\text{m}$ 15@ 165 mm $\rho = 0.60\%$	D3A	Isorod (Fibres de Verre)	7000	15	54
No 15 entre chaque D2A	D7	Isorod (Fibres de Verre)	3200	15	202
No 15 @ 400 mm	GR2A	Isorod (Fibres de Verre)	1375	15	78
No 15 @ 400 mm	GR2	Acier	1375	15	78
No 15	GR1A	Isorod (Fibres de Verre)	15550	15	4
No 15	GR1	Acier	15550	15	4

Remarque : Les rapports de renforcement sont calculés a partir de la section brute (b x H)

D1, D1A : Armature de la nappe supérieure dans la direction longitudinale

D2, D2A : Armatures de la nappe supérieure dans la direction transversale

D3, D3B : Armatures de la nappe inférieure dans la direction longitudinale

D3A : Armatures en fibres de verre de la nappe inférieure dans la direction longitudinale sur une portion de 5 m

D4 : Armatures en acier de la nappe inférieure dans la direction transversale

D4A : Armatures en fibres de carbone de la nappe inférieure dans la direction transversale sur une portion de 5 m

D7 : Armature en fibres de verre de la nappe supérieure dans la direction transversale disposée sur le porte-à-faux entre chaque D2A

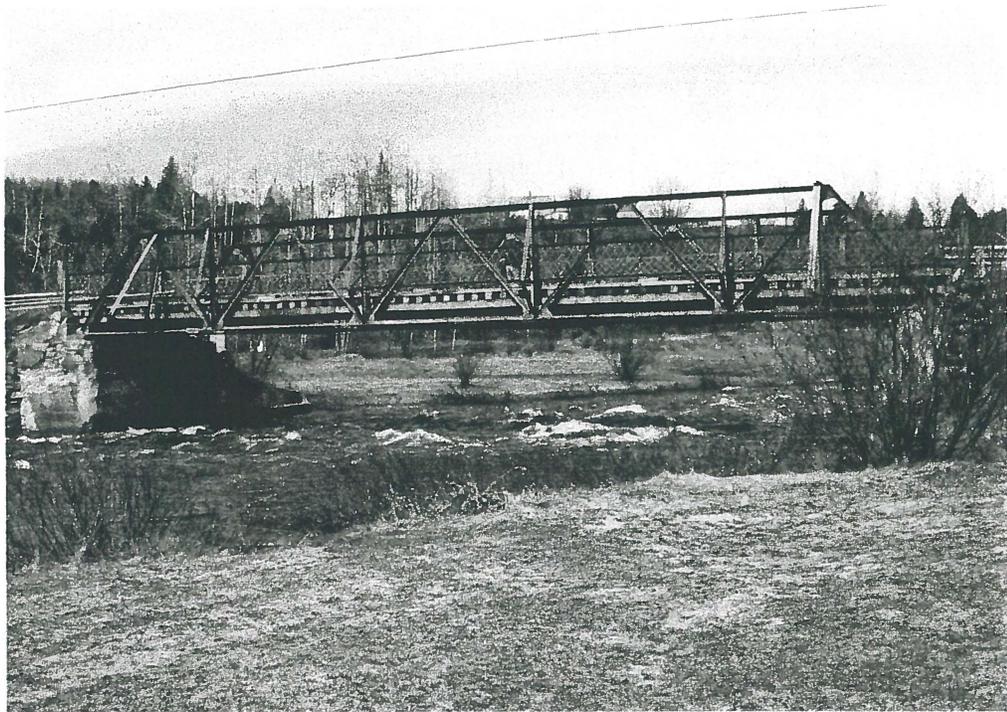


Figure 1. Vue générale du pont avant sa reconstruction

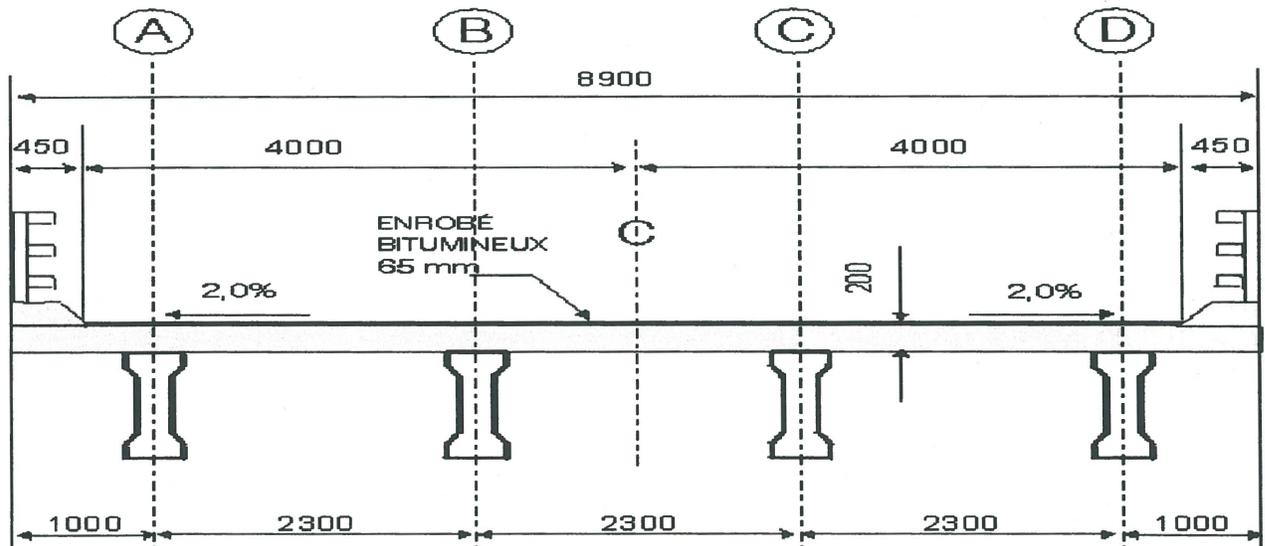
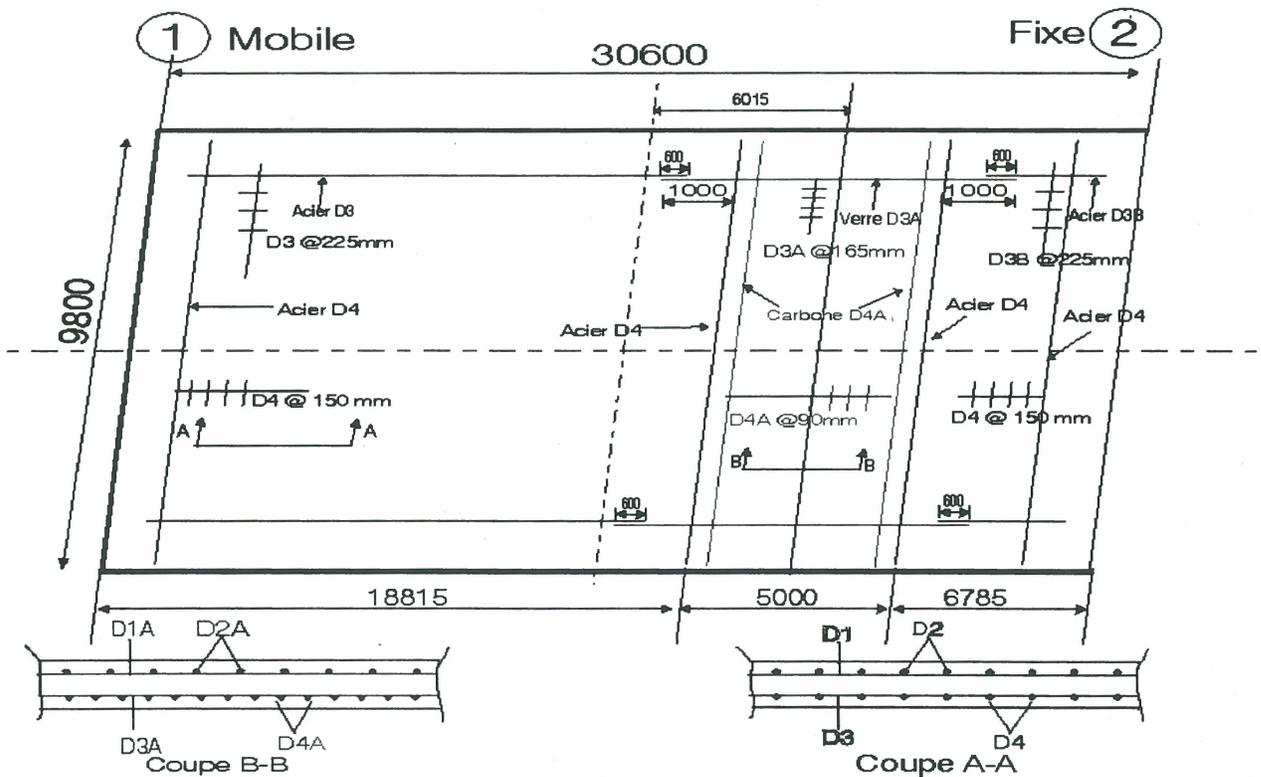
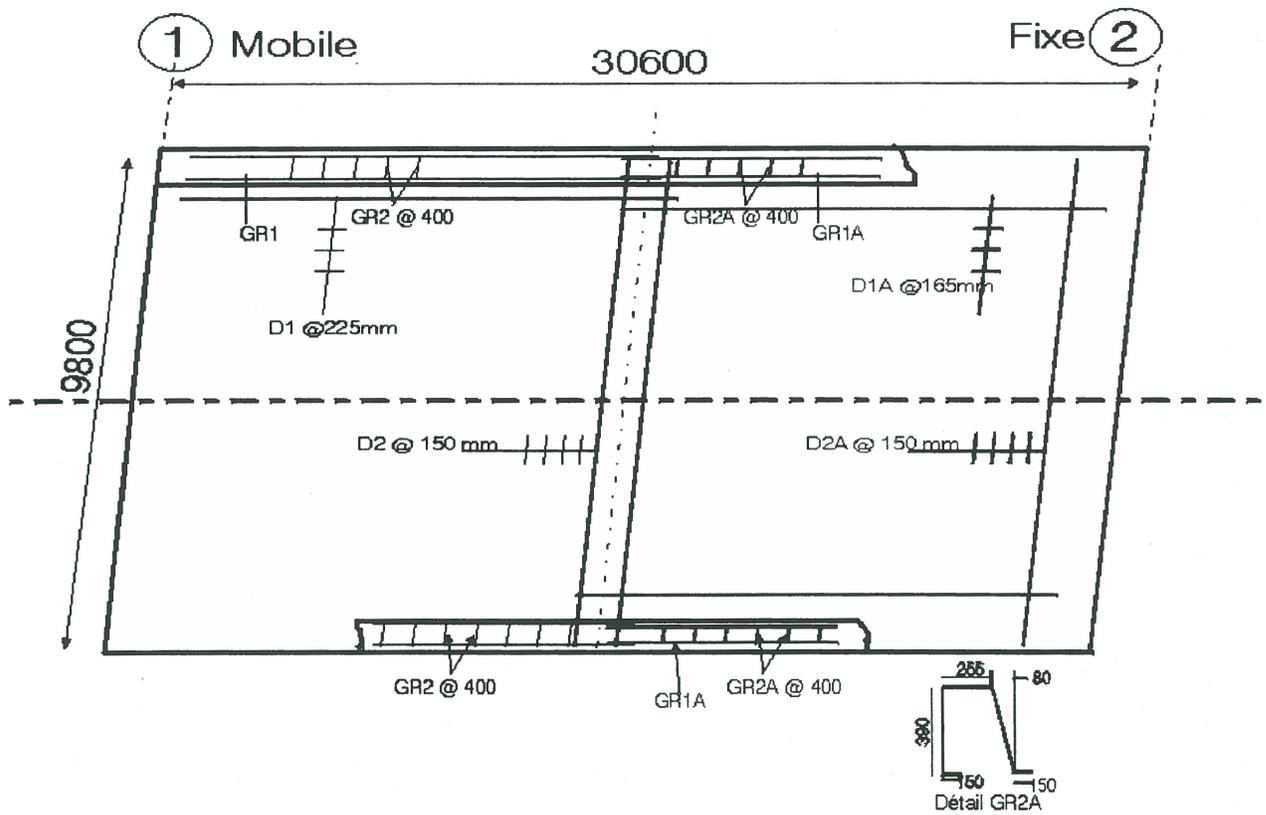
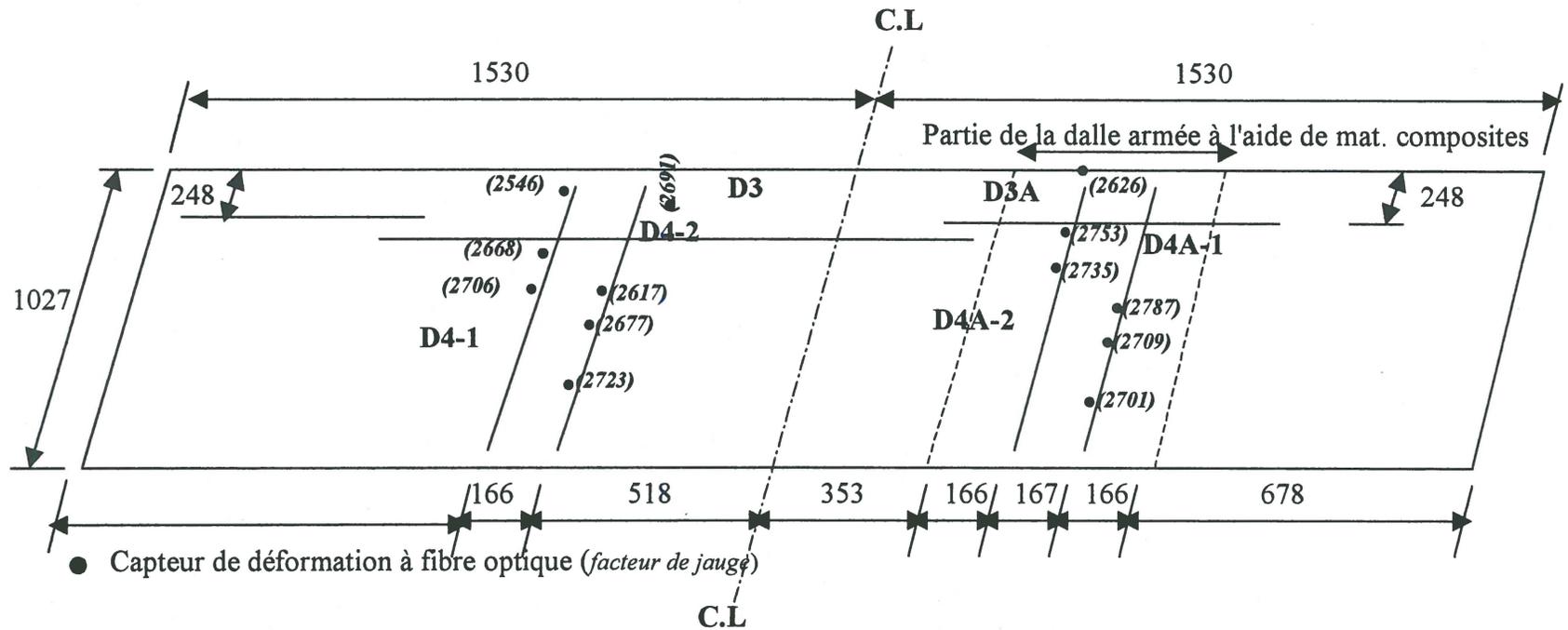


Figure 2. Coupe transversale du tablier du pont





● Capteur de déformation à fibre optique (facteur de jauge)

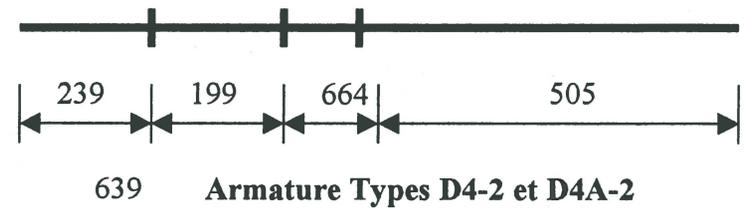
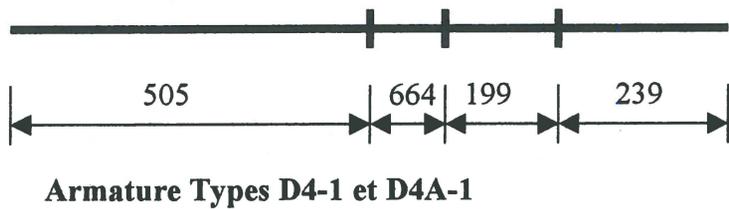
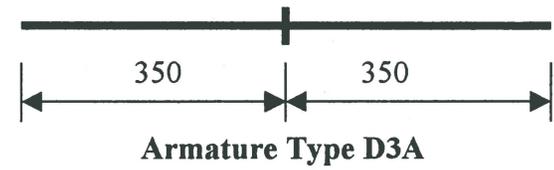
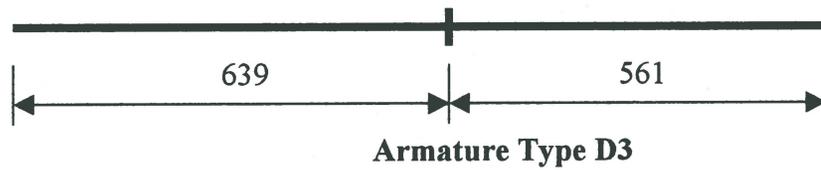
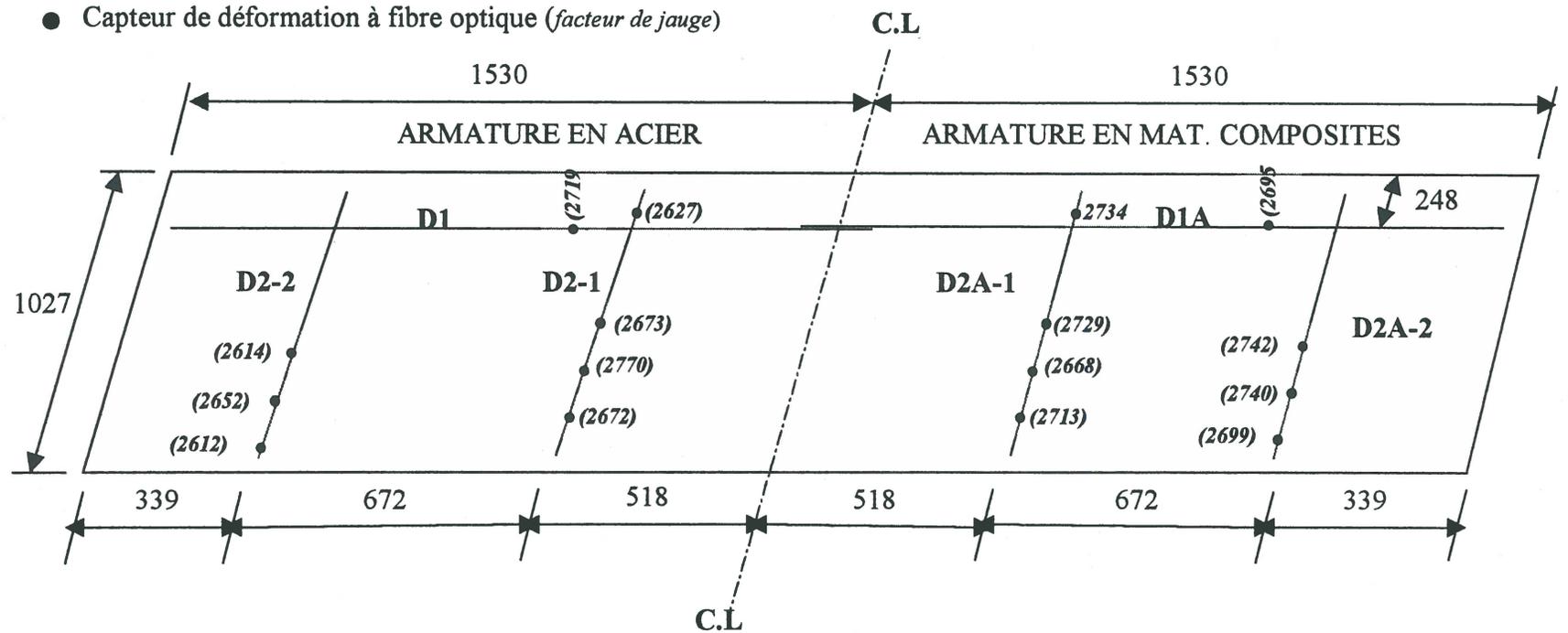
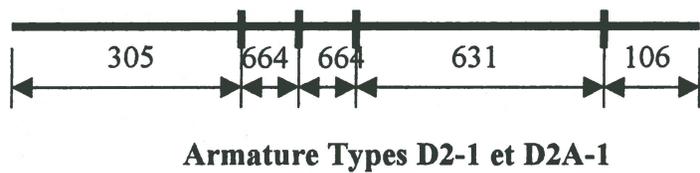
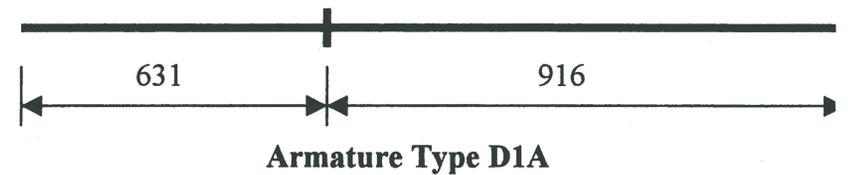
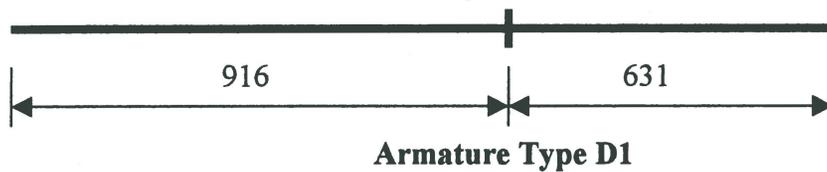


Figure 5. Instrumentation de l'armature du lit inférieur

Figure 6. Instrumentation de l'armature du lit supérieur



Capteur de déformation à fibre optique



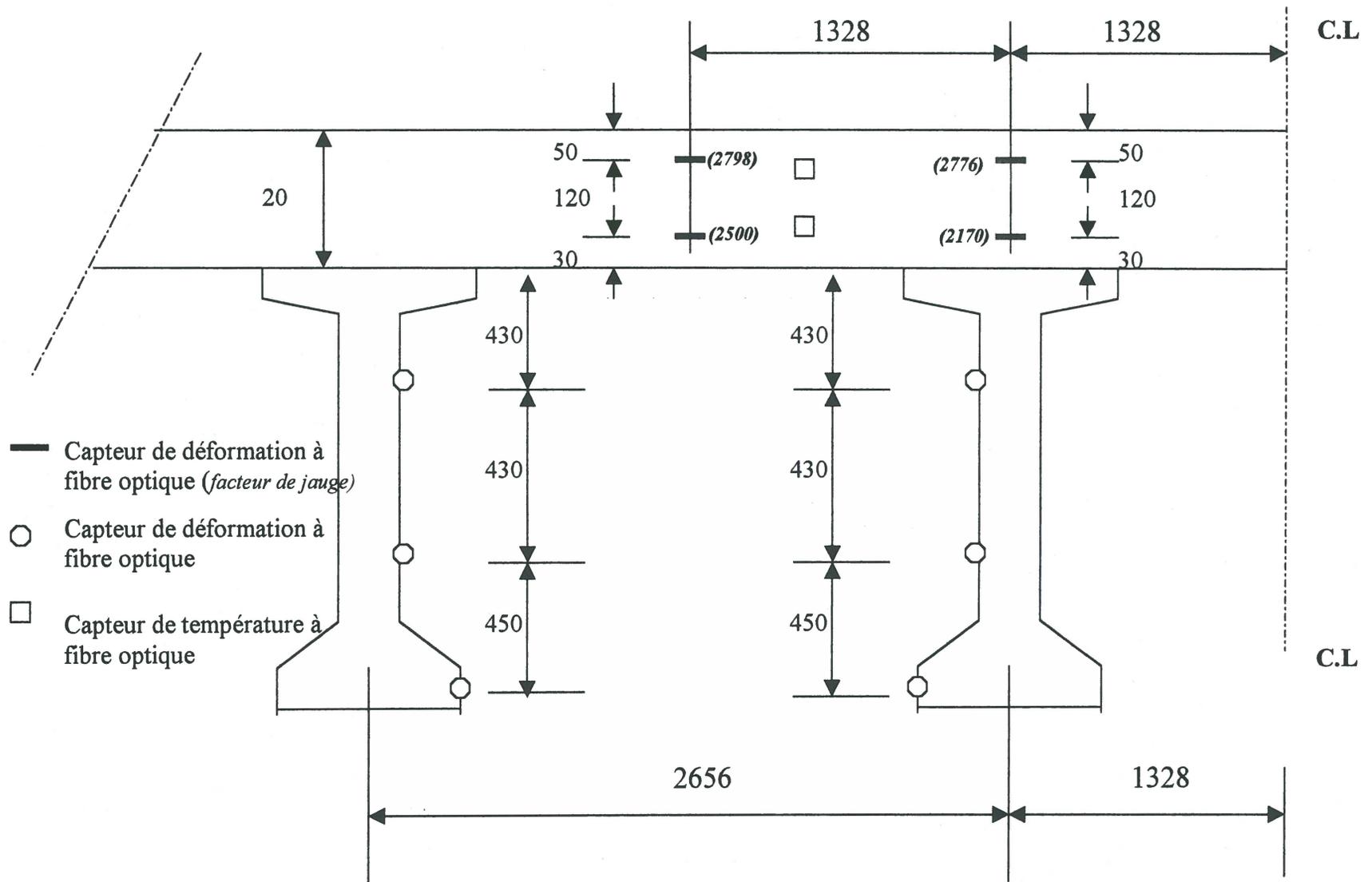


Figure 7. Capteurs de déformation noyés dans le béton, capteurs de déformation collés sur les poutres et capteurs de température à fibre optique

(section du pont située à 5180 mm de la mi-portée du côté de l'armature en mat. composites)

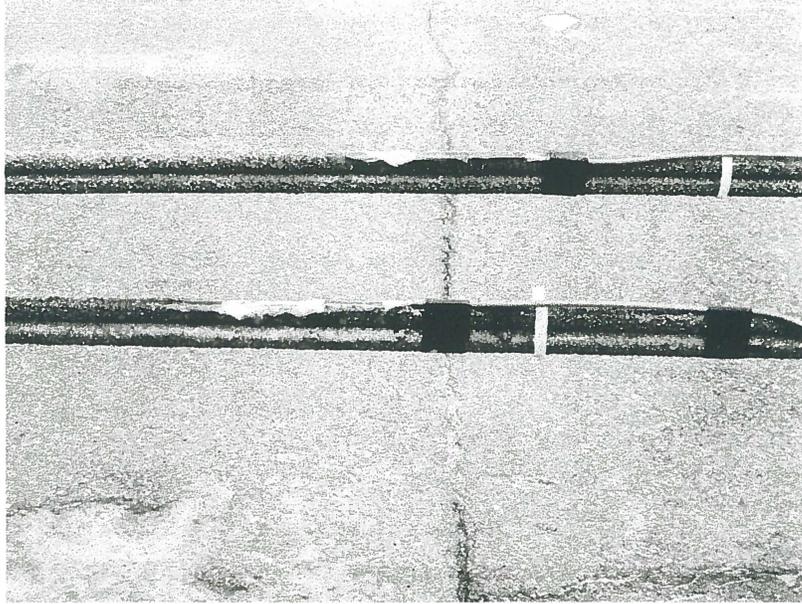


Figure 9. Vue d'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone ISOROD instrumentée à l'aide de capteurs à fibres optique



Figure 10. Capteurs à fibre optique noyés dans le béton et sur l'armature

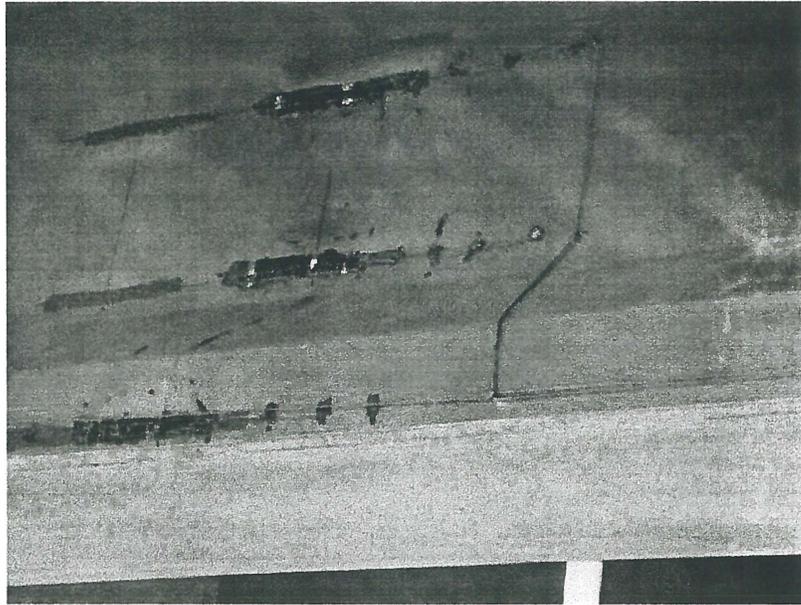


Figure 11. Capteurs à fibre optique collés sur la surface du béton de la poutre



Figure 12. Installation des poutres maîtresses

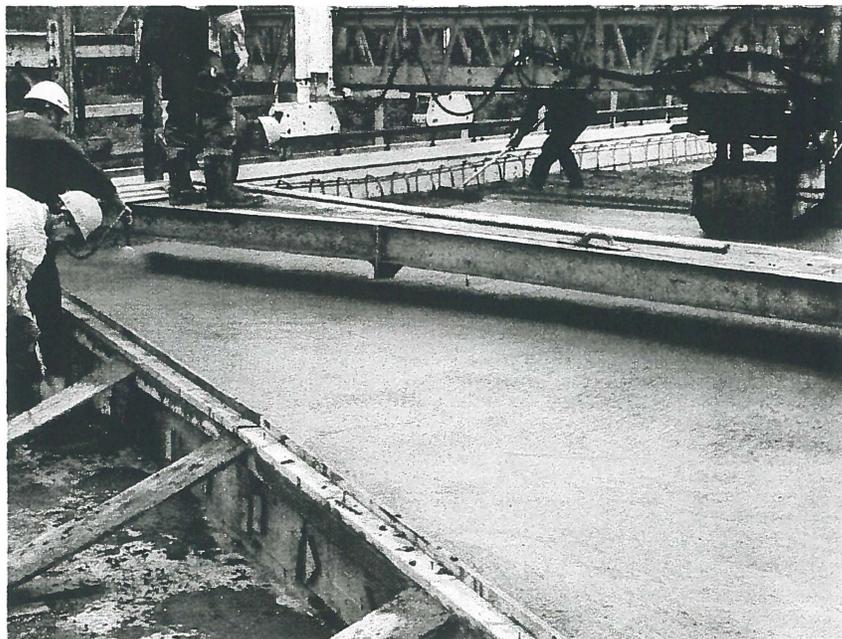
(13 Septembre 2001)



Figure 13. Installation des barres courbes ISOROD (fibre de verre)
(27 Septembre 2001)



Figure 14. Ferrailage complet de la dalle du tablier du pont prête pour le coulage du béton.
On distingue à l'avant-plan l'armature en matériaux composites et à l'arrière-plan celle en acier (27
Septembre 2001).



**Figure 15. Dalle du tablier du pont pendant le coulage du béton
(28 Septembre 2001)**

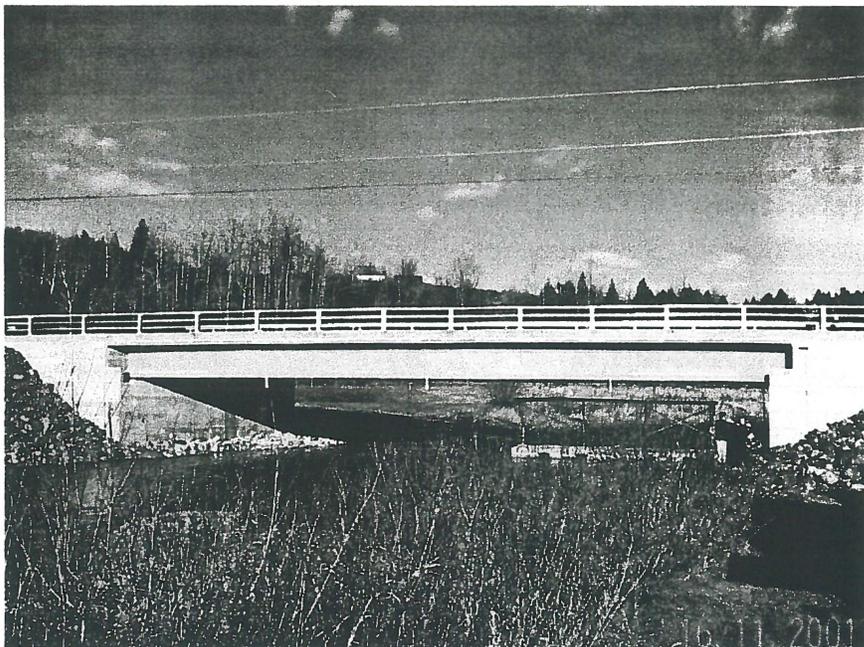
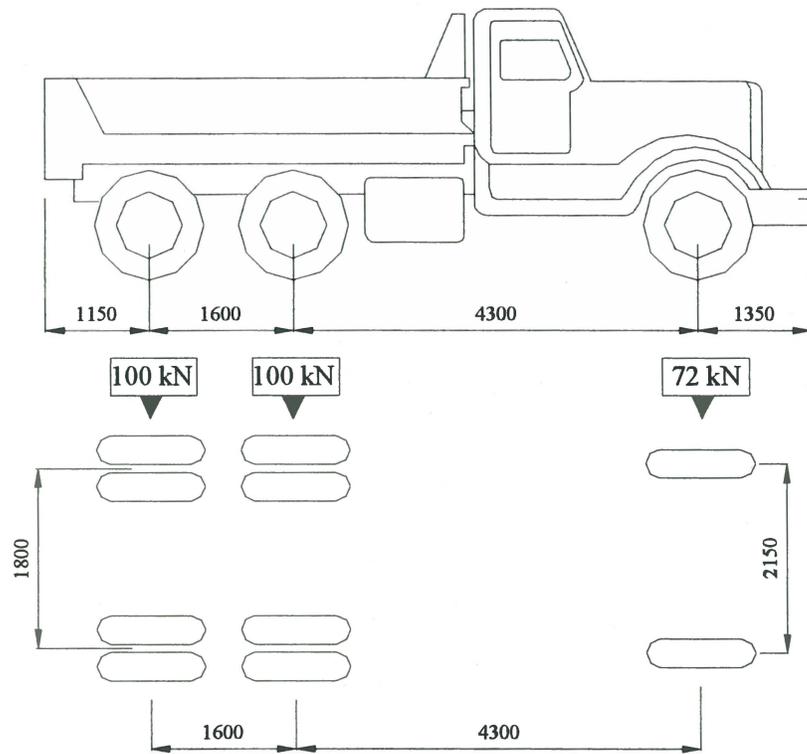
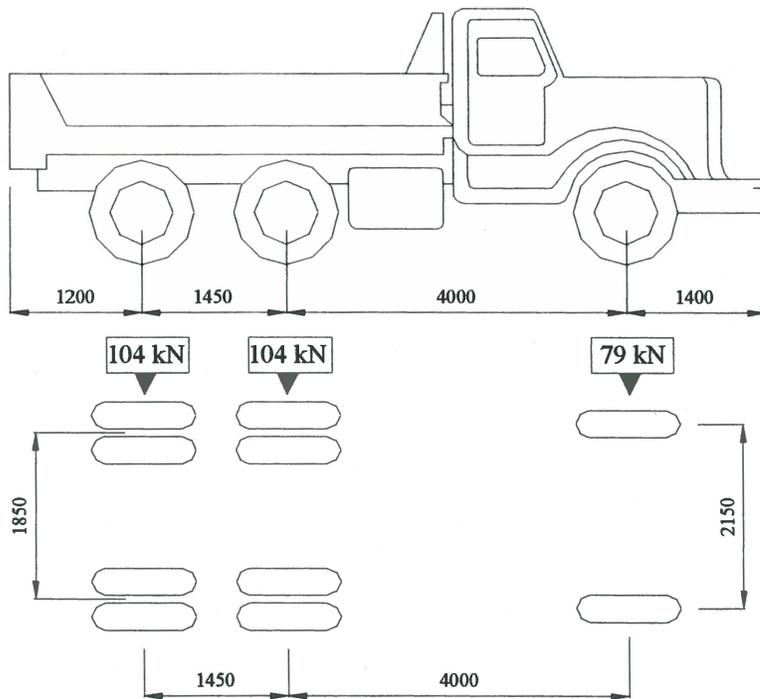


Figure 16. Vue du pont après sa reconstruction en date du 16 novembre 2001



Camion (1)



Camion (2)

Figure 17. Dimensions et charges des essieux des deux camions utilisés lors des essais statiques et dynamiques

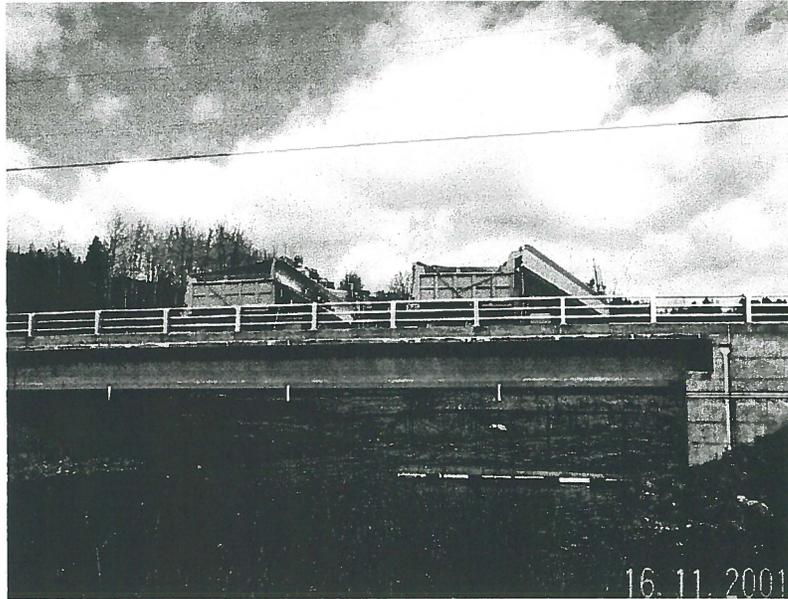


Figure 18. Essai de chargement statique sur le pont à l'aide des 2 camions (16 Novembre 2001)



Figure 19. Système d'acquisition de données durant les essais statiques et dynamiques



Figure 20. Mesure des déflexions à l'aide d'un théodolite durant les essais de chargement statique

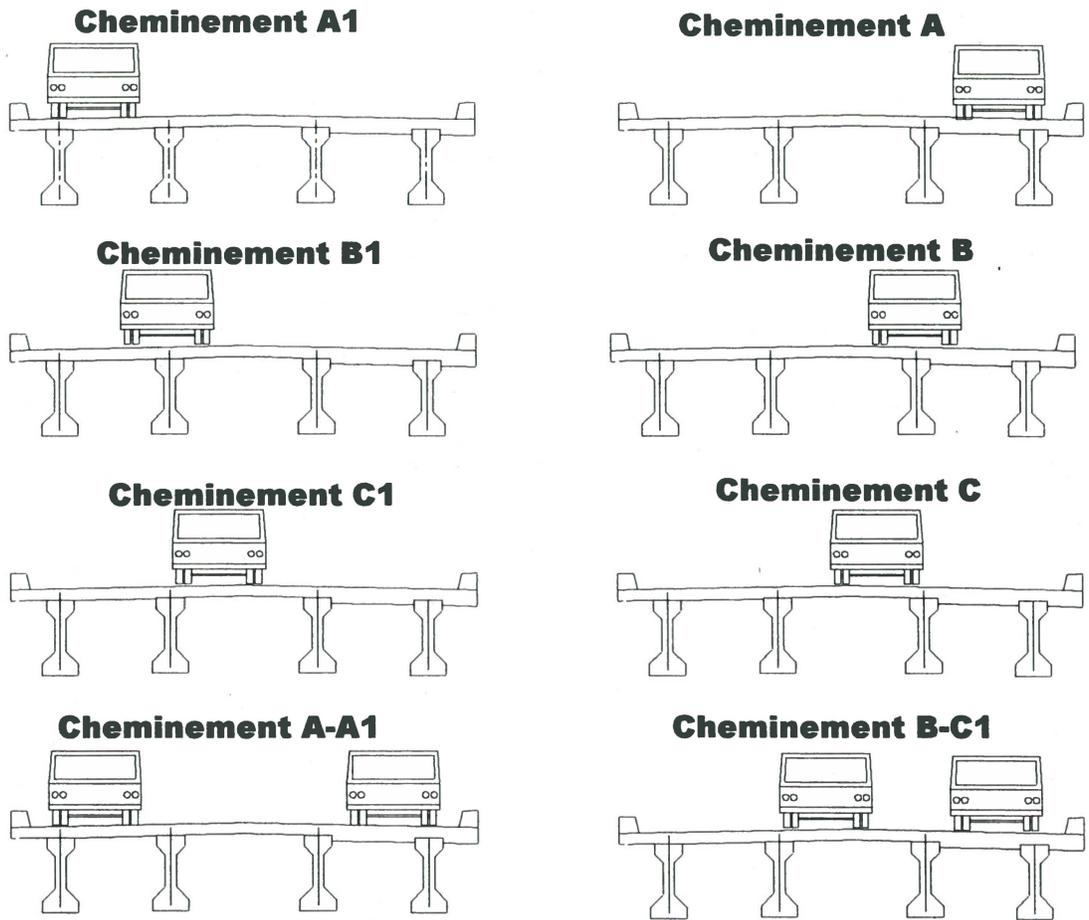
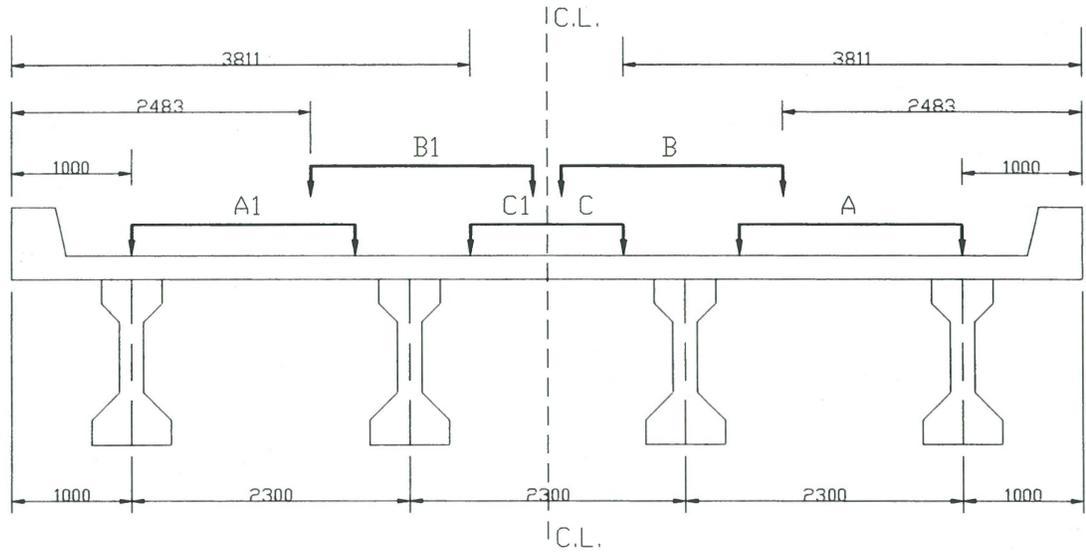


Figure 21. Identification des différents cheminements des camions durant les essais de chargement sur le pont

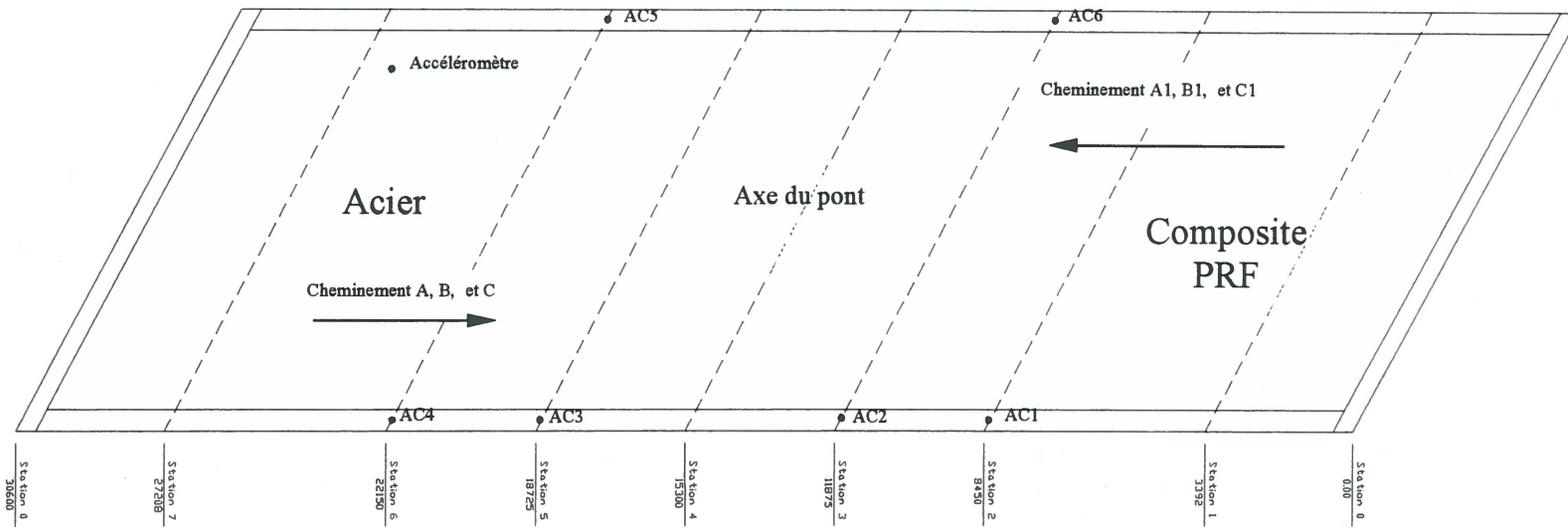


Figure 22. Emplacements des camions pour l'essai statique et positions des accéléromètres pour l'essai dynamique



Figure 23. Vue d'un camion sur le pont lors d'un essai de chargement statique

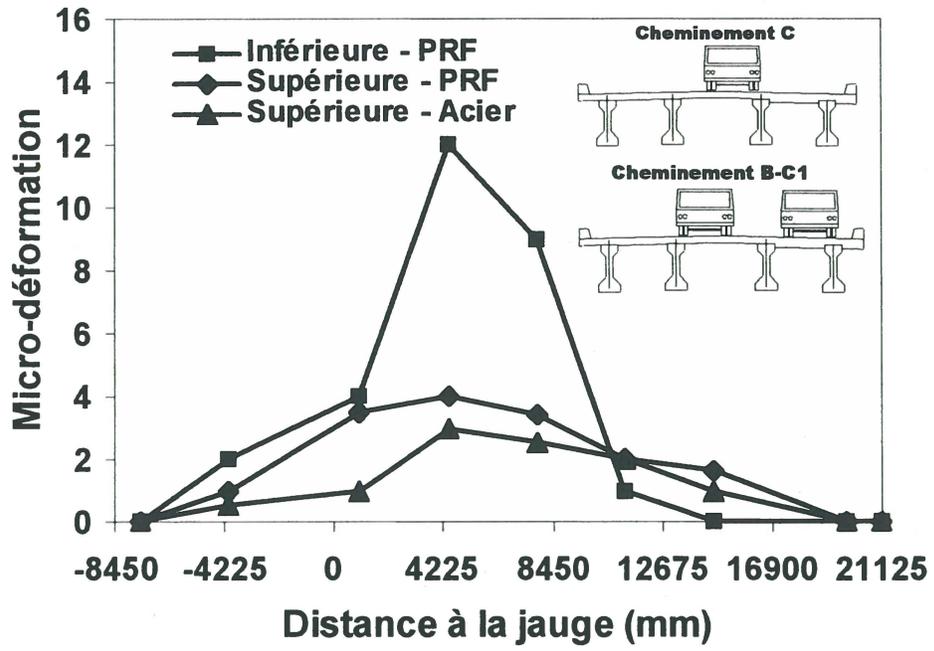


Figure 24. Déformation maximum enregistrée dans le béton

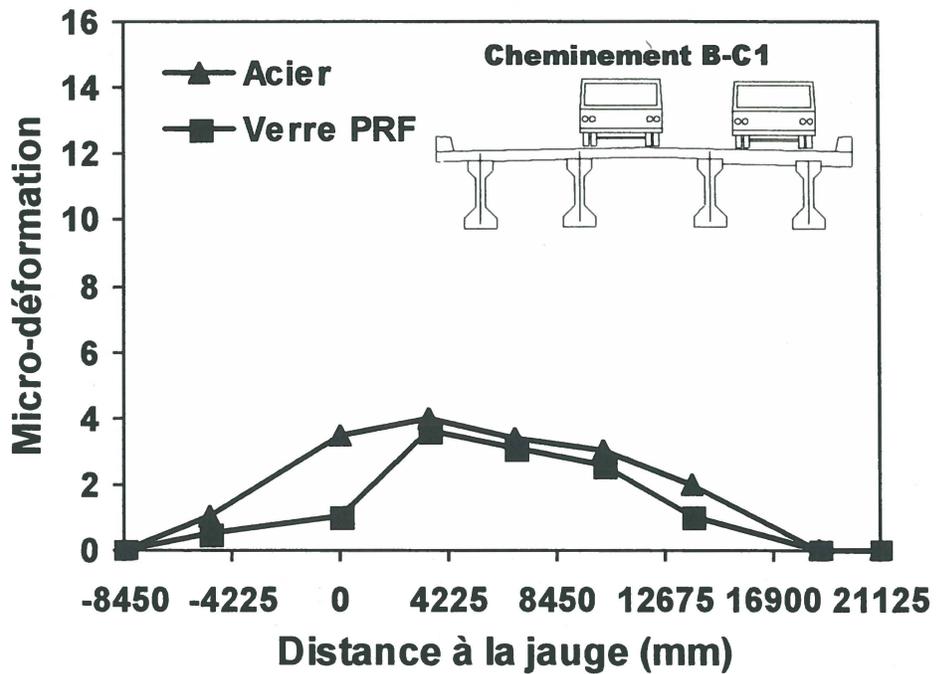


Figure 25. Déformation en traction maximum dans les armatures du lit supérieur (Armature en matériaux composites en fibre de verre versus armature d'acier)

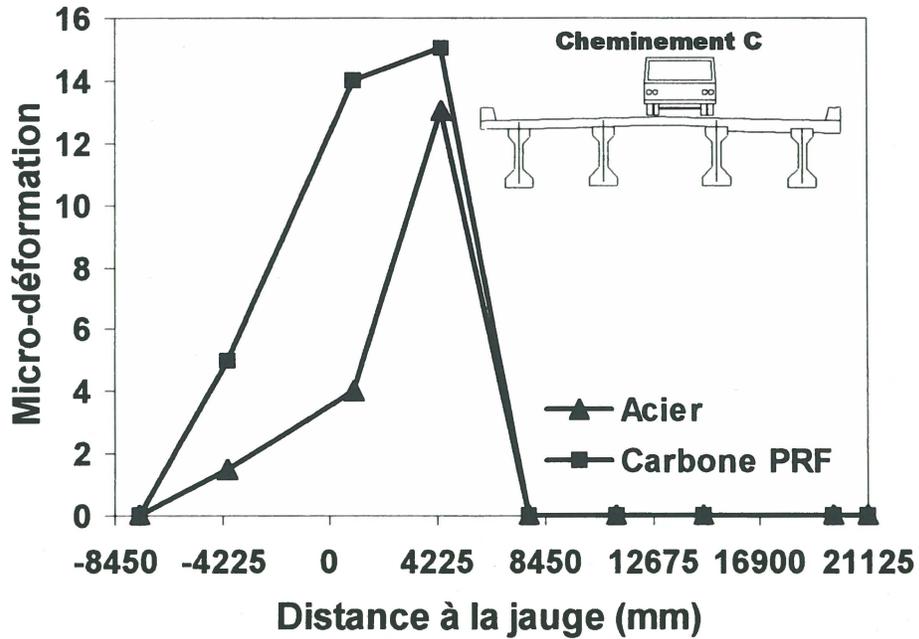


Figure 26. Déformation en traction maximum dans les armatures du lit inférieur (Armature en matériaux composites en fibre de carbone versus armature d'acier)

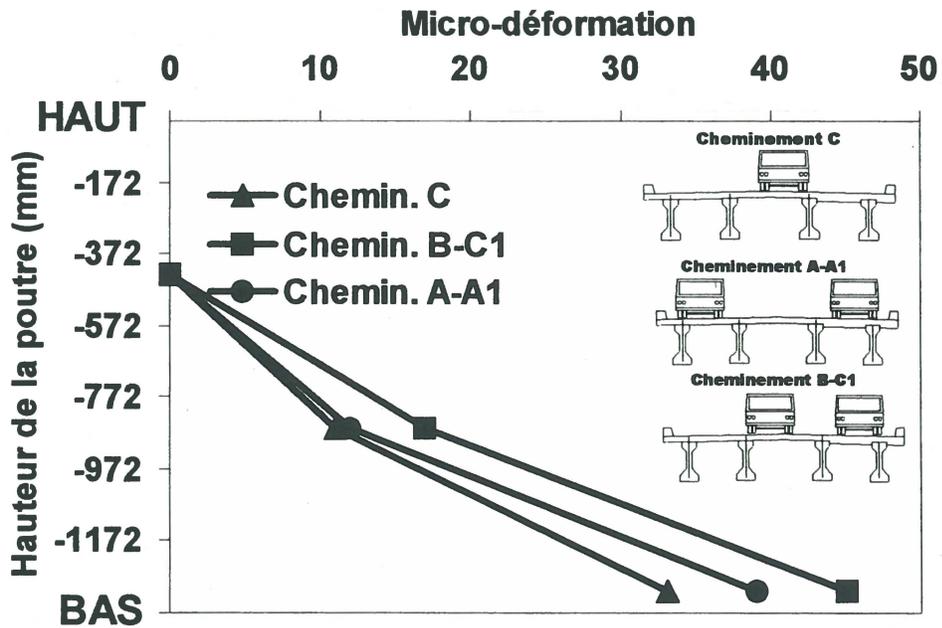


Figure 27. Profil des déformations dans la poutre principale intermédiaire à mi-portée du pont

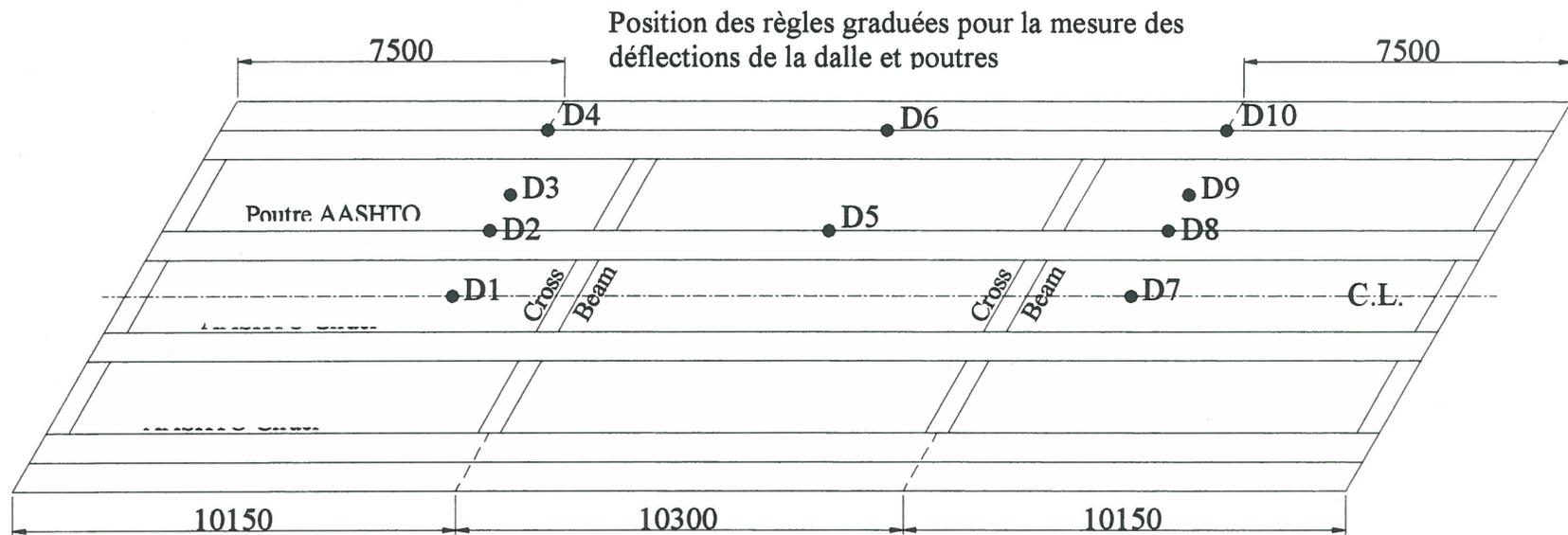
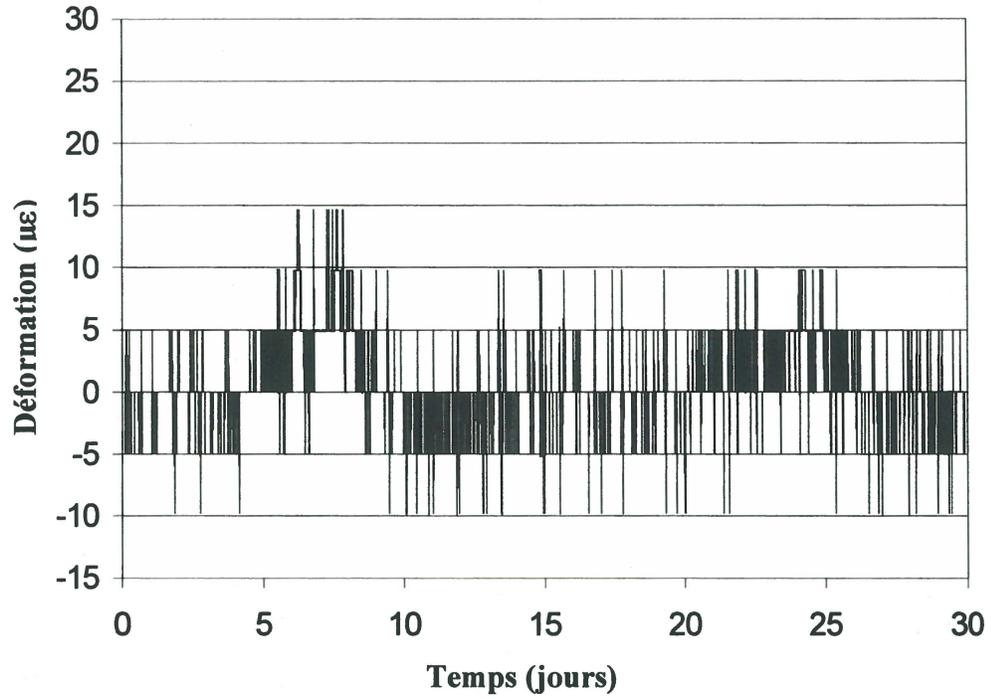
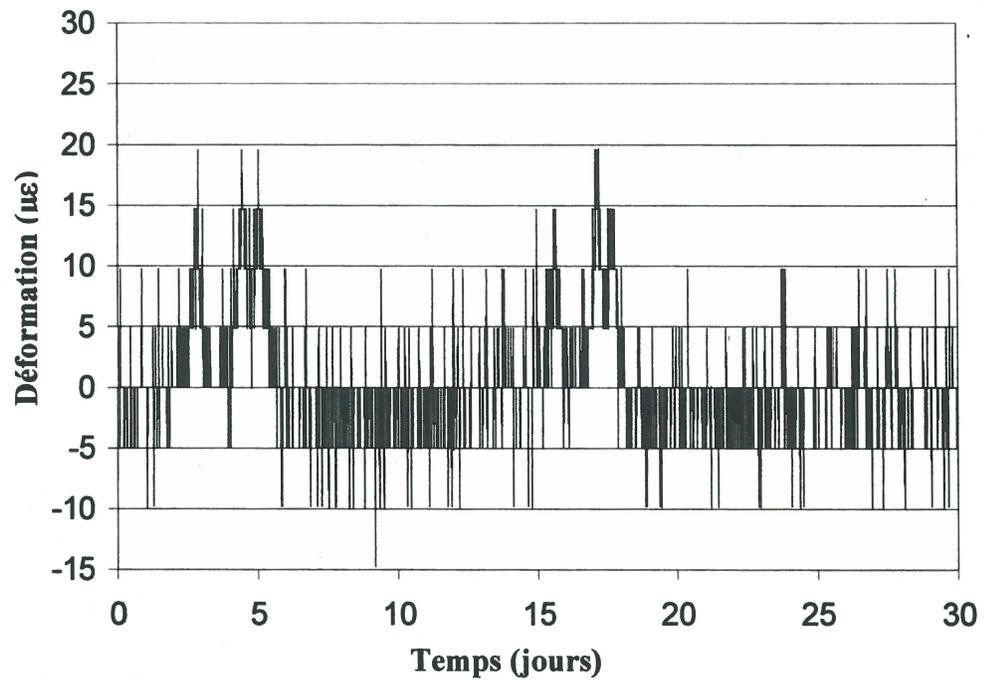


Figure 28. Positions pour les mesures des déflexion de la dalle et des poutres principales



(a) Armature en PRF de Carbone



(b) Armature en Acier

Figure 29. Déformations maximum dans les armatures du lit inférieur enregistrées lors des essais dynamique (vitesse du camion 5 km/h)

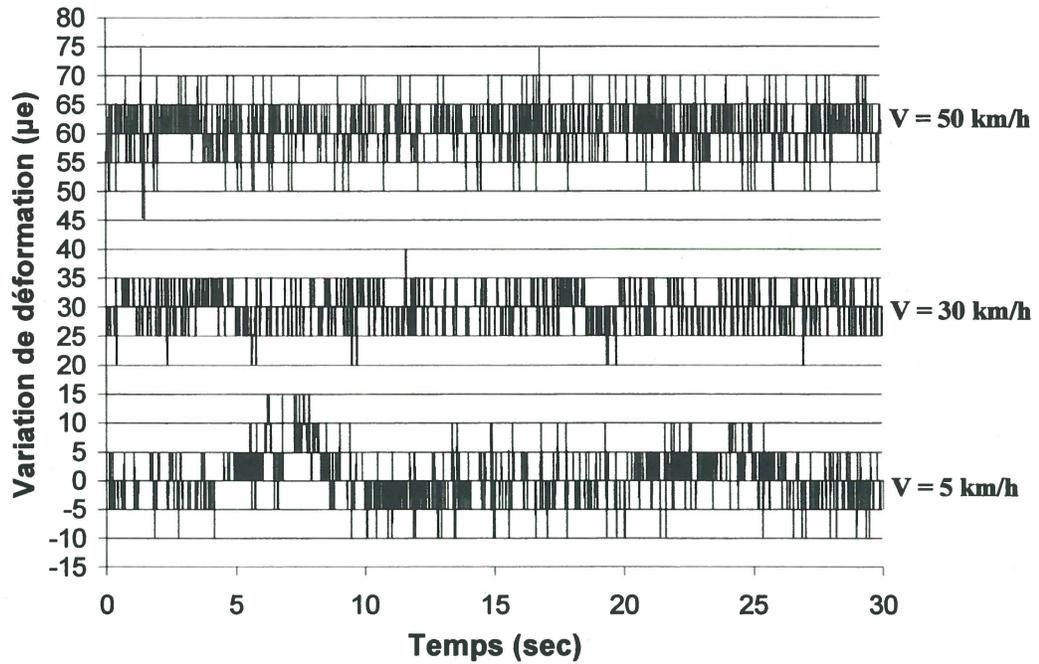


Figure 30. Effet des vitesses de passage des camions sur le pont durant l'essai dynamique sur les déformations de l'armature en PRF de carbone du lit inférieur (cheminement B1)

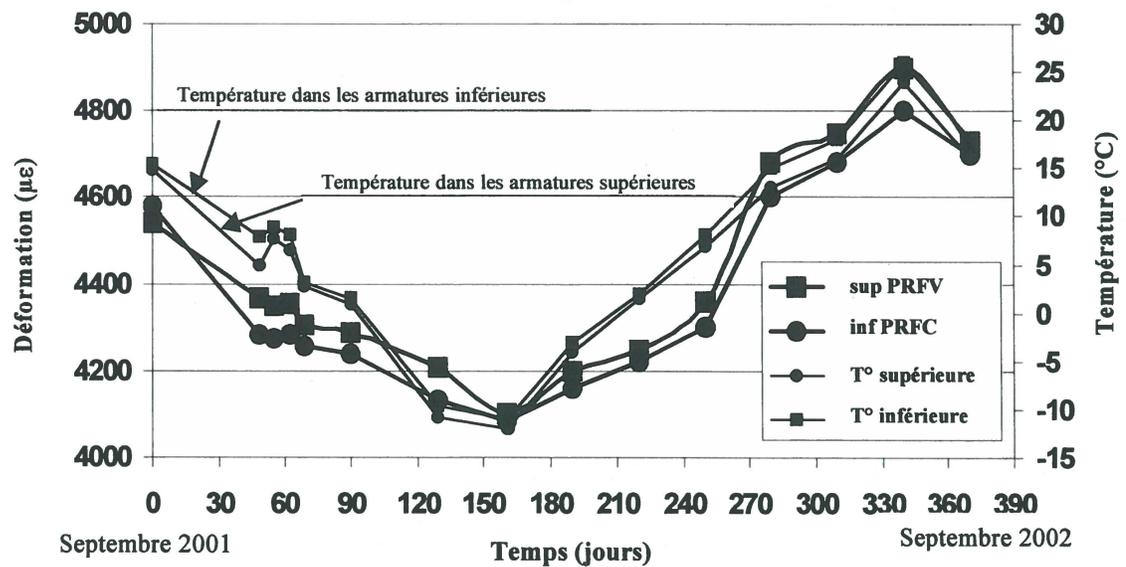


Figure 31. Déformations enregistrées durant un cycle d'un an de service du pont

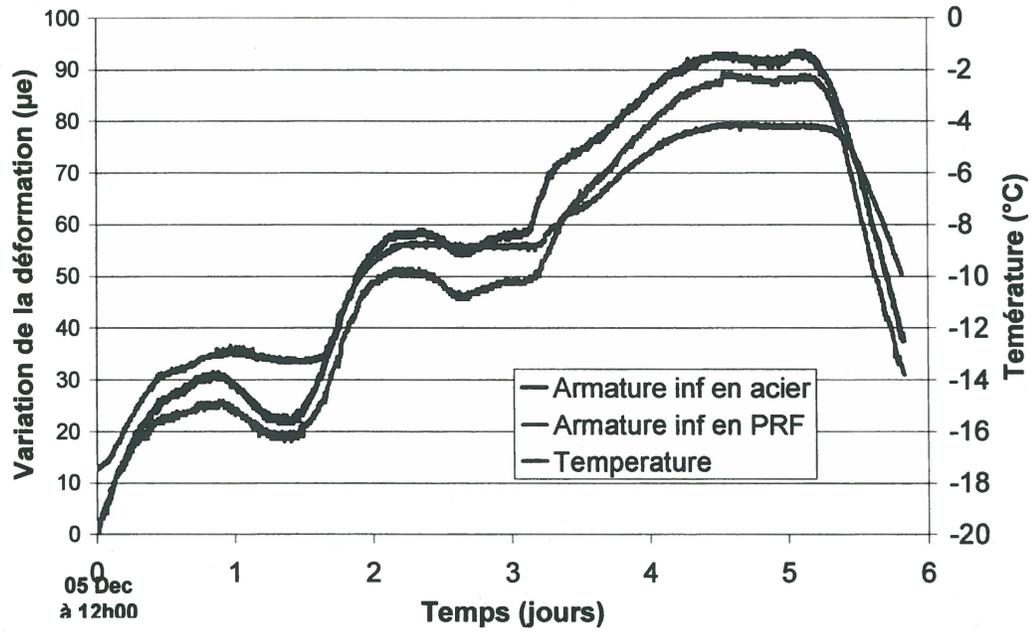


Figure 32. Déformations enregistrées à partir du bureau à l'université de Sherbrooke entre le 05 et le 11 Décembre 2002



Figure 33. Remise du Prix d'Innovation Technologique en Infrastructures

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 194 542