

# **Monitoring des structures avec des capteurs à fibre optique : cas du pont de Sainte-Émélie-de-l'Énergie**

Pierre Rochette, ing., Ph.D.  
Assistant de recherche

Pierre Labossière, ing., Ph.D.  
Professeur titulaire

ISIS Sherbrooke  
Département de génie civil  
Université de Sherbrooke  
Sherbrooke (Québec) Canada J1K 2R1

## **Résumé :**

Cet article porte sur le monitoring du pont de Sainte-Émélie-de-l'Énergie, lequel a été renforcé avec des matériaux composites à l'automne 1998. Des lamelles de polymères renforcés de fibres de carbone et de verre, collées à la surface des poutres, ont permis d'augmenter adéquatement leur résistance en flexion et aux efforts tranchants. De plus, un nombre important d'instruments de mesure ont été incorporés à la structure durant les travaux, dans le but d'évaluer le comportement du pont, avant et après le renforcement.

Depuis 1998, le pont a été soumis à quatre séries d'essais de chargement dirigés par le laboratoire mobile du Ministère de Transport du Québec. Deux séries de tests ont été réalisées la première année, soit avant le renforcement et à la fin des travaux, alors qu'on a répété les mêmes tests un an et six ans après le renforcement du pont. La comparaison des résultats des essais, combinée au suivi périodique des instruments de mesure, a démontré qu'aucun changement substantiel du comportement du pont n'est apparu durant les six années qui ont suivi le renforcement. De plus, les capteurs à fibre optique, interrogés sur une base régulière depuis leur mise en service, se sont montrés très fiables pour le monitoring à long terme.

## **1.0 Introduction**

Depuis une quinzaine d'années, les matériaux composites à base de fibres de carbone et de verre sont de plus en plus utilisés pour le renforcement des structures en béton armé. Les techniques de réhabilitation avec ces matériaux sont basées sur le collage de plaques ou de lamelles de composites sur les surfaces des composantes structurales afin d'en augmenter la résistance. La première application structurale de ces techniques de renforcement sur un ouvrage du réseau routier québécois a été réalisé en 1998, sur un pont en béton armé situé près de Sainte-Émélie-de-l'Énergie. La figure 1 montre une vue générale du pont alors que la figure 2 indique ses principales dimensions sur une vue en plan et une coupe transversale. Ce pont était considéré

comme étant en bon état mais sa capacité était en deçà des exigences des normes en vigueur. La mise en place de matériaux composites a permis d'augmenter la résistance de l'ouvrage, tant en flexion qu'aux efforts tranchants.

Le renforcement du pont a été réalisé à l'automne 1998, en utilisant une configuration établie sur une base analytique et validée par les résultats d'essais en laboratoire sur des échantillons à une échelle 1:3 (Lapierre et coll. 1998, Lamothe et coll. 1998, Labossière et coll. 1998). Le renforcement en flexion des quatre poutres a consisté en des bandes de composites renforcés de fibres de carbone disposées dans la direction longitudinale. Des étriers extérieurs en forme de « U », en composites renforcés de fibres de verre ont servi de renforcement aux efforts tranchants et d'ancrage aux armatures longitudinales. Les travaux de renforcement du pont de Sainte-Émélie-de-l'Énergie sont décrits dans les références suivantes : Labossière et coll. (1999), Demers et coll. (2000), Labossière et coll. (2000).

Afin d'évaluer le fiabilité et la durabilité du renforcement, un nombre important de capteurs ont été installés sur la structure pendant les travaux. De plus, des mesures du comportement du pont ont été prises lors d'essais de chargement réalisés par l'équipe du laboratoire mobile de la Direction des structures, avant et immédiatement après le renforcement, ainsi qu'un an et six ans après les travaux. Depuis leur mise en service, les capteurs laissés en permanence sur la structure ont été lus à maintes reprises afin de suivre leur évolution dans le temps. L'instrumentation installée pour ces mesures comprend des systèmes de mesure des déformations par fibre optique, des jauges résistives conventionnelles, et des thermocouples.

## **2.0 Instrumentation du pont**

Huit jauges résistives ont été soudées sur les barres d'armatures du lit inférieur des quatre poutres, à mi-portée. Vingt jauges résistives additionnelles ont été placées sur les matériaux composites après leur installation. Par ailleurs, 28 capteurs à fibre optique ont été placés sur l'acier et sur les composites. Deux types de capteurs à fibre optique ont été sélectionnés, à savoir 20 capteurs à réseau de Bragg et huit capteurs Fabry-Pérot. La position des jauges à fibre optique et des jauges résistives a été choisie de manière à comparer les lectures des deux types d'instruments. Afin d'évaluer et éventuellement compenser les effets thermiques sur les jauges, dix thermocouples ont aussi été installés en permanence sur le pont. Quatre thermocouples ont été placés sur les barres d'acier longitudinales tandis que les six autres ont été collés à la surface du renforcement en flexion en matériau composite. Les câbles de tous les instruments permanents ont été introduits dans des conduites en PVC qui convergent vers une boîte en aluminium où les connecteurs sont facilement accessibles.

À l'instrumentation permanente décrite précédemment, des appareils ont été ajoutés temporairement pour les besoins des essais de chargement. Quatre capteurs de déplacement, un sous chaque poutre, ont été utilisés pour mesurer la flèche à la mi-portée lors des quatre campagnes d'essais. Des accéléromètres ont également été utilisés pour mesurer les vibrations lors d'essais dynamiques.

### **3.0 Essais de chargement**

Des camions similaires ont été utilisés lors des quatre campagnes d'essais pour charger le pont. Ces essais de chargement ont eu lieu avant et juste après les travaux de renforcement, soit les 14 septembre et 14 octobre 1998, ainsi qu'un an après les travaux, le 30 septembre 1999, et six ans après le renforcement du pont, le 29 juin 2004. Avant chaque campagne d'essais, le poids supporté par chacun des essieux des camions, leur largeur et leur espacement relatif ont été mesurés afin de bien définir les charges. Le chargement du pont et le mesurage des camions étaient sous la responsabilité du laboratoire mobile du MTQ.

Lors des essais de 1998 et de 2004 (séries 1, 2 et 4), le chargement a été appliqué par trois camions à quatre essieux pesant entre 29.5 et 34.2 tonnes chacun. Pour la troisième série d'essais, réalisée un an après les travaux, le chargement a été appliqué par un camion à quatre essieux de 33.8 tonnes et deux camions à trois essieux de 26.3 et 26.6 tonnes. La répartition du poids sur chacun des essieux ainsi que l'espacement des essieux pour l'ensemble des camions utilisés lors de ces campagnes d'essais sont donnés au tableau 1. La figure 3 illustre schématiquement les deux types de camions.

Des séquences de chargement statique identiques ont été imposées à la structure lors des quatre campagnes d'essais. Chaque fois, on a procédé successivement aux cheminements simples (A, B, C, D), doubles (AC, BD) et triples (ACA, DBD). Pour chaque cheminement, les véhicules devaient s'immobiliser à certaines positions prédéterminées sur le pont. Le tableau 2 présente un sommaire de l'ensemble des positions d'arrêt. La figure 4 illustre la terminologie utilisée pour définir un cas de chargement statique typique sur le pont. Sur cette figure, les axes longitudinaux A, B, C et D correspondent à l'alignement des roues arrières d'un camion qui se déplace sur l'une des voies de circulation. Les lignes transversales numérotées de 1 à 8 identifient autant de positions d'arrêt sur chaque axe longitudinal.

### **4.0 Résultats des essais de chargement et du suivi à long terme**

Quelques mesures représentatives, prises lors des quatre séries d'essais de chargement, sont présentées ci-après. Ces résultats comprennent les déformations mesurées par les jauges résistives et par les capteurs à fibre optique. On présente également les mesures des capteurs à

fibre optique de type Fabry-Pérot et des thermocouples, enregistrées périodiquement depuis les travaux de renforcement, qui permettent d'évaluer l'évolution des déformations dans la structure en service.

#### **4.1 Évaluation de la fiabilité des instruments de mesure**

Les essais de chargement avaient pour objectifs, non seulement d'évaluer le comportement du pont, mais aussi de s'assurer de la fiabilité des systèmes de mesure des déformations par fibre optique. Deux types de capteurs basés sur des technologies distinctes ont été installés sur la structure, soit des capteurs à réseaux de Bragg et des capteurs Fabry-Pérot. Dans les paragraphes qui suivent, les mesures prises avec ces capteurs sont comparées aux déformations lues par les jauges résistives.

La figure 5 permet de comparer les résultats obtenus des capteurs à réseaux de Bragg à ceux des jauges. Pour ces comparaisons, on a choisi d'illustrer le cheminement ACA de la quatrième série d'essais (juin 2004). Sur le graphique de gauche, on montre les déformations mesurées avec une paire de jauges (J111 et J112) soudées à une barre d'armature de la poutre de rive amont, ainsi que les lectures du capteur Bragg correspondant (B14). Sur le graphique de droite, les déformations indiquées sont celles mesurées sur l'armature de la poutre intérieure amont. On constate que les lectures des capteurs à fibre optique sont légèrement supérieures à celles des jauges. Les autres cheminements et les lectures enregistrées sur les deux poutres aval ont donné des résultats similaires. Pour l'ensemble des essais, on a observé un écart moyen de 8 % entre les mesures prises avec les deux types d'instruments.

La comparaison des résultats des capteurs Fabry-Pérot à ceux des jauges est montrée graphiquement à la figure 6, où on illustre le cheminement ACA de la troisième série d'essais (septembre 1999). Les déformations des armatures des deux poutres amont y sont montrées. Sur le graphique de gauche, on observe que les lectures des deux types d'instruments sont identiques (l'écart est de moins de 1 %), alors que sur la figure de droite, les mesures du capteur à fibre optique sont de 18 % inférieures à celles de la jauge correspondante. En considérant tous les chargements pour cette série d'essais, la comparaison des deux types d'instruments a donné un écart moyen de 14 %. Cet écart est attribuable à l'imprécision des facteurs de jauge spécifiés par le fabricant pour la plupart des capteurs Fabry-Pérot installés sur le pont.

#### **4.2 Évaluation du comportement du pont lors des essais de chargement**

La figure 7 permet de comparer les résultats des quatre séries d'essais. Deux chargements avec passage d'un camion de quatre essieux sont illustrés sur cette figure, soit les cheminements A et C. Pour chaque courbe de déformation, la valeur portée en graphique est la moyenne des

deux jauges. Les déformations indiquées sur les graphiques ont été normalisées, c'est-à-dire que les valeurs mesurées ont été multipliées par 33 tonnes/poids du camion (en tonnes), de manière à comparer, pour les différentes séries d'essais, la déformation correspondant à une charge de 33 tonnes.

En comparant les valeurs obtenues lors des deux premières séries d'essai, on note une diminution moyenne des déformations d'environ 5 % après la mise en place des composites, ce qui correspond à l'augmentation de rigidité anticipée par l'ajout du renforcement en flexion. En comparant l'essai 3 à l'essai 2, on note une augmentation moyenne des déformations de 3.3 % après un an. Cette augmentation des déformations n'indique cependant pas que la structure a subi une dégradation ayant entraîné une perte de rigidité. Cette différence est plutôt attribuable au fait que le camion de l'essai 3 était plus court que ceux des essais 1 et 2, et qu'il produisait des moments pouvant être jusqu'à 5 % supérieurs. Les différences notées dans les déformations sont donc tout à fait acceptables, et permettent de conclure qu'il n'y a pas eu de variation notable du comportement de l'ouvrage pendant l'année qui a suivi son renforcement avec des matériaux composites. La quatrième série d'essais, menée en 2004, a confirmé cette dernière hypothèse puisque les déformations enregistrées sont à toute fin pratique identiques à celles mesurées lors de la campagne d'essais d'octobre 1998, soit immédiatement après les travaux.

### **4.3 Résultats et interprétation des lectures périodiques**

Les figures 8 et 9 présentent les lectures ponctuelles de deux capteurs Fabry-Pérot enregistrées depuis le renforcement du pont en 1998. Ces lectures ont été prises en moyenne toutes les six semaines jusqu'en 2002, et environ tous les trois mois par la suite. Les graphiques illustrent les déformations mesurées avec les capteurs en fonction de la température, la figure 8 indiquant la déformation d'une lamelle de composite collée sous la poutre intérieure amont, et la figure 9 montrant la déformation de l'armature de la même poutre. Sur les deux figures, les mesures ont été regroupées par périodes. On a de plus tracé la droite obtenue par régression linéaire pour chaque période. La pente de chacune de ces droites donne un coefficient de dilatation qui permet d'estimer les déformations d'origine thermique.

Les déformations des capteurs à fibre optique correspondant à la période « janvier à mai 1999 » (quatre points sur chacune des figures) ont été enregistrées par un poste de lecture de première génération, qui a été remplacé par la suite par un appareil plus fiable. Toutes les mesures effectuées depuis juin 1999 l'ont été avec ce nouveau poste de lecture. L'écart important entre les données des deux premières périodes est attribuable au calibrage différent des deux appareils utilisés pour les mesures. Cependant, les sauts observés entre octobre 2001 et janvier 2002, ainsi qu'entre septembre 2003 et janvier 2004 semblent indiquer que la poutre s'est

déformée de façon permanente, de l'ordre de 50  $\mu\epsilon$  au niveau de l'armature et de 40  $\mu\epsilon$  au niveau des matériaux composites.

## 5.0 Conclusion

La mise en place d'une importante instrumentation sur le pont de Sainte-Émélie-de-l'Énergie combinée à des essais de chargement, répétés à quatre reprises sur une période de six ans, avait pour principal objectif d'évaluer l'efficacité et la durabilité d'une technique de renforcement des structures existantes avec des matériaux composites. L'étude présentée dans cet article a démontré que la structure a conservé son intégrité depuis qu'elle a été renforcée et qu'aucun signe de dégradation des matériaux composites n'a été observé. De plus, les capteurs à fibre optique de type Bragg et Fabry-Pérot utilisés dans cette étude se sont avérés durables et relativement fiables pour faire le suivi des déformations de la structure au cours des six dernières années.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du laboratoire mobile de la Direction des structures, en particulier MM. Marc Savard et Jean-François Laflamme, pour leur précieuse collaboration lors des essais de chargement. Ces travaux ont été réalisés grâce à la participation financière du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), par le biais du Réseau de Centres d'excellence ISIS Canada.

## Références

- Demers, M., Labossière, P., Rochette, P. et Neale, K.W. (2000) Renforcement de poutres de ponts en travée simple avec des matériaux composites : Projet de recherche - Phase II, Rapport ISIS 00-101-101 présenté au Ministère des Transports du Québec.
- Labossière, P., Beaudoin, Y., Lamothe, P., Lapierre, P., Neale, K.W., Demers, M., Martel, S. (1998) Renforcement de poutres de ponts en travée simple avec des matériaux composites : Projet de recherche - Phase I, Rapport ISIS 98-101-101 présenté au Ministère des Transports du Québec.
- Labossière, P., Neale, K.W., Rochette, P. et Demers (1999) Renforcement et instrumentation du pont de Ste-Émélie-de-l'Énergie, 6<sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec.

Labossière, P., Neale, K.W., Rochette, P., Demers, M., Lamothe, P., Lapierre, P. et Desgagné, G. (2000) Fibre Reinforced Polymer Strengthening of the Sainte-Émélie-de-l'Énergie Bridge : Design, Instrumentation and Field Testing, *Revue Canadienne de génie civil*, Vol. 27, No. 5, 2000, pp. 916-927.

Lamothe, P., Labossière, P. et Neale, K.W. (1998) Post-strengthening of reinforced concrete T-beams with composite materials, *Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference*, Halifax, N.S., Edited by J.P. Newhook and L.G. Jaeger, pp. 623-631.

Lapierre, P., Labossière, P. et Neale, K.W. (1998) Modélisation de poutres en T en béton armé renforcées avec des matériaux composites, *Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference*, Halifax, N.S., Edited by J.P. Newhook and L.G. Jaeger, pp. 613-622.

**Tableau 1 :** Poids et espacements des essieux des camions utilisés pour charger le pont

	Nombre d'essieux	Poids sur les essieux (kN)				Espacement des essieux (mm)		
		P1	P2	P3	P4	L1	L2	L3
<b>Septembre 1998</b>								
camion 1	4	63.5	63.5	98.3	98.3	2925	3050	1525
camion 2	4	54.9	54.9	112.6	112.5	1800	3150	1400
camion 3	4	57.8	57.9	104.5	104.4	1550	3350	1550
<b>Octobre 1998</b>								
camion 1	4	60.8	60.8	101.2	101.2	2925	3050	1525
camion 2	4	55.6	55.7	109.6	109.6	1800	3150	1400
camion 3	4	54.4	54.5	113.3	113.2	1800	3100	1400
<b>Septembre 1999</b>								
camion 1	4	51.8	51.8	113.7	113.7	1510	3360	1550
camion 2	3	61.8	99.3	99.3	N. A.	3810	1300	N. A.
camion 3	3	59.8	99	99	N. A.	3810	1400	N. A.
<b>Juin 2004</b>								
camion 1	4	50.5	72.8	91.4	88.7	1585	3710	1535
camion 2	4	64.9	46.4	93.1	86.2	2010	3050	1540
camion 3	4	69.1	56.4	86.0	78.2	2340	3050	1320

**Tableau 2 :** Position d'arrêt des camions pour tous les cas de chargement statique

Chemin.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	fin
A	A 0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	fin A
B	B 0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	fin B
C	C 0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	fin C
D	D 0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	fin D
BC	BC 0	B1C1	B2C2	B3C3	B4C4	B5C5	B6C6	B7C7	B8C8	
ACA	ACA 0	A4C4	A4C4A1	A6C6A2	A7C7A3	A8C8A4	A5	A6	A7	fin ACA
DBD	DBD 0	D4B4	D4B4D1	D6B6D2	D7B7D3	D8B8D4	D5	D6	D7	fin DBD
ACA'	ACA' 0	A6C4A'3								fin ACA'
DBD'	DBD' 0	D6B4D'3								fin DBD'

Pour le cheminement BC, le camion 1 est sur la ligne B et le camion 2 est sur la ligne C.

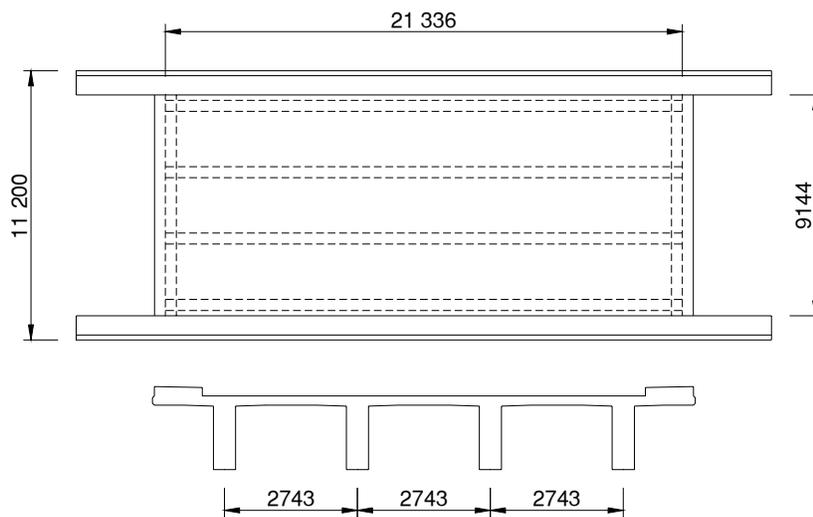
Pour le cheminement ACA, camion 1 en A devant, camion 2 en C et camion 3 en A derrière.

Pour le cheminement DBD, camion 1 en D devant, camion 2 en B et camion 3 en D derrière.

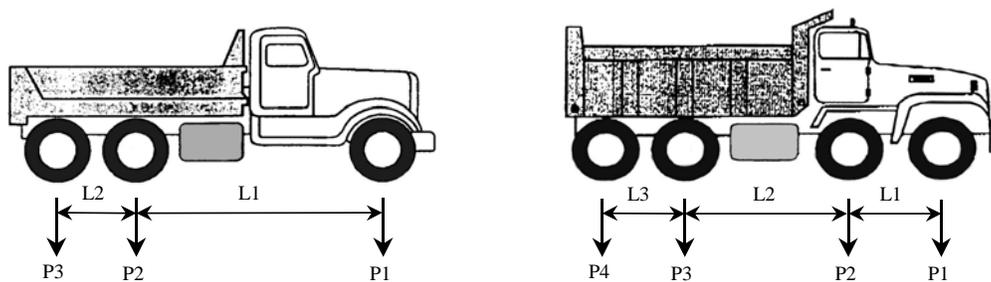
Le camion situé en A'3 et D'3 est en position arrière afin de maximiser l'effet de la charge.



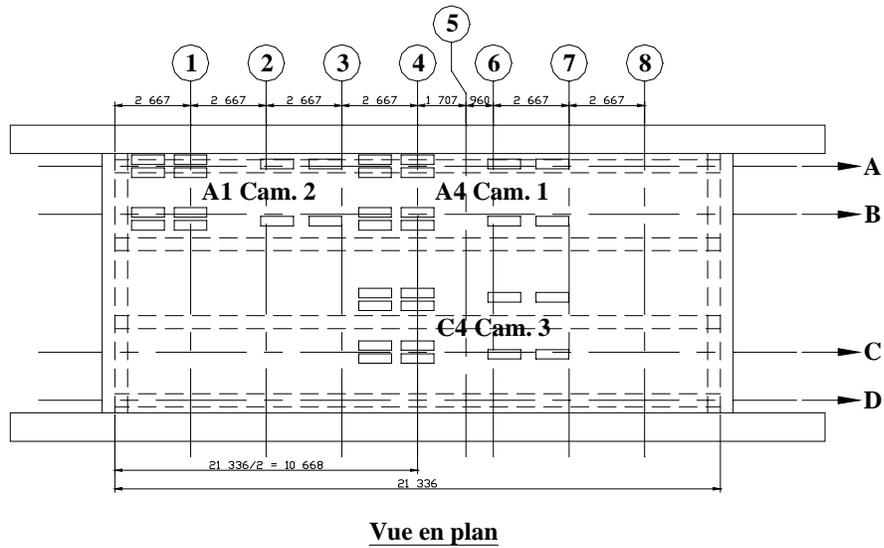
**Figure 1 :** Vue générale du pont de Ste-Émélie-de-l'Énergie



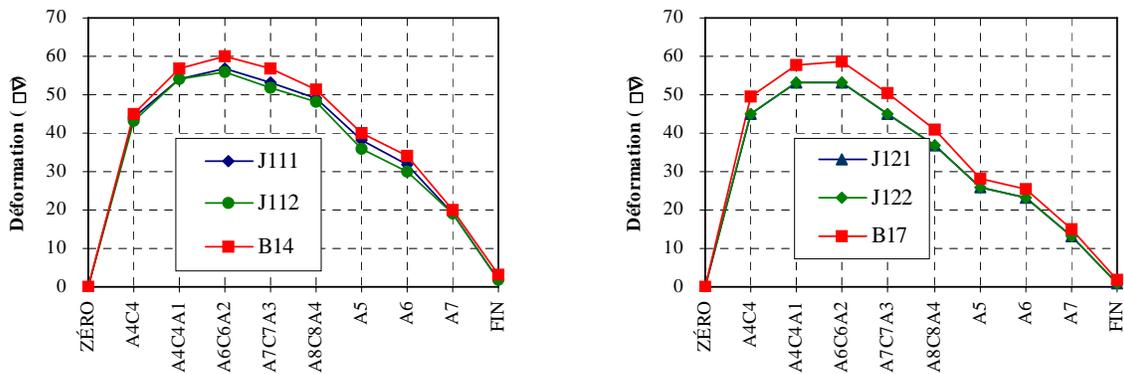
**Figure 2 :** Caractéristiques géométriques du pont



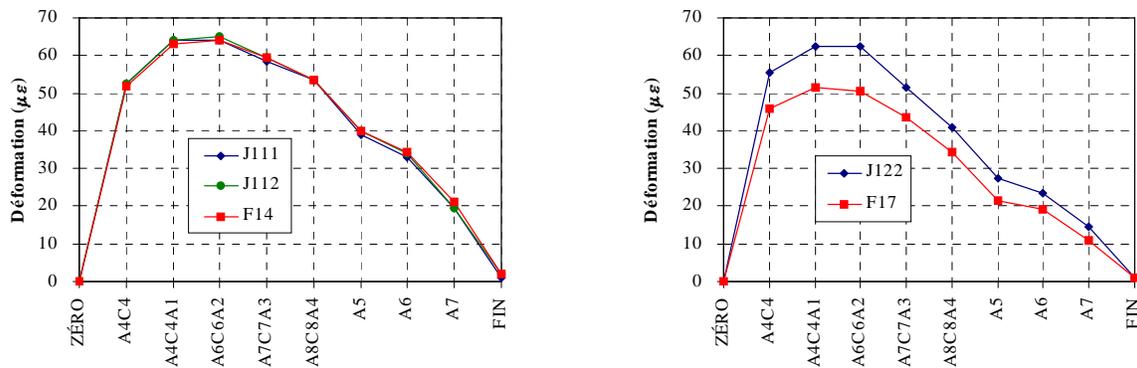
**Figure 3 :** Description des camions utilisés pour charger le pont : (a) camion à trois essieux; (b) camion à quatre essieux



**Figure 4 :** Cheminement et positions d'arrêt des camions lors des essais statiques (position A4C4A1 illustrée)



**Figure 5 :** Déformations de l'acier pour le cheminement ACA (essais de juin 2004)



**Figure 6 :** Déformations de l'acier pour le cheminement ACA (essais de septembre 1999)

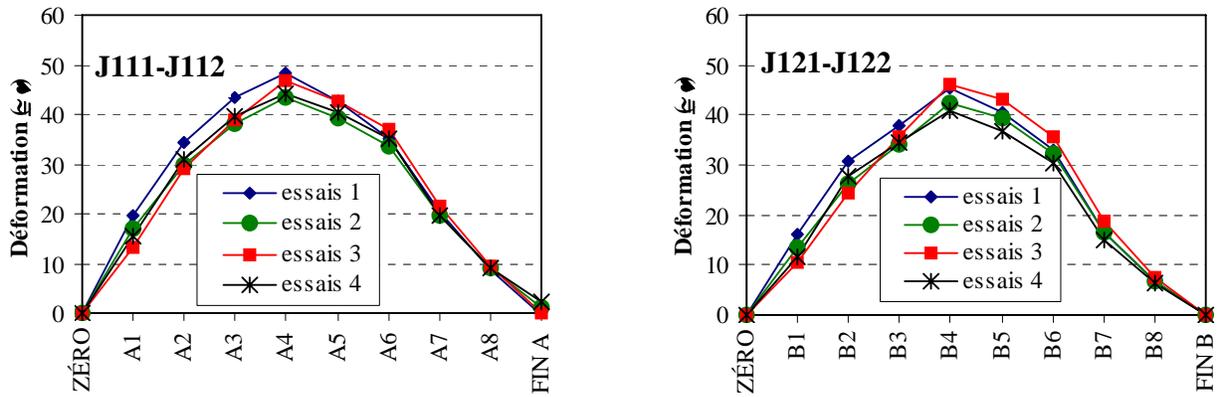


Figure 7 : Lectures des jauges électriques pour les cheminements A et B (4 séries d'essais)

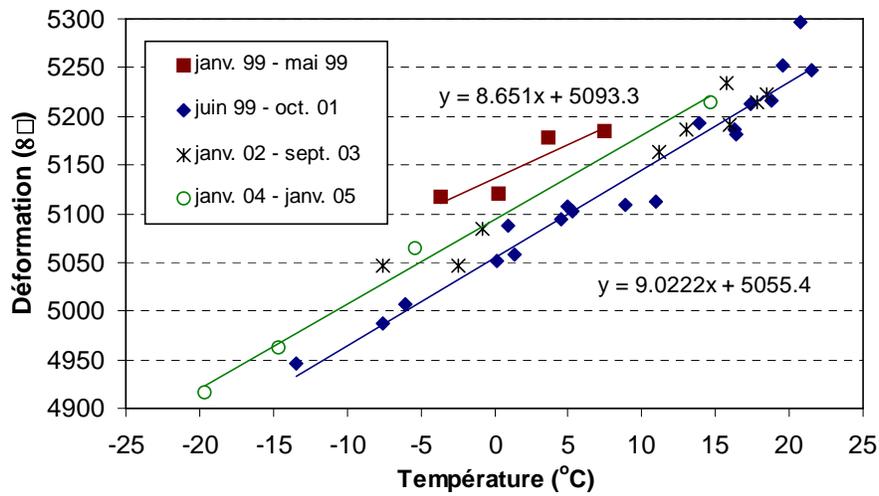


Figure 8 : Déformation des composite en fonction de la température, poutre intérieure

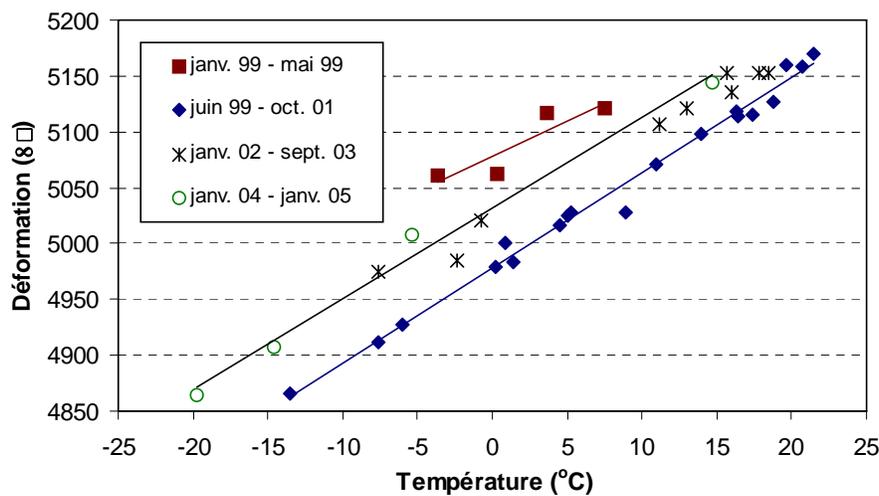


Figure 9 : Déformation des armatures en fonction de la température, poutre intérieure