

# Évaluation mécanique d'une dalle précontrainte par mesure de la courbure

## RÉSUMÉ

L'évaluation mécanique d'un ouvrage d'art a été réalisée en utilisant conjointement, et pour la première fois sur une dalle isostatique en béton précontraint, deux prototypes de courburemètres du réseau des LPC. Cette évaluation s'est appuyée sur des mesures, faites en plusieurs sections, des variations de courbure causées par la circulation sur l'ouvrage d'un convoi de caractéristiques connues.

D'un point de vue pratique, la facilité d'utilisation des courburemètres, simplement posés sur la chaussée, permet de s'affranchir des sujétions liées à l'exploitation de l'ouvrage. Par ailleurs, le traitement des mesures est quasi instantané et permet d'identifier immédiatement d'éventuelles anomalies de fonctionnement de la structure.

D'un point de vue métrologique, une bonne concordance a été observée entre les appareils. L'origine des faibles écarts relevés entre les mesures effectuées par les deux types de courburemètre peut être attribuée à des déformations locales de la chaussée sous l'effet de la proximité des charges ponctuelles.

L'analyse des résultats expérimentaux, obtenus pour dix cas de charge statiques et un cas de charge dynamique, montre que, dans les limites des sollicitations d'épreuve, le tablier ne présente pas de dysfonctionnement mécanique.

Une modélisation « en plaque » du comportement mécanique de la dalle par un logiciel de calcul aux éléments finis a été réalisée afin de calculer les distributions de courbures théoriques correspondant aux cas de chargement. La rigidité apparente de la dalle a été ensuite estimée en comparant les résultats expérimentaux aux valeurs calculées.

Le présent article fait suite et complète l'article des mêmes auteurs, paru dans le Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 224 et intitulé « Mesures de courbures sur ouvrages d'art. Application au cas du pont de Luzancy » [6].

**MOTS CLÉS :** Dalle - Béton précontraint - Charge - Revêtement (chaussée) - Essai - Mesure - Éléments finis (méthode) - Tablier de pont.

**Bertrand COLLIN\***  
Chef de la section Surveillance et instrumentation des ouvrages d'art  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien

**Bernard TONNOIR**  
Chef de l'unité Structures et Ouvrages d'art  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lille

## Introduction

Le comportement mécanique en flexion longitudinale d'un ouvrage d'art a été évalué en utilisant, pour la première fois sur une dalle isostatique en béton précontraint, des prototypes du réseau des LPC : les courburemètres. Ces appareils sont susceptibles de détecter, de localiser, voire de quantifier des endommagements structurels à partir de la mesure des variations de courbure causées par des variations contrôlées de moment fléchissant [1 à 5].

L'utilisation de courburemètres, simplement posés sur le tablier, permet de s'affranchir des sujétions liées à l'exploitation des voies franchies par les ouvrages. Les mesures étant effectuées et traitées instantanément, la durée de l'intervention ne dépend que du temps nécessaire à la réalisation des « cas de charge » et les anomalies de fonctionnement éventuelles du tablier peuvent être immédiatement détectées.

Les essais de chargement d'une des dalles de la trémie Pompadour à Créteil ont fourni l'occasion d'utiliser et de confronter, dans des conditions de chantier difficiles, le courburemètre LPC COPO et la chaîne de courburemètres développée par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lille.

Le présent article fait suite et complète l'article des mêmes auteurs, paru dans le bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 224 et intitulé « Mesures de courbures sur ouvrages d'art. Application au cas du pont de Luzancy » [6].

## Caractéristiques de l'ouvrage

L'ouvrage permet à la RN 186 de franchir la RN 6 du côté nord du carrefour Pompadour à Créteil. Mis en service en 1952, son tablier est constitué d'une dalle isostatique en

\* Actuellement, ingénieur, Société SITES.

béton, précontrainte longitudinalement et transversalement. La précontrainte comprend 128 câbles longitudinaux et 33 câbles transversaux de type 12Ø7 à fils lisses parallèles. La longueur de l'ouvrage est de 14,46 m pour une largeur de 17,40 m. La dalle, de 46 cm d'épaisseur, est recouverte d'une chaussée « composite », constituée de sable en partie inférieure, d'un mélange de vestiges de pavés et de béton bitumineux en partie intermédiaire et d'un béton bitumineux en partie supérieure. L'épaisseur moyenne de la chaussée est de 14 cm. Elle n'est interrompue d'aucun « joint de chaussée » aux deux extrémités de la dalle, le revêtement apparaissant continu sur tout le carrefour. Les appareils d'appui, s'ils existent, sont probablement très minces et rudimentaires : on ne peut les observer par les étroits interstices séparant la dalle des murs de front.

Suite aux désordres constatés lors de l'inspection détaillée réalisée par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien (LREP) en 1999 (corrosion et défauts d'injection de câbles de la précontrainte longitudinale), un programme d'investigations a été mis au point. Ce programme prévoyait notamment, pour évaluer le comportement mécanique du tablier, des essais de chargement avec mesures de flèches. En complément, il a été décidé d'effectuer simultanément des mesures de variations de courbure. Le but de ces mesures était de détecter d'éventuelles anomalies de rigidité en flexion, de tracer les lignes d'influence de la courbure longitudinale en plusieurs sections et d'estimer, à partir des rapports entre courbures mesurées et courbures théorique, la rigidité réelle de l'ouvrage.

## Procédures expérimentales

### Procédure générale des essais de chargement

■ Dans une première phase, en l'absence d'information sur l'état de la précontrainte, il a été

décidé de procéder prudemment, par chargements progressifs. Ces chargements ont été réalisés par un convoi de camions de 26 t (de un à trois camions pour les « cas de charge » 1 à 3 respectivement), qui a été amené en des positions longitudinales successives jusqu'au moment fléchissant maximal. Les flèches ont été mesurées à chaque étape du chargement pour être comparées aux flèches théoriques estimées par le calcul. Dans cette première phase, seul le chargement de la partie centrale du tablier a donné lieu à des mesures de courbure (fig. 1).

■ En seconde phase, ont été déterminées les lignes d'influence de la courbure en cinq sections au voisinage de I/2 (I/2 - 2 m, I/2 - 1 m, I/2, I/2 + 1 m, I/2 + 2 m). Des mesures statiques ont d'abord été effectuées en faisant progresser, par pas de 1,5 m, un convoi de trois camions sur le tablier, soit les sept positions, définissant les « cas de charge » 1 à 7 de la figure 2 et du tableau I ci-après ; enfin, il a été procédé à un essai « dynamique » en faisant circuler ce même convoi à faible vitesse sur la dalle.

### Caractéristiques et implantation des matériels de mesure utilisés

#### Courburemètre LPC COPO

Le principe du fonctionnement du courburemètre LPC COPO a été décrit en détail dans les publications antérieures [1, 4]. Pour cet appareil, les variations de courbure sont évaluées en mesurant le déplacement vertical relatif d'un point situé à une distance d'un mètre par rapport au centre de gravité d'un plan de référence fixe (fig. 3). Le capteur de déplacement, de type interférométrique, ne nécessite aucun réglage mécanique préalable de l'appareil : le courburemètre, simplement posé sur la chaussée avec son capteur de déplacement positionné sur la section à tester, est immédiatement opérationnel. Un capot isolant recouvre

TABLEAU I

Courbures en $10^{-6} \text{ m}^{-1}$	Positions successives du centre de gravité des camions (m)													
	2,73 (cas 1)		4,23 (cas 2)		5,73 (cas 3)		7,23 (cas 4)		8,73 (cas 5)		10,23 (cas 6)		11,73 (cas 7)	
	mesure	calcul	mesure	calcul	mesure	calcul	mesure	calcul	mesure	calcul	mesure	calcul	mesure	calcul
I/2 - 2	176	197	217	281	257	324	223	316	139	231	92	101	62	110
I/2 - 1	175	198	196	258	241	334	250	357	171	287	99	197	56	133
CLRL I/2	165	197	204	243	233	297	271	358	249	338	162	238	100	158
I/2 + 1	110	169	186	234	233	267	246	316	275	345	206	286	117	189
I/2 + 1	74	137	136	208	198	245	219	270	253	312	203	305	137	225
COPO I/2	124	198	195	240	226	292	283	356	322	336	244	234	163	158

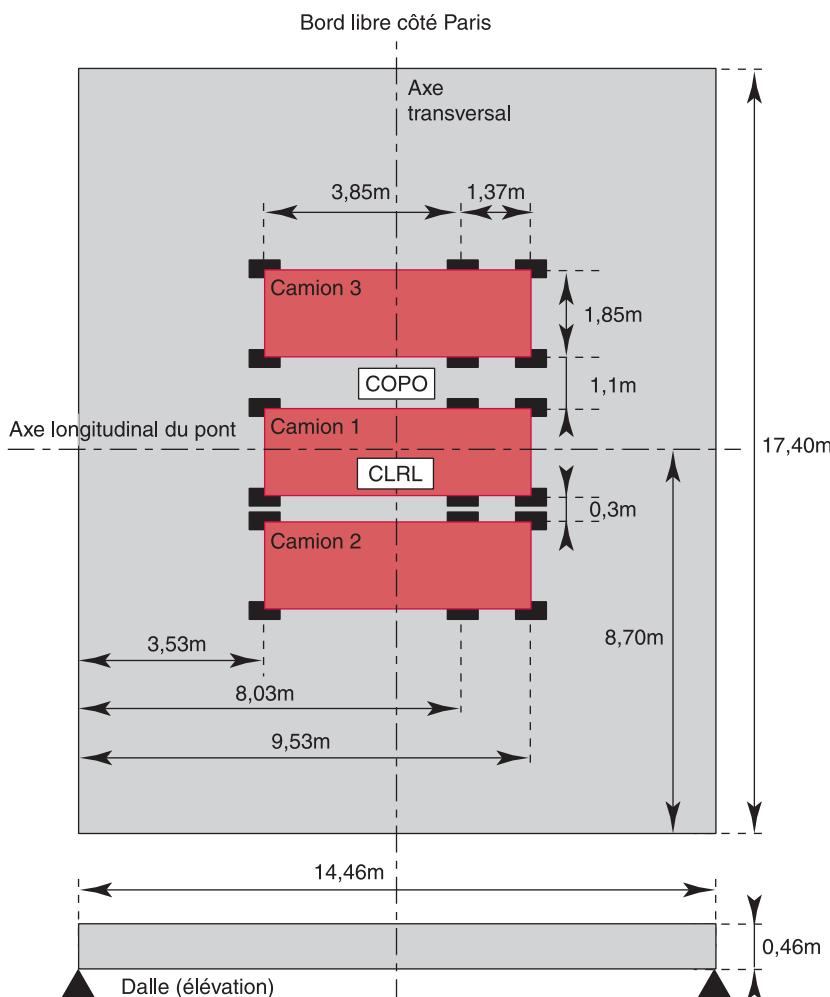


Fig. 1 - Chargement progressif de la partie centrale de la dalle.

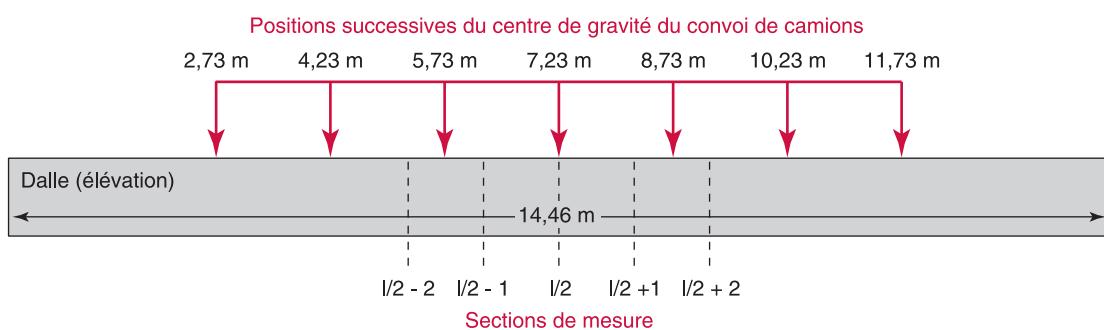


Fig. 2 - Détermination des lignes d'influence du moment de flexion.

l'appareil et permet de s'affranchir des effets des variations de température (et des intempéries). Dans ces conditions, la résolution de l'appareil est de  $10^{-6} \text{ m}^{-1}$ .

Le courburemètre LPC COPO est piloté à distance par un micro-ordinateur portable. Les données, acquises à une fréquence de 24 Hz, sont traitées et exploitées immédiatement. La configuration actuelle du programme d'acquisition et

de traitement des données limite la durée totale de mesure à 60 s. De fait, le courburemètre LPC COPO est un matériel qui, au départ, avait vocation d'être « embarqué » dans un véhicule assurant également le chargement de l'ouvrage (à l'image du deflectographe pour les chaussées). C'est pourquoi les cadences d'acquisition sont si rapides, et le temps de mesure total relativement court.



Fig. 3 - Courburemètre LPC COPO.

La position du courburemètre LPC COPO sur le tablier est représentée sur les figures 1 et 2 ; signalons que le capteur de déplacement, positionné à mi-portée de la dalle, était cependant décalé de 1,10 m par rapport au milieu de l'axe transversal. Du fait de sa hauteur, le courburemètre LPC COPO ne peut en effet être chevauché par un camion, mais doit être placé entre deux véhicules ; cette remarque a son importance, puisque la dalle, plus large que longue, fléchit également dans le sens transversal.

#### **Chaîne de courburemètres du LRPC de Lille (CLRL)**

Le principe du fonctionnement des courburemètres du LRPC de Lille a été décrit dans la publication antérieure [6]. Dans le cas présent, l'utilisation d'une chaîne de cinq courburemètres d'un mètre d'amplitude permet la mesure simultanée de la courbure dans cinq sections successives du tablier.

La position des courburemètres CLRL sur le tablier est représentée sur les figures 1 et 2. De par le faible encombrement de l'appareil, les camions peuvent, sans inconvenient, circuler au-dessus de



Fig. 4 - Une chaîne de 4 courburemètres du LRPC de Lille (CLRL), en place, de jour, sur un autre ouvrage.

celui-ci. Le courburemètre a été simplement posé sur la chaussée, pour cette fois sans dispositif particulier de protection ou d'isolation thermique ; le réglage du zéro des capteurs de déplacement est dégrossi manuellement au début de l'intervention, avant les réglages fins qui sont électriques. Les capteurs de déplacement sont connectés à une centrale d'acquisition reliée par la voie série à un ordinateur portable. Cette configuration permet d'obtenir « en temps réel », le tracé sur écran de l'évolution de la courbure en chacune des cinq sections lors de la circulation du convoi sur l'ouvrage. Les capteurs, de résolution 0,1 µm, sont raccordés par des vis micrométriques étalonées. La chaîne d'acquisition permet une vitesse de scrutation de toutes les voies une fois par seconde, cadence qui, en pratique, se montre largement suffisante. Dans ces conditions, la résolution des mesures de courbure est de  $10^{-7} \text{ m}^{-1}$ .

Il est à signaler que les mesures ont été effectuées de nuit, sous une pluie continue, à température quasi constante. Les conditions extérieures n'ont pas influencé les mesures : celles-ci n'ont jamais dérivé de manière significative au cours d'un essai ayant duré jusqu'à 1/2 heure (entre le début du chargement – et zéro des mesures – et le déchargement final).

## Résultats des mesures

### Mesures statiques

#### **Courbures à mi-travée pour les chargements centrés**

Les résultats expérimentaux sont représentés graphiquement sur la figure 5.

#### *Commentaires*

On note tout d'abord que, quel que soit l'appareil, la courbure mesurée croît continûment et quasi

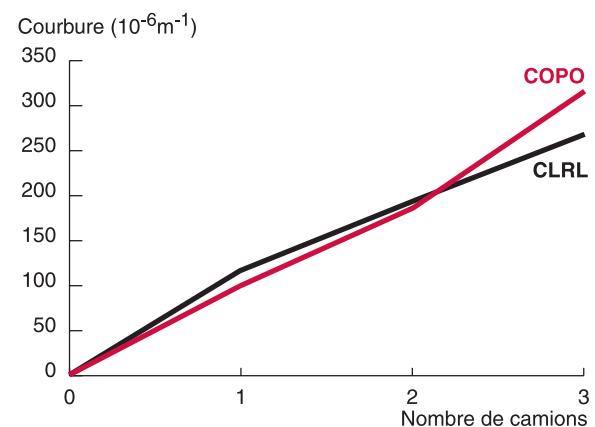


Fig. 5 - Variations des courbures mesurées pour le chargement centré progressif.

linéairement avec le nombre de camions. Ceci montre que la dalle réagit de façon élastique aux sollicitations.

Pour les cas de charge 1 et 2, la concordance entre les valeurs mesurées par les courburemètres est bonne ; les quelques écarts constatés sont pour partie le fait de la flexion transversale du tablier, ce que permet d'évaluer le modèle aux éléments finis. Le courburemètre LPC COPO est en effet excentré de 1,1 m par rapport au milieu de l'axe transversal de la dalle alors que les autres appareils sont placés au milieu de cet axe.

Pour le cas de charge 3, la courbure mesurée par le courburemètre LPC COPO est supérieure d'environ  $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  à celle mesurée par le courburemètre CLRL. Une déformation locale de la chaussée causée par l'essieu du troisième camion, très proche du courburemètre LPC COPO, peut être à l'origine de cette différence. Le courburemètre LPC COPO constate de même une courbure résiduelle au déchargement du même ordre de grandeur, qui pourrait être un défaut de retour élastique des enrobés.

### **Chargements statiques progressifs**

#### *Courbures mesurées à mi-travée*

Les résultats obtenus pour les positions successives du centre de gravité du convoi de trois camions sur l'axe longitudinal de la dalle sont représentés graphiquement sur la figure 6.

L'absence de discontinuité dans la ligne d'influence montre que, dans la section instrumentée, le fonctionnement mécanique du tablier est normal.

La corrélation entre valeurs mesurées par le courburemètre LPC COPO et par le courburemètre

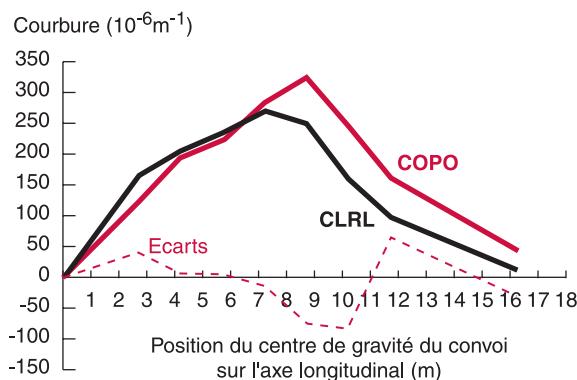


Fig. 6 - Courbures à mi-travée pour différentes positions du convoi de camions.

CLRL est excellente pour les quatre premières positions du convoi. Pour les positions suivantes du convoi, cette corrélation est moins bonne. Les déformations locales de la chaussée et les phénomènes de flexion transversale de la dalle sont probablement à l'origine des écarts observés.

#### *Courbures mesurées dans les cinq sections*

Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure 7.

L'absence de discontinuité dans les lignes d'influence (cf. fig. 7) permet de conclure à un fonctionnement normal du tablier en flexion longitudinale.

### **Mesures dynamiques**

La figure 8 montre l'enregistrement réalisé en temps réel par le courburemètre LPC COPO pendant la traversée de la dalle par le convoi de trois camions circulant à faible vitesse (environ 1 km/h). Ce diagramme est qualitativement identique à celui représentant la variation du moment fléchissant à mi-portée d'une poutre isostatique

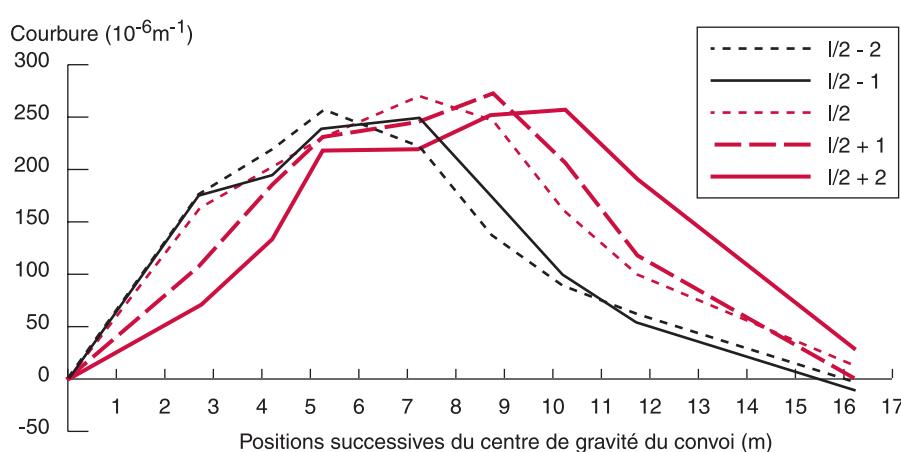


Fig. 7 - Courbures dans cinq sections pour différentes positions du convoi de camions.

soumise à un chargement « à trois essieux » (fig. 9). Comme pour les mesures statiques, l'absence de discontinuité montre que la dalle pré-contrainte ne présente pas à mi-travée de perte sensible d'inertie. On note que la valeur maximale de la courbure est inférieure d'environ  $30.10^{-6} \text{ m}^{-1}$  à celle mesurée pour les charges statiques ; de plus, cette valeur est très proche de celle mesurée par le courburemètre CLRL ( $250.10^{-6} \text{ m}^{-1}$  pour  $271.10^{-6} \text{ m}^{-1}$  respectivement). Si l'on considère qu'en chargement « dynamique », les déformations locales de la

chaussée restent plus faibles qu'en chargement statique, alors il est clair que les écarts de mesure entre les deux types d'appareil sont dus principalement aux déformations de la chaussée au voisinage du courburemètre LPC COPO, qui était souvent très près des roues des camions.

## Évaluation de la rigidité du tablier

La dernière étape de cette étude a consisté en l'évaluation de la rigidité du tablier et du module

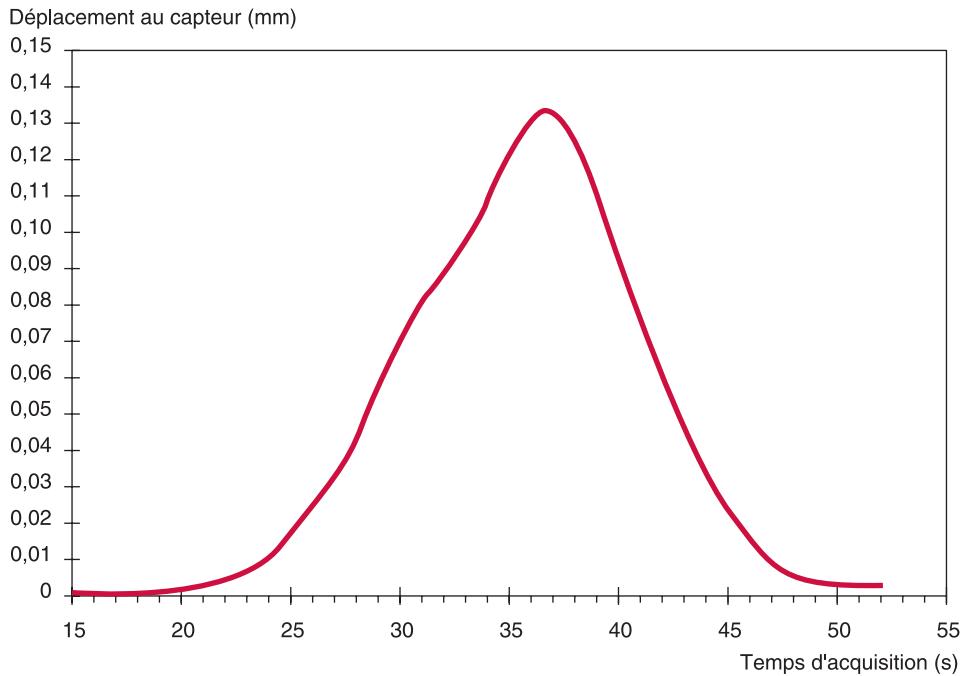


Fig. 8 - Mesure dynamique de la variation de courbure à mi-travée.

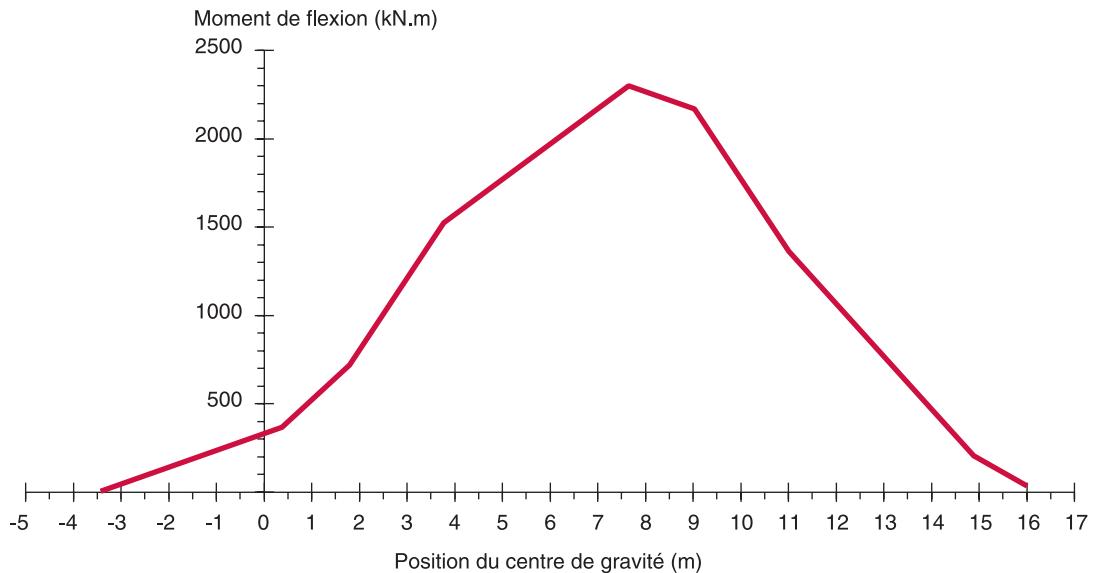


Fig. 9 - Variation théorique du moment de flexion à mi-travée d'une poutre isostatique soumise à un chargement « à trois essieux ».

de déformation apparent du béton. Pour ce faire, les courbures théoriques ont été déterminées, pour chaque cas de charge et dans chaque section instrumentée, par un logiciel de calcul aux éléments finis.

### Modélisation de la dalle

La dalle a été modélisée par une plaque de béton homogène de 0,46 m d'épaisseur, avec une maille élémentaire carrée de 25 × 25 cm, et  $E = 45 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,2$ .

Pour chaque position du convoi, les charges des roues ont été positionnées sur le maillage conformément à l'emplacement réel des camions. Après la résolution du cas de charge considéré, les courbures aux points de mesure des courburemètres ont été calculées à partir des pentes aux deux points du maillage encadrant le point de mesure, telles que fournies par le logiciel. Les résultats expérimentaux et théoriques sont rassemblés dans le tableau I.

### Comparaison entre mesures et calculs

Les courbures théoriques sont, dans tous les cas, supérieures aux courbures mesurées. La rigidité réelle de la dalle est donc supérieure à celle du modèle. La comparaison des distributions des courbures telles que représentées graphiquement sur la figure 10 fait apparaître, surtout pour les positions excentrées 1 et 7, une décroissance des courbures mesurées plus rapide vers les appuis. En extrapolant les distributions expérimentales à zéro, on constate que les « points de courbure nulle » se situent à environ 2 m en avant de la position théorique des appuis de la dalle. Ce résultat indique que le comportement mécanique de la dalle n'est pas parfaitement isostatique. Les zones d'appui constituent de fait un encastrement élastique partiel, la chaussée participant en traction à la reprise d'un moment de flexion négatif. Ceci n'est pas pour étonner, étant donné l'absence de joint de chaussée et les conditions d'appui incertaines de la dalle.

### Rigidité apparente de la dalle

La rigidité réelle de la dalle peut être évaluée en comparant, pour chaque cas de charge et en chaque section de mesure, les courbures mesurées

avec celles calculées pour un module de déformation théorique de 45 GPa, et en considérant l'inertie de la section brute de la dalle en béton. Le calcul a été fait pour le cas où le convoi est centré sur l'ouvrage (cas 4). C'est en effet pour cette position du convoi que l'homothétie entre courbures calculées et courbures mesurées est la meilleure. Dans ces conditions, la rigidité réelle ressort à  $135 \pm 5\%$  de la rigidité théorique, ce qui correspond à un « module de déformation apparent du béton » d'environ 60 GPa. Cette valeur paraît élevée, mais elle intègre la contribution – difficile à apprécier – de la chaussée composite. C'est, quoi qu'il en soit, une estimation « par excès », car elle se rapporte au moment isostatique théorique et que celui-ci est, comme on l'a vu, supérieur au moment réel longitudinal à 1/2 du fait de l'encastrement partiel sur appuis.

### Conclusions

Le diagnostic du comportement mécanique en flexion longitudinale a été réalisé pour la première fois pour une dalle précontrainte isostatique en utilisant les courburemètres du réseau des LPC.

L'analyse des résultats montre que, dans les limites des sollicitations d'épreuve – celles générées par trois camions de 26 tonnes circulant de front –, le tablier se comporte de façon normale en flexion longitudinale. La comparaison des mesures aux courbures calculées aux éléments finis à partir d'un modèle « en plaque » permet d'appréhender le comportement de l'ouvrage et d'estimer la rigidité réelle de la dalle.

Les appareils des deux types se sont révélés d'une utilisation rapide et aisée et ce, malgré des conditions de chantier difficiles. Les courburemètres étant simplement posés sur le tablier, la durée des interventions ne dépend que du temps nécessaire à la réalisation des cas de charge et il n'est pas nécessaire d'interrompre la circulation des voies franchies par l'ouvrage.

Enfin, d'un point de vue métrologique, une bonne concordance a été observée entre les deux types d'appareil, autant capables de mesurer avec précision et sans dérive « quelques dizaines de micromètres ». De fait, l'origine des quelques écarts observés peut être attribuée aux déformations locales de la chaussée du fait de la proximité de charges ponctuelles.

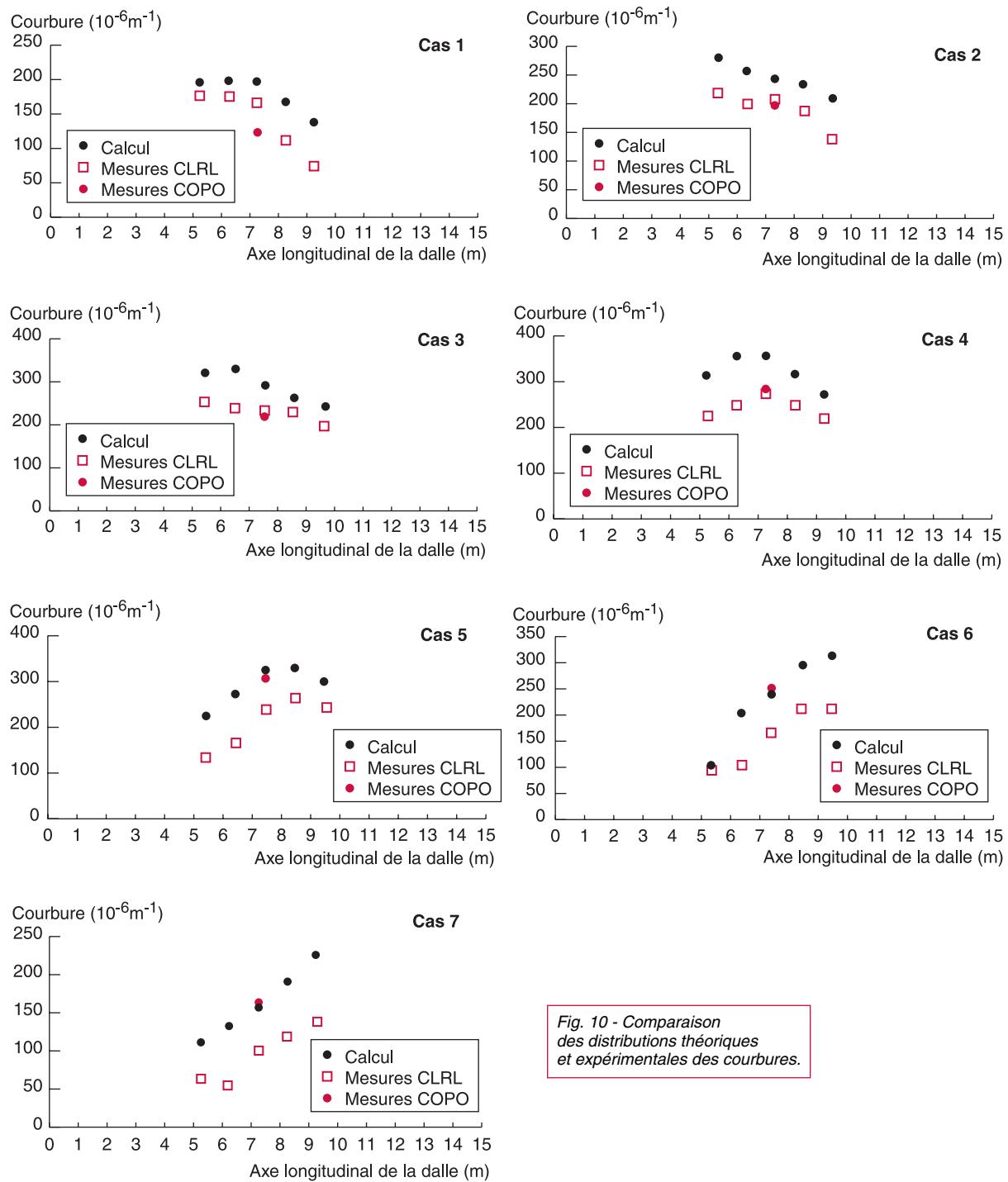


Fig. 10 - Comparaison des distributions théoriques et expérimentales des courbures.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABDUNUR C., GODART B., Méthodes d'auscultation pour l'évaluation des ponts, *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, 6, décembre 1998, pp 35-49.
- [2] DUCHÈNE J.-L., *Méthode inclinométrique pour la détermination des rigidités de flexion*, LCPC, 1988, Rapport interne, FAER 1-43-40-3.
- [3] DUCHÈNE J.-L., *Méthode clinométrique pour la détermination des rigidités de flexion appliquée à une poutre hyperstatique*, LCPC, 1989, Rapport interne, FAER 1-43-40-9.
- [4] COLLIN B., *Qualification du courburemètre prototype LPC COPO*, LCPC, 1988, Rapport interne, FAER 2-42-41-5.

- [5] COLLIN B., *Techniques de l'information sur ouvrages d'art. Mesures de courbure dans les structures*, LCPC, 1988, Rapport interne, FAER 2-43-12-8.
- [6] COLLIN B., TONNOIR B., Mesures de courbure sur ouvrages d'art. Application au cas du pont de Luzancy, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 224, janvier-février 2000, pp. 59-71.

## ABSTRACT

### **Structural evaluation of a prestressed deck slab by means of curvature measurements**

B. COLLIN, B. TONNOIR

The structural evaluation of a bridge was carried out by the joint use of two curvature meter prototypes from the LPC research network ; for the first time, this technique was performed on an isostatic prestressed concrete slab. The evaluation has been based on measurements taken at several cross-sections. The curvature variations were caused by controlled traffic loads.

From a practical standpoint, the easy-to-use curvature meters, which are straightforward to install on the pavement, enable overcoming the obstacles related to traffic. Moreover, measurements are processed almost instantaneously, thereby making it possible to immediately identify any possible abnormal structural behaviour.

From a metrological standpoint, the devices gave consistent results. The minor deviations detected between measurement readings from the two types of meters may be attributed to local deformations in the pavement due to the proximity of point loads.

An analysis of experimental results, obtained for ten static load cases and one dynamic case, reveals no signs of mechanical dysfunction in the deck slab, within the test load limits.

A "plate" model of the mechanical behaviour of the deck slab using a finite element computation software was devised in order to compute the theoretical curvature distributions corresponding to the various loading cases. The apparent stiffness of the slab was then estimated by comparing experimental results with computed values.

The present article is intended as a sequel and complement to the article by the same authors published in *Ponts et Chaussées Bulletin* No. 224 entitled : "Measurement of bridge curvature : Application to the Luzancy Bridge" [6].