

Mesures de courbure sur ouvrages d'art

Application au cas du pont de Luzancy

Bertrand COLLIN
Chef de la section Surveillance
et instrumentation des ouvrages d'art
Laboratoire régional de l'Est Parisien

Bernard TONNOIR
Chef de la section Ouvrages d'art
Laboratoire régional de Lille

RÉSUMÉ

La connaissance de la rigidité réelle d'une structure en béton armé ou en béton précontraint est essentielle à la détermination de ses caractéristiques mécaniques. Les mesures des variations de courbure d'une section sous l'action de variations contrôlées du moment fléchissant constituent une méthode expérimentale de caractérisation de la rigidité. La courbure peut être déterminée par trois méthodes basées chacune sur la mesure de grandeurs différentes : micro-déformations locales (jauges d'extensométrie), angles de rotation (clinomètres) et déplacements verticaux (courburemètres). Chacune de ces méthodes présente ses caractéristiques propres, tant du point de vue de la facilité de mise en œuvre que de celui de la justesse. Pour la première fois, ces trois techniques ont été utilisées simultanément pour caractériser le comportement mécanique sous charge statique du tablier d'un ouvrage d'art, le pont de Luzancy. D'un point de vue pratique, les méthodes clinométriques et courburemétriques se sont montrées, du fait de leur facilité de mise en œuvre, les plus adaptées aux mesures de courbure. D'un point de vue métrologique, la précision de chacune des trois méthodes de mesure a permis de révéler le caractère complexe du fonctionnement du tablier. Même si l'ordre de grandeur des courbures estimées à partir des différentes techniques est le même, l'influence d'efforts parasites locaux et de sollicitations autres que la flexion simple est sensible. Une analyse précise des résultats expérimentaux montre que cette influence se traduit par des écarts de quelques 10^{-6} m^{-1} entre les courbures mesurées par chacune des méthodes.

MOTS CLÉS : 24 - Pont - Tablier - Courbure - Extensomètre - Méthode - Mouvement - Déformation - Rotation - Mesure - Contrainte - Angle - Appareil de mesure - France - Ouvrage d'art (gén.) - Béton armé - Béton précontraint - Rigidité - Caractéristiques - Mécanique.

Introduction

L'intérêt des mesures de courbure dans les structures est multiple. Ces mesures permettent d'accéder à la rigidité en flexion des sections et peuvent par conséquent être utilisées pour vérifier des hypothèses de calcul, pour identifier des sections critiques, pour localiser et quantifier des endommagements.

Les recherches menées ces dix dernières années se sont attachées à développer des techniques de mesures permettant de s'affranchir au mieux des contraintes liées, d'une part, à la mise en œuvre *in situ* des matériels de mesures et, d'autre part, aux conditions d'exploitation des ouvrages de génie civil [1]. Les résultats de certaines de ces recherches démontrent notamment qu'il est possible de déterminer précisément les rigidités de flexion des structures par des mesures de rotation [2, 3, 4].

La rigidité en flexion d'une section peut être déterminée expérimentalement à partir de trois types de mesures : des mesures de microdéformations, des mesures de rotation et des mesures de courbure ; ces dernières ont donné lieu à la réalisation, dans le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées, de nouveaux matériels : les courburemètres [5]. Deux appareils, le courburemètre LPC COPO, utilisé au Laboratoire régional de l'Est Parisien et le courburemètre développé et utilisé par le Laboratoire régional de Lille sont actuellement en service. Récemment, ces appareils ont été utilisés conjointement avec succès pour évaluer le comportement mécanique d'une dalle précontrainte ; les résultats de cette étude feront l'objet d'un prochain article.

Pour la première fois, les méthodes clinométriques, courburemétriques et extensométriques ont été employées simultanément pour mesurer les variations de courbure du tablier d'un ouvrage d'art sous chargement statique contrôlé. Cette opération s'est inscrite dans le cadre de la réparation du pont de Luzancy en Seine-et-Marne.

L'objet de cet article est de présenter et de comparer ces méthodes expérimentales, d'abord dans leur principe, puis dans leur application.

Méthodes expérimentales de détermination de la courbure

Dans tout ce qui suit, on considérera que le principe de Navier Bernoulli sur la planéité des sections déformées et sur leur perpendicularité à la fibre moyenne déformée est vérifié. Dans ces conditions, le principe des méthodes de détermination de la courbure d'une section est basé sur la relation :

$$\Delta C = \Delta M / EI \quad (1)$$

ΔC représente la variation de courbure sous l'action de la variation ΔM du moment de flexion et EI est la rigidité de la section.

Détermination de la courbure d'une section à partir de mesures de microdéformations

Dans le cas d'une section de hauteur h , initialement au repos, puis soumise à une sollicitation de flexion pure, le moment de flexion M s'exprime par $M = (\sigma_{\text{sup}} - \sigma_{\text{inf}}) I/h$, où σ_{sup} et σ_{inf} sont respectivement les contraintes en fibre supérieure et en fibre inférieure (fig. 1). Pour des petites déformations ε_i élastiques, on peut utiliser la loi de Hooke ($\sigma_i = \varepsilon_i E$) et le moment de flexion s'écrit : $M = (\varepsilon_{\text{sup}} - \varepsilon_{\text{inf}}) EI/h$; la courbure C s'exprime alors par :

$$C = (\varepsilon_{\text{sup}} - \varepsilon_{\text{inf}}) / h \quad (2)$$

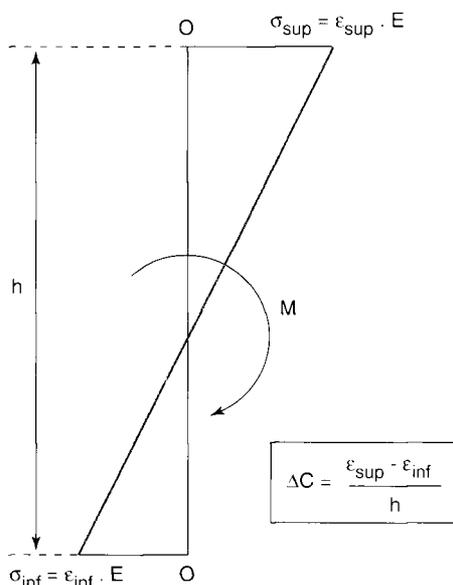


Fig. 1 - Détermination de la courbure d'une section à partir de mesures de microdéformations.

Les allongements correspondants à la courbure initiale n'étant pas pris en compte, la variation de courbure ΔC due à la variation de moment de flexion s'exprime par :

$$\Delta C = (\varepsilon_{\text{sup}} - \varepsilon_{\text{inf}}) / h \quad (3)$$

Cette grandeur n'est autre que la pente du diagramme de Navier ; cette pente peut être déterminée à partir de mesures de microdéformations dans la section. Ces mesures peuvent être réalisées à l'aide de jauges de déformations, d'extensomètres ou de capteurs de déplacement micrométriques.

La rigidité EI de la section s'exprime par :

$$EI = \Delta M / \Delta C \quad (4)$$

Cette rigidité peut donc être déterminée expérimentalement en calculant les pentes des diagrammes $\Delta M = f(\Delta C)$, ΔM étant supposé connu et ΔC étant déterminé à partir des mesures de microdéformations.

Détermination de la courbure d'une section à partir de mesures de rotations

La variation de courbure d'une section peut être également déterminée à partir de mesures d'angles de rotation. Comme au paragraphe précédent, une section S , initialement au repos, est soumise à un moment de flexion pure M . On considère les angles de rotations ω_1 et ω_2 en deux points situés symétriquement de part et d'autre de la section S et distants d'une longueur l_{12} (fig. 2). En rappelant que, dans l'hypothèse de petites déformations, la courbure C en S est la dérivée de l'angle de rotation de la fibre moyenne de la section, on peut écrire :

$$C = (\omega_1 - \omega_2) / l_{12} \quad (5)$$

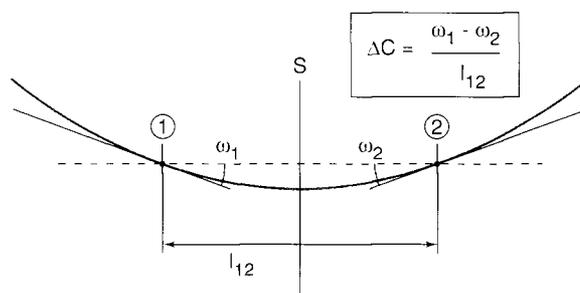


Fig. 2 - Détermination de la courbure d'une section à partir de mesures de rotations.

Les rotations initiales n'étant pas prises en compte (section « au repos »), la variation de courbure ΔC due à la variation de moment de flexion s'exprime par :

$$\Delta C = (\omega_1 - \omega_2) / l_{12} \quad (6)$$

Les mesures d'angles de rotation ω_i sont le plus souvent effectuées en utilisant des clinomètres électriques disposés le long d'un axe horizontal perpendiculaire à la section à étudier. Théoriquement, il suffit de deux clinomètres disposés symétriquement de part et d'autre de la section pour mesurer la variation de courbure.

La rigidité EI de la section peut alors être déterminée de la même façon que précédemment.

Détermination de la courbure d'une section par l'utilisation d'un courburemètre

Le principe du courburemètre est d'évaluer la variation de courbure locale dans une poutre à partir de l'angle β dont ont tourné, l'une par rapport à l'autre, deux sections situées à une distance longitudinale donnée d . Cet angle, séparant deux tangentes à la déformée, n'est autre que « l'angle au centre de courbure ». La valeur de la courbure est obtenue par le rapport β/d . Dans la pratique, la distance d est une caractéristique géométrique fixée pour un courburemètre donné (de un à plusieurs mètres, selon le type d'ouvrage à tester). L'angle β - très petit - est évalué par le biais de sa tangente λ ($\text{tg}\beta \cong \beta$) au moyen d'une mesure de déplacement déportée en bout de console, à l'extrémité du courburemètre ; la courbure mesurée est une valeur moyenne sur la longueur du courburemètre (deux mètres sur la figure 3).

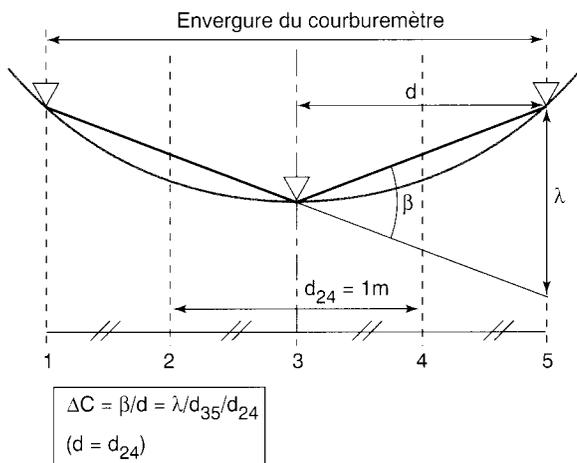


Fig. 3 - Principe de fonctionnement d'un courburemètre.

Comparaison des trois méthodes de mesure

Les trois méthodes de détermination de la variation de courbure d'une section S sont explicitées graphiquement sur la figure 4.

- Les tracés en rouge concernent l'usage de jauges extensométriques ou de capteurs de microdéplacements distribués sur la hauteur de la section. La variation de courbure en S correspond à la pente moyenne du diagramme de Navier, soit :

$$\Delta C(S)_{\text{jauges/capteurs}} (10^{-6} \text{ m}^{-1}) = d\varepsilon (10^{-6}) / dh \text{ (m)}$$

- Les tracés en vert concernent l'usage de clinomètres de précision, deux clinomètres étant nécessaires pour évaluer la courbure moyenne sur leur intervalle. La courbure en S correspond à la variation angulaire relative entre deux sections, rapportée à la distance entre clinomètres, soit :

$$\Delta C(S)_{\text{clinomètres}} (10^{-6} \text{ m}^{-1}) = (\alpha_4 - \alpha_2) (10^{-6} \text{ rad}) / d_{2,4} \text{ (m)}$$

- Enfin, la grandeur mesurée par un courburemètre, le déplacement vertical λ , est affichée en bleu. La courbure en S correspond à l'angle β

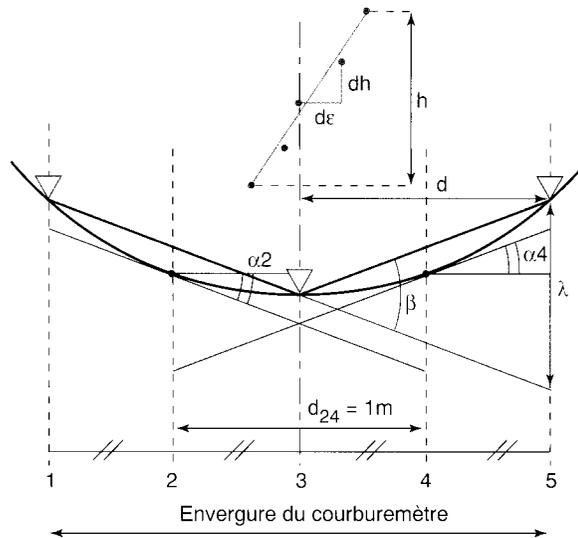


Fig. 4 - Comparaison entre les trois méthodes de mesure.

rapporté à la demi envergure d du courburemètre (revoir paragraphe précédent et fig. 3) ; en utilisant $\beta \cong \text{tg}\beta = \lambda/d$ la courbure s'écrit :

$$\Delta C(S)_{\text{courburemètre}} (10^{-6} \text{ m}^{-1}) = \lambda (10^{-6} \text{ m}) / d^2 \text{ (m}^2) \quad (7)$$

Dans le cas représenté sur la figure 4, on a $d_{12} = d_{23} = d_{34} = d_{45} = d/2$; si l'on admet que les tangentes à la déformée (en 2 et 4) sont parallèles aux sécantes (respectivement 1,3 et 3,5), alors les évaluations de la courbure au point 3 faites par les clinomètres et le courburemètre sont, si on suppose la courbure constante entre les points 1 et 5, rigoureusement équivalentes ; en effet, dans ce cas, on a bien $\beta = \alpha_4 - \alpha_2$.

Les conditions dans lesquelles la variation de courbure de la section S est mesurée par les différentes méthodes sont donc les suivantes :

- des jauges d'extensométrie (ou des capteurs de microdéformations) sont distribuées sur la hauteur de la section,
- deux clinomètres sont disposés symétriquement de part et d'autre de la section S ,
- l'appui avant, à mi-longueur du courburemètre, est positionné sur la section S .

Pour comparer les résolutions théoriques des trois systèmes de mesure, on considère d'abord les grandeurs physiques directes mesurées par chaque capteur et les grandeurs permettant d'estimer la courbure ; puis, à partir de la résolution individuelle de chaque capteur et des formules (3), (6) et (7), on détermine la plus petite variation de courbure détectable par chacun des systèmes. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau I.

TABLEAU I
Résolutions comparées des trois techniques de mesure

Systèmes de mesure	Grandeurs mesurées		Résolution	
	Directe	Finale	Directe	Finale
Jauges	Microdéformations locales ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Pente du diagramme de Navier ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{m}$)	1 $\mu\text{m}/\text{m}$	$10 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ (*)
Clinomètres	Angles α_i de rotation (radians)	$\Delta\alpha/l$ (ou $d\alpha/dl$) pour deux sections distantes d'une longueur l (rd/m)	$2,4 \cdot 10^{-7} \text{ rd}$	$2,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ (**)
Courburemètre	Déplacement vertical λ (μm)	Variation d'angle entre deux sécantes consécutives à la déformée ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{m}$)	0,1 μm	$1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ (***)

(*) Pour une pente de diagramme de Navier évaluée sur une section de hauteur d'un mètre.
(**) Pour une distance d'un mètre entre clinomètres.
(***) Pour un courburemètre de demi-envergure d'un mètre.

Application au cas du pont de Luzancy

Contexte des mesures

Le pont de Luzancy (fig. 5) permet au RD 402 de franchir la Marne entre la Ferté-sous-Jouarre et Château Thierry. Cet ouvrage à travée unique de 55 m de portée a été conçu par Freyssinet en 1941 et réalisé par Campenon Bernard entre 1941 et 1946. Le tablier est constitué de trois poutres caisson à bécquilles articulées (fig. 6 et 7). L'ensemble de l'ouvrage, à l'exception des blocs culées et de la lisse supérieure du garde corps, est composé d'éléments préfabriqués. Ces éléments sont assemblés par des précontraintes longitudinales, transversales et verticales. Les éléments préfabriqués ne contiennent pratiquement aucun acier passif et la précontrainte verticale a été réalisée par prétension lors de la préfabrication.



Fig. 5 - Photographie du pont de Luzancy.

Pour remédier aux désordres constatés en 1974, une précontrainte additionnelle a été mise en œuvre en 1976 et il a été procédé, en 1977, à un réglage de la poussée qui s'est traduit par un relèvement de la clé. Une récente évaluation de l'ouvrage, réalisée entre 1994 et 1996, a montré qu'il était nécessaire de procéder à une nouvelle remise en compression du tablier. Cette remise en compression a été réalisée par vérinage des bécquilles de l'ouvrage.

Les mesures de courbure devaient d'abord contribuer à caractériser le comportement mécanique du tablier avant réparation. Ces mesures ont été ensuite utilisées en temps réel pendant le vérinage pour contrôler l'évolution des contraintes et des déformations de deux sections caractéristiques. Une dernière campagne de mesures a été réalisée après vérinage du tablier pour déterminer les nouvelles caractéristiques du tablier « recomprimé ».

Seules les mesures de courbure de la première phase du chantier (caractérisation du comportement mécanique sous chargement contrôlé du tablier par un camion de 26 tonnes) ont été effectuées simultanément par les trois méthodes (jauges, clinomètres, courburemètres). Nous présenterons par la suite les résultats obtenus dans cette première phase pour quatre essais de chargement.

Ces essais, deux à deux identiques (à la précision près du positionnement du camion), ont été réalisés en faisant stationner un camion de 26 tonnes au voisinage de la clé de l'ouvrage, deux fois dans un sens de circulation donné et deux fois dans le sens opposé (fig. 6 et 7).

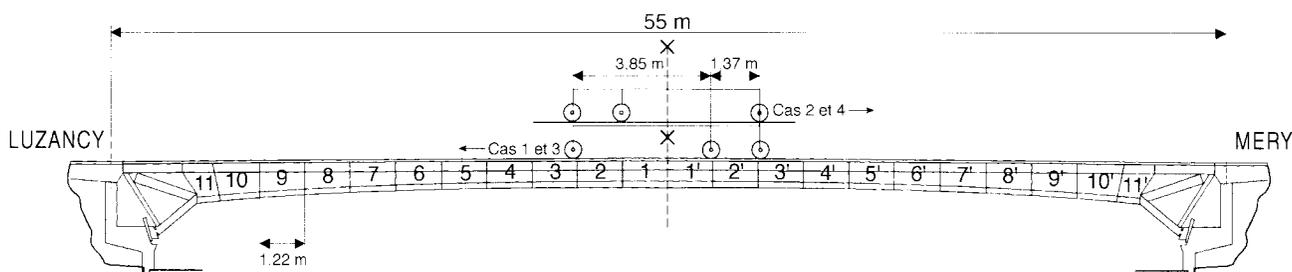


Fig. 6 - Élévation et positions du camion.

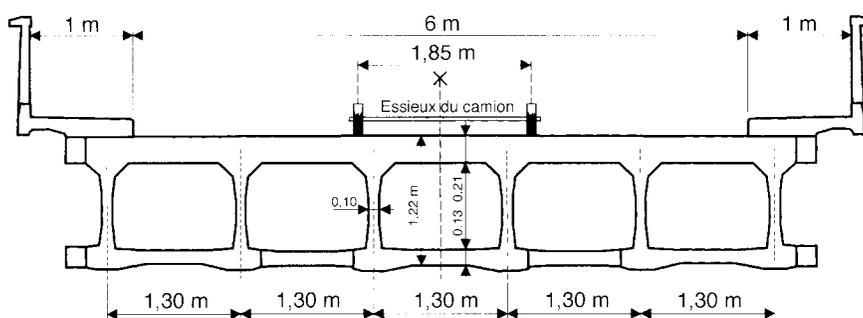


Fig. 7 - Coupe transversale à la clef et position du camion.

Implantation et type des matériels de mesure utilisés

Le schéma d'implantation des trois systèmes de mesure est représenté sur la figure 8.

Jauges d'extensométrie

Des jauges d'extensométrie de type courant ont été implantées à l'intérieur du caisson dans la section de mesure (deux jauges par âme, deux jauges sur le hourdis supérieur et deux jauges sur le hourdis inférieur).

L'installation des jauges a nécessité une préparation minutieuse de la surface du béton : polissage, mise en place d'une sous-couche de colle, collage, câblage et protection. Ces opérations, longues et délicates, ont dû être réalisées à l'intérieur d'un caisson de moins d'un mètre de hauteur.

Les jauges étaient reliées à une centrale d'acquisition pilotée par un micro-ordinateur portable. Les mesures, mémorisées dans le micro-ordinateur, ont été traitées après le chantier.

Clinomètres

Les mesures de rotation ont été réalisées à l'aide de quatre clinomètres électriques de résolution intrinsèque de 0,05 secondes d'angle, soit

$0,24 \cdot 10^{-6}$ radians. Les clinomètres ont été disposés horizontalement le long de l'âme gauche du caisson par l'intermédiaire de platines métalliques de longueur égale à 20 centimètres fixées dans l'âme du caisson.

L'implantation des clinomètres sur l'âme gauche du caisson a permis de s'affranchir des effets des possibles mouvements des hourdis sous l'effet des charges ; de cette façon, seule la rotation longitudinale de l'âme gauche du caisson central du tablier a été mesurée.

Les clinomètres étaient reliés à une centrale d'acquisition pilotée par un micro-ordinateur portable. Une partie des mesures, mémorisées dans le micro-ordinateur, ont été traitées directement sur site. À cause de la grande sensibilité des clinomètres aux vibrations, il a été nécessaire d'une part de tenter de réduire au minimum les sources de vibrations (pas de déplacements sur l'ouvrage pendant les mesures, arrêt du moteur du camion de chargement) et d'autre part de réaliser, après analyse, un traitement adéquat des données.

Courburemètres

Une chaîne de cinq courburemètres, dont une photographie est présentée sur la figure 9, a été utilisée. Le schéma de principe du fonctionnement de cette chaîne est présenté sur la figure 10.

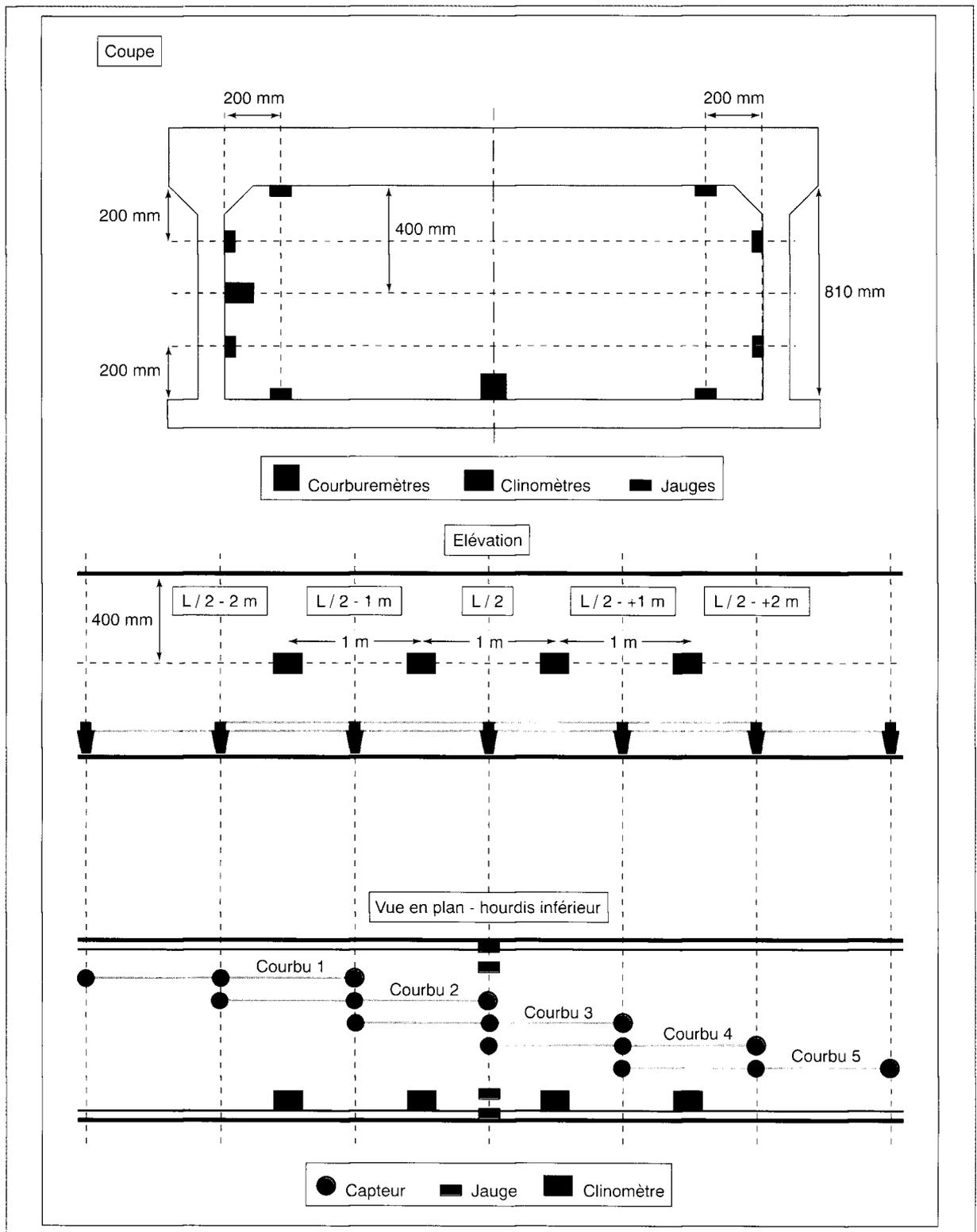


Fig. 8 - Implantation de l'instrumentation dans le caisson central.

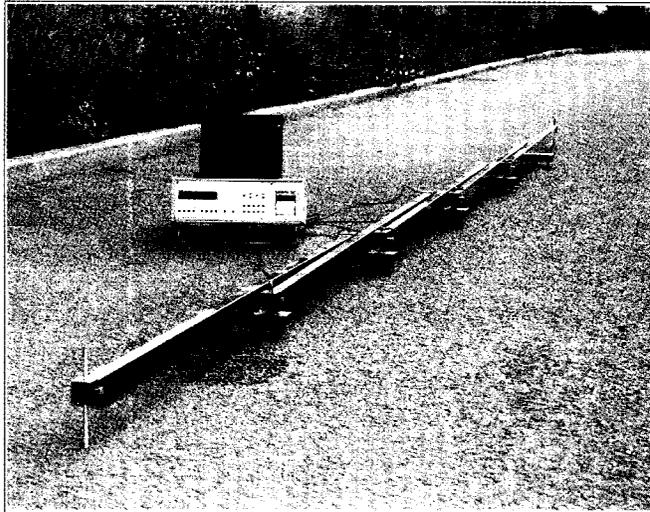


Fig. 9 -
Photographie
du courburemètre
utilisé à Luzancy.

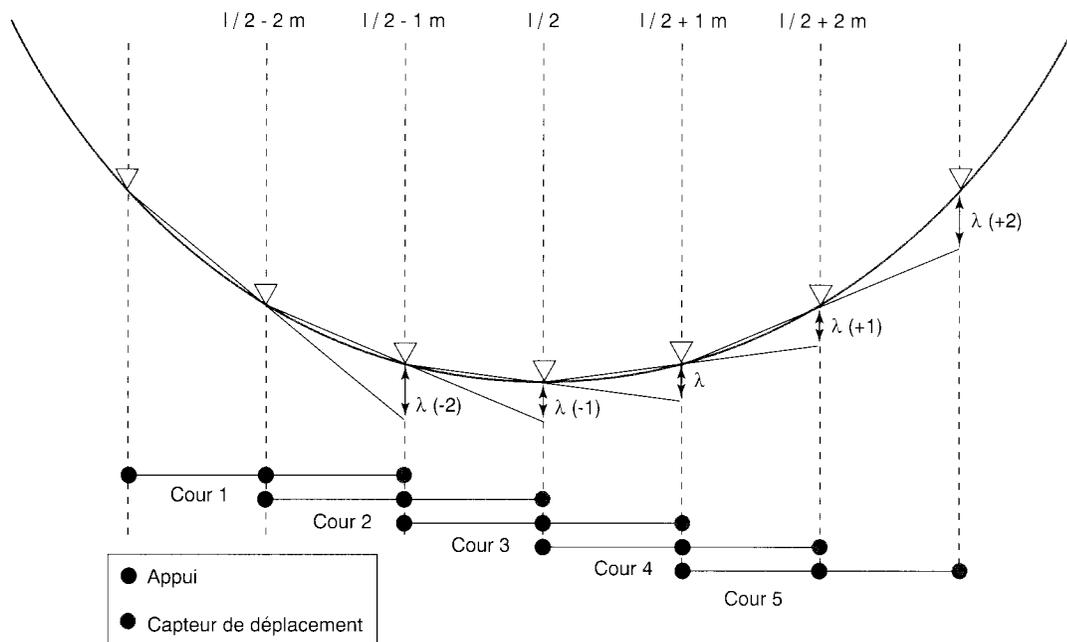


Fig. 10 - Schéma de principe d'une chaîne de courburemètres.

La figure 10 montre que la disposition « en chaîne » des courburemètres permet la mesure de la courbure dans autant de sections qu'il y a d'éléments dans la chaîne.

Les appuis avant des courburemètres placés à l'intérieur et à mi-largeur du caisson central ont été disposés à -2 m , -1 m , 0 m , $+1\text{ m}$ et $+2\text{ m}$ de la mi-portée de l'ouvrage, notée $l/2$ (les distances horizontales croissant conventionnellement de Luzancy vers Méry). Les positions $l/2 - 1\text{ m}$, $l/2$ et $l/2 + 1\text{ m}$ coïncident avec les sections testées par les clinomètres ; seule la section $l/2$ était instrumentée en jauges de déformation.

Les déplacements en extrémité de console de chacun des cinq éléments sont mesurés par des

capteurs inductifs connectés à une centrale d'acquisition. Cette dernière est reliée par la voie série à un ordinateur portable, ce qui 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 d'un convoi sur l'ouvrage. Les capteurs de déplacement, de résolution $0,1\text{ micromètre}$, sont raccordés par des vis micrométriques étalonnées. 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. Un exemple de mesures réalisées au passage d'un camion de 26 tonnes sur le pont de Luzancy est montré sur la figure 11.

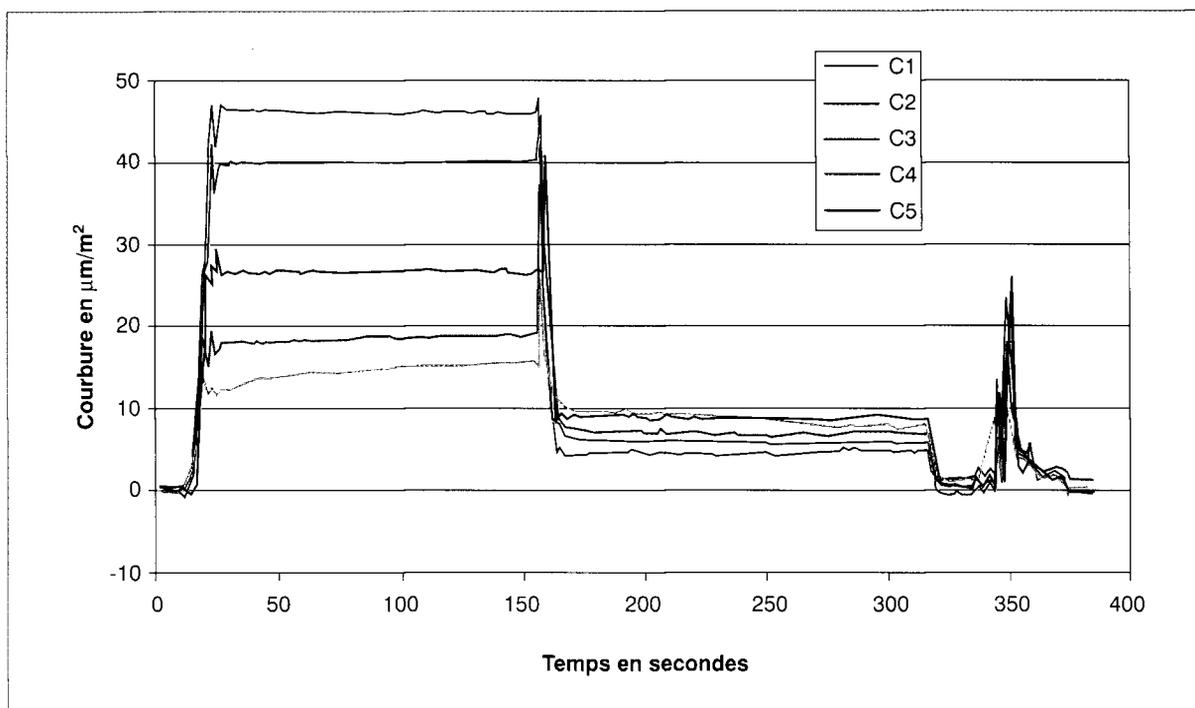


Fig. 11 - Courbures mesurées par une chaîne de cinq courburemètres.

Résultats expérimentaux

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus pour quatre essais de chargement, deux à deux identiques à la précision près du positionnement du camion : cas 1 et 3, cas 2 et 4. Les cas 1 et 3 correspondent à la même position du camion de 26 tonnes orienté dans le sens Luzancy-Méry ; dans les cas 2 et 4, le camion était orienté dans le sens Méry-Luzancy (revoir les fig. 6 et 7).

Jauges

Il convient de rappeler que les jauges ne rendent compte que des déformations locales et que, pour un vieil ouvrage en béton, des défauts locaux dans le matériau constitutif de la structure sont susceptibles de perturber les mesures. Par conséquent, bien que théoriquement deux jauges soient suffisantes pour déterminer la courbure d'une section (voir précédemment), dans la pratique, il est souvent nécessaire de multiplier les points de mesure.

Les diagrammes de Navier présentés sur la figure 12 sont tracés respectivement pour :

- les déformations mesurées par les jauges disposées sur la poutre droite (JC1, JC3, JC5, JC7) et les déformations mesurées par celles placées sur la poutre gauche (JC2, JC4, JC6, JC8) ;

- les déformations moyennes $(JC1 + JC2)/2$, $(JC3 + JC4)/2$, $(JC5 + JC6)/2$ et $(JC7 + JC8)/2$.

Ces diagrammes montrent que la section ne réagit pas de façon uniforme aux sollicitations : les

pentés des Navier apparaissent différentes selon qu'on considère les hourdis ou les âmes. De plus, on constate, pour le cas de charge 1, que la déformation du hourdis supérieur (comprimé) est, contrairement à ce que l'on pouvait attendre, plus faible que celle mesurée dans la partie comprimée de l'âme ; ceci pourrait révéler une déformation par « traînage de cisaillement » du hourdis. On note également que les diagrammes tracés à partir des déformations de la poutre droite diffèrent significativement de ceux tracés à partir de la poutre gauche ; ceci indique que les sollicitations ne sont pas réparties symétriquement dans la section et que le caisson subit vraisemblablement un gauchissement, en sus de la flexion. Enfin, des écarts dans le positionnement, tant transversal que longitudinal, du camion sur l'ouvrage peuvent expliquer les différences observées entre les cas de charge 1 et 3, *a priori* identiques.

Les valeurs des courbures calculées à partir des diagrammes montrés sur la figure 12 sont rassemblées dans le tableau II.

Si l'on souhaite considérer le comportement « d'ensemble » de la section, alors on doit calculer la courbure moyenne sur la totalité de la section ; dans ce cas, on « globalise » la section et la précision des valeurs de courbure varie entre $3,5$ et $11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$.

Pour comparer ces résultats avec les courbures mesurées par la méthode clinométrique, on ne pourra considérer que les valeurs obtenues à partir des déformations mesurées par les deux jauges collées sur l'âme de la poutre gauche.

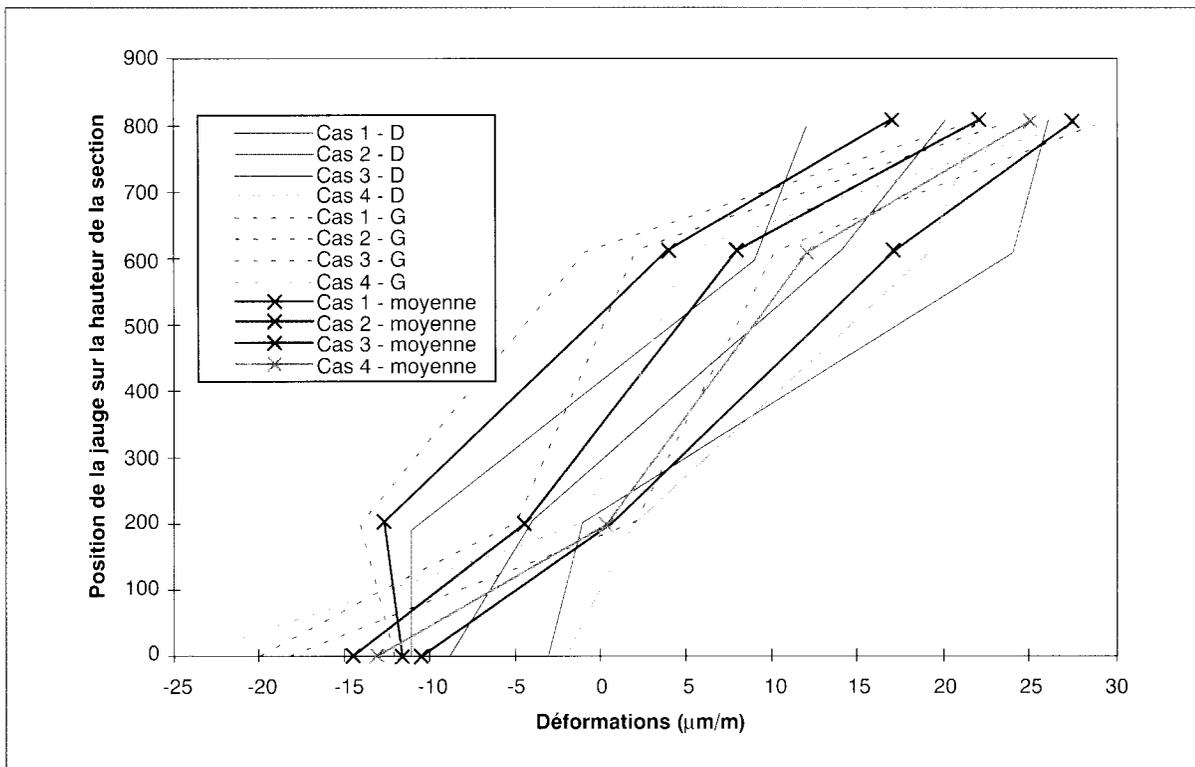


Fig. 12 - Diagrammes de Navier.

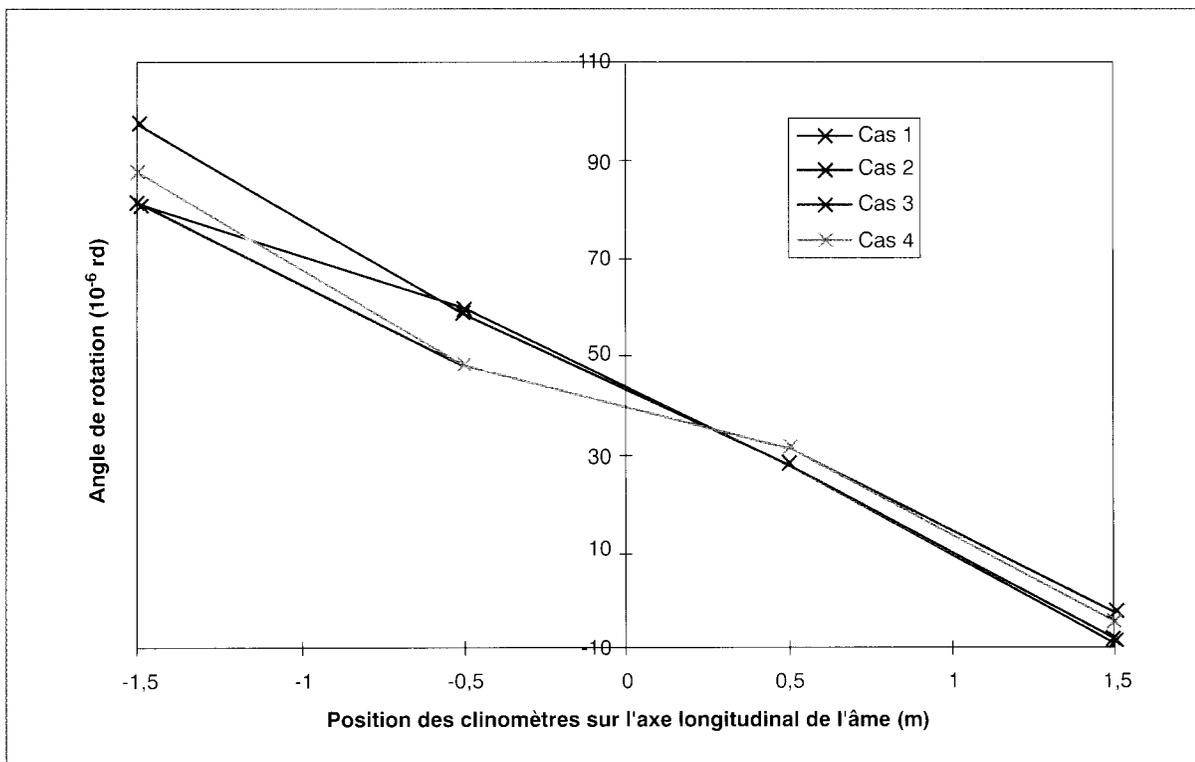


Fig. 13 - Mesures de rotation - diagrammes $\alpha = f(l)$.

TABLEAU II
Courbures calculées à partir des mesures extensométriques

Cas de charge	Courbure en 10^{-6} m^{-1}					
	Poutre droite		Poutre gauche		Moyenne	
	âme	âme et hourdis	âme	âme et hourdis	âme	âme et hourdis
1	49	33	32	40	40	36
2	44	37	17	47	30	42
3	61	41	20	50	40	46
4	41	32	15	54	28	43

TABLEAU III
Rotations et courbures

Position des clinomètres sur l'axe longitudinal de l'âme gauche (m)	Rotations en 10^{-6} radians			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
0	82	81	97	88
0,998	60	49	59	49
1,999	28	31	28	31
2,994	-9	-3	-8	-5

Section de mesure	Courbures en 10^{-6} rd/m			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Section I/2	32	17	31	17
Section I/2 - 1 m	22	33	37	39
Section I/2 + 1 m	37	34	36	36

Clinomètres

Une analyse préalable des signaux fournis par les clinomètres a montré une grande sensibilité des mesures aux vibrations. La prise en compte de ces effets « parasites » conduit à une perte de précision sur les mesures ; cette précision, de $\pm 2,4 \cdot 10^{-6}$ rd, conduit à une incertitude de $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ rd/m sur les valeurs de courbure.

Lors de la dernière phase du chantier, l'amélioration des conditions de mesure et du traitement du signal a permis de ramener l'incertitude à $0,6 \cdot 10^{-6}$ rd/m sur les mesures de courbure.

L'absence de discontinuité dans les courbes rotations/positions montrés sur la figure 13 indique que la rigidité de la section de mesure ne présente pas d'anomalie. On note, pour les cas de charge 2 et 4, un « creux » de courbure de la section I/2. Ces cas de charge différant des cas 1 et 3 par l'orientation du camion sur l'ouvrage, un décalage de la position des essieux pourrait être à l'origine de ce « creux » de courbure ; enfin, l'influence d'un effet de torsion causé par une

dissymétrie de chargement par rapport à l'âme gauche du caisson pourrait également expliquer ce résultat.

Les valeurs des rotations et des courbures sont données dans le tableau III.

Courburemètres

Le graphique de la figure 11 représente l'évolution des valeurs brutes des déplacements mesurés par les capteurs C1 à C5 en fonction du temps au cours d'un des cas de charge, telles qu'elles sont apparues, en temps réel, sur l'écran de l'ordinateur.

Au coefficient de justesse près des capteurs (à ce stade, non encore appliqué), il montre les déplacements mesurés, soit, en divisant par 1 m^2 , les courbures enregistrées par les cinq courburemètres en $\mu\text{m}/\text{m}^2$, ou encore 10^{-6} m^{-1} . L'enregistrement représente environ 10 minutes, au cours desquelles un camion a stationné d'abord à la clé, puis dans une position intermédiaire avant de sortir de l'ouvrage. On peut faire ici deux remarques :

❶ camion stationné, moteur stoppé, on arrive très vite à la stabilisation du déplacement indiqué par les capteurs, et il n'y a aucune ambiguïté à déterminer le « déplacement de fin de palier », considéré comme caractéristique de la variation de courbure provoquée par le camion ;

❷ camion parti, on observe un très bon retour au zéro des cinq capteurs (à plus ou moins 1 µm). Les très faibles écarts correspondent probablement à une (légère) redistribution des courbures sur les cinq mètres instrumentés.

Pour chaque essai de chargement, et pour chacun des cinq courburemètres, la variation de courbure brute a été relevée puis pondérée par le coefficient de justesse propre à chaque capteur.

Comparaisons et commentaires

Mise en œuvre de l'instrumentation

Le collage des jauges sur le béton à l'intérieur du caisson de l'ouvrage s'est révélé long, coûteux et malcommode. La jauge n'intégrant les déformations que sur les quelques centimètres de sa longueur active, elle réalise des mesures essentiellement locales ; l'installation d'un plus grand nombre de jauges, incompatible avec le temps et les moyens disponibles pour cette opération, aurait donc été nécessaire pour caractériser plus précisément le comportement de la section. En comparaison, l'installation des clinomètres et du courburemètre a été beaucoup plus aisée.

Concordance entre valeurs mesurées

Avant de comparer les résultats obtenus, il convient de rappeler qualitativement le comportement mécanique probable du tablier sous l'effet du chargement étudié, tout en considérant les grandeurs mesurées par chacune des techniques :

- les jauges mesurent des déformations très locales ; sur les âmes, ces déformations sont dues à la flexion longitudinale mais aussi au gauchissement de torsion gênée ; sur les hourdis sont mesurées, en plus des déformations dues à la flexion longitudinale, des déformations « parasites » causées par des flexions locales ; de plus, des défauts locaux de bétonnage ou des micro-fissures sont susceptibles de perturber sensiblement les mesures ;

- les clinomètres mesurent uniquement les rotations longitudinales de l'âme gauche du caisson ;

- les courburemètres mesurent une succession discrète de variations relatives des déplacements verticaux du hourdis inférieur ; ils sont donc sensibles à la flexion longitudinale « d'ensemble » du caisson mais aussi à son gauchissement et aux flexions parasites locales du hourdis inférieur.

Enfin, il est probable qu'à cause de la nature du tablier, des écarts minimes de la position transversale des roues du camion sur la chaussée aient été suffisants pour causer des différences significatives dans la répartition des contraintes (fig. 6 et 7).

Le tableau IV présente les résultats fournis par les trois systèmes de mesure pour quatre cas de chargement du tablier lors de la première phase du chantier.

TABLEAU IV
Comparaison des résultats fournis par les trois systèmes de mesure

Cas de charge	Système de mesure de la courbure	Courbures (10 ⁻⁶ m ⁻¹)					Moyennes	
		l/2 - 2 m	l/2 - 1 m	l/2	l/2 + 1 m	l/2 + 2 m	sur 3 m	sur 5 m
1	Jauges (moyenne sur les âmes)			40				
	Jauges (âme gauche)			32				
	Clinomètres (âme gauche)		22	32	37		30	
	Courburemètres (hourdis inf.)	23,3	28,1	40,2	50,6	35,4	39,6	35,5
2	Jauges (moyenne sur les âmes)			30				
	Jauges (âme gauche)			17				
	Clinomètres (âme gauche)		33	17	34		28	
	Courburemètres (hourdis inf.)	28,6	16,8	20,4	42,5	50,3	26,6	31,7
3	Jauges (moyenne sur les âmes)			40				
	Jauges (âme gauche)			20				
	Clinomètres (âme gauche)		37	31	36		35	
	Courburemètres (hourdis inf.)	24,1	25,4	38,7	49,1	36,9	37,7	34,8
4	Jauges (moyenne sur les âmes)			28				
	Jauges (âme gauche)			15				
	Clinomètres (âme gauche)		39	17	36		31	
	Courburemètres (hourdis inf.)	28,2	15,1	19,5	42,1	50,1	25,5	31,0

Concordance entre les trois méthodes à mi-portée (l/2)

La concordance entre les courbures mesurées par les clinomètres et celles estimées à partir des jauges de l'âme gauche est, sauf pour le cas de charge 3, excellente. Pour les cas de charge 2 et 4, la concordance entre les valeurs mesurées par les clinomètres, le courburemètre et les jauges de l'âme gauche est également très bonne. Enfin, pour les cas 1 et 3, les courbures moyennes estimées à partir des jauges disposées sur les âmes et celles mesurées par le courburemètre sont quasiment égales.

Les écarts significatifs concernent :

- le cas 1, où l'écart entre clinomètres (ou jauges de l'âme gauche) et courburemètre est égal à $8,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$;
- le cas 3, où on note un écart important entre les jauges de l'âme gauche, les clinomètres et les courburemètres.

Ces différences pourraient s'expliquer à partir des considérations développées plus haut sur le comportement complexe de la section instrumentée. Rappelons que le courburemètre, simplement posé sur le hourdis inférieur de 12 centimètres d'épaisseur, est sensible aux effets de flexion locale du hourdis alors que les clinomètres ne mesurent strictement que les rotations longitudinales de l'âme gauche du caisson. On peut également signaler que le clinomètre mesure l'angle dont tourne son support, donc l'angle « absolu » que fait la tangente à la déformée par rapport à l'horizontale ; par différence avec le clinomètre voisin, on obtient l'angle entre deux tangentes locales à la déformée ; le courburemètre mesure l'angle entre deux sécantes successives et égales de la déformée (fig. 3).

Concordance générale entre courburemètres et clinomètres

Jugée sur la comparaison des valeurs locales de courbure, la concordance entre les deux systèmes n'est pas excellente. L'écart moyen entre courbures individuelles mesurées par l'une et l'autre technique est de $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ et les courbures maximales sont de $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ pour les courburemètres et de $37 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ pour les clinomètres. Les raisons présentées au paragraphe précédent permettent d'expliquer ces différences. Si l'on considère cette fois les valeurs moyennées sur 3 mètres, l'écart moyen entre courbures est environ de $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$. Les effets des comportements locaux étant lissés, la concordance est beaucoup plus satisfaisante.

Distribution des courbures dans le sens longitudinal

Les courburemètres indiquent une bonne continuité des courbures sur la longueur instrumentée, avec un maximum à $l/2 + 1 \text{ m}$ lorsque le camion est orienté vers Méry (essais 1 et 3), mais à $l/2 + 2 \text{ m}$ lorsqu'il est orienté vers Luzancy (essais 2 et 4). Cette valeur maximale est comprise entre $49,1$ et $50,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, soit, pour fixer les idées, un « rayon de courbure » de 20 000 mètres. La continuité des courbures mesurées est également bonne pour les clinomètres lors des essais 1 et 3 (les maxima, très voisins, sont de 37 et $36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ en section $l/2 + 1 \text{ m}$). Lors des essais 2 et 4, les clinomètres indiquent un « creux » de courbure à $l/2$ ($17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$) qui ne coïncide pas exactement avec celui enregistré par les courburemètres.

Répétabilité des mesures

Les essais 1 et 3, d'une part, et 2 et 4, d'autre part, ont été réalisés le même jour, avec le même camion positionné pareillement sur l'ouvrage, ce qui permet donc de tester, à la précision près du positionnement du camion, la répétabilité des mesures. Elle est bonne pour les jauges quand on considère la courbure moyenne des âmes et pour les courburemètres, même quand on compare les valeurs individuelles. La répétabilité est légèrement moins bonne pour les clinomètres (comparer les courbures à $l/2 - 1$ pour les essais 1 et 3). Les faibles écarts mesurés pourraient trouver leur origine dans le fait que les mesures clinométriques sont moins « intégrales » que celles effectuées par les courburemètres ; « l'intégration » des courbures se fait sur 20 centimètres (longueur de la base de fixation) pour les clinomètres, et sur un mètre pour les courburemètres.

Conclusions

La réparation du pont de Luzancy a fourni l'occasion de confronter pour la première fois trois systèmes de mesure de la courbure.

La facilité de mise en œuvre et d'exploitation d'une instrumentation sont des facteurs déterminants du coût et des délais d'une intervention de mesure. De ce point de vue, les clinomètres et les courburemètres se sont révélés, pour cette opération, comme étant les mieux adaptés aux mesures de courbure. Les mesures de rotation, même si elles nécessitent, du fait de la sensibilité des appareils aux vibrations, une analyse et un traitement approprié, peuvent être exploitées en temps réel. Le courburemètre s'est révélé d'un emploi aisé, et les mesures ont pu être traitées immédiatement.

L'analyse des résultats expérimentaux a révélé le caractère complexe du comportement mécanique du tablier sous chargement statique. Même si l'ordre de grandeur des courbures calculées à partir des différentes techniques est le même, l'influence d'efforts parasites locaux et de sollicitations autres que la flexion est sensible. Les écarts significatifs de quelques 10^{-6} m^{-1} entre courbures estimées à partir des différents moyens de mesure sont notamment révélateurs de phénomènes de torsion du

caisson central et de flexions locales du hourdis inférieur.

La sensibilité et la complémentarité des trois méthodes ont permis de caractériser avec une grande précision le comportement du caisson central. Il est toutefois regrettable de ne pas avoir pu confronter les résultats expérimentaux à un modèle mécanique précis ; ceci aurait permis de mieux comprendre le comportement de l'ouvrage et d'affiner l'interprétation des résultats des mesures.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABDUNUR C., GODART B. (1998), Méthodes d'auscultation pour l'évaluation des ponts, *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, **6**, pp. 35-49.
- [2] ABDUNUR C., DUCHÊNE J.-L. (1988), *Mesures de rotation pour le schéma statique d'un ouvrage fissuré*, Conférence internationale *Mesures et essais en Génie civil*, Lyon-Villeurbanne 13-16 septembre.
- [3] DUCHÊNE J.-L. (1988), *Méthode inclinométrique pour la détermination des rigidités de flexion*, Rapport interne. FAER 1-43-40-3, LCPC.
- [4] DUCHÊNE J.-L. (1989), *Méthode clinométrique pour la détermination des rigidités de flexion appliquée à une poutre hyperstatique*, Rapport interne. FAER 1-43-40-9, LCPC.
- [5] COLLIN B. (1998), *Qualification du courburemètre prototype LPC COPO*, Rapport interne, FAER 2-42-41-5, LCPC.

ABSTRACT

Measurement of bridge curvature - an application on the Luzancy bridge

B. COLLIN - B. TONNOIR

A knowledge of the true stiffness of a reinforced concrete or prestressed concrete structure is essential in order to determine its mechanical characteristics. Measurement of changes in curvature of a segment subjected to controlled variations in the bending moment provides an experimental method for characterizing stiffness. Three methods, each based on the measurement of a different quantity, can be used to determine stiffness: local microdeformations (strain gauges), angles of rotation (clinometers) and vertical displacements (curvature meters). Each of these methods has specific characteristics, both as regards ease of use and accuracy. For the first time, these three techniques have been used simultaneously in order to characterize the mechanical behaviour under static loading of a bridge deck (Luzancy bridge). From a practical point of view, the clinometer and curvature meter measurements were the easiest to perform. From the metrological point of view, the accuracy of each method revealed the complex operation of the bridge deck. Although the curvatures estimated by each method were of the same order of magnitude, the influence of local interference and stresses other than simple bending was noticeable. Detailed analysis of the experimental results shows that the influence of these produce differences of several 10^{-6} m^{-1} between the curvatures measured using each method.