

DEUX METHODES D'EVALUATION MECANIQUE DES OUVRAGES D'ART

Mesures à l'Arbalète & Courburemétrie

Bernard Tonnoir

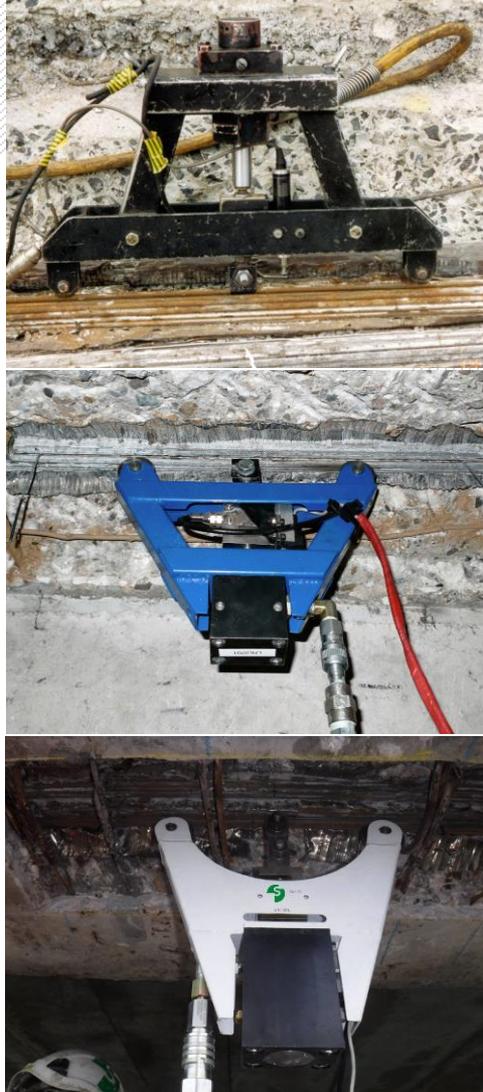


3 octobre 2018

LES MESURES A L'ARBALETE

Mesure de la tension des armatures de précontrainte

- *Concerne essentiellement les ouvrages en béton précontraint*
- *Méthode un peu destructive pour l'accès aux armatures*
- *Mesures locales*
- *Mesures directes de la tension recherchée*
- *Echantillon d'effectif limité → incertitude statistique sur la précontrainte*

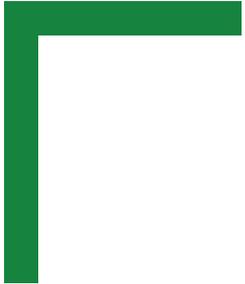


LA COURBUREMÉTRIE

Analyse des micro-déformations d'un ouvrage sous sollicitations de flexion

- *S'applique à toutes les poutres en général (tous matériaux et structures)*
- *Méthode non destructive*
- *Méthode semi-globale qui mesure le comportement d'un tronçon de poutre, centré sur le joint ou la section à tester*
- *Evaluation directe de la capacité portante, indirecte de la précontrainte*
- *Interprétation des mesures compliquée dans les ouvrages en béton*



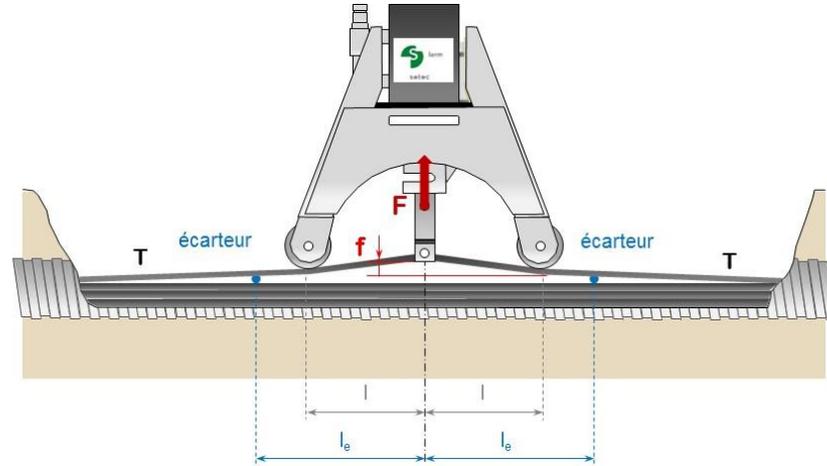


Les mesures à l'Arbalète

01.

Principe de la mesure

Le principe de base du fonctionnement de l'arbalète est fondé sur le fait que plus une armature est tendue, plus l'effort F nécessaire à la dévier de son tracé d'une flèche f sera important



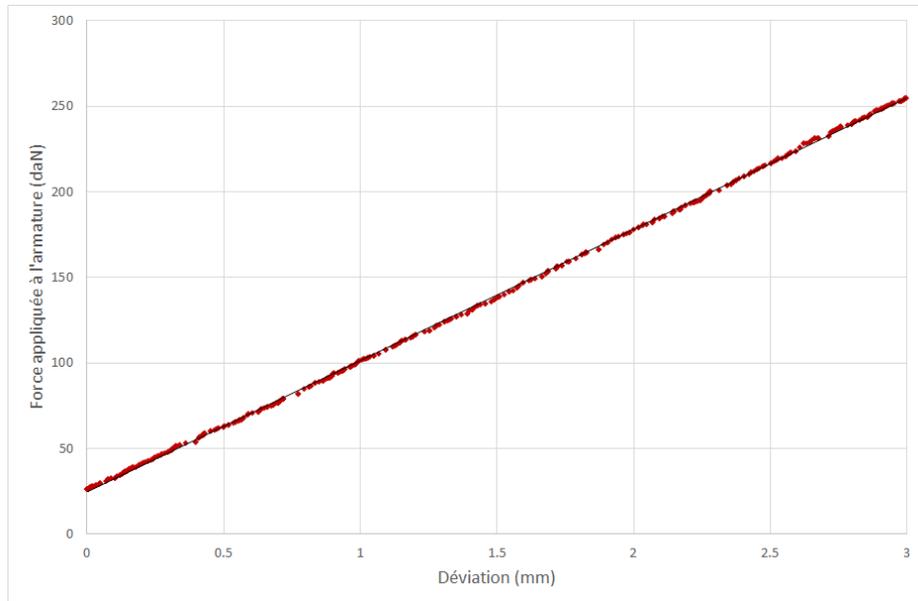
L'arbalète est munie d'un capteur de déplacement et d'un capteur de force. Elle s'appuie sur l'armature testée par deux roulettes et exerce l'effort de déviation par l'intermédiaire d'une fourchette qui saisit l'armature à mi-empattement.

En pratique, l'essai est réalisé jusqu'à une déviation limitée à 3 mm

Mise en œuvre sur site



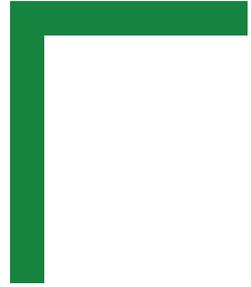
Courbe d'essai



Guide de référence (LCPC 2009) → **Assurer l'exactitude et une bonne précision des résultats de mesure**



- Respecter les recommandations du guide, en particulier :
 - Tester un échantillon d'effectif suffisant
→ incertitude totale (systémique + statistique) < 3%
 - Calibrer l'outil pour le type d'armatures et pour tenir compte de sa spécificité (géométrie, conception du châssis)
 - Apporter les correctifs nécessaires aux résultats bruts pour tenir compte des conditions différentes entre la calibration et les mesures sur site (longueur dégagée, qualité du coulis, ancrages, écarteurs ...)
- utilité de créer et de respecter une procédure spécifique du matériel et des conditions d'essais



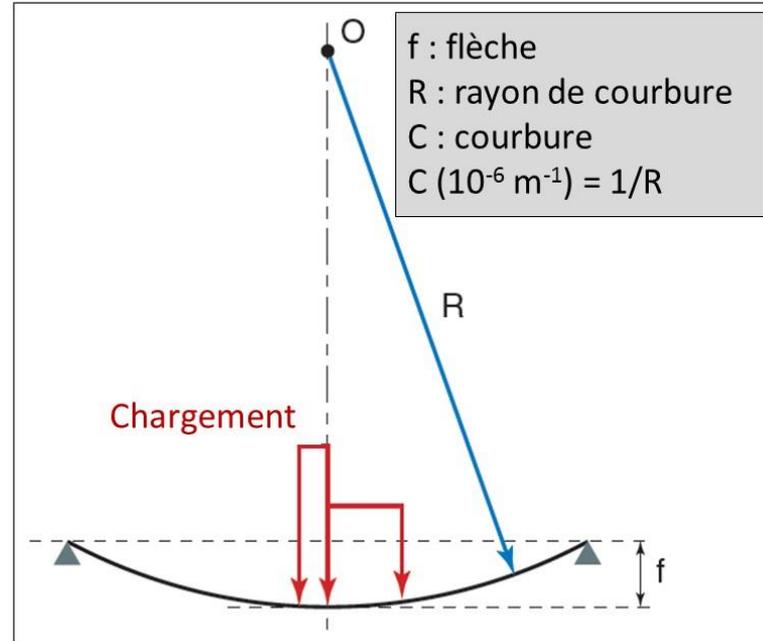
La Courburemétrie

02.

Principe

Une poutre en flexion sous l'effet des charges verticales prend en tous points de sa portée une « courbure » C , grandeur inverse du « rayon de courbure » local R issu du « centre de courbure » O situé (très loin) au-dessus de la poutre.

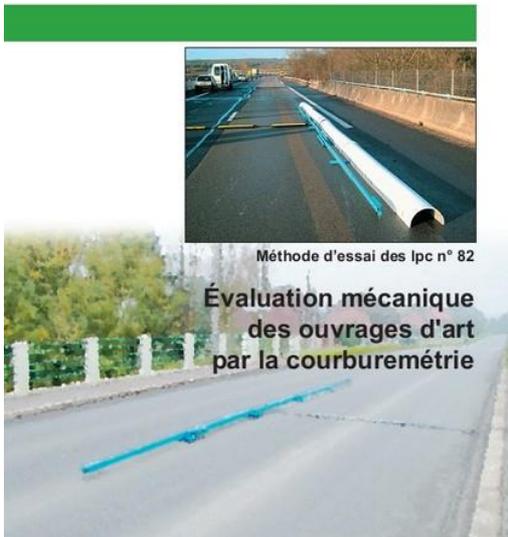
La courbure d'une section s'exprime donc en m^{-1} , mais en pratique en $10^{-6}.m^{-1}$, une courbure de $100 \cdot 10^{-6}.m^{-1}$ correspondant   un rayon de courbure de 10 km ...)



Guide de référence (méthode LPC n° 82 - IFSTTAR, décembre 2014)



techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées



Évaluation mécanique
des ouvrages d'art
par la courburemétrie



Les formules de la Courburemétrie

Formules géométriques

$$C \text{ (} 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{)} = 1/R \text{ (} 10^{-6} \text{ m)}$$

$$C = 1.10^{-6} \text{ m}^{-1} \Leftrightarrow R = 1000 \text{ km}$$

$$C \text{ (} 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{)} = d \text{ (} 10^{-6} \text{ m)} / a^2 \text{ (m}^2\text{)}$$

Sous charges roulantes (ΔM)

$$\Delta C \text{ (} 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{)} = \Delta M \text{ (MN.m)} / EI \text{ (MN.m}^2\text{)}$$

Vrai quel que soit le niveau d'hyperstaticité

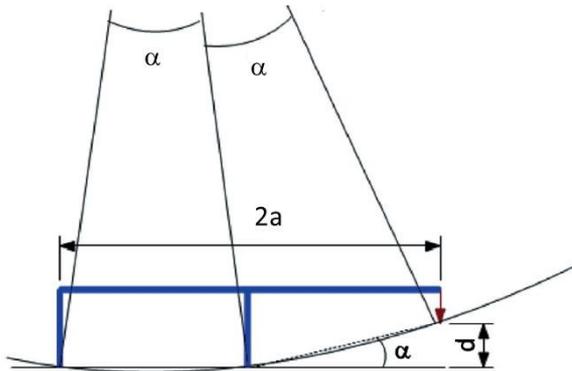
Sous gradient thermique (dT)

$$\Delta C \text{ (} 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{)} = \alpha \text{ (} 10^{-6}/^\circ\text{C)} \cdot dT \text{ (} ^\circ\text{C)} / h \text{ (m)}$$

Relation vraie en isostatique (déformations de flexion libres)

Relation fausse en hyperstatique (déformations de flexion empêchées \rightarrow Mts de gradient thermique).

De même, écrire $\sigma = \varepsilon.E$ sous gradient thermique est un contresens



Méthodologie

De façon générale, la procédure des essais comprend, successivement :

- Calcul préalable des courbures attendues sur les joints ou sections qui seront instrumentés, pour tous les cas de chargement prévus,
- Chargement calibré progressif de la travée par déplacement pas à pas du convoi,
- Mesure des courbures pendant le temps de stationnement des camions en position, avec surveillance en temps réel du dépassement éventuel de seuils fixés à l'avance,
- Tracé, au bureau, de la courbe Moment/courbure de chaque joint et analyse des anomalies possibles.



Objectifs de la Courburemétrie

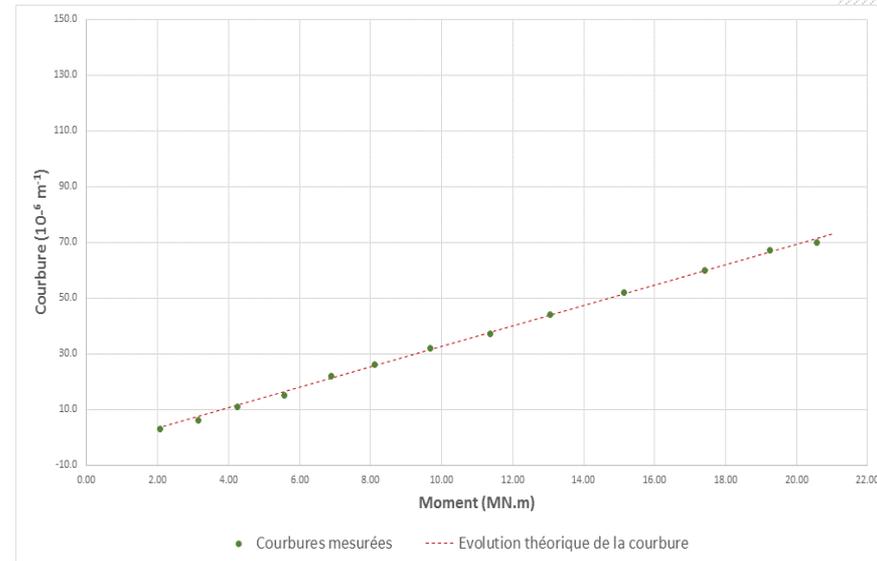
1- recherche du module d'inertie EI

Quelle est l'inertie disponible de certaines sections critiques qu'on cherche à évaluer, comme celles qui présentent des désordres, ou les sections de mi-portée des VIPP.

EI est la pente de la courbe M/C , dans le meilleur des cas parfaitement rectiligne jusqu'à la sollicitation maximale du convoi d'essai.

En admettant que l'inertie est celle, théorique I_h , calculée sur la base de la section de béton (homogénéisée), on évalue généralement le « module de déformation apparent » correspondant. On peut mesurer ainsi :

- l'effet de la participation de la chaussée et des superstructures dans le E apparent (45 GPa ?)
- pour certains VIPP, l'effet de l'endommagement de la section au fil du chargement (45 => 35 GPa ?)

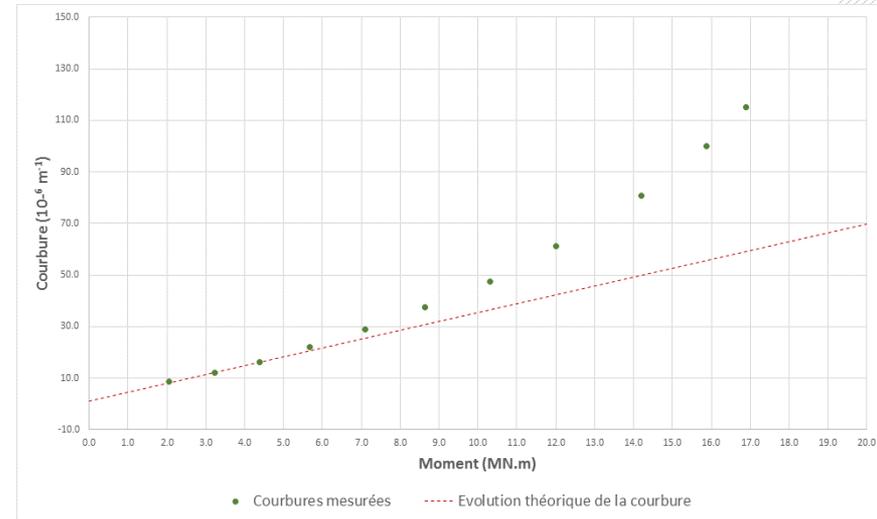


Objectifs de la Courburemétrie

2- recherche des moments de décompression

Le courburemètre est une alternative intéressante à une instrumentation classique par jauges de déformation, telle que réclamée par la « Méthode des Moments de décompression » dans sa version « historique » :

- simplement posé sur l'ouvrage (notamment à l'abri à l'intérieur des caissons), il est rapidement mis en œuvre et, si judicieux, déplaçable à tout moment
- il est néanmoins d'une grande précision. Il fournit une « valeur intégrale des variations de courbure sur sa longueur de quelques mètres », au contraire des jauges qui mesurent une déformation « très locale, sur une distance de quelques granulats »



Autres applications de la Courburemétrie

3- tracé du diagramme des moments le long d'une traverse de PIPO

L'utilisation de 3 courburemètres posés à $1/6$, $1/2$ et $5/6$ d'une travée de PIPO a permis :

- de déterminer le module d'inertie disponible d'une travée surmontée d'une importante épaisseur de chaussée « participante »
- d'évaluer les moments d'encastrement des deux côtés pour s'assurer de la bonne continuité de la traverse avec les pénétrants

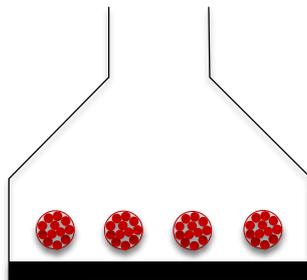
4- évaluation rapide de la respiration de joints de voussoirs sous circulation

Sans avoir à déployer la logistique d'une épreuve de chargement, toujours lourde sur les grands ouvrages autoroutiers, il est possible, sous circulation, de détecter les joints de voussoirs « pathologiques » par la courburemétrie :

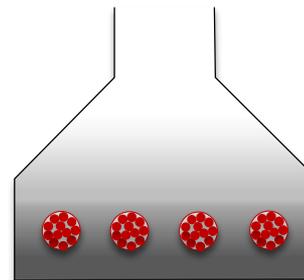
- La campagne peut être systématique, car les courburemètres sont facilement et rapidement déplacés d'un joint à l'autre,
- La cadence d'acquisition des mesures est plus élevée que pour une épreuve de chargement statique (10 Hz), ce qui permet de décrire correctement la ligne d'influence de la courbure par un nombre de points suffisant lorsqu'un camion traverse la travée

Progression de la fissuration dans le talon d'une poutre après dépassement de la limite de décompression

Fissuration théorique



Fissuration réelle



Type de fissuration

Effet mécanique

Visibilité

En progression

Fissure F concentrée, ouverte

EI décroissant

Oui. F0,1 mm tous les 20 cm

Ouverture et hauteur

Micro-fissuration distribuée

EI décroissant

f invisible

Densité et surface

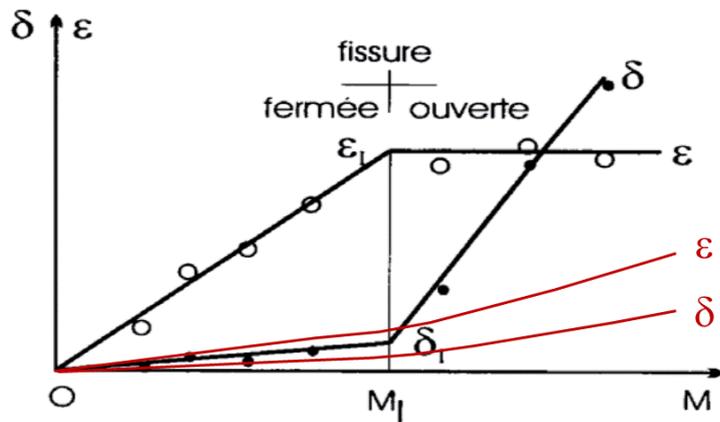
Progression de la fissuration dans le talon d'une poutre après dépassement de la limite de décompression

- La résistance à la traction du béton n'est pas partout égale à f_t
- Même si un joint de voussoir n'est pas « bien collé », il faudrait, pour qu'il puisse visiblement s'ouvrir, que tous les câbles de précontrainte qui le traversent perdent aussi, localement, leur adhérence au coulis
- Dans la réalité, on assiste donc à l'extension (vers le haut) et à la densification de la zone micro-fissurée, ce qui entraîne la décroissance de l'inertie, donc du « module de déformation apparent », ce qui est bien mis en évidence par les mesures de courbure
- On a également pu montrer que la micro-fissuration distribuée pouvait néanmoins, au fil du chargement, « se concentrer » sur le joint instrumenté, sans pour autant aller jusqu'à l'apparition d'une fissure franche
- Une autre conséquence est de pouvoir constater (lorsqu'on la mesure) que la hauteur de l'axe neutre « remonte » avec la sollicitation (VIPP)

Ces observations ne s'appliquent pas à un joint déjà visiblement fissuré, d'une section qui est déjà décomprimée à vide

Les enseignements récents de la courburemétrie

Incidence sur l'instrumentation et l'interprétation de la Méthode des moments de décompression



ϵ et δ restent proportionnels

Schéma de principe de la Méthode des « Moments de Décompression »

(Fiche C5-2 du recueil IFFSTAR des méthodes d'auscultation des structures)

- L'apparition d'une fissure franche, considérée comme le signe du début de la décompression est normalement détectée par un capteur de déplacement : en cas de micro-fissuration distribuée, ce signe ne peut apparaître
- De même, la jauge ne peut saisir le seuil de la décompression, car il n'y a pas discontinuité du matériau, la section du joint « reste plane »



MERCI
DE VOTRE ATTENTION