

Télésurveillance d'un pont en maçonnerie

Le cas du pont Fouchard

Gilbert FAUCHOUX
Ingénieur

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

RÉSUMÉ

Le pont Fouchard à Bagneux, près de Saumur, est constitué de trois arches très surbaissées.

Au cours d'une première inspection détaillée, il fut observé des désordres préoccupants.

Des investigations complémentaires permirent de conclure à l'admissibilité d'exploitation de l'ouvrage, sous réserve de renforcer la sécurité à l'effort tranchant aux naissances et de mettre l'ouvrage sous surveillance renforcée afin de confirmer les résultats d'expertise et de vérifier l'absence d'événements irréversibles.

L'article décrit les techniques d'instrumentation, de centralisation, de télétransmission et d'interprétation des mesures sur l'ouvrage pendant six ans.

Le grand nombre de mesures permet de tester statistiquement une régression linéaire.

L'analyse des résidus de cette régression fut la partie essentielle de l'étude qui permit de conclure à la stabilité spatiale et temporelle des appuis et des arches.

Le gestionnaire pût alors ramener cet ouvrage dans un cycle de surveillance ordinaire après avoir réalisé les renforcements à l'effort tranchant par la mise en place de consoles à l'intrados des naissances.

MOTS CLÉS : 61 - Surveillance - Télécommunication - Pont - Maçonnerie - Méthode - Télétransmission de données - France - Mesure - Modèle numérique - Renforcement (gen.) - Cisaillement.

Présentation générale du problème

Description générale du pont

Le pont Fouchard (fig. 1) à Bagneux près de Saumur, reconstruit en 1947, est constitué longitudinalement de trois arches très surbaissées (1/10) de 27 m d'ouverture chacune. Transversalement, il est composé de deux voûtes centrales isostatiques à trois articulations « Considère » et de deux voûtes latérales sans articulation. Les tympans sont en maçonnerie. Les piles sont fondées en rivière sur des pieux « Rodio ». Bien que l'ouvrage soit construit à partir de blocs de béton non armé, mis en place à joints secs, son fonctionnement est identique à celui d'un pont en maçonnerie. Cet ouvrage se situe sur la RN 147 et supporte un trafic très important de poids lourds.



Fig. 1 - Vue générale de l'ouvrage.

Description de la pathologie du pont

En 1986, au cours d'une inspection détaillée, des désordres susceptibles de mettre en cause la sécurité des usagers furent relevés. En particulier, l'arche de rive gauche faisait apparaître de larges fissures aux niveaux des naissances et de la clé (fig. 2).

Les fractures ainsi constatées correspondaient aux classiques joints de rupture des ponts voûtes (fig. 3). L'existence de ces fractures, qui faisaient penser à l'amorce d'un mécanisme de ruine, et l'importance de l'ouverture des joints (jusqu'à 1,5 cm) rendaient la situation préoccupante.

Expertise préalable et décision d'instrumenter l'ouvrage

Deux questions se posaient alors au gestionnaire :

- quelle était la sécurité immédiate de cet ouvrage face à l'action d'un trafic important de poids lourds ?
- comment allait évoluer cette sécurité au cours du temps ?

Après une expertise complète de l'ouvrage et de ses fondations qui avait nécessité, d'une part, une vérification de la stabilité des fondations et de la voûte et, d'autre part, une reconnaissance endoscopique de l'étendue des décompressions dans la zone potentielle de rupture (fig. 4), on aboutit à la conclusion que l'importance des ouvertures observées était la conséquence d'un déplacement horizontal de la culée lors de sa mise en butée, et ceci dès le décintrement de la voûte.

De plus, toute risque d'affouillement avait été écarté.

Une analyse du passage probable des efforts dans le corps de voûte et dans les fondations permit alors de conclure à une continuation possible de l'exploitation. Toutefois, il restait une inconnue vis-à-vis des efforts de cisaillement à la jonction du corps de voûte et de la culée, surtout si la culée continuait à se déplacer.

Ainsi, l'admissibilité d'exploitation de l'ouvrage était établie sous deux conditions :

- s'assurer de l'absence de déplacements irréversibles de la culée,
- renforcer la résistance à l'effort tranchant aux naissances des culées.

Dans un premier temps, il fut donc décidé de mettre cet ouvrage sous surveillance renforcée en juin 1986, en implantant « à cheval » sur les fractures, des capteurs de déplacement (dix au total sur l'ensemble de l'ouvrage) (fig. 5 et 6).

Le principe de base de la surveillance renforcée consistait à suivre, au cours du temps, l'équilibre statique horizontal des culées à partir des mouvements des articulations (ou fractures).

Des sondes thermiques furent aussi mises en place afin d'isoler le facteur « température », soupçonné d'influencer les mesures (fig. 7).

Pendant une première période (période d'apprentissage), les mesures furent faites manuellement une fois par mois.



Fig. 2 - Fracture aux naissances des arches

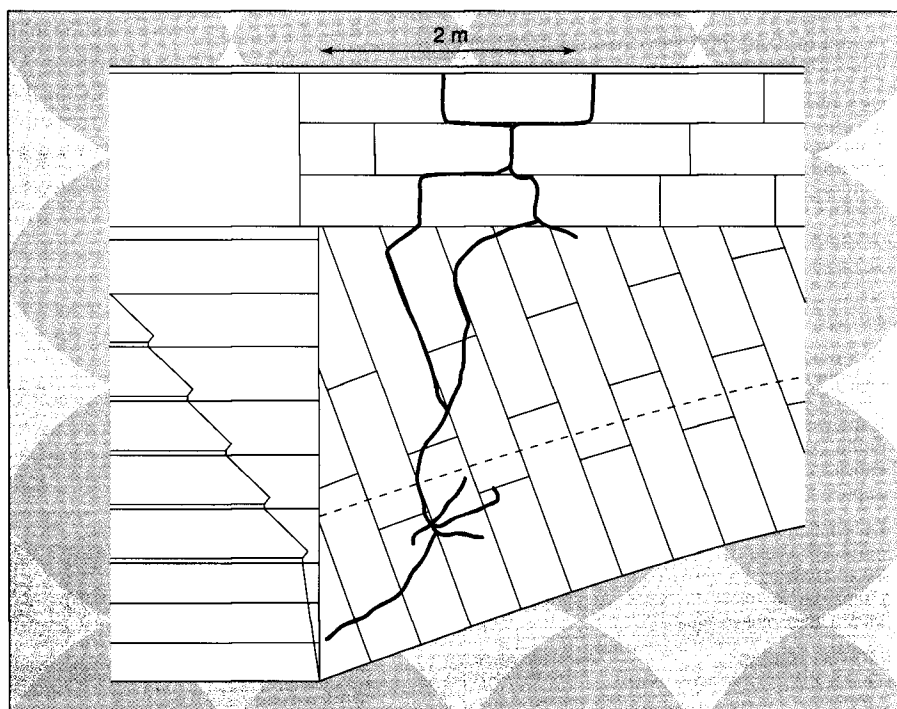


Fig. 3 - Schématisation de l'ouverture du joint de rupture.

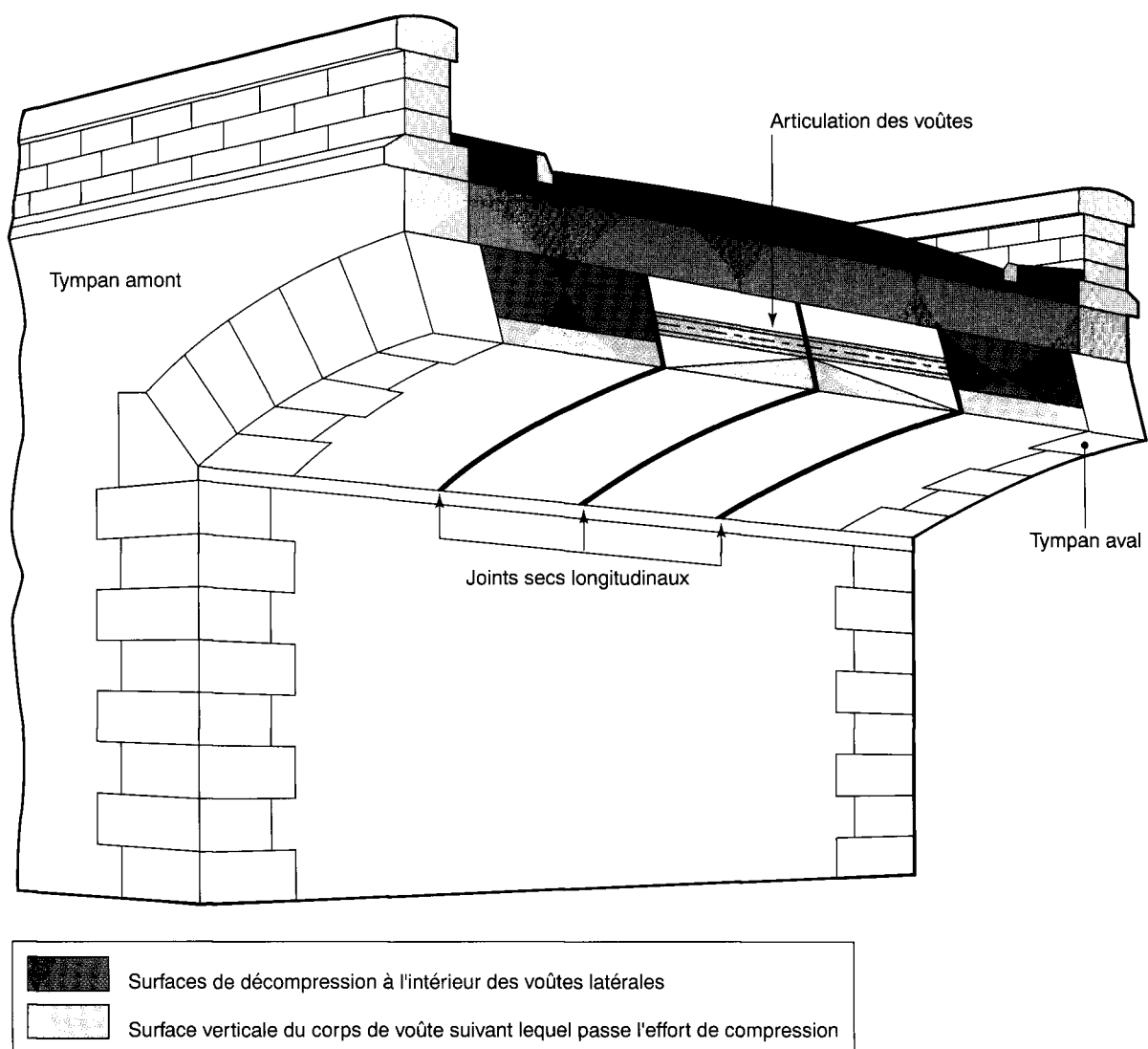


Fig. 4 - Résultats de la reconnaissance endoscopique de l'étendue des décompressions.

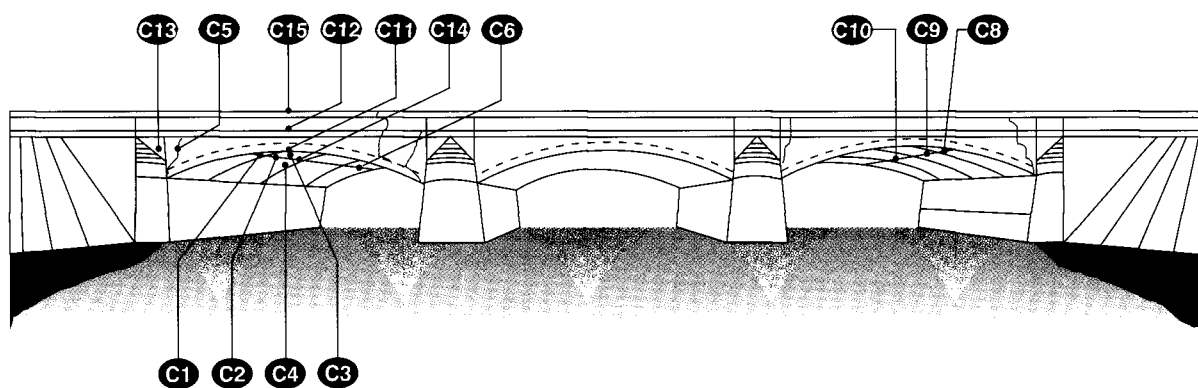


Fig. 5 - Schéma d'implantation des capteurs de déplacement sur joints de rupture (C1 à C10) et des sondes thermiques (C11 à C15). Le capteur C7 est un capteur de référence situé dans une zone non sollicitée de la voûte rive gauche.

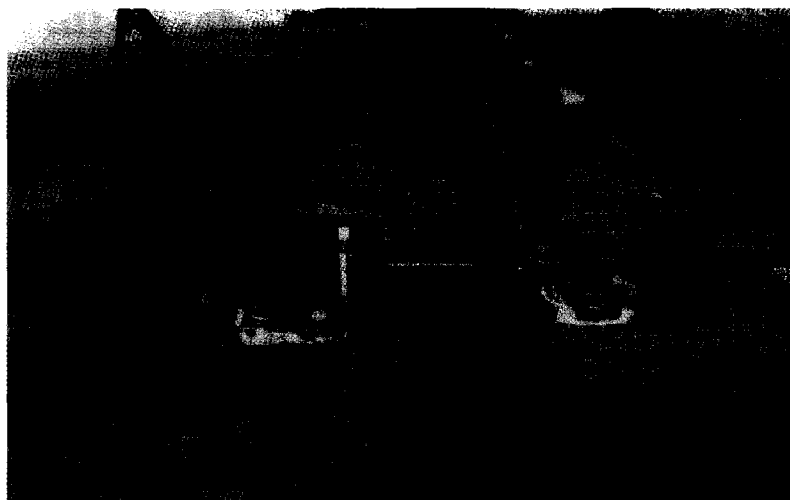


Fig. 6 - Capteur de déplacement.

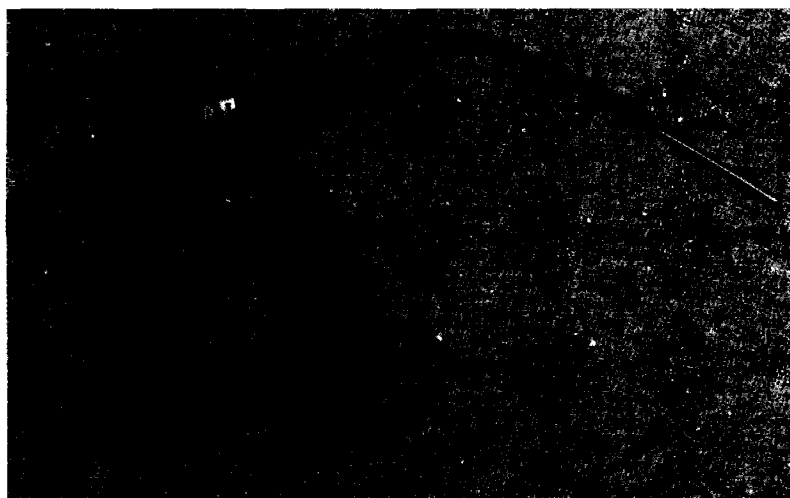


Fig. 7 - Sonde platine pour la mesure de température.

Une analyse statistique montre une très forte dépendance entre les variations des mesures de déplacement et les variations thermiques. Suivant une loi naturelle, le pont se raccourcissait l'hiver et, par voie de conséquence, les fractures s'ouvraient, tandis que l'été le phénomène inverse avait lieu (fig. 8).

Indépendamment de cette « respiration naturelle » de l'ouvrage, il était nécessaire de mettre en évidence l'existence ou non d'une dérive irréversible (déplacement de la culée rive gauche, fluage en fond de fissure, etc.).

Nécessité de centraliser les mesures et de les télétransmettre

Nécessité de centraliser les mesures

Cette première campagne de mesures aboutit à la nécessité d'augmenter la fréquence d'observation car, si une irréversibilité des déplacements existait, elle était sans doute très lente par rapport aux variations des actions thermiques diurnes et nocturnes.

Afin de pouvoir extraire une information sur des mouvements irréversibles à partir des mesures de déplacement corrigées des variations saisonnières, il fut nécessaire de procéder à des mesures journalières. Pour des raisons évidentes, cela nous conduisit à centraliser les mesures, ce qui nous permit alors de descendre la périodicité de scrutation à un niveau encore plus bas, compatible avec la chaîne de mesures (toutes les deux heures, jour et nuit).

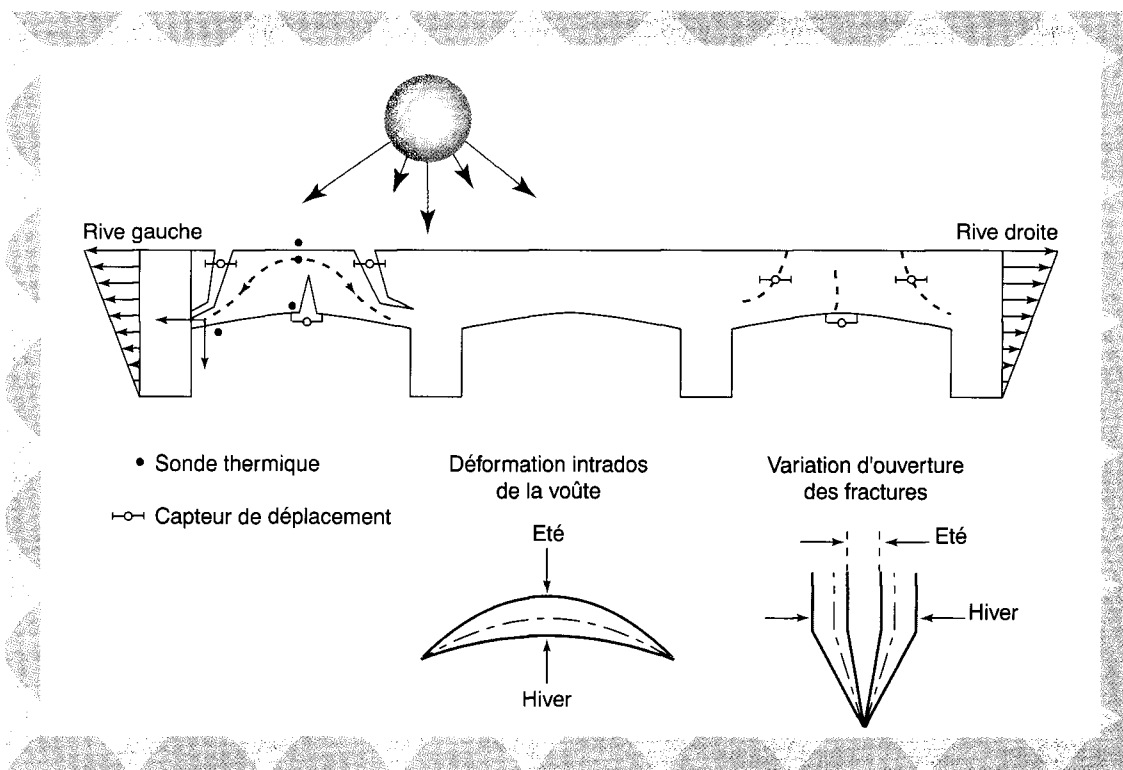


Fig. 8 - Respiration thermique de l'ouvrage.

Nécessité de télétransmettre les mesures

La mission de surveillance impliquait une saisie et une interprétation des mesures deux fois par semaine. Il fut donc indispensable d'installer un module de télétransmission (fig. 9). Ce dernier était constitué par un poste d'acquisition mis en place à demeure sur le pont. Ce poste est l'as-

semblage d'une centrale d'acquisition modémisée et de conditionneurs de capteurs protégés de la foudre par des éclateurs (fig. 10). Au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Angers, on recevait et traitait les mesures à l'aide d'une carte modem numérateur, associée à un ordinateur et à ses périphériques (fig. 11).

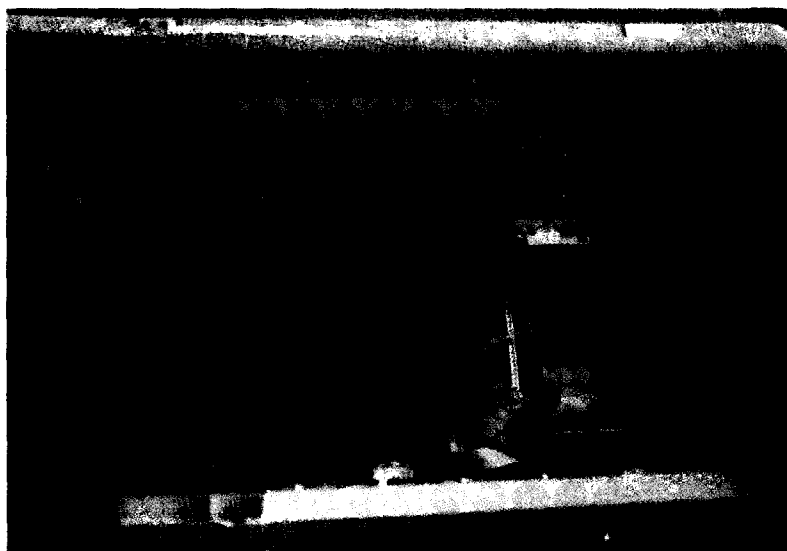


Fig. 9 - Module de télétransmission.

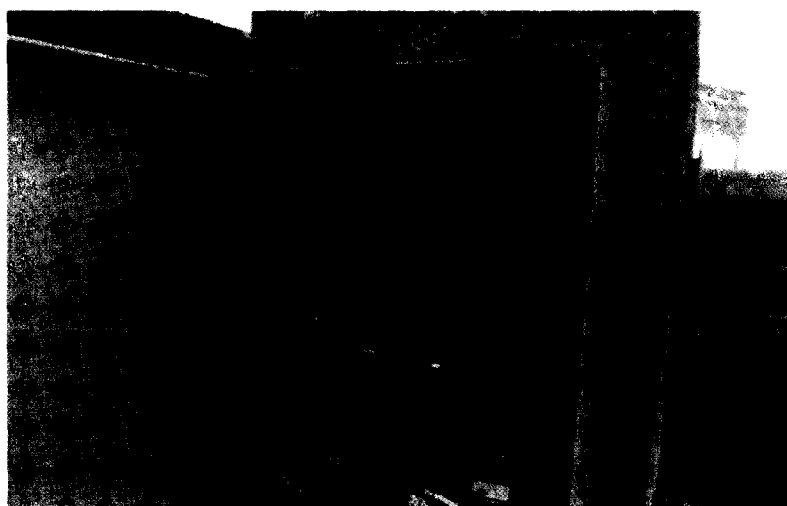


Fig. 10 - Conditionneur de capteurs.

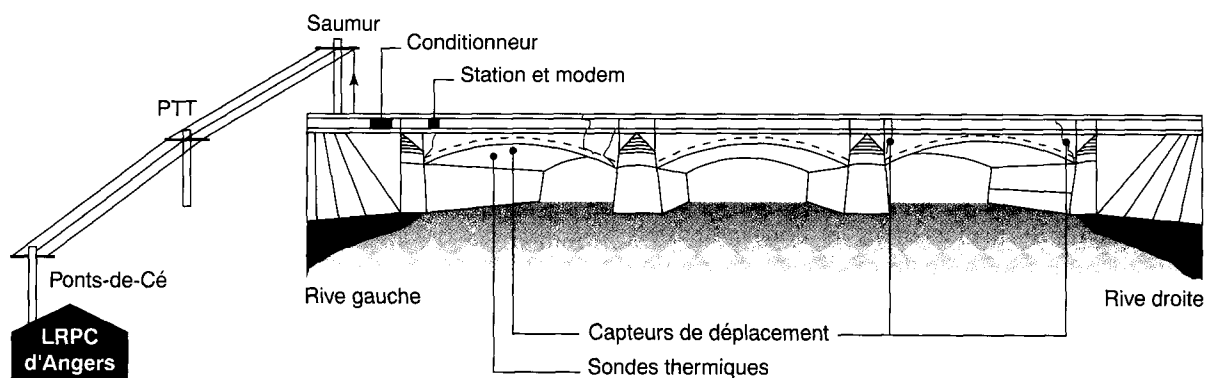


Fig. 11 - Vue générale de l'installation.

Exploitation des mesures de la télésurveillance

La centralisation et la télétransmission des mesures permettent de constituer des fichiers contenant un grand nombre de données. Il convenait donc, dès le départ, de définir une méthode d'exploitation et d'interprétation qui donne le moyen d'infirmier ou de confirmer l'existence de phénomènes irréversibles pathogènes pour l'ouvrage.

Cette étude méthodologique a été réalisée sur l'ensemble des capteurs, mais on ne présentera, dans cet article, que le cas du capteur C1.

Choix des périodes d'analyse

Les mesures sont effectuées pendant 1 562 jours d'observation, à raison de douze mesures par jour.

Les 1 562 jours d'observation sont répartis suivant quatre grandes périodes.

- **Période 1** : du 23 août 1987 au 22 août 1988 (371 jours).
- **Période 2** : du 31 janvier 1989 au 28 décembre 1989 (320 jours).
- **Période 3** : du 1er septembre 1990 au 31 décembre 1991 (505 jours).
- **Période 4** : du 1er janvier 1992 au 31 décembre 1992 (366 jours).

Au total, de 1987 à 1992, plus de 300 000 valeurs ont été stockées dans les fichiers du logiciel de traitement statistique (STATGRAPHICS-UNWARE).

Les limites d'analyse du logiciel, à l'époque, n'autorisaient pas l'utilisation de l'ensemble des valeurs récupérées dans les fichiers.

On a donc décidé de limiter l'analyse aux valeurs mesurées à 6 h 00 du matin du fait qu'elles appartenaient à la tranche horaire au cours de laquelle les actions des gradients thermiques et du trafic sont encore faibles.

Analyse qualitative préliminaire du fonctionnement de l'ouvrage

Un premier traitement des mesures a consisté à comparer les variations temporelles des sondes thermiques et des capteurs de déplacement.

On observe, par exemple, que la sonde C11 est le point de mesure de température le mieux couplé aux capteurs de déplacement, et donc potentiellement le plus robuste pour expliquer du point de vue thermique les variations des ouvertures des fractures. Les figures 12 à 14 montrent qu'il existe un bon couplage entre les variations thermiques (sonde C11) et les variations d'ouverture de fracture (capteur C1) pour des fenêtres temporelles d'observations différentes (six ans, un

an, un mois). On remarque donc un rapport d'homothétie ou de similitude entre l'allure des variations observées à des échelles temporelles différentes.

L'observation qualitative de l'ensemble des mesures a permis de valider les séries de données, qui montrent une bonne stabilité et une bonne cohérence au cours du temps.

Analyse quantitative et mise au point d'un modèle explicatif (modèle de surveillance)

Un bon couplage entre les variations temporelles des capteurs de déplacement et les variations thermiques a été constaté sur les figures 12 à 14. Une relation linéaire a donc été recherchée entre elles, sous la forme :

$$C = a_0 + a_1 T + \varepsilon$$

avec

- C : variable à expliquer (ouverture de la fracture en millimètres, capteur C1),
- T : variable explicative (température en degrés Celsius, capteur C11),
- ε : résidu de la régression (écart entre le modèle et les mesures non expliqué par les variations de température),
- a_0 et a_1 : coefficients à déterminer.

La méthode d'analyse a été décrite par Fauchoux (1995). Elle consiste à valider statistiquement une régression linéaire utilisée comme modèle causal pour la série temporelle à expliquer. Il s'agit d'abord de mesurer globalement l'ajustement du modèle par l'évaluation du coefficient de détermination R^2 compris entre 0 et 1 : R^2 est la proportion de la variabilité de C1 expliquée par C11. Si la valeur de R^2 est voisine de 1, alors C11 explique bien C1.

Pour savoir si cette proportion est significative, on utilise la statistique de test pour cette hypothèse, qui est celle de Student (t). Si elle n'est pas significative, il n'y a pas de relation linéaire entre C1 et C11 et le coefficient a_1 peut être nul. Dans l'exemple traité, les valeurs de Student calculées (tableau I) sont très largement supérieures à la valeur lue dans les tables de statistiques. Donc, les termes a_0 et a_1 sont significatifs. De plus, le terme R^2 est égal à 0,98, très proche de 1, ce qui caractérise le choix d'un bon modèle numérique explicatif.

Le logiciel calcule ensuite directement les intervalles de confiance à 95 % des deux coefficients a_0 et a_1 (tableau II). On peut vérifier que les intervalles de confiance ne contiennent pas la valeur nulle, ce qui confirme que ces deux termes sont bien significatifs.

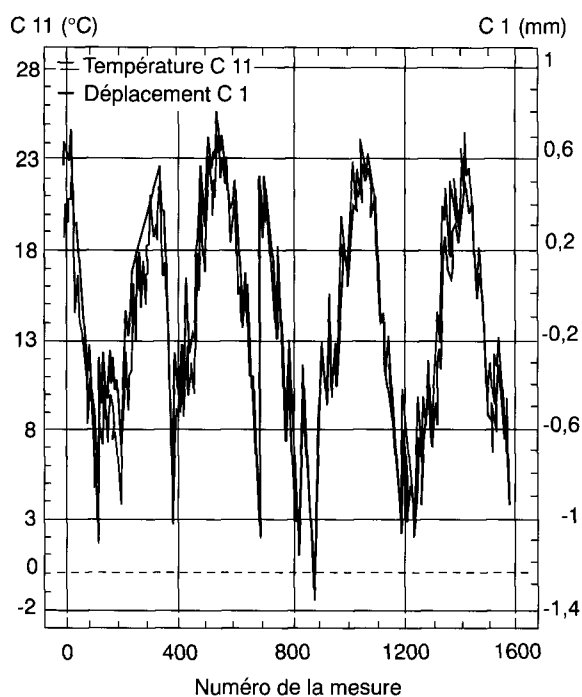


Fig. 12 - Variations des mesures du capteur de déplacement C1 et de la sonde thermique C11 pendant six ans (1987-1992).

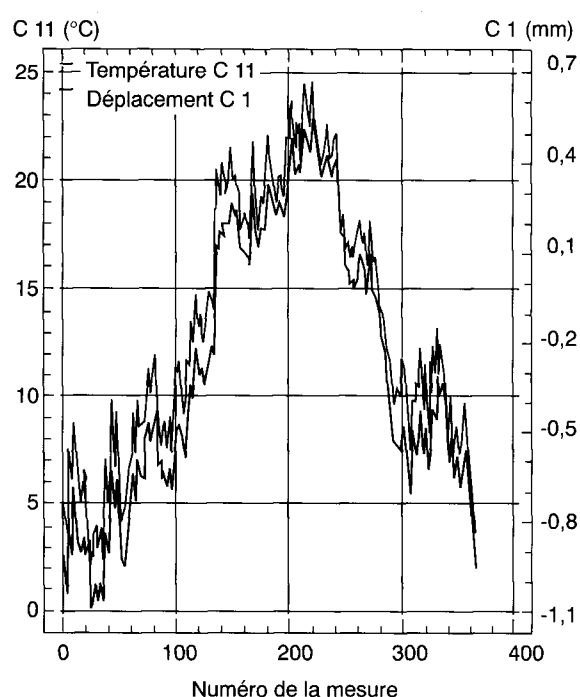


Fig. 13 - Variations des mesures du capteur de déplacement C1 et de la sonde thermique C11 pendant un an (1992).

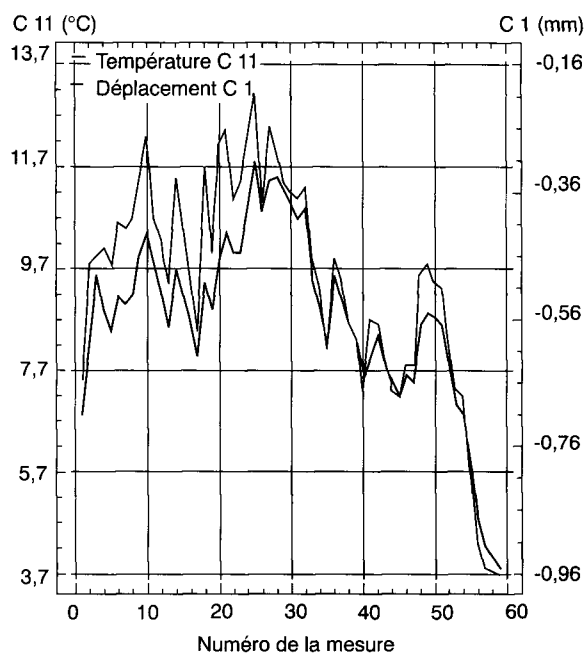


Fig. 14 - Variations des mesures du capteur de déplacement C1 et de la sonde thermique C11 pendant un mois (octobre 1992).

TABLEAU I

Coefficient	Valeur estimée	Écart-type	Valeur de Student
a_0	- 1,25	0,004	- 313
a_1	0,081	0,0003	298

TABLEAU II

Coefficient	Limite inférieure	Limite supérieure
a_0	- 1,258	- 1,242
a_1	0,0804	0,0816

Capteur C 1 : déplacement mesuré en mm (1987 - 1992)

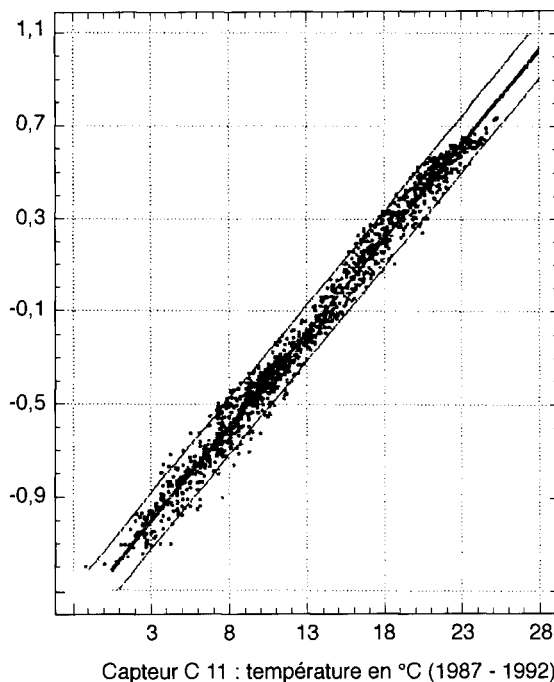


Fig. 15 - Variations des ouvertures de joint de rupture (C1) en fonction des variations de température (C11).

Résidus (mm)

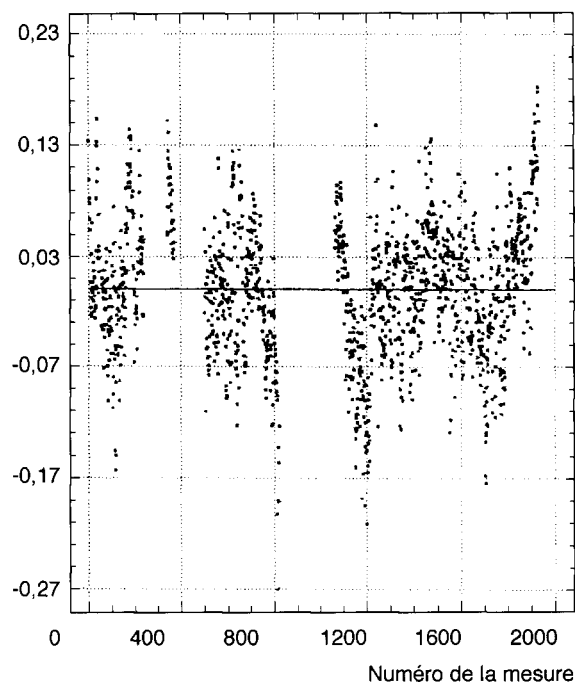


Fig. 16 - Évolution au cours du temps du résidu des ouvertures de joint de rupture (capteur C1).

L'analyse conduit donc à l'expression $C = -1,25 + 0,081 T + \varepsilon$, dans laquelle une valeur positive de C correspond à la fermeture des joints de rupture.

La régression est globalement satisfaisante : le carré du coefficient de corrélation R^2 vaut 0,98 et les intervalles de confiance (à 95 %) des coefficients estimés a_0 et a_1 ne contiennent pas zéro.

Ainsi, ce modèle permet de dire que les variations de température expliquent à 98 % les variations des ouvertures des fractures (fig. 15). On a donc ainsi isolé l'influence des variations thermiques sur

le fonctionnement de l'ouvrage et les déformations correspondantes, qui sont par nature réversibles et non dommageables.

Il reste 2 % d'informations non expliquées, qui sont contenues dans le résidu ε de la régression. Une analyse de ce résidu peut être opérée en examinant ses variations au cours du temps (fig. 16).

On constate sur la figure 16 que les résidus n'ont pas de tendance et varient dans une plage comprise entre - 0,27 et 0,23 mm, qui est suffisamment étroite pour ne pas avoir de caractère dommageable. On peut néanmoins repérer un effet de structure cyclique, liée certainement à un effet thermique secondaire (gradient thermique, par exemple) ou un effet saisonnier des variations de teneur en eau des matériaux (variations du retrait, et peut-être variations du coefficient de dilatation thermique).

Cette analyse, décrite dans le cas du capteur C1, a été réalisée pour les neuf autres capteurs de déplacement et a donné des résultats semblables.

Conclusion

Le modèle étudié n'a pas mis en évidence d'endommagement irréversible au niveau des fractures. Il a, au contraire, permis de conclure à une stabilité spatiale et temporelle de la culée. Néanmoins, afin d'augmenter la sécurité à la rupture par effort tranchant, un renforcement par console, à l'intrados, a été effectué en 1993 (fig. 17).



Fig. 17 - Renforcement à l'effort tranchant par mise en place d'une console à l'intrados.

En 1993, l'instrumentation automatique a été démontée et remplacée par quelques bases de mesures manuelles servant de relais de mesures pour les années à venir.

Les modèles numériques explicatifs trouvés pendant l'acquisition automatique servent à présent de modèle de surveillance.

En conclusion, la télésurveillance de cet ouvrage, associée à un diagnostic précis, a permis au gestionnaire de passer un cap difficile,

puis de ramener l'ouvrage dans un cycle de surveillance ordinaire avec toutes les garanties nécessaires.

Depuis 1993, le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers a télésurveillé, suivant la même méthode, neuf ouvrages. Fin 1997, trois ouvrages sont activement suivis, dont l'un en haute surveillance. La gestion des télémesures et des alarmes se fait à l'aide d'un logiciel mis au point par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers et la société Garos de Nantes.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

FAUCHOUX G. (1995), Analyse des résidus d'une régression linéaire appliquée à la surveillance métrologique des ouvrages d'art, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **200**, nov.-déc., pp. 61-68. _____

ABSTRACT

**Remote monitoring of a masonry bridge.
The example of the fouchard bridge**

G. FAUCHOUX

The Fouchard bridge at Bagneux near Saumur consists of three segmental arches which carried, in 1986 when the bridge was built, a considerable amount of lorry traffic.

In initial detailed inspection revealed worrying deficiencies.

After additional investigation of the arches and bearings it was decided that the bridge could be kept open, on condition that the springing was reinforced against sheer stresses and the bridge closely monitored.

The paper describes the instrumentation, data centralization and transmission techniques as well as the methods used to interpret measurement data over a six year period.

Linear regression analysis led to the conclusion that the bridge was stable.

The bridge manager was then able to return the bridge to normal surveillance after sheer reinforcement by installing brackets on the springing of the intrados.