

Suite à la parution dans le n° 212 du Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées de la note technique intitulée « Mesures de déformations à l'aide de fibres optiques noyées dans le béton », la société DEHA-COM nous a adressé le texte que nous publions ci-après.

Note
technique

SUIVI D'OUVRAGES À L'AIDE DE FIBRES OPTIQUES

Quelques cas d'application de la société DEHA-COM

Jérôme AZÉMA

Ingénieur civil des Ponts et Chaussées
Directeur de projets, société DEHA-COM

Il est paru dans le Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 212 (novembre-décembre 1997) un article s'intitulant « Mesures de déformations à l'aide de fibres optiques noyées dans le béton ».

Afin de donner aux lecteurs intéressés un éclairage complémentaire sur le sujet, la société DEHA-COM qui possède une expérience unique dans ce domaine à la fois sur le plan de la recherche et de l'application concrète du procédé sur des ouvrages a jugé bon d'apporter, à travers l'article suivant, son avis de spécialiste consacrant son activité à ce domaine.

Spécificités du procédé et démarche applicative

La définition des capteurs de déformation par corde optique est le fruit d'une recherche de nombreuses années effectuée dans le monde de l'optique avec pour objectif prédéfini de servir le domaine du génie civil.

C'est pourquoi, parmi les différents principes de mesure possibles du point de vue optique (interférométrie, etc.), DEHA-COM n'a pas hésité à retenir le principe le plus simple de la modulation d'amplitude comme paramètre de base de la mesure : l'allongement du capteur entraîne une perte d'intensité lumineuse le long de micro-courbures imposées à la fibre.

Et concomitamment, les nombreuses applications *in-situ* ont permis de faire aboutir les recherches dans le domaine optique pour aboutir à un système industriel à la fois opérationnel et économiquement attractif.

Les capteurs par cordes optiques DEHA-COM offrent actuellement une série de qualités groupées sans équivalent :

- ▶ mesures en **base longue**,
- ▶ mesures **sous conservation de l'état de référence**,
- ▶ mesures **statiques**,
- ▶ mesures **dynamiques**,
- ▶ mesures **continues**,
- ▶ mesures **simultanées** de toutes les lignes de détection,
- ▶ neutralité électromagnétique,
- ▶ réseau de connexion de grande longueur.

Le premier point mérite d'être explicité plus avant :

Sur un matériau hétérogène (Béton armé ou précontraint, maçonnerie, assemblage métallique), la base longue permet de lisser les déformations localisées,

d'amplitudes très variables, pour obtenir la valeur moyenne des déformations qui est représentative de la réponse de la structure considérée aux sollicitations.

Positionnées après analyse structurelle sur les zones les plus sollicitées (au-delà des critères d'aspect), un nombre limité de lignes de détection par cordes optiques permet de caractériser le comportement d'ensemble d'un ouvrage.

À partir de ces caractéristiques, le système permet de suivre les phénomènes principaux subis par les structures :

| | |
|-------------------------|---|
| Mesure statique | <p>Vieillessement (relaxation, fatigue, fluage, etc.).</p> <p>Efficacité des travaux de réparation.</p> <p>Déformations cycliques, d'origine thermique, liées à des variations du niveau de la nappe phréatique, etc.</p> |
| Mesure dynamique | <p>Sollicitations d'exploitation (trafic, vent, etc.).</p> <p>Sollicitations de construction (mise en tension, montage, etc.).</p> |
| Mesure continue | <p>Sollicitations extrêmes, accidentelles, prévisibles ou inattendues (chocs, séisme, incendie, explosion, etc.).</p> |

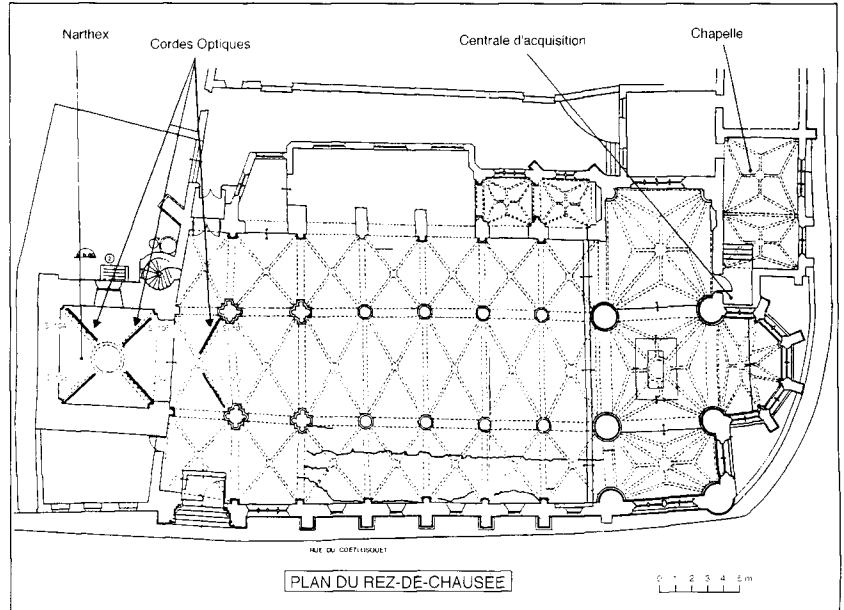
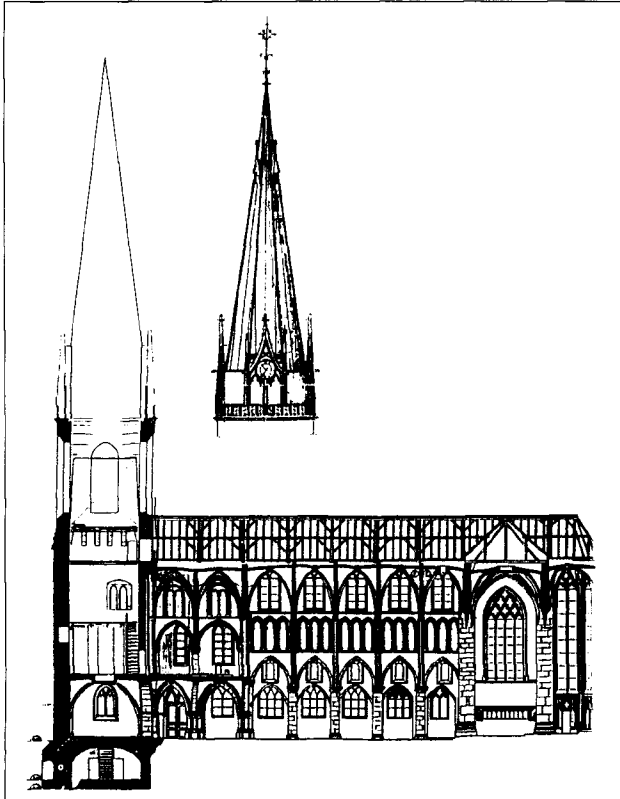
Dans cette approche, le temps est le facteur primordial de l'analyse, contrairement à une approche métrologique instantanée :

- ▶ une première période d'apprentissage apporte la connaissance du comportement normal de l'ouvrage sous des sollicitations habituelles courantes, caractérisé par des amplitudes de déformation sous charges connues (variation de température, vent, circulation) ;
- ▶ à partir de ce modèle de comportement, réputé de référence, peuvent être identifiés et caractérisés des événements ou évolutions de nature anormale ou exceptionnelle.

En complément de cette approche empirique peut être menée, afin d'apporter un diagnostic immédiat, une démarche d'analyse instantanée, basée sur la comparaison des mesures *in-situ* avec les résultats d'un modèle de calcul.

Cette approche singulière est explicitée dans la partie suivante par des applications concrètes de suivi d'ouvrages sur une longue période illustrant par des exemples, l'intérêt de cette démarche et le bon fonctionnement du procédé dans des conditions d'exploitation.

Stabilité sur le long terme Suivi de l'église Saint-Martin de Metz



Ouvrage

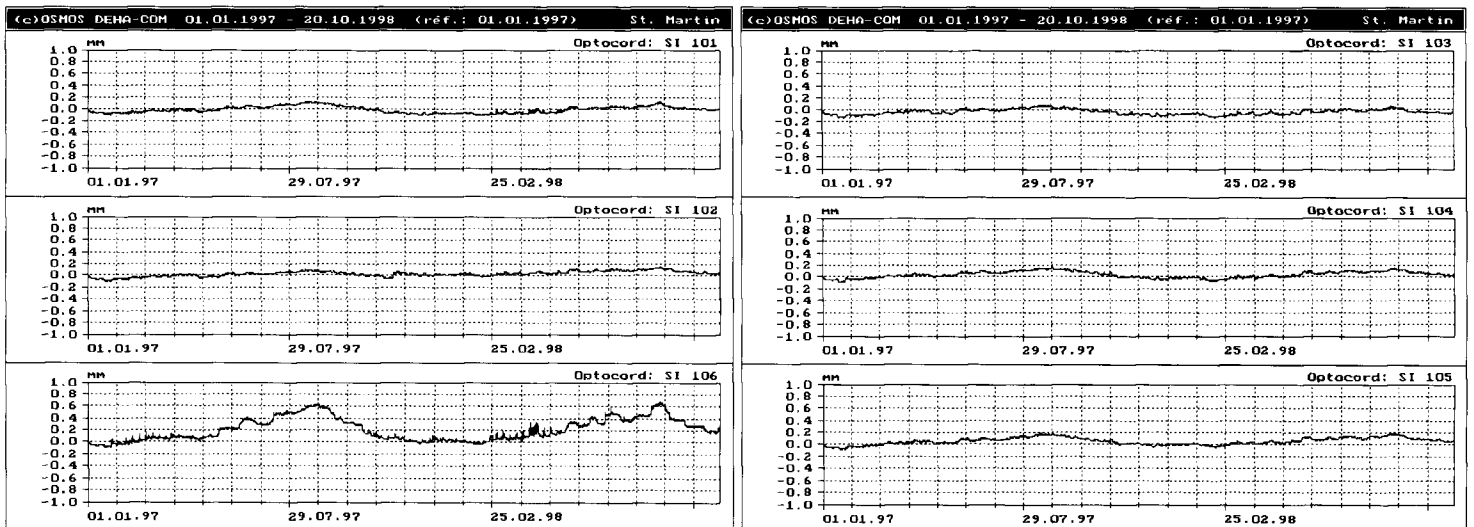
L'église Saint-Martin de Metz est une structure en maçonnerie datant du 13^e siècle.

Construite selon des règles empiriques, cette structure doit être abordée sur un mode d'observation afin de comprendre son comportement actuel et son évolution.

Dispositif de suivi

Les cordes optiques sont situées dans le narthex, le long des quatre arcs-boutants, ainsi qu'à la jonction du narthex et de la nef.

L'ensemble du réseau, qui fonctionne uniquement avec de la lumière infrarouge de faible intensité, est sans danger d'étincelle pour les anciennes menuiseries.



Résultats

Sur une période de deux ans, les déformations enregistrées, qui sont caractéristiques des cycles saisonniers de température, sont d'amplitude inférieure à 0.2 mm avec une parfaite conservation de la référence à la fin de la période.

Une corde optique présente des variations saisonnières plus importantes, tout en conservant la référence initiale.

Exemple de mesure de déformations lentes

Suivi d'un ouvrage en exploitation, usine souterraine EDF de Grand'Maison



Ouvrage

L'usine souterraine de Grand'Maison est un ouvrage semi-enterré constitué d'une partie extérieure et d'une partie souterraine creusée dans la roche.

Dans cette dernière partie sont logées les batteries de turbines réversibles fixées aux parois de la cavité.

Un mouvement de convergence de ces parois entraîne une gêne pour l'exploitation et un entretien particulier des turbines.

Dispositif de suivi

Les cordes optiques sont tendues horizontalement entre les deux parois de la cavité, à deux niveaux superposés.

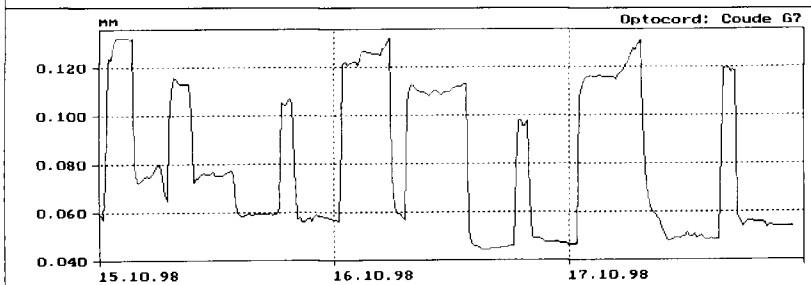
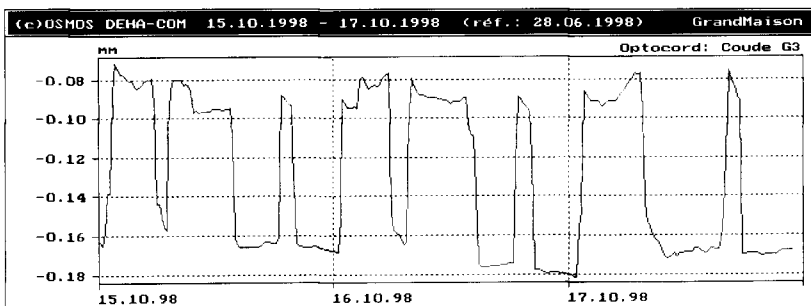
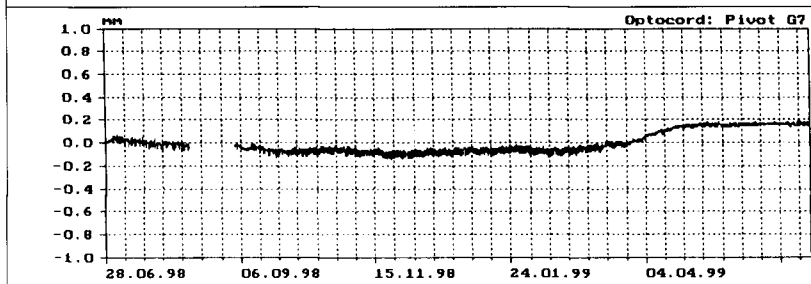
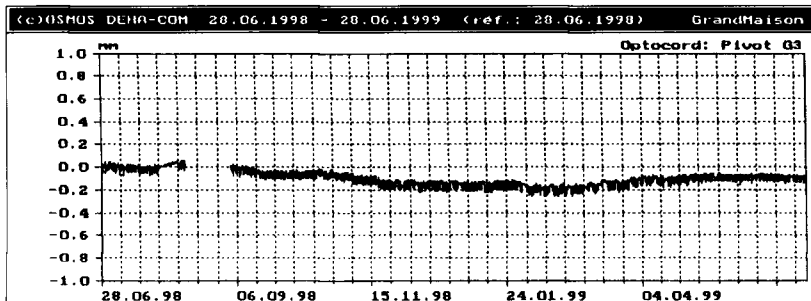
L'ensemble du dispositif est complètement amagnétique jusqu'à la centrale d'acquisition.

Emplacement de la corde optique en sous-face de la salle des machines, d'une paroi à l'autre.

Résultats obtenus

La mesure des déformations lentes permet de mettre en évidence la vitesse de convergence.

L'analyse de cette convergence, sur un rythme pluriannuel, permet de planifier la prochaine intervention pour préserver le jeu de fonctionnement des turbines.



La mesure par le même système des phénomènes rapides met en évidence les incidences de l'exploitation sur la structure porteuse.

La mise en route journalière des turbines provoque un écartement instantané et réversible des parois dont l'ordre de grandeur ($60 \mu\text{m}$) n'est pas négligeable devant les phénomènes lents observés par ailleurs.

Exemple de mesure de déformations dynamiques

Suivi d'un ouvrage en exploitation, Pont sur l'Elbe à Wittenberg (Allemagne)

Ouvrage

Le pont de Wittenberg est un pont en béton armé à sept travées identiques formées de deux demi-travées parallèles, indépendantes par construction.

À de très nombreux endroits, l'enrobage a disparu et met en évidence la corrosion avancée des armatures.

L'ouvrage est soumis à un trafic important de poids lourds, lié à la présence d'une carrière de pierre à proximité.



Vue d'ensemble.

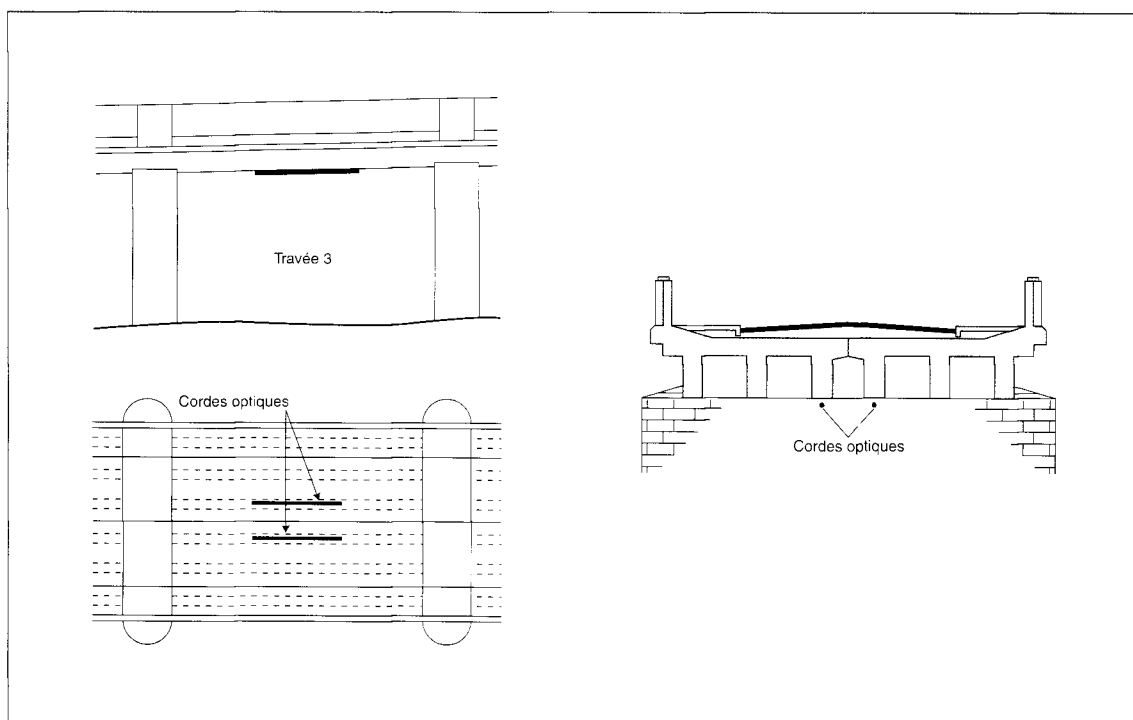
Dispositif de suivi

Les sept travées de l'ouvrage, d'une longueur de 14 mètres, sont instrumentées à mi-travée par une corde optique de 5 mètres mesurant les déformations de la fibre inférieure des poutres.

Afin de connaître la répartition réelle des charges, deux demi-travées sont d'autre part instrumentées en parallèle.

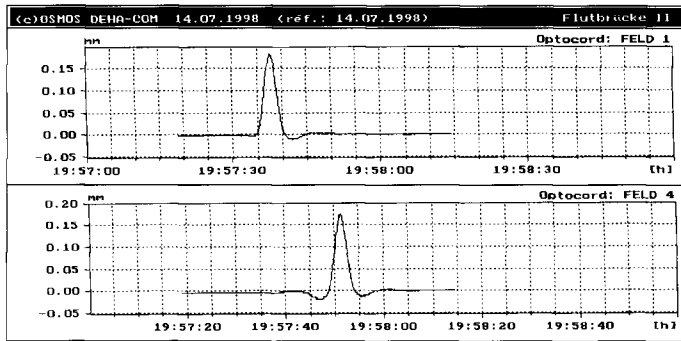


Sous-face : emplacement de la corde optique le long des armatures corrodées.



Emplacement des cordes sous chaque travée.

Demi-travées est

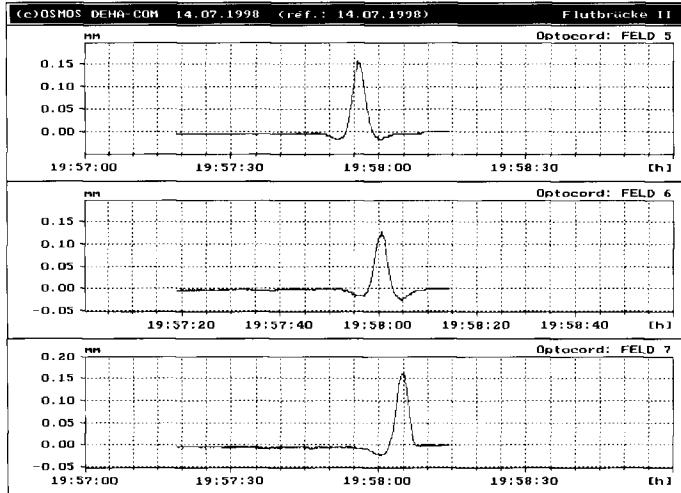


L'amplitude des déformations lors du chargement test est sensiblement la même pour les différentes lignes de détection.

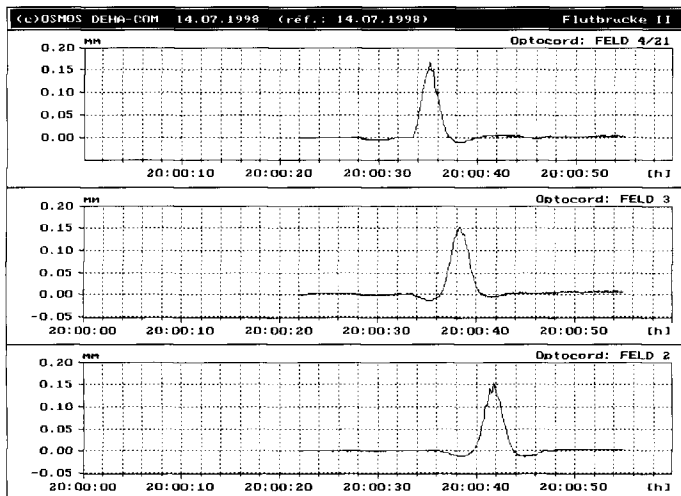
Résultats obtenus

1. Chargement test :

- Malgré leurs états apparents de dégradation très différents, les sept travées présentent des déformations de même amplitude.
- Le joint entre deux demi-travées en théorie indépendantes permet en pratique une très bonne répartition des charges.
- Cette répartition des charges conduit à des déformations plus faibles que les prévisions de calcul.

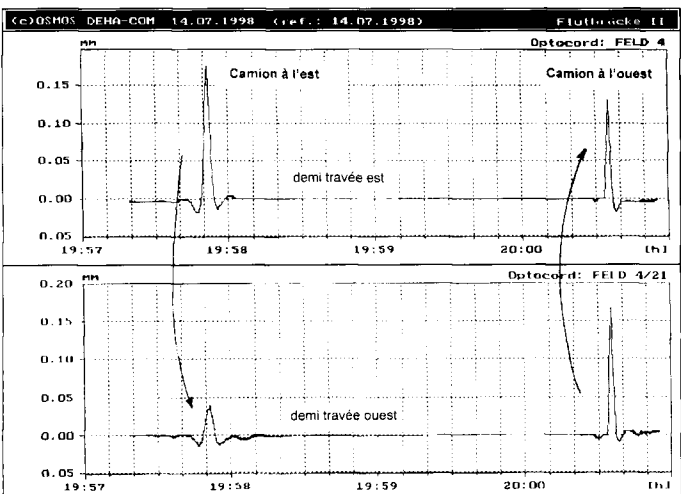


Demi-travées ouest



2. Exploitation courante :

- Le suivi des déformations lentes permet de valider que la structure ne présente pas de déformation sur le long terme.
- Le suivi des déformations rapides permet de suivre le trafic et d'opérer un comptage des véhicules et de leur poids, en fonction de classes prédéfinies. Les véhicules en surcharge sont mis en évidence.



Effet d'entraînement d'une demi-travée sur l'autre, alors qu'elles sont théoriquement indépendantes.

Conclusion

Les nombreuses références que nous possédons déjà auprès de maîtres d'ouvrages réputés exigeants (voir ci-après le jugement de M. Gabriel Gossner, maître d'œuvre des travaux sur la Tour Eiffel, instrumentée depuis le 23 octobre 1993) montrent la cohérence et l'intérêt du système par cordes optiques tel que nous l'avons développé pour le suivi des ouvrages.

La société DEHA-COM est pourtant consciente de la nécessité d'enrichir encore la connaissance et l'explo-

tation du système de suivi par cordes optiques par une démarche de recherche sur des cas d'application concrets.

Cette action ne peut être que l'occasion de réunir, à travers une démarche commune des organismes dont l'expérience est reconnue dans le domaine du comportement des ouvrages et de la métrologie, avec l'expertise de DEHA-COM dans le domaine de l'instrumentation par cordes optiques.

Instrumentation de la Tour Eiffel

*Gabriel Gossner, Ingénieur civil des Ponts et Chaussées
Directeur technique du Groupe Séchaud et Bossuyt*

❶ La campagne des grands travaux (1981-1984) a porté sur la rénovation totale des équipements de l'ouvrage et la vérification générale des structures.

Les structures ont été allégées de 1200 tonnes correspondant principalement à des surcharges au niveau du 1er étage qui menaçaient la stabilité des structures principales sous ce niveau.

Le suivi de ces allègements a été effectué à l'aide de cordes vibrantes disposées sur les structures principales (arbalétriers, membrures des poutres principales) ; les résultats de ce suivi se sont avérés difficilement exploitables, en raison de la sensibilité de ces capteurs locaux et surtout du nombre limité des capteurs mis en place (un par section) ne permettant pas de s'affranchir des moments locaux et des effets dissymétriques de température.

❷ À la fin de ces grands travaux ayant porté notamment sur la reprise complète des ascenseurs et moyens de secours (escaliers) entre le 2e et le 3e étage, avec modification des structures de contreventement, il est apparu nécessaire de vérifier l'acceptabilité des contraintes dynamiques induites par les effets du vent dans les 12 arbalétriers, au-dessus du 2e étage.

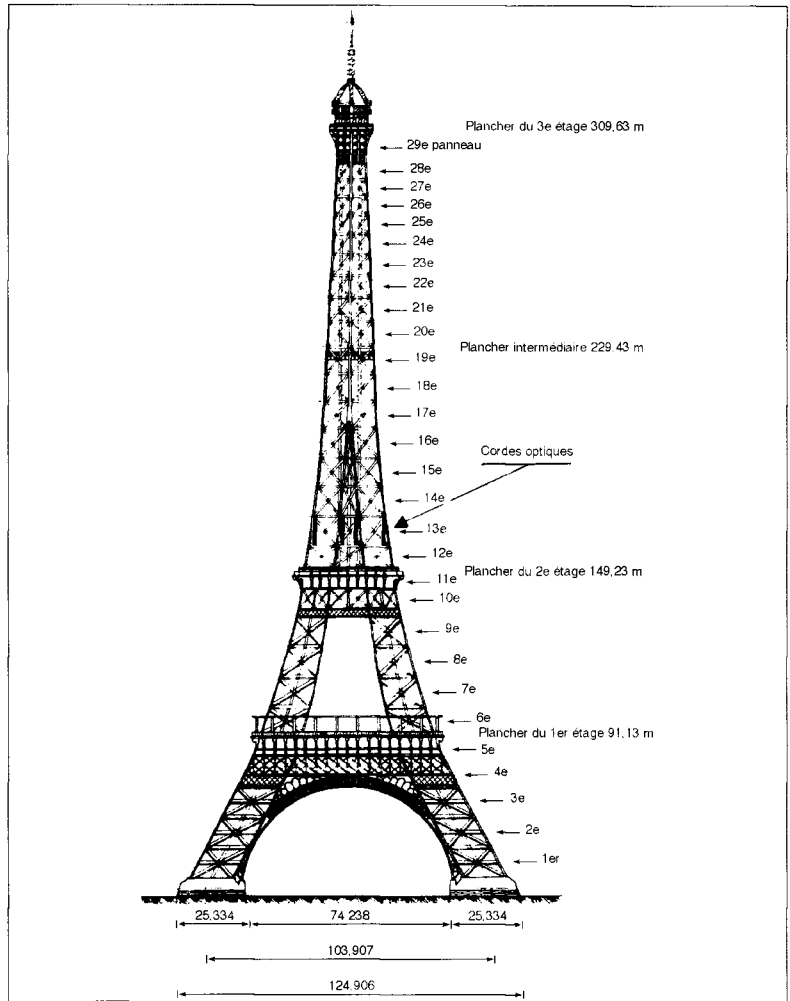
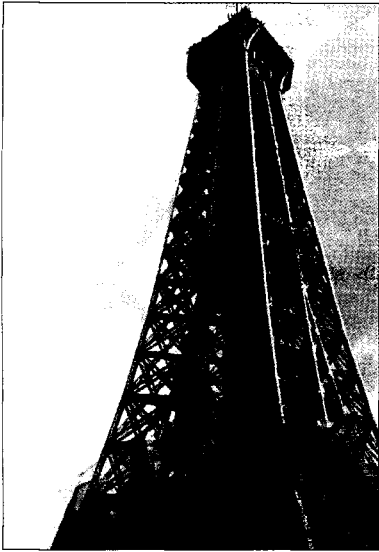
Après des essais infructueux par jauges collées (en raison de la très forte pollution électromagnétique du site), une instrumentation a été mise en place le 27 octobre 1993, basée sur extensomètres à cordes optiques en base longue de 10 mètres, sur chacun des 12 arbalétriers.

❸ Cette instrumentation a donné totalement satisfaction. Après détermination d'un point zéro par moyenne de mesures nocturnes (suppression des effets thermiques) en l'absence de vent et des surcharges variables d'exploitation, on a en effet pu constater, en particulier :

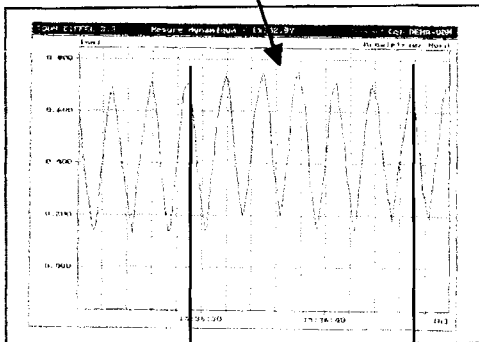
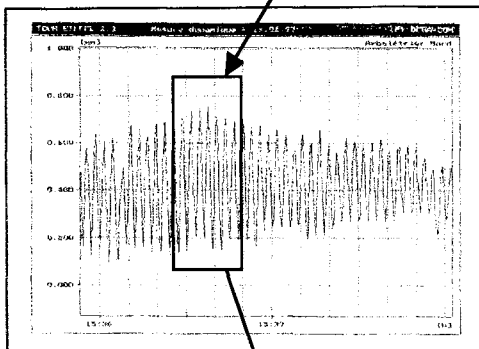
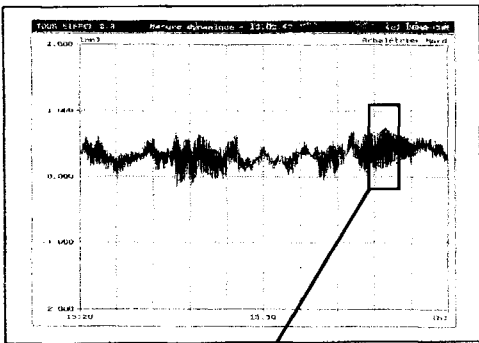
- ▶ l'absence totale de parasitages,
- ▶ la bonne sensibilité du procédé, ayant en particulier permis d'évaluer l'incidence importante des phénomènes de verglas (30 novembre 1993),
- ▶ la capacité du procédé à mesurer indifféremment en statique et en dynamique,
- ▶ la stabilité dans le temps (le procédé est opérationnel depuis six ans, sans avarie).

❹ Il est aujourd'hui envisagé de généraliser l'application du procédé à l'ensemble des structures principales depuis le sol jusqu'au 2e étage.

Instrumentation de la Tour Eiffel

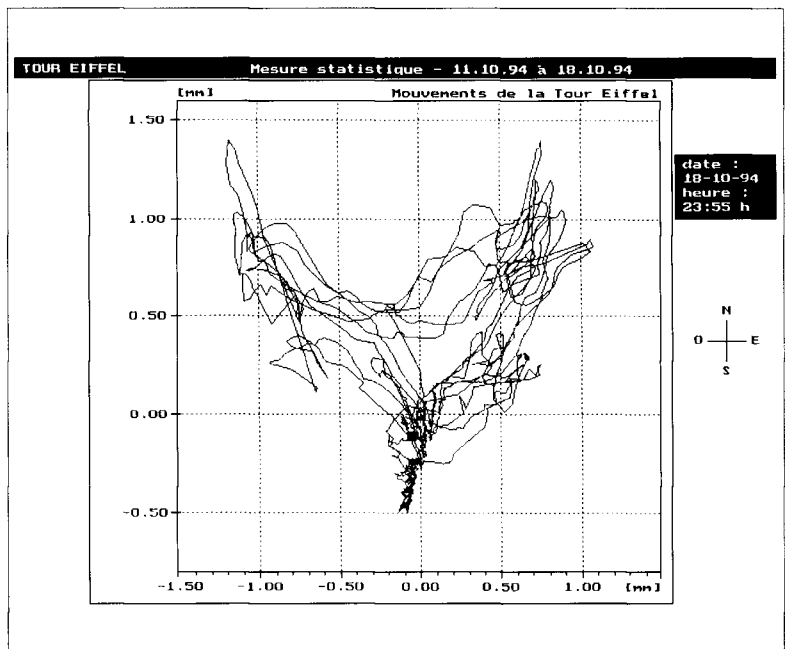


Emplacement des cordes optiques sur les arbalétriers au-dessus du 2e étage.



18 s = 6 périodes

La mesure en dynamique confirme la période propre de trois secondes prévue par G. Eiffel.



Mouvement caractéristique du sommet de la Tour Eiffel sur plusieurs jours.

Pour les personnes ayant accès à l'article cité en introduction, nous souhaitons apporter les commentaires suivants aux différents points évoqués :

Utilisation pratique des fibres optiques

« les fibres amorces de transmission utilisées (...) semblent sensibles aux manipulations. En effet, tout déplacement, tel qu'un désenroulement de ce câble, provoque (...) des atténuations non négligeables par rapport au signal à mesurer. »

Commentaire

Il est connu que les fibres de connexion sont sensibles, dans une certaine mesure aux manipulations, comme les systèmes électriques par ailleurs. Il est aussi évident que le système de mesure par cordes optiques, comme la plupart des systèmes, est conçu pour fonctionner en mode définitif, et non pour faire des mesures tout en déroulant les câbles de connexion.

« il a été observé que des débranchements, suivis de reconnections mêmes immédiates, entraînaient une modification des valeurs indiquées. Il semble donc se poser un problème de contact au niveau du branchement avec le matériel utilisé sur cet ouvrage. »

Commentaire

Les systèmes de connexion utilisés par la société DEHA-COM sont des matériels du commerce de très bonne qualité. Ces matériels peuvent induire néanmoins des modifications, faibles mais existantes, de la quantité de lumière transmise lors des connexions-déconnexions. Ce phénomène est connu dans le domaine de l'optoélectronique.

Pour les applications de la mesure dans le génie civil, ce phénomène reste sans conséquence si l'on observe les deux remarques suivantes :

- en mode définitif, ces opérations n'ont pas lieu d'être sauf lors du remplacement en cas de panne (très rare) des modules optoélectroniques ;
- la variation parfois observée lors d'une telle opération, qui se traduit par un saut de la courbe de mesure à l'instant de la connexion-déconnexion, est identifiée comme une non-mesure devant être corrigée. Ainsi identifiée, elle n'affecte pas la qualité de la référence sur le long terme.

« dysfonctionnement de la chaîne de mesure, observé dès le raccordement des deux conditionneurs optiques ».

Commentaire

La chaîne de mesure utilisée lors de cette opération comporte une centrale du commerce à laquelle se raccordent les boîtiers optoélectroniques DEHA-COM dont la compatibilité était supposée. Elle n'a pas eu lieu, sans pour autant que l'un ou l'autre des matériels ne puisse être incriminé.

La société DEHA-COM fabrique par ailleurs ses propres centrales d'acquisition dont l'emploi sur ce site aurait été tout à fait indiqué pour tester l'ensemble des fonctionnalités du système DEHA-COM avec en particulier la mesure dynamique qui est une qualité essentielle des capteurs corde optique et qui ne peut être effectuée par les centrales d'acquisition du commerce.

Validité des mesures par fibres optiques

« il apparaît que les fibres optiques fournissent, d'une façon générale, des valeurs de déformation assez dispersées, comprises entre la moitié et les trois-quarts des valeurs obtenues avec une instrumentation classique. »

La qualité de la mesure de l'axe neutre montre que le système par corde optique mesure de façon cohérente les déformations. Nous pensons qu'une explication pour l'amplitude plus faible des mesures par corde optique par rapport aux systèmes traditionnels peut être recherchée dans :

- la mesure en base longue d'une part ;
- le prémontage des cordes optiques sur une armature supplémentaire dont la longueur est exactement celle du capteur (2 m) d'autre part. L'absence de longueur d'ancrage supplémentaire de cette armature lui fait jouer un rôle rigidifiant important sur la déformation du capteur par rapport au béton environnant.

Compensation de la température

(« principale difficulté pour leur (les cordes optiques) application aux ponts) »

« les déformations mesurées avec les jauges et les témoins sonores restent constamment très proches »

« avec les fibres optiques les déformations mesurées sont différentes des précédentes mais suivent, en revanche, très fidèlement les courbes d'enregistrement de la température »

« les fibres intègrent non seulement les déformations de l'ouvrage, mais également celles de la fibre elle-même sous l'effet de la température »

Nous devons corriger ces affirmations :

❶ Les fibres optiques sont très peu sensibles à la température en comparaison des matériaux sur lesquels elles sont fixées ($K \approx 0,7 \cdot 10^{-6}$ m/K/m contre $K \approx 10 \cdot 10^{-6}$ m/K/m). La température peut par ailleurs être mesurée et corrigée.

❷ Les courbes présentées, *sans aucune distinction par leurs auteurs*, sont :

➤ pour les capteurs traditionnels, des courbes de déformation de la structure naturellement compensées des déformations de la température ;

➤ pour les cordes optiques, des courbes de déformation de la structure sans compensation. Il est donc tout à fait normal qu'elles suivent les courbes de variation de la température qui est la source majeure de déformation de l'ouvrage.

On retrouve d'ailleurs très bien sur les graphes présentés le coefficient de dilatation thermique du matériau ($\Delta\theta \approx 30$ °C correspond à $\Delta l \approx 300$ µm/m).

Conclusion

1 - Les cordes optiques mesurent uniquement les déformations de l'ouvrage.

2 - Les cordes optiques n'ont pas de sensibilité significative à la température par rapport à la structure.

Les informations apportées dans l'article au sujet de la corde optique DEHA-COM présentées sous une forme incomplète, ne correspondent pas à ses performances réelles validées sur de nombreux sites, pour certains très sévères.

