

# Auscultation d'un déversoir par fibre optique

## *Monitoring of a Dam Spillway with Optical Fiber*

Bernard HODAC

OSMOS S.A., 41-45, rue du Moulin des Bruyères, 92400 Courbevoie, France  
[hodac@osmos-group.com](mailto:hodac@osmos-group.com)

Charles VIANO<sup>1</sup>, Pauline TREMBLOT

OSMOS S.A., 41-45, rue du Moulin des Bruyères, 92400 Courbevoie, France  
[viano@osmos-group.com](mailto:viano@osmos-group.com), [tremblot@osmos-group.com](mailto:tremblot@osmos-group.com)

### MOTS CLÉS

Monitoring, barrage, surveillance, déformations, contraintes, déplacements, Corde Optique, statique, dynamique, fibre optique, Maîtrise des risques, sécurité

### RÉSUMÉ

*La centrale hydroélectrique de la Première-Chute, d'une puissance de 130 MW, a été mise en service en 1968 au Canada. Le déversoir du barrage est constitué par trois vannes-segments, dont les plots sont construits en béton précontraint. Certains plots entre les déversoirs sont affectés de fissures au niveau de lignes de passage de câbles de précontrainte. L'opérateur souhaite savoir si ces fissures sont le signe d'une pathologie du plot, qui risquerait alors de se déformer excessivement et d'empêcher l'ouverture et la fermeture des vannes, et donc l'exploitation de la centrale. Six Cordes Optiques ont été installées le long des lignes de câbles de précontrainte sur les plots fissurés, ainsi que sur un autre à titre de comparaison avec une structure réputée saine.*

*Après une période de suivi de neuf mois, le système de monitoring a montré un comportement structural identique entre les différents plots. L'opérateur a donc la preuve que la situation ne présente pas de caractère d'urgence et qu'il peut continuer à exploiter la centrale hydroélectrique selon ses besoins, en toute sécurité structurelle. L'opérateur sera aussi informé de tout comportement anormal dès sa naissance, ce qui lui permettra de prendre les mesures correctives idoines, de façon précoce et donc en réduisant au maximum l'incidence sur l'opération de la centrale.*

### ABSTRACT

*The Hydroelectric Plant Première-Chute, with a power capacity of 130 MW, was commissioned in 1968 in Canada. The spillway of the dam is formed by three tainter gates, whose piers are constructed in prestressed concrete. A pier is damaged with cracks along the prestressed cable passage line. The operator wants to know if these cracks are a sign of pathology of the pier, which may deform excessively and prevent the opening and closing of tainter gates, and therefore the operation of the plant. Six Optical Strands were installed along the prestressed cable passage lines of the cracked pier, and of piers deemed to be structurally healthy, as a comparison.*

*After a surveillance period of nine months, the monitoring system showed identical structural behavior between the different piers. The Operator has proof that the situation shows no urgency and that he may continue to operate the hydroelectric power station according to his needs, with all structural safety. The operator will also be informed of any abnormal behavior from the very beginning, allowing him to take suitable corrective measures, early and therefore minimizing the impact on the operation of the plant.*

---

<sup>1</sup>Auteur correspondant

## 1. INTRODUCTION

Le besoin de maintenance préventive et curative des infrastructures en service, par le monitoring du comportement structurel, peut avoir des causes variées. Par exemple, le vieillissement des ouvrages, l'augmentation de l'utilisation ou des ajustements budgétaires, et même des demandes publiques de sécurité accrue.

La maintenance d'un parc d'infrastructures est traditionnellement réalisée par la mise en œuvre d'inspections visuelles périodiques obligatoires, où les critères subjectifs prédominent, ou basées sur des paramètres de suivi incomplets.

La difficulté d'intégrer un vrai critère de performance structurel dans les programmes de maintenance d'infrastructures vient avant tout du fait que ces critères n'ont pas vraiment été pris en compte auparavant. Néanmoins, il existe maintenant des solutions de monitoring, qui permettent de déterminer le comportement des ouvrages, tels que les barrages, sur des critères complètement objectifs, à des conditions économiques acceptables.

L'avantage de réaliser un monitoring des barrages basé sur des critères liés directement au comportement structurel est de pouvoir répondre de façon extrêmement précoce aux besoins de maintenance et de réparation, et d'optimiser les possibles interventions. Ce type de monitoring permet également, lors des situations ponctuelles d'urgence, défaillance ponctuelle d'une vanne ou séisme par exemple, d'informer en temps réel l'exploitant de l'impact de ces événements sur le comportement structurel de l'ouvrage. En d'autres termes, ce type de monitoring permet aux gestionnaires d'ouvrages d'acquiescer une connaissance documentée des performances structurelles, et donc de décider des priorités d'intervention, là où le risque, défini par des critères objectifs, est le plus important.

Le critère lié le plus directement au comportement structurel est par excellence celui des contraintes. En surveillant les variations de contraintes, le gestionnaire bénéficiera d'une information directement exploitable, précoce dans sa manifestation et complète sur le comportement structurel.

## 2. MONITORING

Le système de monitoring est conçu pour permettre de définir une aptitude au service et assurer la sécurité structurelle d'un ouvrage, à partir de prescriptions prédéfinies qui doivent être remplies.

En fonction des sollicitations auxquelles la structure est sujette, nous pouvons rencontrer des phénomènes de vieillissement accéléré, de corrosion, de fatigue, ou de réaction alkali granulat. Les structures peuvent même subir des événements extrêmes qui réduisent leur performance structurelle en-deçà des limites acceptables.

Le cas présenté ici est celui d'un barrage au Canada dont certains plots du déversoir, réalisés en béton précontraint, sont fissurés.

## 3. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE ET CONTEXTE

La centrale hydroélectrique de la Première-Chute a été mise en service en 1968. Elle est érigée sur la rivière des Outaouais, à Notre-Dame du Nord, Province du Québec, Canada. Ses caractéristiques sont :

Type	Gravitaire / Fil de l'eau
Hauteur du barrage (lit de rivière)	22,26 m
Hauteur du barrage (fondation barrage)	32 m
Largeur du barrage	297 m
Volume du réservoir	40,4 M m <sup>3</sup>
Surface du réservoir	252,6 ha
Nombre de turbines	4
Puissance Installée	130 MW

*Tableau 1 : Caractéristiques de la centrale hydroélectrique de la Première-Chute.*

La centrale possède quatre groupes de turbines-alternateurs hydrauliques, dont trois ont été installés en 1968, et le quatrième, en 1975.

Des techniques nouvellement mises au point à l'époque ont été utilisées sur ce barrage : des parois moulées pour rendre étanches les fondations et les trois vannes du déversoir qui ont été conçues comme des vannes-segments. Tandis que les vannes conventionnelles fonctionnent comme un écran vertical, les vannes-segments sont installées sur des axes et pivotent de bas en haut, ouvrant ou fermant le passage à l'eau.



*Figure 1 : photo de la centrale hydroélectrique de la Première-Chute.*

Des fissures ont été repérées, notamment sur le plot N°9 soutenant les vannes segments (Fig. 7). La fissure se situe au niveau de lignes de passage des câbles de précontrainte du plot, faisant craindre à l'opérateur une perte importante de la résistance de ces câbles. La fissure est due selon le Maître d'Ouvrage aux cycles de mouillage et séchage pendant 20 ans du câble de précontrainte occasionnant ainsi une corrosion du câble.

La crainte de l'opérateur est de ne pouvoir fermer les vannes segments du déversoir si le plot endommagé devait se déformer excessivement. De fait, l'opérateur ignore l'origine, l'évolution et la criticité de ces dommages.

Les méthodes à la disposition de l'opérateur (suivi géométrique, suivi des fissures, analyse physico-chimique) ne peuvent lui donner l'information qu'il recherche : une connaissance du comportement réel du plot, afin de pouvoir agir **de façon précoce et ciblée** sur les plots considérés, si les dommages devaient s'avérer critiques.

Seule la mesure de l'évolution de la résistance mécanique des plots peut apporter à l'opérateur cette **anticipation nécessaire pour éviter une situation d'urgence** le forçant à ne plus pouvoir utiliser son ouvrage.

La solution présentée ci-après se propose d'être un système basé sur la Méthode Observationnelle, c'est-à-dire, s'appuyant prioritairement sur **la surveillance des effets structurels précoces, dits du 1er ordre**, qui seront les premiers à se manifester et les plus proches de la réalité structurelle des plots du déversoir.

Les effets les plus précoces à se manifester sont les modifications des variations de contraintes dans ces structures, amenant à leur concentration sur certains éléments.

#### 4. SOLUTION DE SURVEILLANCE

La ligne de détection appelée **Corde Optique** a été retenue pour la surveillance de cet ouvrage. Elle permet de réaliser une surveillance des effets du 1er ordre, de façon permanente et continue sur le long terme.



*Figure 2 : Photo d'une Corde Optique.*

La Corde Optique est un capteur mesurant les déformations cumulées sur une base longue, dont les longueurs standards sont de 2 et 5 mètres. La Corde Optique est un capteur en fibre optique utilisant le paramètre modulé de l'intensité lumineuse. L'atténuation de l'intensité lumineuse se produit selon le principe de la microcourbure.

Le paramètre obtenu est donc de la forme  $\Delta L/L$ , c'est-à-dire **un paramètre proportionnel aux variations de contraintes**, selon le coefficient d'élasticité, ou Module d'Young E.

La Corde Optique permet donc de mesurer directement une information, basée sur le critère de suivi du 1er ordre : **le suivi des variations de contraintes**,

- en mode statique et dynamique ;
- sans temps mort : Réaction immédiate à la moindre sollicitation ;
- sans risque d'interférences ;
- à très long terme grâce à sa robustesse.

Le comportement sera défini à partir des caractéristiques mécaniques élémentaires des plots :

- l'amplitude des déformations statiques sur des cycles répétables : cycle de variations thermiques, actionnement des vannes, etc ;
- les amplitudes maximale et moyenne des déformations dynamiques ;
- la fréquence de survenue des déformations dynamiques, notamment celles caractéristiques des ruptures de fils de précontrainte ;
- la réversibilité des déformations dynamiques.

L'analyse des déformations obtenues permettra d'obtenir :

1. la **définition du comportement** réputé normal des structures des plots ;
2. le suivi **de l'évolution des caractéristiques** mécaniques de ces structures, notamment par la confirmation du bon comportement lors de l'activation des vannes ;
3. des projections, ou anticipations, **de l'évolution** de ces caractéristiques.

La structure est mise sous surveillance permanente. L'opérateur est informé ou alerté, en temps réel, de son état de santé et dispose d'un accès sécurisé aux données de surveillance en salle de contrôle.

Les capteurs positionnés sur les plots sont reliés à la station de monitoring par un réseau de câblage de connexion optique.



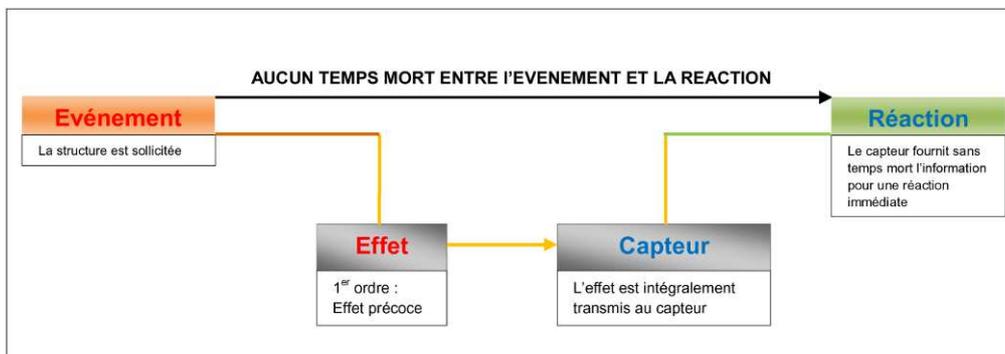
**Figure 3 :** Photo d'une station de monitoring, où sont connectées les Cordes Optiques.  
Hauteur : 650 mm, largeur : 400 mm, profondeur : 200 mm

Cette station de monitoring acquiert les données, les traite et les stocke. L'opérateur dispose d'un accès sécurisé pour visualiser en temps réel les données de surveillance du barrage. De leur côté, les équipes d'ingénierie d'OSMOS visualisent et analysent les données, modifient le cas échéant la configuration du suivi, définissent les seuils de déclenchement d'envoi de messages d'alarme. Chaque seuil est muni de deux niveaux : la pré-alarme, permettant de renseigner l'opérateur sur une évolution à surveiller en amont et l'alarme, signalant un état où une action urgente est requise.

En cas de dépassement de seuils :

- des dispositifs in situ sont activés : sirène, gyrophare ou barrières. Les opérateurs de sécurité reçoivent un message sur leurs écrans de contrôle ;
- des messages sous forme d'emails, de fax, de SMS sont envoyés à une liste de destinataires. Ces messages contiennent la description de l'événement ayant occasionné l'alarme.

La prise de décision est faite en temps réel : le système de surveillance est directement intégré à la chaîne décisionnelle. Les actions à entreprendre par l'opérateur sont définies par avance dans le cadre d'un protocole rédigé en collaboration avec les équipes d'ingénierie d'OSMOS.



**Figure 4 :** Schéma de la chaîne décisionnelle.

L'immédiateté de l'information est obtenue grâce à :

1. **l'utilisation des critères du 1er ordre** : effets les plus précoces possibles ;
2. **le signal de mesure utilisé** : l'atténuation de l'intensité lumineuse.

La Corde Optique utilise un signal véhiculant l'information qui :

- n'a pas besoin de traitement au niveau de la centrale : **aucun temps mort** ;
- n'a pas besoin de filtrage : la moindre information enregistrée traduit un changement de comportement structurel ;
- n'a pas besoin d'amplification ;
- n'est soumis à aucune interférence extérieure : champs électromagnétiques, courants vagabonds, pression atmosphérique ou luminosité.

**Annexe 1 : Comportements statique et dynamique indifférenciés**

La Corde Optique est un système de mesure particulièrement précis permettant la mesure de la déformation répartie sur une longueur représentative.



La Corde Optique est un capteur macroscopique qui fonctionne sans temps mort. Elle est imparasitable et possède une référence constante.

Ce capteur optique est capable de mesurer deux types de données.  
Le système mesure en mode dynamique en permanence, jusqu'à 100 Hz.

1- Si un évènement particulier survient le système enregistre un fichier de **données dynamiques**.

2- Si aucun évènement ne survient, les mesures dynamiques sont moyennées dans un fichier de **données statiques**.

Le comportement statique n'est rien d'autre que la fonction intégrale du comportement dynamique de l'ouvrage.

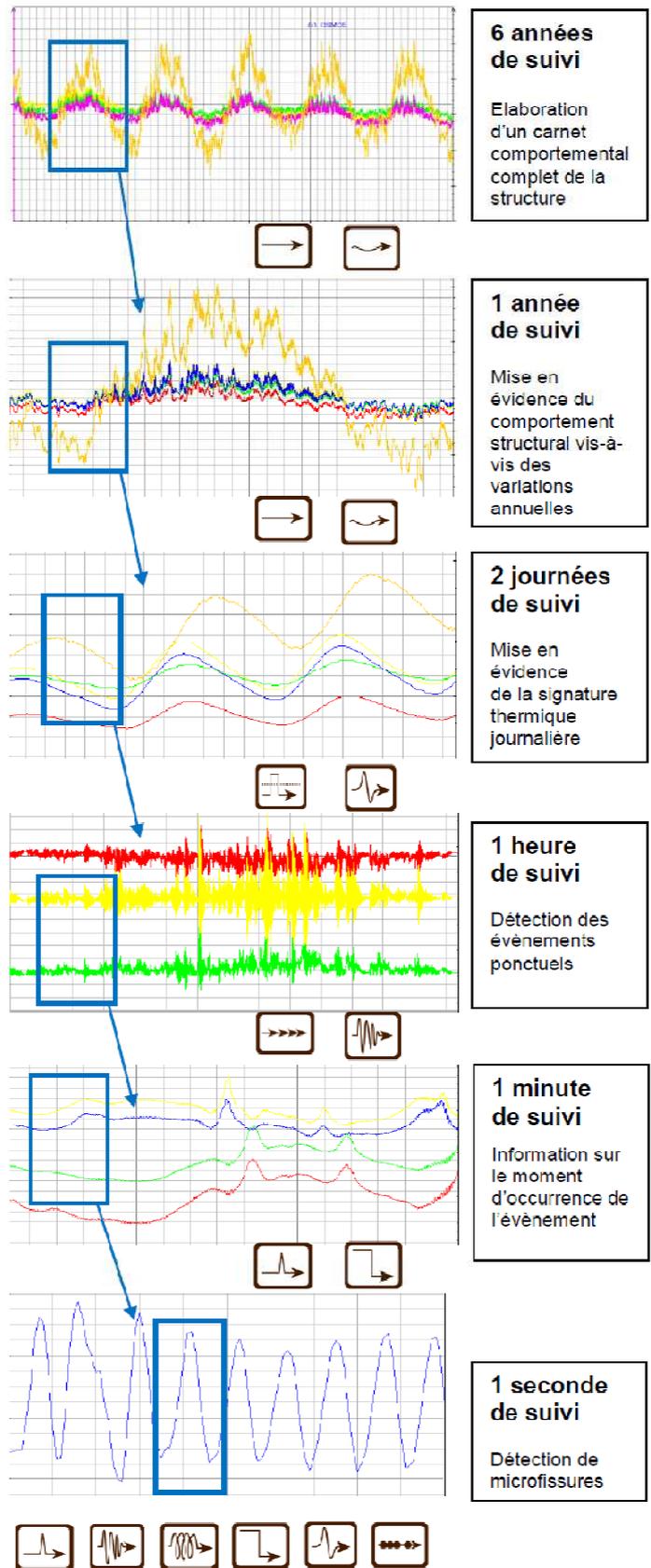


Figure 5 : Caractérisation des comportements statique et dynamique d'une structure.

**Annexe 2 : La détection et la Localisation des ruptures de fils de précontrainte**

**Rupture d'un fil de précontrainte**

Après rupture d'un fil de précontrainte, la signature dynamique typique observée est composée successivement de :

- Une tension forte et instantanée ayant pour origine le glissement du toron dans sa gaine,
- Une légère compression due au comportement visco-élastique de la structure du barrage puis
- Un retour à zéro correspondant à un réancrage du câble

Le système de suivi permettra de renseigner chaque rupture de câble et d'analyser automatiquement leurs conséquences.

**Perte de tension progressive dans le câble de précontrainte :**

Le changement de comportement structurel des plots, même différé, dû à la perte de tension engendrée par la coupure successive de plusieurs fils est détecté par le système de suivi.

Toutes les coupures de câbles n'affectent pas l'ouvrage de la même manière : Certains câbles se rompent violemment, mais la plupart se détendent petit à petit dans le temps.

Mais dans tous les cas, la signature dynamique d'une coupure de câble est parfaitement détectable par le système de suivi.

**Rupture d'un câble de précontrainte :**

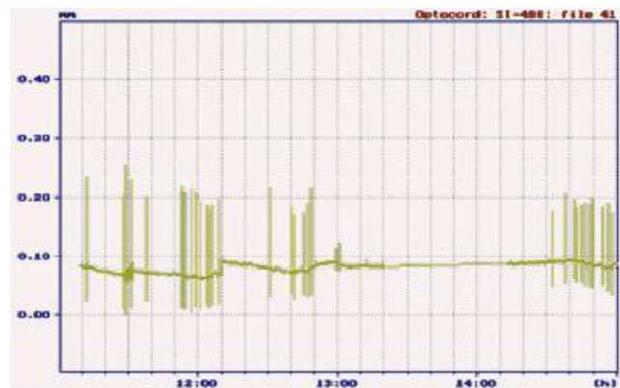
L'influence d'une rupture de câble de précontrainte sur les autres poutres est identifiable.

L'observation montre que l'allongement engendré par la rupture d'un câble est à chaque fois dégressif.

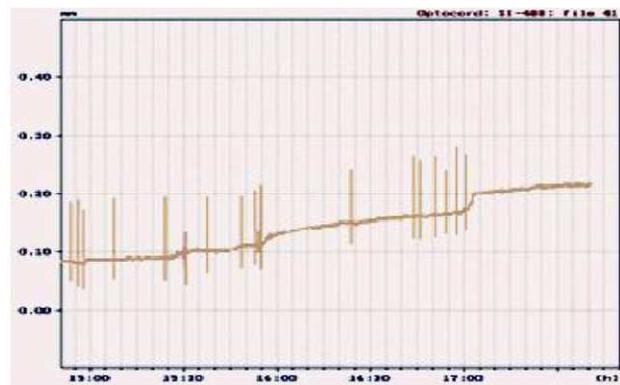
La Corde Optique permet de mesurer la rupture de câbles, leur réancrage et la perte de tension résultante.



Signature dynamique caractéristique de la rupture d'un fil de précontrainte



Rupture de fils de précontrainte n'ayant pas d'effet sur la stabilité du plot



Perte de tension des câbles de précontrainte suite aux ruptures répétées de fils.

Figure 6 : Détection et caractérisation d'une rupture de fil de précontrainte.

## 5. DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

La solution apportée a été l'installation de six Cordes Optiques de 5 mètres, installées sur chacune des faces des quatre plots du déversoir.

Les Cordes Optiques sont installées horizontalement au droit du passage des câbles de précontrainte. L'installation a été réalisée par une équipe spécialisée en travaux d'accès difficiles, et a duré 2 journées.

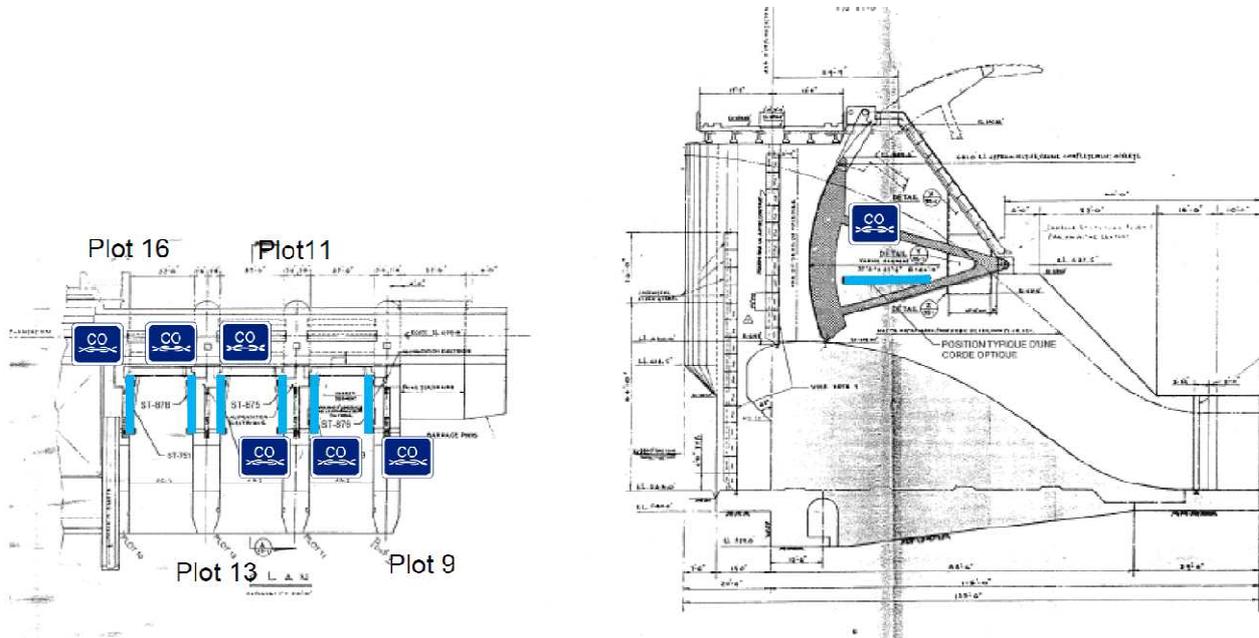


Figure 7 : Schéma de l'emplacement de l'instrumentation sur la centrale hydroélectrique.

Nom du capteur	Longueur du capteur	Localisation du capteur
ST-876	5 m	Plot N°9, côté Gauche
ST-879	5 m	Plot N°11, côté Droite
ST-875	5 m	Plot N°11, côté Gauche
ST-877	5 m	Plot N°13, côté Droite
ST-878	5 m	Plot N°13, côté Gauche
ST-751	5 m	Plot N°16, côté Droite

Tableau 2 : Caractéristiques des capteurs utilisés.





*Figure 8 : Photos de techniciens installant les capteurs.*

## 6. RESULTATS

### 6.1 Analyse statique

Le suivi de l'évolution des déformations des parties instrumentées des plots du déversoir du barrage Première Chute est présenté ci-après. Les déformations statiques sont sensibles aux variations de température. Les sondes de température sont vissées à la surface des plots.

Le plot 9 enregistre la plus faible déformation (-0,119 mm/5 m) tandis que le plot 16, situé au centre du barrage, enregistre, quant à lui, la déformation la plus élevée (-0,393 mm/5 m). Ceci peut être attribué au fait que le plot 16 est situé dans la zone la plus sollicitée (centre du barrage) alors que le plot 9 est accoté au roc. La partie accotée au roc peut être plus rigide du fait du rôle d'inertie thermique joué par le rocher voisin.

Comportement statique	Date et heure	Temp. (°C)	Déformation / 5 m					
			ST-876 (mm)	ST-875 (mm)	ST-877 (mm)	ST-878 (mm)	ST-879 (mm)	ST-751 (mm)
			plot n° 9 face nord	plot n° 11 face sud	plot n° 11 face nord	plot n° 13 face sud	plot n° 13 face nord	plot n° 16 face sud
Mesure (Température maximale)	2008-09-02 à 10h17	39,2	0,183	0,259	0,042	-0,164	0,116	0,170
Mesure (Température minimale)	2009-01-16 à 08h45	-27,8	-0,675	-0,486	-0,509	-0,993	-0,655	-1,034
Amplitude en mm		67	0,858	0,745	0,551	1,157	0,771	1,204
Ratio en (m/m) / °C			2,5 <sup>E-6</sup>	2,2 <sup>E-6</sup>	1,6 <sup>E-6</sup>	3,4 <sup>E-6</sup>	2,3 <sup>E-6</sup>	3,6 <sup>E-6</sup>

*Tableau 3 : Amplitudes de déformation enregistrées en prenant comme référence les températures maximale et minimale relevées.*

Dans les courbes de déformations statiques ci-dessous, nous notons un décalage entre le point bas de la température et les points bas des déformations (déformation minimale).

La journée où la température est minimale est le 16/01/2009. La journée où les déformations sont minimales est le 07/02/2012. Le décalage est de 22 jours. Ce décalage est identique pour toutes les Cordes Optiques, sauf celle installée sur le Plot 16, construite le long de l'usine.

Ce décalage ne se rencontre pas dans les cycles quotidiens des variations thermiques.

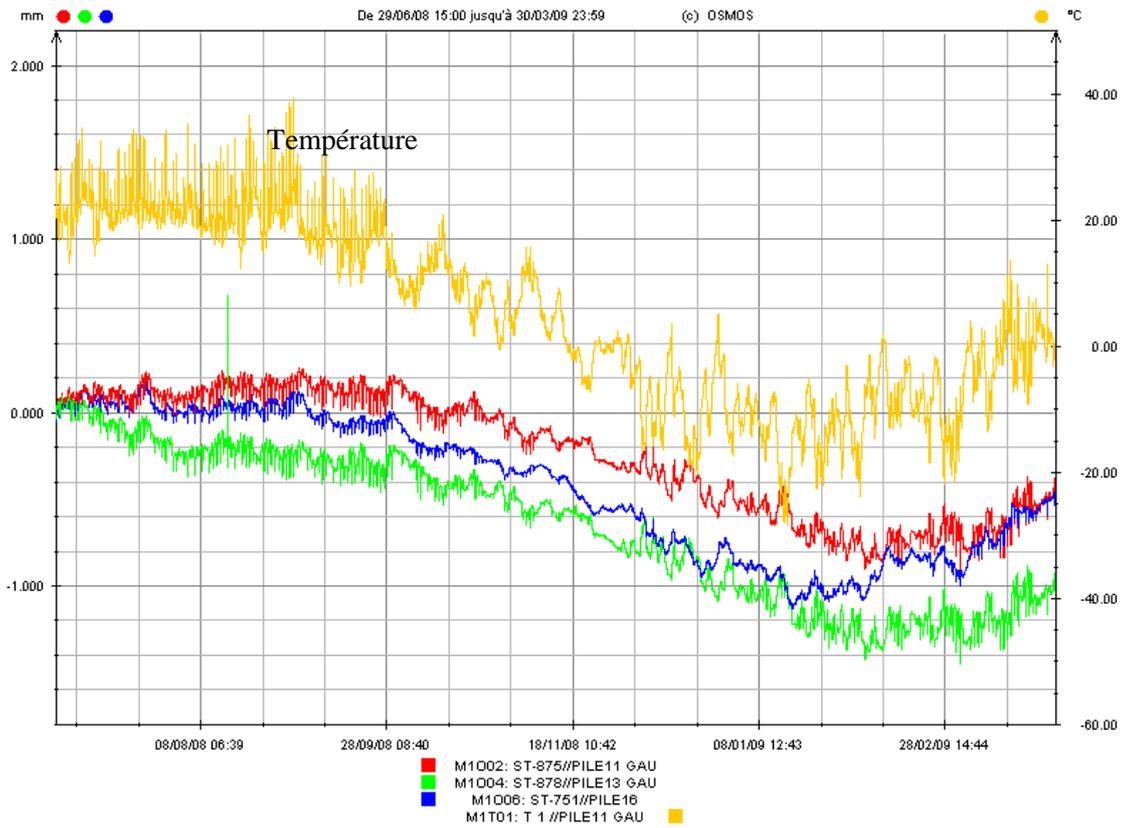


Figure 9 : Déformations statiques des Cordes Optiques sur plots, côté Gauche/Sud pendant 8 mois.

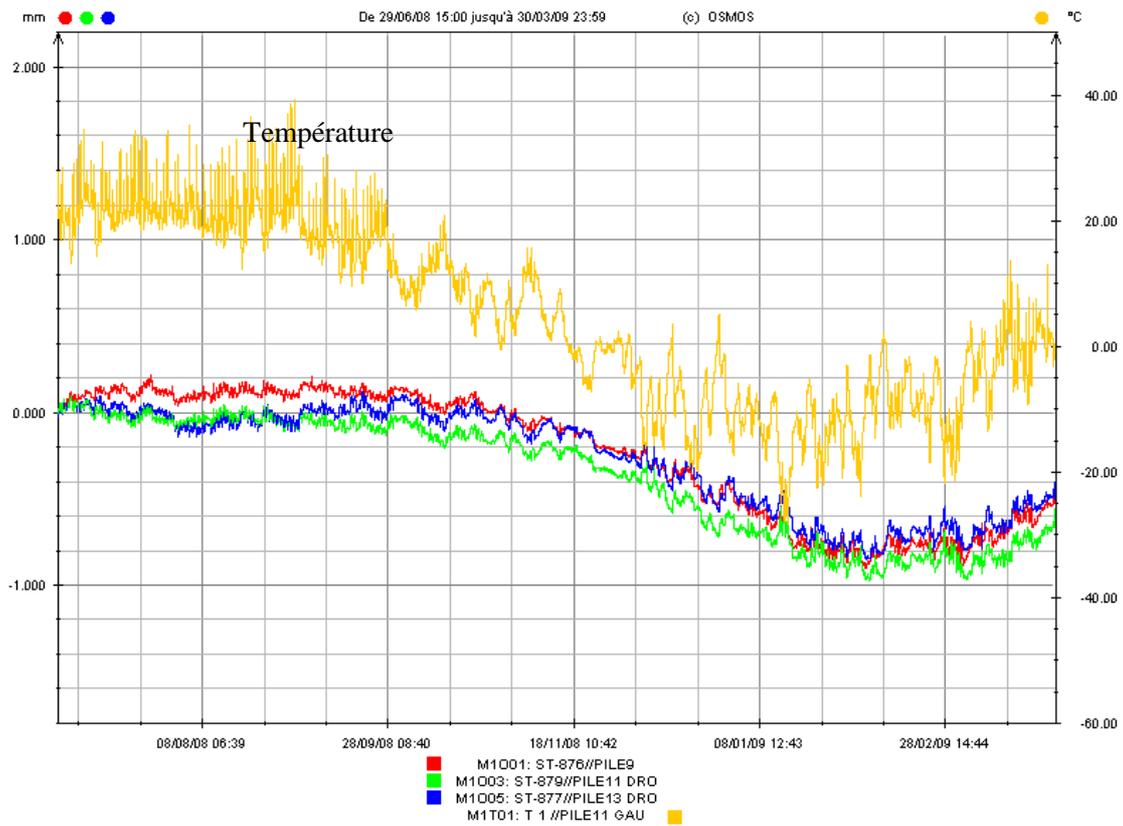


Figure 10 : Déformations statiques des Cordes Optiques sur plots, côté Droit/Nord pendant 8 mois.

Pour un cycle journalier de température, les faces Sud des plots 11, 13 et 16 démontrent une plus grande variabilité de déformation comparativement aux faces Nord des mêmes plots, et ce, à cause d'une plus grande exposition au soleil.

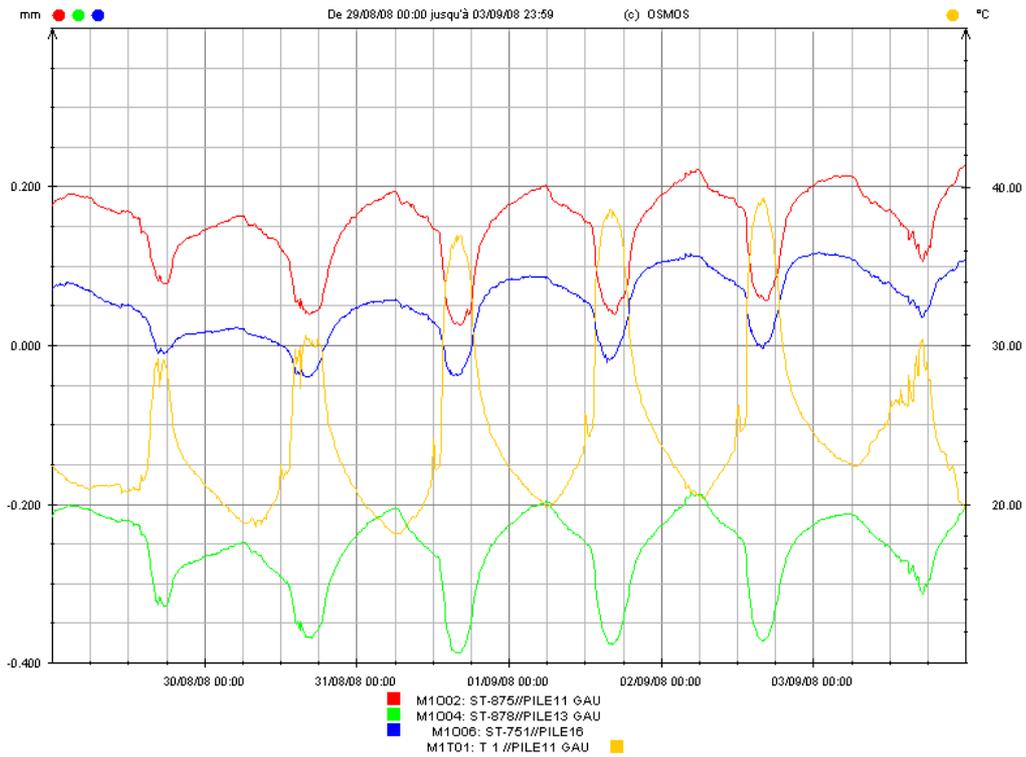


Figure 11 : Déformations statiques des Cordes Optiques sur plots, côté Gauche/Sud pendant 6 jours.

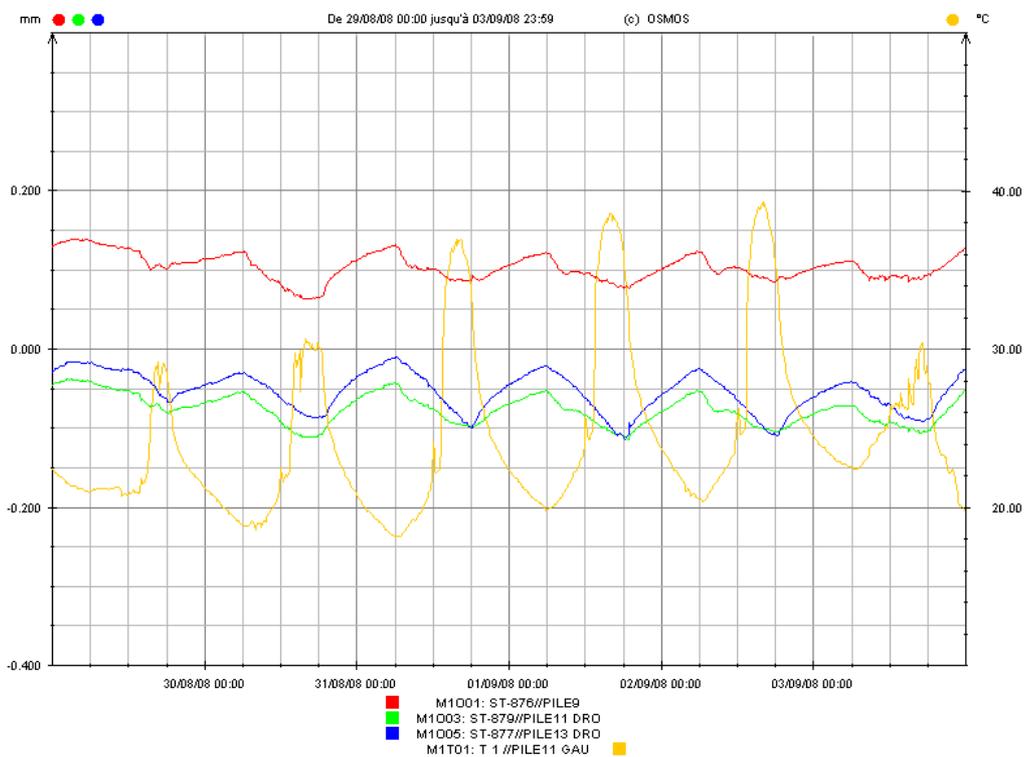


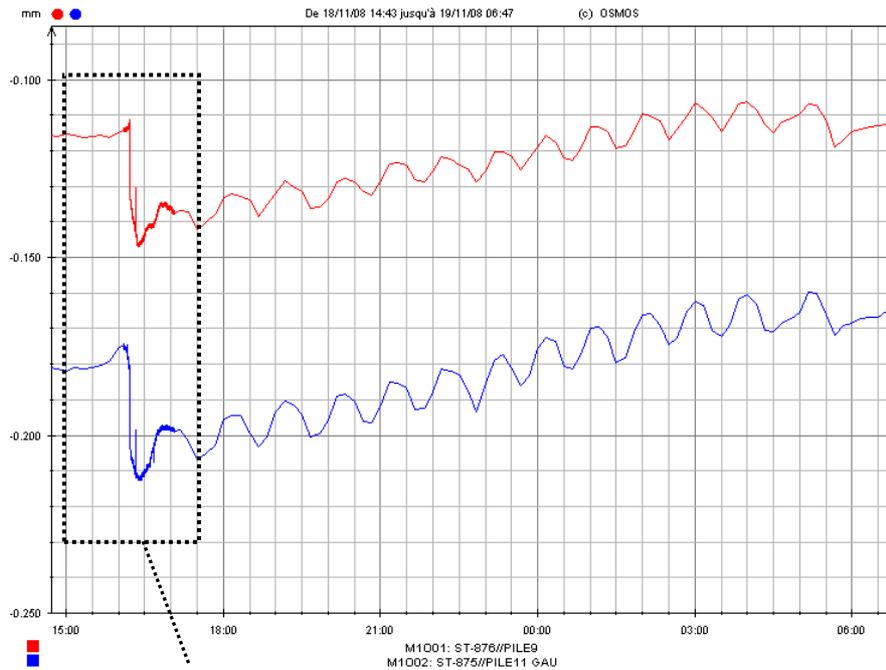
Figure 12 : Déformations statiques des Cordes Optiques sur plots, côté Droit/Nord pendant 6 jours.

## 6.2 Analyse dynamique

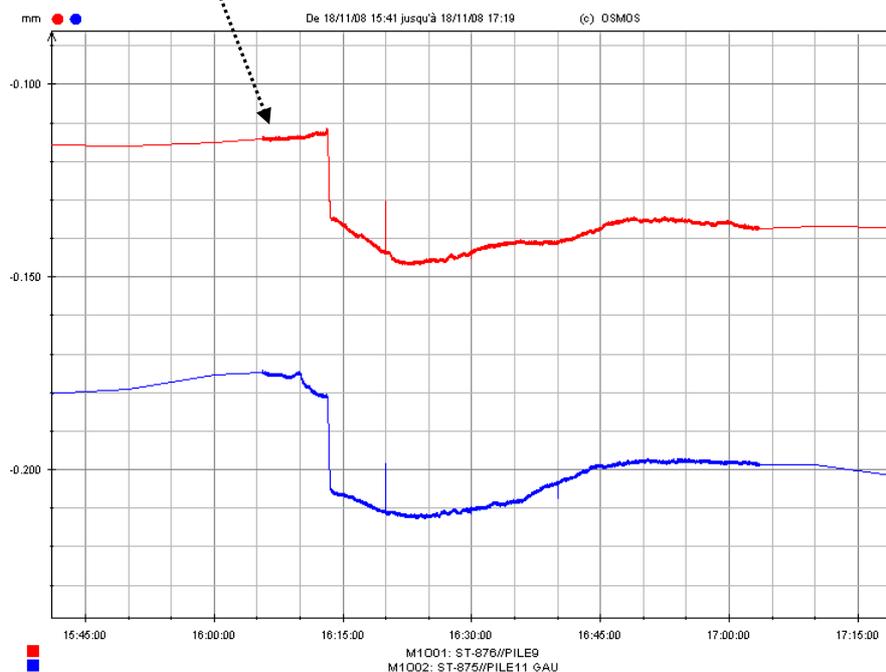
Aucune signature dynamique typique des ruptures de fils de précontrainte n'a été signalée.

Opération de la Vanne :

Lors de l'ouverture de la vanne, l'amplitude de déformation est de 0,025 mm, en compression (raccourcissement des Cordes Optiques). Suite à la fermeture de la vanne, les déformations reviennent progressivement à leur état de déformation initiale. Ce retour est constitué de cycles répétables d'une amplitude de déformations de 0,012 mm en moyenne et d'une durée d'une heure. La cause de ces cycles n'est pas formellement établie ; elles peuvent provenir des phases de remplissage du réservoir en amont.



*Figure 13 : Signature complète des déformations : les déformations reviennent à leur état initial après la fermeture des vannes.*



*Figure 14 : Signature dynamique des phases d'actionnement des vannes : déformation dynamique causée par l'ouverture et la fermeture de la vanne entre les plots N°9 et 11.*

## CONCLUSIONS

La pertinence des paramètres mesurés et la très grande précision du système permettent de confirmer que les plots équipés suivent un comportement structurel stable.

En particulier, aucune rupture de fils de précontrainte n'a été détectée pendant la période de suivi. L'hypothèse de la corrosion du câble de précontrainte due aux cycles de mouillage et de séchage n'est pour l'instant pas corroborée. La période de suivi doit être prolongée pour avoir un recul suffisant.

Les variations thermiques annuelles et journalières, importantes, et les phases d'activation des vannes segments se traduisent par des signatures caractéristiques de déformations statiques et dynamiques.

Une fois ces signatures bien définies, un monitoring permanent des plots renseignera l'opérateur sur la stabilité du comportement structurel.

Si ces signatures devaient évoluer (augmentation des déformations lors de l'activation des vannes, par exemple) ou si de nouvelles signatures devaient apparaître (rupture de fil de précontrainte), l'opérateur sera immédiatement informé et pourra prendre les mesures de correction appropriées, dans les meilleurs délais.

Tels sont les avantages de ce suivi :

- confirmer le comportement structurel sain d'un ouvrage ;
- détecter de façon précoce toute divergence par rapport à ce comportement sain ;
- consigner tout phénomène inattendu sortant des sollicitations normales (Séisme, crues, etc.) et informer immédiatement de leurs conséquences structurelles.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des collaborateurs d'OSMOS et d'OSMOS Canada pour les informations fournies.

---

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Harries Kent A., Holford Andrew, Kasan Jarret. Demonstration of Fiber Optic Instrumentation system for Prestressed Concrete Bridge Elements. University of Pittsburgh, Department of Civil and Environmental Engineering. May 2012.
- [2] J.J. Orozco y Orozco, F. Sánchez Domínguez, L. Benatov Vega. Bridge monitoring with fiber optics technology. An example of dynamic traffic load monitoring in Mexican bridges. *Proceedings of the 5th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-5)*, December 11-15 2011, Cancun, Mexico
- [3] Kassem C., Crépeau L., and Benmokrane B. 2009. Monitoring of Old Bridges Using OSMOS System. *Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4)*, July 22-24 2009, Zurich, Switzerland.
- [4] SANCHEZ, F., HODAC, B., ARRONIZ, S. “Auscultación y gestión de estructuras con tecnología de Fibra Óptica”. IV Congreso ACHE, Asociación Científico-técnica de Hormigón Estructural (Ed.), Madrid, 2008. ISBN 978-84-89670-62-4.
- [5] Braunstein J., VIANO C. and Hodac B. 2005. Structural Analysis in Real Time using Continuous Monitoring. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering ISSN 0277-786X* International conference on optical fibre sensors No17, Bruges, BELGIQUE (2005)
- [6] Braunstein J., and Hodac B. 2003. Structural health monitoring with fiber-optic deformation and displacement sensors. *Proceedings of the First International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-1)*, November 13-15 2003, Tokyo, Japan.
- [7] Braunstein J., Ruchala J., Hodac B. SMART STRUCTURES: Fiber-optic deformation and displacement monitoring. International. Association for Bridge Maintenance and Safety. (IABMAS) conference, July 2002, Barcelona, Spain.
- [8] Braunstein J., Ruchala J., Hodac B. Application of novel FOS. to civil structures. International Fiber Optic Sensors Society meeting, June 2000, Uxbrigde, UK.
- [9] Holst A. Globale Bauwerksüberwachung mit Optischen Sensoren. 9. International Geodetic Week conference, Feb. 1997, Obergurgl, Austria.