

Évaluation permanente de la sécurité des barrages, digues, réservoirs, voies navigables avec mesure par fibre optique

Permanent safety assessment of dams, levees, reservoirs, waterways with fiber optic distributed sensing

V. Garau¹, R. Blin², D. Inaudi²

¹ TELEMAT SAS, 10 avenue Eiffel, 77220 Gretz-Armainvilliers, vincent.garau@telemat.fr

² SMARTTEC SA, Via Pobiette 11, 6928 Manno, Suisse, regis.blin@smarttec.ch, daniele.inaudi@smarttec.ch

Résumé

L'instrumentation traditionnelle basée sur des capteurs ponctuels n'est pas toujours suffisante pour garantir la détection et la localisation des signes précoces d'apparition de dommages. La mesure de température et de déformation distribuée par fibre optique permet la détection précoce de discontinuités thermiques et structurelles locales le long de grandes structures, ainsi que leur localisation et dimensionnement. Ces discontinuités sont des indicateurs d'anomalies locales tels que les infiltrations, les fontis, les fissures et les tassements différentiels. De tels systèmes d'instrumentation fibre optique fournissent un flux de données continu d'une mesure par mètre sur toute la longueur du câble de détection. Un suivi permanent est essentiel pour constituer une base de données exhaustive de mesures en vue d'une évaluation plus approfondie. Les technologies les plus courantes de capteurs à fibre optique distribuée sont basées sur la rétrodiffusion Raman pour mesure des gradients de température et la rétrodiffusion Brillouin pour mesure des déformations relatives. L'analyse des données primaires basée sur le post-traitement des mesures de température ou de déformation distribuée a des limites et ne fournit pas d'informations en temps réel à l'opérateur, qui devient souvent débordé par la quantité de données qu'il reçoit. Un logiciel a été développé pour permettre une gestion robuste et automatique des données des systèmes de surveillance par fibre optique distribuée.

Mots-Clés

Auscultation, fibre optique, linéaire, long-terme, logiciel.

Abstract

Fiber optic distributed temperature and strain sensing allows for early detection and localization of local thermal and structural discontinuities along large structures. Those

discontinuities are indicators of local anomalies such as seepage, tunneling, sinkholes, cracks and differential settlements. Such systems provide a continuous data flow of one measurement every meter along the entire length of the sensing cable. Permanent monitoring is essential to build up an exhaustive measurement database as basis for further assessment. Once the physical implementation becomes operational, the subsequent challenge becomes data management and visualization of distributed sensing parameters. Software has been developed to allow robust and automatic data management of distributed fiber optic monitoring systems. The scale, age and uncertainty of materials in the sometimes huge hydro engineering structures combine a difficult array of parameters for the responsible engineer to navigate when analyzing its structural integrity. Traditional instrumentation based on localized point sensor is not sufficient to guarantee the detection and localization of early signs of damage. Distributed fiber optic sensing allows the early detection, localization and sizing of defects and degradations such as seepages, leakages, settlements, shearing, cracks, abnormal joint movements, intentional tampering and over-flooding.

Key Words

Monitoring, fiber optic, linear, long-term, software.

Introduction

La détection de déformation et température par fibre optique distribuée constitue un outil puissant de surveillance de l'intégrité des digues et barrages. Telemat / Smarttec fournit de tels systèmes depuis 15 ans. Cette communication présente la complémentarité de l'instrumentation fibre optique avec les outils d'auscultation conventionnels, décrit les composants du système de mesure fibre optique distribué, la méthodologie de mise en œuvre, des exemples de projets et les perspectives de cette technique.

Outil d'auscultation complémentaire

Le capteur distribué à fibre optique se présente comme un câble qui agit comme un capteur linéaire continu qui mesure la déformation avec une résolution de 0,020 mm / m et / ou la température avec une résolution de 0,1 °C, avec une résolution spatiale de 1 point de mesure par mètre ; chaque point de mesure est l'intégration de la moyenne de la déformation et/ou de la température dans 1 mètre de câble. L'implantation du câble est définie avec l'ingénierie en charge de la conception du système d'auscultation (Figure 1).

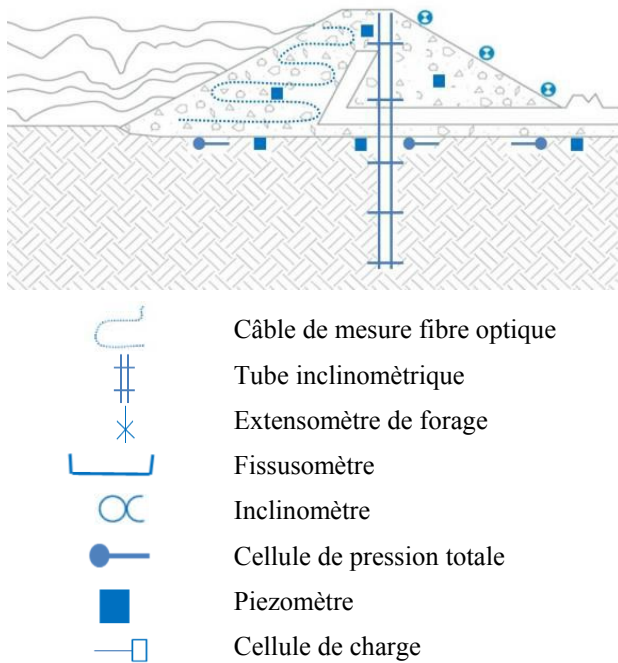


FIGURE 1 : SCHEMA TYPE INSTRUMENTATION D'UN BARRAGE EN REMBLAI

Système de mesure fibre optique distribuée

Les technologies les plus développées de capteurs à fibre optique distribuée sont basées sur la rétrodiffusion Brillouin et Raman. Les deux systèmes utilisent une interaction non linéaire entre la lumière et le matériau de silice dont est faite une fibre optique standard. Si la lumière, qui a une longueur d'onde connue, est lancée dans une fibre, une très petite quantité de celle-ci est rétrodiffusée en chaque point le long de la fibre.

La lumière rétrodiffusée contient des composantes Brillouin et Raman à des longueurs d'ondes différentes de celles du signal d'origine. Ces composantes rétrodiffusées contiennent des informations sur les propriétés locales de la fibre, en particulier sa déformation et sa température. Après une analyse appropriée de ces signaux, le système fournit une mesure de déformation ou de température tous les mètres le

long du câble de détection (Figure 2). Le temps de mesure du câble complet est typiquement de 10 secondes à 5 minutes.

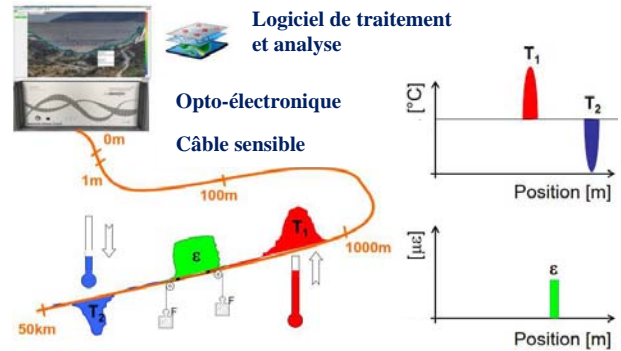


FIGURE 2 : SCHEMA TYPE INSTRUMENTATION FIBRE OPTIQUE

Câbles sensibles de déformation et température

La conception traditionnelle de câbles à fibres optiques vise à protéger au mieux la fibre elle-même de toute influence environnementale. En particulier, il est nécessaire de protéger la fibre optique de l'humidité externe, des pressions latérales, de l'écrasement, des efforts longitudinaux appliqués au câble. Dans le cas de la mesure de déformation par diffusion Brillouin, le câble doit transférer fidèlement la déformation structurelle à la fibre optique, un objectif qui va à l'encontre de la conception de câbles de télécommunication. Pour la diffusion Raman le câble doit être robuste tout en assurant un transfert thermique optimal, voire être équipé d'éléments chauffants en cuivre. Plusieurs câbles dédiés à la mesure distribuée sont donc proposés (Tableau 1).

Optoélectronique de mesure

La diffusion Brillouin génère un signal optique rétrodiffusé dont la signature en fréquence est proportionnelle à la déformation et à la température du câble ; la donnée brute fournie par une optoélectronique de mesure Brillouin est donc une fréquence en MHz. L'optoélectronique DiTeSt DUAL permet une interrogation de fibre optique bouclée, accessible à ses deux extrémités, c'est le mode BOTDA, qui offre les meilleures performances métrologiques. Il est possible d'utiliser la même optoélectronique en mode BOTDR (paramétrage logiciel) afin d'interroger la fibre optique à une unique extrémité. En cas de casse d'un câble branché en BOTDA il est donc toujours possible d'effectuer des mesures en mode BOTDR. La déformation est mesurée par rapport à la référence à l'instant initial.

La diffusion Raman génère un signal optique rétrodiffusé dont la signature en amplitude est proportionnelle à la température du câble ; la donnée brute fournie par une optoélectronique de mesure Raman est une amplitude relative, convertie par l'appareil en variation de température. L'ensemble des optoélectroniques de mesure Telemac / Smartec est présenté ci-après (Tableau 2).

TABLEAU 1 : CABLES FIBRE OPTIQUE DE MESURE










	Déformation			Température	
	SMARTape II	SMARTprofile II	Hydro&Geo	Câble passif	Câble actif
					
Mesure	Déformation	Déformation Température	Déformation Température	Température	Température Chauffage (conducteur Cu)
Plage de déformation	±1 %	±1,5 %	±1 %	-	-
Plage de température	-40 °C à +120 °C	-40 °C à +60 °C	-20 °C à +70 °C	-40 °C à +85 °C	-40 °C à +70 °C
Matériau	Composite	PEHD	Renforts Kevlar	Renforts inox, gaine PA	Renforts kevlar, gaine PEHD
Dimensions	9,9 x 0,3 mm ²	8,0 x 4,0 mm ²	Ø 6,5 mm	Ø 3,8 mm	Ø 14,5 m

TABLEAU 2 : OPTOELECTRONIQUE DE MESURE

	Système DiTeSt Brillouin	Système DiTemp DTS Raman		
	DiTeSt DUAL	DiTemp Light	DiTemp Harsh	DiTemp XR
				
Technologie	Brillouin BOTDA (boucle) et BOTDR (extrémité simple)	DTS Raman (extrémité simple)		
Mesure	Déformation, Température	Température		
Voies de mesure	4 intégrées 20 (MUX externe)	4 intégrées	4 intégrées	4 intégrées 16 (MUX externe)
Portée	60 km (BOTDA) 45 km (BOTDR)	4 km	5, 12 km (Harsh) 5, 12, 20, 30 km (Harsh PLUS)	12, 20, 30, 45 km
Résolution spatiale	1 m (BOTDA) 1,5 m (BOTDR)	2 m	1 m ≤ 12 km 2 m > 12 km	1 m ≤ 20 km 2 m > 20 km 5 m > 30 km
Résolution	0,020 mm/m ± 1 °C	- ± 1 °C		
Cycle de mesure	typ. 5 min. / voie de mesure	Min 10 s, Typique 5 min. / voie de mesure		

L'optoélectronique de mesure DiTemp DTS Raman est disponible en plusieurs modèles, l'entrée de gamme est le DiTemp Light, qui a une portée et une résolution spatiale limitées, les optoélectroniques DiTemp Harsh et DiTemp XR sont conçues pour des projets de grande envergure. Différentes techniques d'étalonnages permettent d'obtenir la température absolue ; étalonnage fixe avec température de référence mesurée à l'instant initial, étalonnage avec sonde de température électrique de référence (type PT100) fournie (DiTemp Harsh et DiTemp XR), et enfin l'étalonnage dynamique possible avec toutes les optoélectroniques DiTemp.

Les deux systèmes DiTeSt Brillouin et DiTemp DTS Raman localisent les événements au mètre près grâce à la mesure de

distance par temps de vol parcouru par la lumière dans la fibre optique.

Logiciel

L'analyse directe de données basée sur des données de déformations ou de températures distribuées a des limites et ne fournit pas d'informations en temps réel à l'opérateur qui devient souvent débordé par la quantité de données qu'il reçoit. Il est donc nécessaire d'automatiser le processus de gestion et d'analyse des données.

Le logiciel affiche les profils de mesure, les cartes d'état de la température ou de la déformation, l'évolution de la structure et les événements survenus et consignés par le système de surveillance (Figures 3, 4, 5).

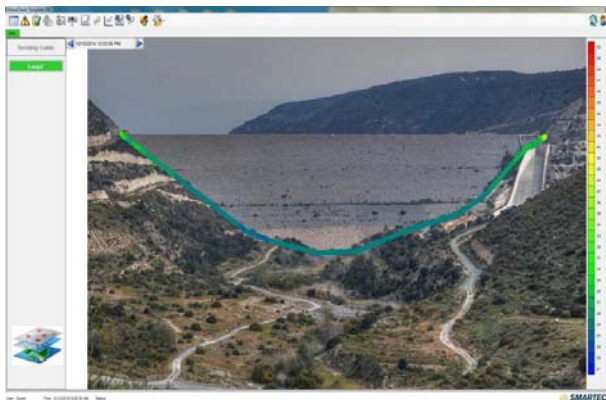


FIGURE 3 : INTERFACE GRAPHIQUE DiVIEW - CABLE DE MESURE DE TEMPERATURE AVEC ECHELLE DE COULEUR



FIGURE 4 : INTERFACE GRAPHIQUE DiVIEW, PROFILS DE TEMPERATURE

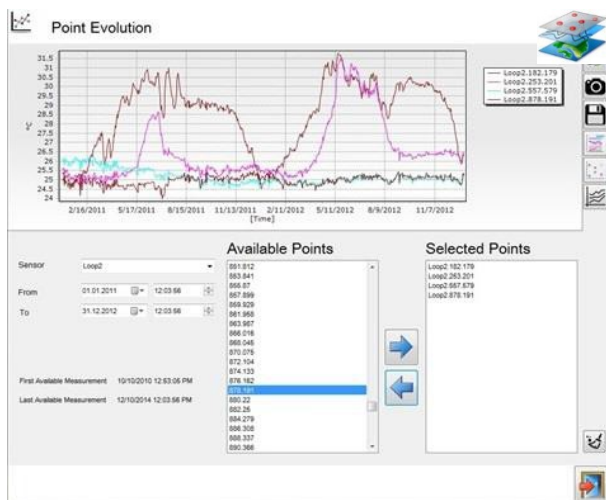


FIGURE 5 : INTERFACE GRAPHIQUE DiVIEW, ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE A DES POINTS SPECIFIQUES

Toutes les mesures sont importées et stockées dans une base

de données unique et les données sont traitées pour appliquer des calibrations et sélectionner des zones d'intérêt.

Les alarmes sont générées automatiquement, sur la base de critères complexes (par exemple pour la détection de fuite). Les alertes et les alarmes sont visualisées sur des cartes et des dessins et peuvent être envoyées par Email ou SMS.

Les autres fonctionnalités sont la gestion de l'acquiescement des alarmes et des utilisateurs multiples, la visualisation des données sur une carte avec codage couleur, la mise à jour en temps réel des données, alarmes et visualisations, ainsi que la gestion de plusieurs systèmes de surveillance. Les données sont exportables sous forme de fichier texte.

Méthodologie

Les techniques de pose mises en œuvre allient efficacité métrologique et compatibilité aux conditions du projet : particulièrement nous travaillons avec nos partenaires sur l'optimisation de la cadence de pose, la gestion de la co-activité, la formation aux spécificités de la fibre optique, le contrôle continu et le maniement des systèmes de mesure.

Mesure de déformation

Les câbles de mesure de déformations sont enterrés dans des tranchées, placés dans des rainures, ou fixés en surface d'un ouvrage de manière continue et / ou périodique (Figure 6).



FIGURE 6 : INSTALLATION CABLE DE MESURE DE DEFORMATION, DE GAUCHE A DROITE : DIGUE PROJET ILEVEE A LA NOUVELLE-ORLEANS (USA) - CABLE ENTERRE, GALERIE DU BARRAGE PLAVINU HES (LETONNIE) - RAINURAGE SUR BETON

Détection d'infiltration

Un système distribué de détection de fuites à fibre optique peut fonctionner dans deux configurations différentes ; les méthodes passives et actives. La méthode dite passive repose sur la détection directe des anomalies de température induites par le déversement de liquide. Cette méthode est généralement utilisée lorsqu'un gradient d'environ 3 à 5 °C entre le liquide et le câble de détection peut être assuré. La

méthode passive livre en permanence le profil thermique de l'ouvrage.

La méthode dite de pulsation de chaleur (« Heat Pulse Method ») ou méthode active est en revanche utilisée lorsque le gradient entre le liquide et le câble de détection est négligeable et inférieur à 1 °C. Afin d'assurer une détection fiable, le câble de détection auto-chauffant est chauffé et forcé de changer sa température naturelle. Le chauffage est assuré par un courant électrique circulant sur le câble de détection, l'injection de courant est contrôlée par un module dédié qui fait partie du système lorsque cette méthode de détection est sélectionnée (Inaudi, 2015). La vitesse de chauffage et de refroidissement dépend de la présence d'eau autour du câble et de sa vitesse d'écoulement.

Le câble est installé lors de la construction ou rénovation d'un ouvrage hydraulique (Figures 7, 8).



FIGURE 7 : GAUCHE, DIGUE DE LA SAVE (SLOVENIE)
DROITE, BARRAGE DE BAGBASI (TURQUIE)



FIGURE 8 : BARRAGE DE NAM NGUM 2 (LAOS)

Retour sur expérience

Mesure de déformation Barrage de Siah Bisheh (Iran)

Le projet d'énergie hydroélectrique à accumulation par pompage de Siah Bisheh est le premier de ce type en Iran. Situé à 125 km de Téhéran. Les principaux objectifs de l'instrumentation à fibre optique sont l'infiltration au niveau

de la plinthe et le système de détection actif avec la méthode de chauffe. Deux systèmes indépendants sont développés pour surveiller les barrages existants (amont et aval). Une salle de contrôle dédiée où l'armoire d'instrumentation est située est spécifiquement construite sur la crête de chacun des deux barrages (Figure 9).

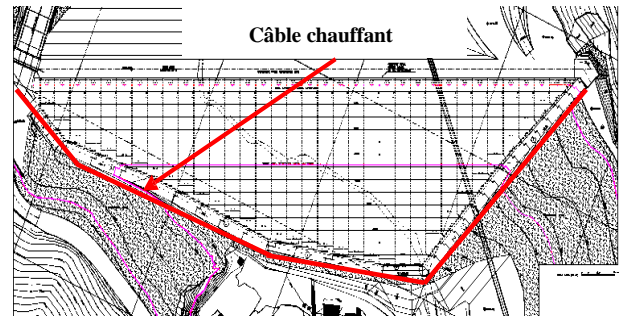


FIGURE 9 : POSITIONNEMENT DU CÂBLE FIBRE OPTIQUE DE MESURE DE TEMPERATURE

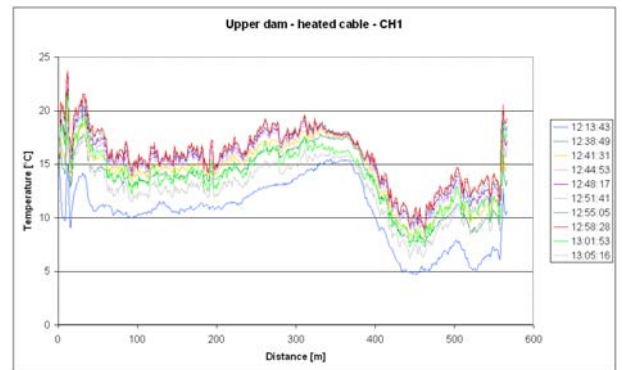


FIGURE 10 : MESURE ABSOLUE DE TEMPERATURE PENDANT REMPLISSAGE DU BARRAGE

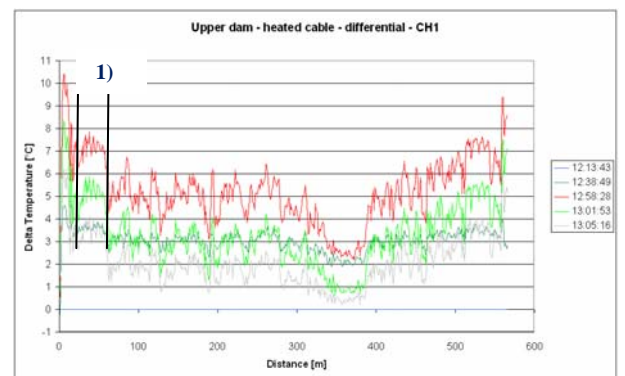


FIGURE 11 : MESURE DIFFERENTIELLE DE TEMPERATURE PENDANT REMPLISSAGE DU BARRAGE, DIFFERENTIATION ZONE SECHE ET ZONE HUMIDE

Les Figures 10 et 11 représentent des séquences de chauffe pendant le remplissage du barrage. La section initiale 1) montrant une déviation plus élevée se rapporte en fait à une

section de câble non encore bétonnée et exposée à l'environnement. Les profils de température des câbles de détection sont suivis en temps réel et à l'aide du logiciel de traitement et d'analyse donnent une alerte en cas de fuite.

Conduite forcée de Nendaz (Suisse)

La conduite forcée d'un barrage de montagne important dans les Alpes suisses est soumise à des mouvements de masse rocheuse qui peuvent influencer ses performances mécaniques (Jordan Papilloud, 2015). Afin de fournir une installation sûre, la vanne est composée de plusieurs sections de tuyaux soudées ensemble afin de former un tuyau plus flexible, permettant ainsi un plus haut degré de mouvement. Néanmoins, un système de surveillance de la déformation est nécessaire pour détecter toute déformation anormale de la conduite forcée et la courbure de la conduite forcée. En plus de cela, le tunnel d'accès aux conduites forcées est également affecté par la fissuration du béton due à la pression interstitielle et aux mouvements de la roche.



FIGURE 12 : INSTALLATION DANS LE TUNNEL D'ACCES

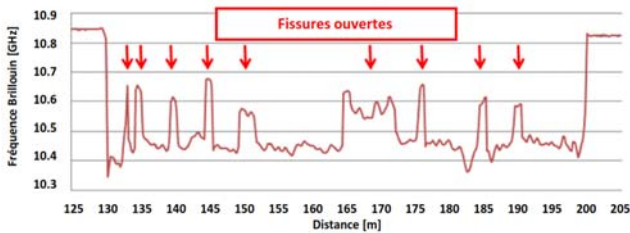


FIGURE 13 : DISTRIBUTION DE LA DEFORMATION LE LONG DU TUNNEL D'ACCES

Un système de surveillance des déformations réparties a été sélectionné en raison de sa capacité à surveiller de grandes longueurs à travers un seul câble, simplifiant ainsi l'installation et augmentant la densité des données. Une technique d'installation différente est choisie pour les deux sections : dans la conduite forcée, où une surveillance précise sous l'eau est requise, le câble de détection (profil plat) est

directement collé sur la surface interne. Le linéaire de 510 m de câble de détection est collé selon 4 lignes distinctes.

D'autre part, pour le tunnel d'accès, une technique d'installation mixte a été choisie : le câble de détection était directement collé sur le béton sur la plus grande partie de sa longueur, mais fixé avec un support en acier inoxydable au droit des fissures. Cette décision a été prise afin de préserver le capteur de la rupture au cas où la fissure continuerait à se développer (Figure 12). Cette technique d'installation permet un suivi précis sur toute la longueur de ce tunnel d'environ 70 m.

Après 3 années de surveillance, les résultats recueillis sont en ligne et en bon accord avec les prédictions mathématiques et autres mesures géomatiques fournies par des systèmes de surveillance supplémentaires installés sur le site. Un exemple typique de répartition des contraintes mesurée dans le tunnel d'accès à la vanne indique clairement l'emplacement des fissures de développement ouvertes, des pointes peuvent être vues et facilement localisées le long de la longueur câble de détection (Figure 13).

Tendances et perspectives

Projets hybrides Brillouin / Raman

Pour des projets de grands linéaires il est plus simple et moins coûteux d'installer un unique câble de mesure distribuée et d'utiliser deux systèmes de mesure DiTemp (DTS Raman) et DiTeSt (BOTDA/BOTDR Brillouin) combinés, un tel équipement est présenté Figure 14.

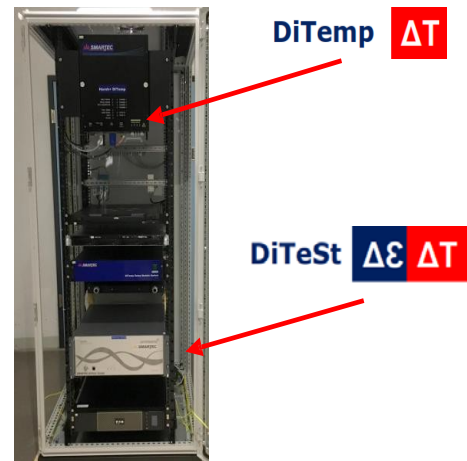


FIGURE 14 : ARMOIRE HYBRIDE DiTeSt (BRILLOUIN) / DiTemp (RAMAN) ET CÂBLE MULTIFIBRES BRILLOUIN / RAMAN

Les données sont gérées par une unique interface DiView capable d'assurer la compensation thermique des déformations avec la température.

Interfaces industrielles

Des fonctionnalités robustes de connectivité industrielle sont disponibles avec l'interface DiView pour une communication directe avec le contrôleur de l'installation (SCADA, PLC, DCS) ; Une fois configurées, les alertes et les alarmes sont envoyées via des relais ou via une communication série / Ethernet via des protocoles industriels (Figure 15).

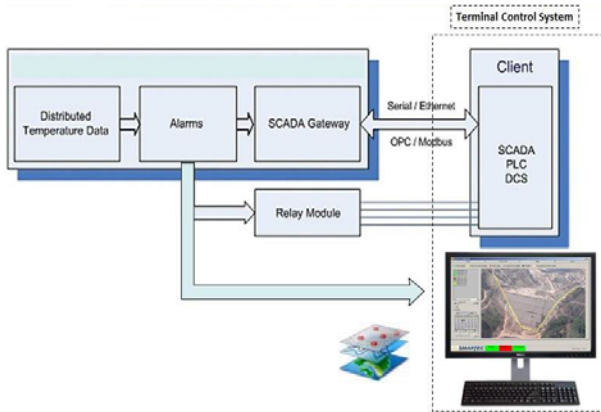


FIGURE 15 : INTERFAÇAGE INDUSTRIEL DES SYSTEMES DE MESURE DISTRIBUEE PAR FIBRE OPTIQUE DiTEMP (DTS RAMAN) ET DiTEST (BOTDA/BOTDR BRILLOUIN)

Intégration des mesures distribuées en représentation 3D

L'intégration de données de mesures distribuées est réalisée par les utilisateurs de nos systèmes, à partir des fichiers exportés par l'interface graphique DiView.

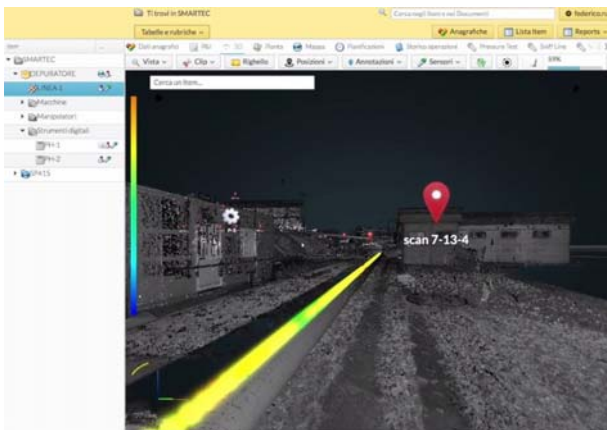


FIGURE 16 : SUPERPOSITION DES MESURES DISTRIBUEES PAR FIBRE OPTIQUE SUR UN NUAGE DE POINTS ISSUS DE SCANS 3D

Dans le cadre du Projet RAGTIME (2016-2019) nous développons une nouvelle possibilité de visualisation, avec superposition des mesures distribuées Brillouin / Raman et de capteurs ponctuels sur un nuage de points issus de scans 3D d'un ouvrage (Figure 16).

Conclusion

Les défis initiaux de fourniture d'un système d'auscultation fibre optique distribué ont porté sur la conception, implantation du câble et l'installation ; cette technique étant une nouvelle approche complémentaire des capteurs ponctuels traditionnels (piézomètres, extensomètres). L'auscultation par fibre optique est mise en œuvre sur de nouveaux barrages ou digues ou dans le cadre de projets de réhabilitation et d'amélioration de la sécurité. Dans le cas de structures existantes les techniques de pose d'un câble distribuée permettent des cadences de pose élevées, ce qui limite le temps d'interruption d'exploitation de l'ouvrage. Une fois que la mise en œuvre physique de ces systèmes de surveillance est devenue opérationnelle, le défi est la gestion des données et la visualisation des paramètres de détection répartis. Un système à fibre optique distribuée fournit un flux de données d'une mesure par mètre sur toute la longueur du câble de détection. Un logiciel a été développé et permet la gestion de plusieurs optoélectroniques de mesure, l'interfaçage industriel avec le contrôleur de l'installation, et, à l'avenir, la superposition des données sur une représentation scanner 3D en nuage de points. L'auscultation distribuée par fibre optique est une instrumentation fiable et économique pour améliorer la connaissance et la maîtrise des risques.

Remerciements

Nous remercions nos partenaires ayant participé aux réalisations citées dans cette communication. En particulier, STS - Soil Testing Siam en Thaïlande, VND2 Ltd en Lettonie, Geocomp Inc aux USA, le bureau de protection et restauration côtière de Louisiane aux USA, Gecko en Slovénie, Kanada Technik en Turquie.

Références

- [1] Inaudi D. (2015). *Distributed Fiber Optic Sensors for Dams and Levee Deformation Monitoring*, Society of Exploration Geophysicist, Annual Meeting, New Orleans.
- [2] Jordan A., Papilloud E. (2015) *Penstock Structural Health Monitoring*, Hydro 2015 Bordeaux, Session 19 Gates and penstock.
- [3] <http://ragtime-asset.eu/> *Risk based approaches for asset integrity multimodal transport infrastructure.*