

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Maintenance préventive des ouvrages hydrauliques par fibre optique

Preventive maintenance of water retaining structures based on fiber optic systems

Fry J.-J., Courivaud J.-R.
EDF-CIH, Le Bourget du Lac, France

Beck Y.-L.
EDF-DTG, Grenoble, France

Pinettes P.
Géophyconsult, Le Bourget du Lac, France

RÉSUMÉ : EDF est maître d'ouvrage de plus de 500 km de digues, dont certaines qui forment une protection d'aménagements intéressant la sécurité publique. Afin d'améliorer la sûreté de son parc, EDF travaille au concept de maintenance préventive. Il s'agit de concevoir, réaliser et gérer un système de détection précoce d'anomalies (dont les principales sont les fuites et les déformations), un modèle d'interprétation et une chaîne d'interventions précises comportant alarmes techniques, administratives et travaux de réparation adaptés. Dans ce cadre, EDF travaille depuis 1994 à développer l'utilisation de mesures réparties par fibre optique pour améliorer la surveillance des digues. En effet, la technologie fibre optique permet d'avoir une mesure de température et/ou de déformation répartie tous les mètres le long de celles-ci, mesurée en continu. Cette nouvelle technologie, placée stratégiquement dans l'ouvrage, permet de compléter la surveillance habituelle du comportement hydraulique et mécanique, assurée à ce jour avec une instrumentation classique (nivellement, piézomètre, drain), par une surveillance à la fois globale, détaillée et surtout apte à la détection des phénomènes extrêmes et des états de crise (crue, séisme, vandalisme). Cet article présente le principe de la surveillance des digues de canaux par fibre optique ainsi que les résultats de validation de cette technologie tant à l'échelle de sites test que sur sites réels du parc d'EDF.

ABSTRACT: EDF owns more than 500 km of dikes, some of them protecting large critical structures involving public security. In order to improve the safety of its stock of power plants, EDF develops the concept of preventive maintenance. It means design, building and operation of an early warning monitoring system (leakage and strains), plus model of interpretation and portfolio of technical or legal alarm and interventions. In that framework, EDF has been working since 1994 on the development of the use of the distributed measurements with fiber optic, to improve the monitoring of dikes and flood embankments. The fiber optic technology provides a remote control measurement of the distributed temperature and strain every meter along the embankment. This new technology strategically placed in the fill, allows to reinforce the hydraulic and mechanical behavior monitoring, which is provided to date by conventional instrumentation (leveling, piezometer, discharge rate), with simultaneously a global and detailed surveillance and an early warning system for extreme loadings and crisis (floods, earthquakes, vandalism). This paper introduces the principle of dikes monitoring using fiber optic and the validation results of this technology from both trial test sites and on EDF's real sites.

MOTS-CLÉS : remblai, barrage, digue, crue, séisme, sécurité, surveillance, auscultation, fibre optique, rupture, fuite

KEYWORDS: embankment, dam, levee, flood, earthquake, safety, surveillance, monitoring, fiber optic, failure, leakage

1 INTRODUCTION

En 1995, EDF est le premier gestionnaire d'ouvrages hydrauliques à tester la technologie de mesure de température répartie par fibre optique pour la surveillance des fuites d'une digue. Sur les digues, il est courant d'observer des fuites soudaines, sans que les piézomètres ne détectent une variation de la surface libre. Cette observation, souvent répétée sur des ouvrages variés, montre à quel point le phénomène d'érosion interne, à l'origine de la fuite, est local. EDF, sensibilisé à ces manifestations d'érosion interne, lors de la mise en eau des digues d'Isère Moyenne Aval en 1991, en conclut que la détection précoce de l'érosion interne ne peut pas être envisagée avec l'espacement habituel des piézomètres, mais plutôt avec un espacement de l'ordre du mètre et un système d'acquisition marchant en continu. Dans le cadre d'un groupe de travail constitué avec la CNR en 1993, il apparaît que la méthode thermométrique de GTC, détectant les anomalies thermiques provoquées par un écoulement préférentiel dans le remblai avec des mesures de température dans des forages implantés tous les 20 m, est la méthode la plus efficace pour localiser la zone de fuite. D'autre part, Johansson propose à cette époque une interprétation des mesures de thermométriques, apte à en

extraire la perméabilité et à suivre son évolution dans le temps. EDF en déduit en 1994 que la détection de l'érosion interne par l'augmentation de la perméabilité dans le temps est possible grâce aux mesures à l'interprétation de température, comme l'écrit plus tard Johansson (1997) dans sa thèse.

Cependant, la méthode n'est pas prédictive : l'intervention est curative. Il faut un nouveau saut technologique, pour détecter l'initiation de l'érosion interne, surveiller son évolution au fil du temps et décider d'une intervention ou non. Quel système a l'aptitude de mesurer la température tous les mètres et en permanence ? En discutant avec Jürgen Dornstädter en 1994, patron de GTC, EDF met en parallèle le contrôle de l'érosion interne et le contrôle des câbles électriques enterrés. Ces derniers sont mis en place avec une fibre optique, en vue de détecter à tout moment, une éventuelle coupure accidentelle du câble. L'outil existe donc à cette époque ! Il reste à l'adapter au contexte de la surveillance des ouvrages hydrauliques. Cela nécessitera plus de 15 années d'étude... Dès le premier test avec une fibre optique d'une centaine de mètres, en juillet 1995, la détection de fuites, dans le canal de drainage en pied de la digue Cusset, montre que la détection des fuites est possible, mais qu'elle est dépendante de la technologie et exige une forte précision de la mesure. D'autre part, le diagnostic est entaché de

difficultés d'interprétation, suite aux nombreux biais physiques : changement thermique de l'eau canalisé, rayonnement, pluie, perte de signal dans les soudures ou les rayons de courbure trop courts. Ce premier bilan montre l'importance de la difficulté, du temps et des moyens qu'il faudra développer, pour aboutir à une surveillance fiable. Cependant le fort enjeu de sécurité justifie les nombreux efforts pour surmonter ces difficultés. EDF veut améliorer la sûreté des aménagements les plus sensibles, en démontrant une détection précoce, un diagnostic fiable et une intervention préventive minimisant le coût la réparation. Depuis, EDF, maître d'ouvrage, développe et valide méthodiquement cette métrologie (Fry 2004).

Cet article introduit le principe de cette maintenance préventive, montre les principaux résultats de qualification et évoque le déploiement opérationnel de cette technologie.

2 LA MAINTENANCE PREVENTIVE

2.1 La mesure par fibre optique

Le principe consiste à envoyer un rayon lumineux de laser dans une fibre optique standard, dont les défauts installés à pas régulier, souvent 1 m, vont rétrodiffuser le signal, qui sera analysé par un interrogateur optoélectronique et identifié par son temps d'aller-retour et son spectre en fréquence. Les pics du spectre, dépendant de la température et de la contrainte, mesurent d'une manière indirecte et surtout répartie la température et la déformation le long de celle-ci. Les interrogateurs optoélectroniques disponibles sur le marché actuellement permettent d'obtenir une mesure tous les mètres, avec une portée allant jusqu'à 20 à 30 km. En choisissant bien l'interrogateur et en utilisant des fibres standard télécom multimodes, la précision est de 0,1°C pour une mesure de température seule avec un interrogateur Raman et une distance inférieure à 10 km. A partir d'une fibre optique monomode contrainte dans un câble, la précision des mesures de température et de déformation par un interrogateur Brillouin est de l'ordre de 1°C et de 20µm/m.

2.2 Surveillance active ou passive

La méthode thermométrique initiale de GTC mesure une seule fois la température. Comme ce n'est souvent pas suffisant, GTC développe un test de convection forcée, où la température est imposée par chauffé ou réfrigération (Dornstädter J. 2010). Ce mode opératoire est appelé méthode active, en opposition à la méthode passive, consistant à mesurer les températures naturelles. Le débat, autrefois vif entre les partisans de l'une ou de l'autre approche, laisse maintenant une place à chaque méthode.

Johansson (1997) n'utilise que la méthode passive associée à une modélisation numérique des échanges thermiques. EDF montre qu'une interprétation simpliste de la méthode passive dans un milieu non saturé aboutit à un diagnostic faux. Pour surmonter cette incohérence, EDF développe d'autres modèles d'interprétation, valables quelle que soit la position de la fibre optique ou celle de la nappe. Quatre modèles sont complémentaires (Beck & al. 2010), les deux premiers sont physico-statistiques, issus de la pratique de l'auscultation, tandis que les suivants sont basés sur le traitement du signal. La méthode passive a l'avantage de permettre la surveillance permanente et d'identifier les fuites à plus d'un mètre de la fibre. Son inconvénient est de nécessiter la mesure de la température de l'eau stockée ou canalisée et celle de l'air et un modèle d'interprétation complexe à plusieurs niveaux de traitement.

Perzmaier, Aufleger et Dornstadter (2007) ont été les précurseurs de la méthode active, en entourant la fibre optique d'un câble de cuivre chauffé par effet Joule sur une courte période de temps. La puissance électrique nécessaire est de 3 à

15 W/m. Cette méthode présente l'inconvénient d'être applicable uniquement à des tronçons limités de digues (< 2 km), d'avoir un faible rayon d'action (< 20 cm autour du câble), de ne pas permettre une surveillance en continu et de nécessiter quelques précautions de conception et d'utilisation afin d'assurer la sécurité du personnel.

2.3 Le concept de maintenance préventive

Le choix d'un système de surveillance par fibre optique n'est pas justifié sur tous les ouvrages. Une stratégie basée sur l'évaluation du risque ne montre pas de bénéfice à équiper ni les grands barrages de bonne conception, dont la sécurité est assurée par une surveillance habituelle, ni les petits barrages de risque limité, dont la rupture aurait peu de conséquences. A l'opposé, un système de détection par fibres optiques apporte un gain justifié quand l'ouvrage est de grande longueur, sur une fondation mal connue ou édifié avec une conception non conforme à l'état de l'art actuel, dont le coût de réparation est lourd pour le maître d'ouvrage, alors que des zones de faiblesse sont suspectées sans qu'elles soient localisées, laissant un doute sur la sécurité dans le temps ou en conditions extrêmes.

Le système de surveillance par fibre optique apporte dans tous les cas un complément au réseau habituel d'auscultation. C'est un outil d'aide à la gestion de crise. Que se soit après un séisme ou une crue, il a la capacité de localiser en temps réel les zones à risque et donc d'améliorer la gestion des ressources et d'accroître l'efficacité des interventions.

Le choix de la méthode et du modèle d'interprétation est lié à la stratégie du maître d'ouvrage : surveillance long terme ou court terme, pathologies à suivre, gestion du risque sismique. La mise en place de ce système de surveillance est identique à celui de la méthode observationnelle, en réunissant quatre conditions :

1. Les limites admissibles du comportement en température et/ou en déformation sont évaluées par modélisation avant d'être mesurées;
2. Le domaine des variations possibles du comportement thermique ou cinématique est jugé acceptable. Un tel système d'auscultation n'est installé que si la marge de sécurité est jugée acceptable, dans le cas contraire il s'agit de programmer en urgence la réhabilitation;
3. Le programme de suivi est établi pour vérifier si le comportement réel reste dans les limites admises. La fréquence d'acquisition est suffisamment élevée pour que le dispositif puisse détecter l'apparition de toute fuite, vérifier par la progression du phénomène s'il s'agit d'érosion interne et laisser le temps de réparer. Le choix de la méthode passive ou active doit être justifié par rapport à la cinétique des phénomènes attendus;
4. Un programme d'interventions d'urgence est défini au cas où le suivi révèle un comportement sortant des limites admissibles.

L'avantage de la maintenance prédictive est de limiter les zones endommagées par la détection précoce des pathologies menant à n'importe quel mode de rupture. Il existe 3 modes de rupture potentiels : l'érosion externe, l'érosion interne et le glissement. Chacun de ces trois modes est intercepté par le système de surveillance à base de fibres optiques de mesure de température et de déformation. Les mesures de température repèrent le risque de rupture par érosion et les mesures de déformation détectent le risque d'instabilité générale. Cela est bien démontré par les résultats du projet IJkdijk en Hollande (Koelewijn A. 2010) et (Beck & al. 2010).

3 VALIDATION DE LA DÉTECTION PRÉCOCE DE LA RUPTURE

L'été 2003, en pleine canicule, la digue de Wilnis se rompt, quelques heures après une inspection visuelle. La démonstration est faite que l'inspection visuelle, souvent essentielle à la

surveillance, ne garantit pas à elle seule la sûreté. Le gouvernement hollandais en prend conscience. Il décide de lancer le projet IJdijk en vue de sélectionner les meilleures technologies de détection précoce de la rupture. EDF, associé à Tencate, Géophysconsult et au projet PAREOT, voit une opportunité hors du commun de tester son approche de la sûreté.

3.1 Rupture par instabilité générale

Le premier test en 2008 concerne la détection du glissement d'une digue, chargée par des containers et dont le pied est excavé. 4 fibres optiques mesurent l'élongation du parement aval (Figures 1 à 3). La surface de rupture est bien détectée.

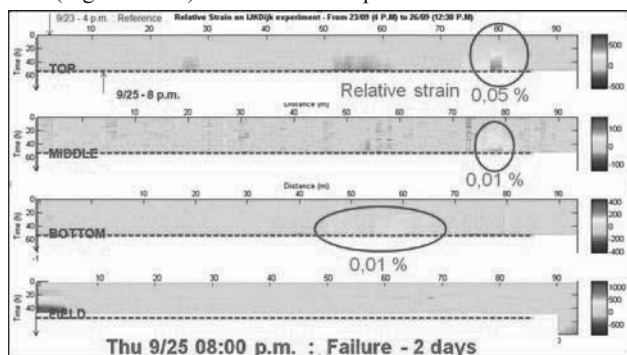


Figure 1: Elongation des 4 fibres optiques 2 jours avant la rupture

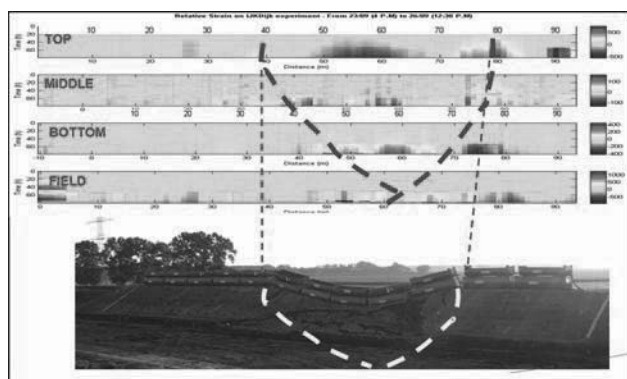


Figure 2: Détection de la surface de rupture par les 4 fibres optiques



Figure 3 : Glissement de la digue (photo Koelewijn)

3.2 Rupture par érosion interne

Le système de détection est de nouveau testé sur les 4 essais de détection de rupture par renard des digues expérimentales du projet IJdijk en 2009. Les remblais mesurent 3,5 m de hauteur, 15 m de longueur et ont un fruit H/V=2/1 à l'amont et aval. Les fibres optiques passives sont installées avec Tencate dans la

fondation au contact du remblai (Figure 4). La rupture est obtenue par érosion régressive en montant par palier le plan d'eau amont. La durée de l'essai varie de 4 à 6 jours. La détection visuelle et la détection par analyse de signal sont représentées respectivement sur les figures 5 et 6.

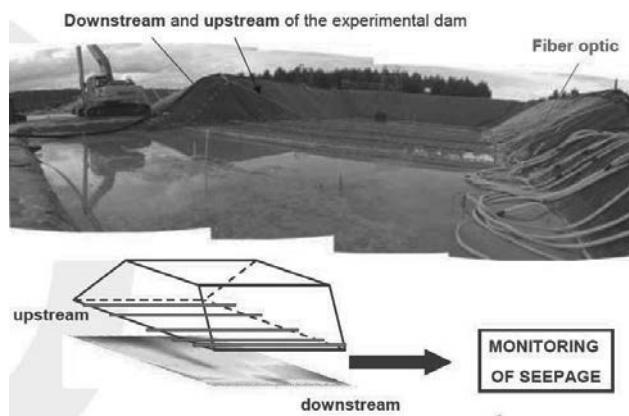


Figure 4 : Installation des fibres sous le remblai

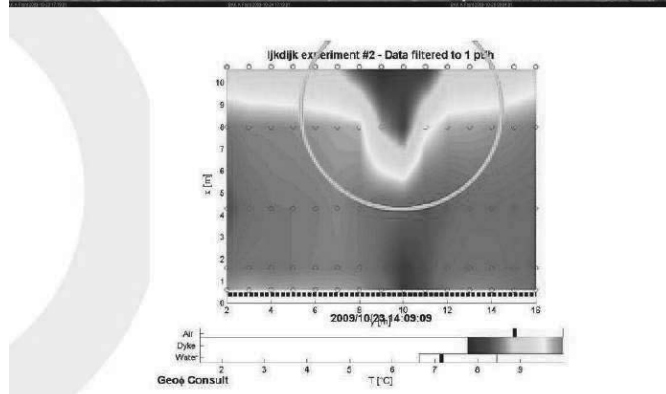


Figure 5 : Détection visuelle du renard 2 jours avant la rupture

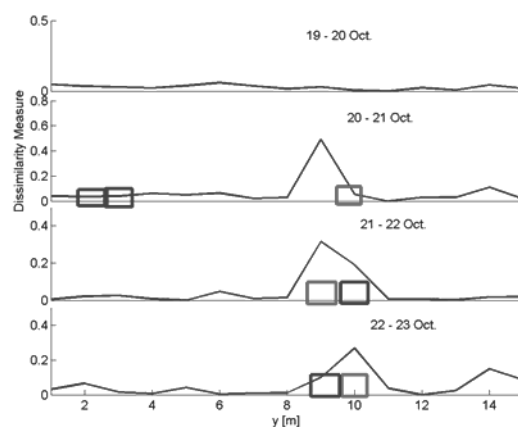


Figure 6 : détection du renard par analyse du signal

La Figure 5 montre que l'analyse visuelle détecte le renard en formation sans erreur deux jours avant la rupture dans le test N°2. La figure 6 illustre l'intérêt de l'analyse de signal sur le même test. Le réservoir est rempli le 19/10/2009 d'une charge d'eau de 1,9 m à 12h00. L'essai s'achève le 25/10/2009 à 10h00 par la rupture de la digue. Les données sont rapatriées à distance et analysées au pas journalier par géophysConsult du 19/10 à 9h18 au 25/10 à 9h10. La transformation des données de

température par analyse du signal détecte un clair précurseur de la rupture plusieurs jours avant l'analyse brute des données. Sur la Figure 6, l'absence d'anomalie au cours de la première journée d'essai (19-20/10) correspond bien à l'absence d'observation de fuite sur le terrain. Les jours suivants, des fuites sont observées et visualisées par un rectangle bleu, alors que l'entraînement et le dépôt de sable est représenté par un rectangle rouge. Le modèle d'analyse détecte bien une fuite croissante vers l'abscisse 9-10 m, là où la rupture va se produire 5 jours plus tard.

Pour chacun des quatre essais, le modèle d'analyse développé par EDF apparait plus performant que la visualisation des mesures brutes (tableau 1). Le temps de détection varie d'un test à l'autre, car les fibres n'ont pas pu être posées exactement aux endroits demandés par EDF. Cela montre l'importance de la localisation des fibres dans la conception du système de détection.

Tableau 1. Durée entre la détection et la rupture

Test	Durée (jours)	Détection visuelle	Détection analyse du signal
1	4	3 heures	3 jours
2	6	48 heures	5 jours
3	5	31 heures	3 jours
4	5	21 heures	1 jour

3.3 Bilan des tests de validation de IJkdijk

Que ce soit pour la détection du glissement ou de l'érosion interne, le système de fibres optiques accompagné d'un robuste modèle d'interprétation apparait la méthode la plus performante (robustesse et justesse) parmi les technologies de détection testées par la trentaine de participants du projet international.

Conforté par ces résultats d'inter-comparaison des pratiques internationales, EDF programme et déploie cette maintenance préventive en 2010 sur une série de travaux visant à réhabiliter certains biefs hydro-électriques et à optimiser leur maintenance.

4 APPLICATIONS

EDF dispose en 2012 de quatre ouvrages instrumentés et suivis par fibre optique. Ainsi, le canal de Curbans, de 5 km de longueur, est instrumenté par 11 km de fibre optique et est aujourd'hui suivi périodiquement par des mesures de température actives et passives. Des mesures de déformation sont faites à une fréquence plus faible. La surveillance par fibre optique de la remise en eau de l'ouvrage à la fin des travaux de réhabilitation contribue à détecter rapidement les zones de fuites (résultats de surveillance toute les 4 heures) et à diminuer les pertes d'exploitation remboursant son coût d'installation. La surveillance actuelle de l'ouvrage en exploitation montre une bonne corrélation entre les résultats d'analyse des données de température par fibre optique et les débits de drainage sous l'étanchéité rénovée, captés tous les 300 mètres. Ils mettent en évidence une décroissance due au phénomène de colmatage. Les mesures de déformation identifient trois secteurs de déformations différentielles à suivre de près.

5 CONCLUSION

La maintenance préventive par un système de fibres optiques permet une mesure en continue et répartie dans l'espace d'anomalies thermiques ou mécaniques, une détection précoce

des risques de rupture, une optimisation des ressources en situation de crise et une économie sur les durées d'indisponibilités ou le coût des travaux de réhabilitation. Elle est adaptée aux ouvrages de grand linéaire ou à ceux qui posent des difficultés de conception ou sont très sensibles au niveau de la sûreté.

6 REMERCIEMENTS

Nous remercions les nombreux partenaires (de Deltares, EDF R&D, GTC, Hydroresearch, Irex, Irstea, Tencate, Université de Grenoble) qui ont accompagné EDF et ont contribué à la qualification de la technologie à base de fibres optiques pour la surveillance des ouvrages hydrauliques.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Fry, J.J. (2004) Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température le long d'une fibre optique. Sécurité des digues fluviales et de navigation, Actes de colloque du CFGB, Orléans, France.
- Johansson, S. (1997) Seepage monitoring in embankment dams. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- Beck Y.L., Khan A.A., Cunat P., Guidoux C., Artières O., Mars J. and Fry J.J. (2010) Thermal Monitoring of Embankment Dams by Fiber Optics, 8th ICOLD European Club Symposium DAM SAFETY, Innsbruck, Autriche
- Perzmaier, S., Aufleger, M., Dornstädter, J. (2007) Active and passive defences against internal erosion in assessment of the risk internal erosion of water retaining structures: dams, dykes and levees. Intermediate report of the European Working Group in Internal Erosion of ICOLD 2007, pp. 194-207
- Beck Y.L., Le Clerc T., Fry J.J., Fabre J.P. and Royet P. (2010b) Leakage detection in earth dams by heated fiber optics, CDA 2010 Annual Conference, Niagara Falls, Canada
- Beck Y-L., Hénault J-M., Guidoux C. et Courivaud J-R. (2010), Surveillance des fuites dans les digues en terre par mesure de température répartie par fibre optique, Journées AGAP Qualité, 4p., St Brieuc, France
- Dornstädter J. (2010) Detection of erosion flow path during 1:1 scale experiment using fibre optic Heat Pulse Method at IJkdijk, Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion, 12 avril 2010, Grenade, Espagne
- Koelwijn A. (2010) Performance of detection techniques at four full-scale seepage erosion tests, Annual Meeting of the European Working Group on Internal Erosion, 12 avril 2010, Grenade, Espagne
- Beck Y-L., Courivaud J-R., Créneau S., Delorme F. et Fry J-J., Réhabilitation de revêtement bitumineux et maintenance préventive innovante utilisant des fibres optiques : principes et application au canal de Curbans, 24ème Congrès des Grands Barrages, CIGB, Kyoto, Japon, 19p.
- Hénault J-M., Moreau G., Blairon S., Salin J., Courivaud J-R., Taillade F., Merliot E., Dubois J-P., Bertand J., Buschaert S., Mayer S. and Delphine-Lesoille S. (2010) Truly distributed optical fiber sensors for structural health monitoring: from the telecommunication optical fiber drawing tower to water leakage detection in dikes and concrete structure strain monitoring. Advances in Civil Engineering.
- Artières O., Beck Y-L., Khan A.A., Cunat P., Fry J-J., Courivaud J-R., Guidoux C. and Pinettes P. (2010), Assessment of dams and dikes behavior with a fibre optics based monitoring solution, 2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation, 8p., Zaragoza, Spain Cao K., Wang Y., Xu Y. and Liu S. 2008. Concrete Face Rockfill Dam, *China Water Power Press*