

Premier apport du traitement du signal pour la détection de fuite dans des digues en terre

Guy D'URSO, Alexandre GIRARD, Jean-Marie HENAULT, Mattieu RIGAUT

¹ EDF R&D Département STEP Groupe Systèmes Dynamiques et Traitement de L'Information,
6 quai Watier 78401 CHATOU Cedex
guy.durso, alexandre.girard, jean-marie.henault@edf.fr

Résumé – Cet article propose les principes d'un premier algorithme de détection des fuites éventuelles dans des digues en terre. L'une des innovations techniques de ce mode de surveillance tient à l'utilisation d'une fibre optique comme capteur de mesures thermométriques localisé. Cette fibre permet de suivre temporellement le profil de température le long de la digue (résolution métrique). Dès lors, considérant qu'une fuite se traduit par une non-stationnarité locale spatiale et temporelle dans ce profil, un algorithme en trois étapes fondé sur la restitution de cette non-stationnarité a été élaboré : premièrement, élimination du profil « géologique » stationnaire par Analyse en Composantes Principales, puis suppression d'une source de bruit (principalement des variations climatiques) par Analyse en Composantes Indépendantes du résidu de l'ACP et finalement léger filtrage morphologique pour mieux visualiser les fuites. Ces premiers résultats sont encourageants mais il reste beaucoup de fausses alarmes et une thèse a été engagée avec le laboratoire LIS de l'INP de Grenoble pour atteindre une méthode optimale de traitement.

Abstract – This article sets the principles of a first possible seepages detection algorithm in earth dams. One of the technical innovations of this supervision mode lies in the use of fiber optics as local thermometric sensor. This fiber gives the possibility to follow temporally the temperature profile along the dam (with metrical resolution). So, considering that a seepage leads to a local spatial and temporal non-stationarity in this profile, an algorithm in three steps based on the restitution of this non-stationarity has been developed : first, elimination of the "geological" stationary profile with Principal Component Analysis, then deletion of a noise source (mainly due to climatic variations) using Independent Component Analysis of the PCA residue and finally light morphological filtering in order to better visualize the seepages. These first results are encouraging but it remains a lot of false alarms and a thesis has been started with LIS laboratory form INP Grenoble to achieve an optimal processing method.

1. Surveillance des digues

Les changements climatiques liés au réchauffement de la planète renforcent la question de la maîtrise du vieillissement de nombreuses infrastructures. Face à des crues violentes de plus en plus fréquentes, des ouvrages tels que les digues en terre peuvent en effet subir des dégâts. D'où la volonté de renforcer toujours plus la maîtrise de la sûreté de ces ouvrages et mettre ainsi au point un système « avertisseur » de détection de fuites. Les principales attentes de ce système sont les suivantes :

- Eviter des dommages aux personnes
- **Détecter et localiser** d'éventuelles fuites et en estimer le débit
- **Suivre l'évolution des fuites** et stabiliser leur débit (protection contre l'érosion interne)
- Déclencher les actions de confortement de la digue
- *Suivre la déformation du pied de digue*
- *Détecter les terriers d'animaux en partie aval*

Des mesures de température ont tout d'abord été réalisées localement le long d'une digue grâce à une fibre optique. L'objectif est d'évaluer le potentiel des techniques du traitement du signal pour la détection de fuite « naissante » indépendamment des conditions de mesure. Cette étude de faisabilité ayant donné des résultats très prometteurs, EDF vient de lancer, en collaboration avec le LIS de Grenoble, une thèse sur ce sujet.

La surveillance des fuites dans les digues en terre par thermométrie est expliquée par *Sensornet*, un des industriels fournissant le dispositif, sur son site Internet dans [1] et par un des experts du domaine, Sam Johannson, dans [2].

Une présentation complète de l'analyse en composantes indépendantes (ACI), principal outil mathématique utilisé ici, est effectuée dans [3] qui montre en particulier son utilité dans le cas du traitement des ondes sismiques, dont l'approche temps-espace est reprise dans le présent article.

2. La mesure thermométrique par fibre optique

Le site retenu pour l'étude est la digue du canal d'Oraison. Un câble contenant 4 fibres optiques a été enterré au pied aval du canal à environ 1 m de profondeur. Les fibres soudées deux à deux permettent d'effectuer des mesures en boucle le long des 2213 m de câble enfoui.

Les illustrations (FIG. 1 et 2) présentent l'installation.

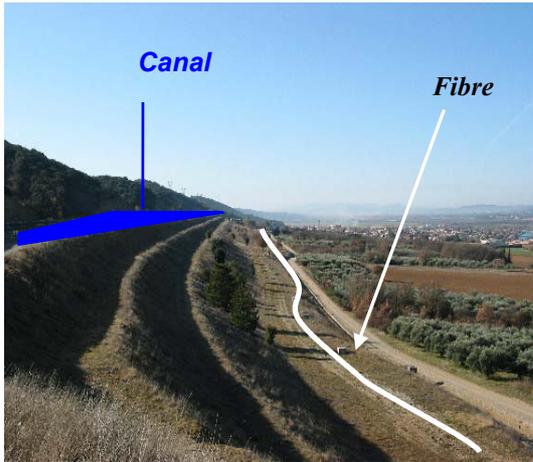


FIG. 1 : . Installation d'une fibre optique sur le canal d'Oraison (photo)

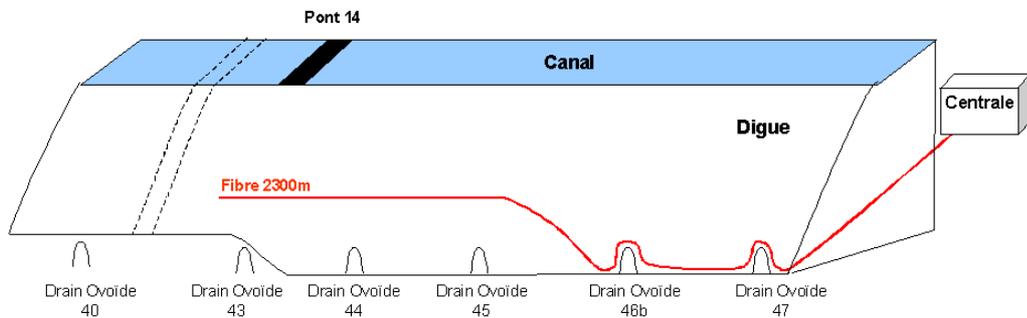


FIG. 2 : . Installation d'une fibre optique sur le canal d'Oraison (coupe)

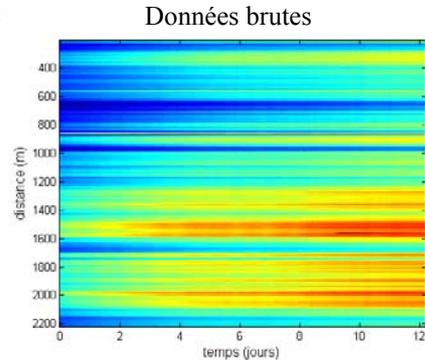
Les drains ovoïdes repérés sur le schéma sont creusés perpendiculairement à la fibre et comme leur nom l'indique, servent à drainer l'eau vers le contre-canal en cas d'infiltration dans l'édifice.

La fibre est reliée au laser et à un appareil de mesure placé dans la centrale hydraulique voisine. Cet appareil, le **DTS (Distributed Temperature Sensing)**, est fondé sur l'effet Raman : la température est fonction du spectre de l'onde lumineuse réfléchi. L'utilisation des fibres optiques comme « capteurs de température » présente de nombreux avantages :

- Technologie peu coûteuse (3 à 5 €/m),
- Bonne précision des mesures de température,

- Bonne résolution spatiale,
- Longueur du câble pouvant atteindre 4 à 10 km.

Il est ainsi possible d'observer non seulement la distribution de température le long de la fibre mais aussi l'évolution de cette distribution au cours du temps en considérant plusieurs acquisitions.



L'apparition d'un écoulement préférentiel (fuite) doit se traduire par une « anomalie » thermique, détectable par la fibre optique. En l'absence de fuite, la température mesurée est principalement la résultante d'un phénomène thermodynamique, la **conduction** : les transferts de chaleur ont pour cause l'interaction entre la température de l'air et celle de l'eau présente naturellement dans le sol (niveau de la nappe phréatique avec ou sans précipitations et/ou phénomène de capillarité qui se traduirait par une remontée d'eau de la nappe vers la fibre).

En présence d'une fuite, l'écoulement d'eau apporte une quantité de chaleur supplémentaire : c'est l'**advection**. Il est donc possible de détecter un écoulement par thermométrie lorsque l'advection l'emporte sur la conduction. La détection d'une fuite dépendra donc non seulement de son débit mais également des variations entre la température du sol ($\approx T^{\text{air}}$) et celle de la fuite ($\approx T^{\text{eau}}$).

3. Algorithme de détection de fuites

L'étude de la distribution de la température le long de la fibre a révélé un « profil géologique » stationnaire en forme tandis que la fuite « naissante » peut être considérée comme une non-stationnarité spatiale et temporelle. Le

principe de l'algorithme, qui doit si possible être indépendant des conditions de mesure, est illustré par la figure ci-dessous. Il consiste à modéliser le profil géologique stationnaire tel qu'il serait sans la fuite. La soustraction du modèle génère un résidu qui est ensuite traité par filtrage morphologique pour, d'une part, éliminer des variations parasites (rejets des fausses alarmes) et, d'autre part, faire ressortir des fuites non visibles du fait de leur faible taille dans l'image.

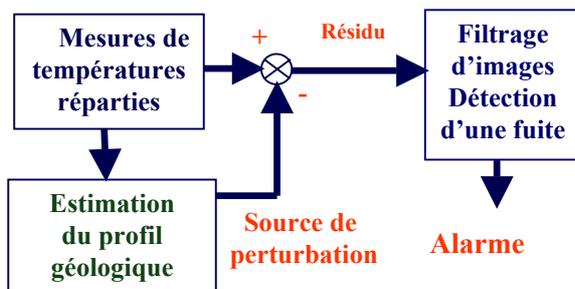


FIG. 3 : Principe de l'algorithme de détection en deux temps

3.1 Estimation du profil stationnaire de température par Analyse en Composantes Principales

Les enregistrements de la température le long de la fibre forment une matrice T dont les lignes correspondent aux points de relevé et les colonnes aux pas de temps. La moyenne spatiale des températures est ensuite soustraite aux colonnes de T pour former une matrice DT . Une analyse en composantes principales va alors être effectuée sur des fenêtres temporelles glissantes avec recouvrement de DT , afin que le comportement de la température reste stationnaire. L'analyse en composantes principales sur une fenêtre de DT , DT^{fen} , correspond mathématiquement à une décomposition en valeurs singulières $DT^{fen} = USV^t$, avec S diagonale et U et V orthogonales.

La décroissance des valeurs propres λ_i extraites de la matrice de covariance des observations DT (cf. FIG. 4) montre qu'il existe essentiellement une seule composante principale.

La première composante principale DT^{fen}_1 est alors formée par le produit de la première colonne de U , $U_{.,1}$, par le produit de S_{11} avec la transposée de la première colonne de V , $V_{.,1}^t$, $DT^{fen}_1 = U_{.,1}S_{11}V_{.,1}^t$. Les colonnes de DT^{fen}_1 sont donc proportionnelles. Cette première composante contient la plus grande proportion d'informations communes aux colonnes. Avec elle, il est possible d'observer les phénomènes qui se répètent d'un pas de temps à l'autre, l'impact des ovoïdes par exemple, ainsi que ceux qui entraînent une annulation de la différence de température le long de la fibre comme les précipitations. Il est à noter que la fuite n'est pas visible sur cette première composante.

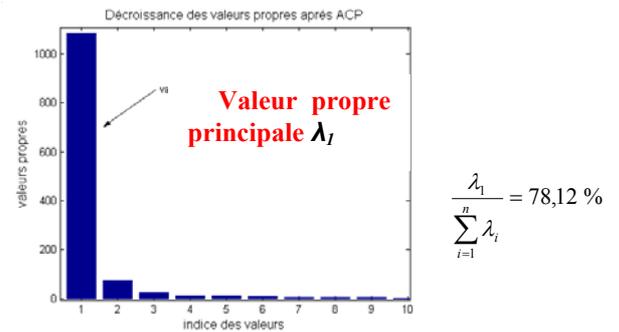


FIG. 4 : Décroissance des valeurs propres de la matrice de covariance de DT



FIG. 5 : Profil géologique estimé : première composante de l'ACP

Le résidu entre les mesures brutes et la projection de cette première composante permet de faire ressortir les fuites mais également de fortes variations. Il a alors été recherché si une source de bruit perturbatrice pouvait expliquer ces variations.

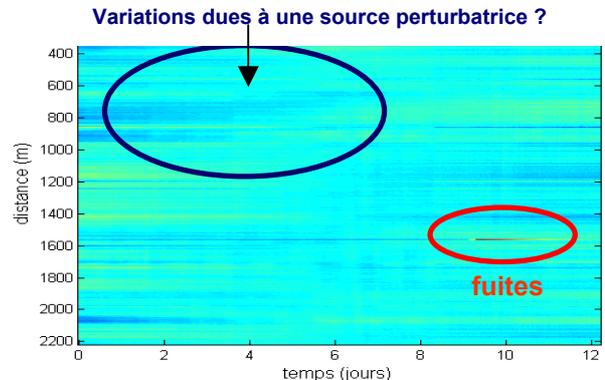


FIG. 6 : Résidu après élimination de la première composante principale

3.2 Élimination d'une source de bruit par Analyse en Composantes Indépendantes

Le résultat d'une Analyse en Composantes Principales est, d'un point de vue général, de fournir une base orthonormée formée par les k premiers vecteurs de U , k dépendant des valeurs de la diagonale de S . Cette base orthonormée contient l'information identifiable dans la matrice initiale, les autres vecteurs ne représentant plus que du bruit.

L'étape suivante consiste, à partir de cette base orthonormée, à trouver un certain nombre de composantes

statistiquement indépendantes dans l'objectif de récupérer des signaux plus proches de la réalité.

Ici, l'Analyse en Composantes Indépendantes va être réalisée sur la différence entre la matrice DT^{fen} et sa première composante principale DT^{fen}_1 . Divers algorithmes sont applicables. Nous avons retenu l'algorithme Jade présenté dans [4]. Après plusieurs essais et analyses des résultats, le nombre de sources retenu est de deux.

La première composante indépendante (cf. FIG. 7 a) contient d'une part de fortes évolutions au niveau des ovoïdes et d'autre part des fluctuations sur tout le profil. Elle peut donc être interprétée comme une source perturbatrice relative aux conditions extérieures tandis que la seconde contient les écarts au comportement moyen les plus nets, comme les fuites (cf. FIG. 7 b).

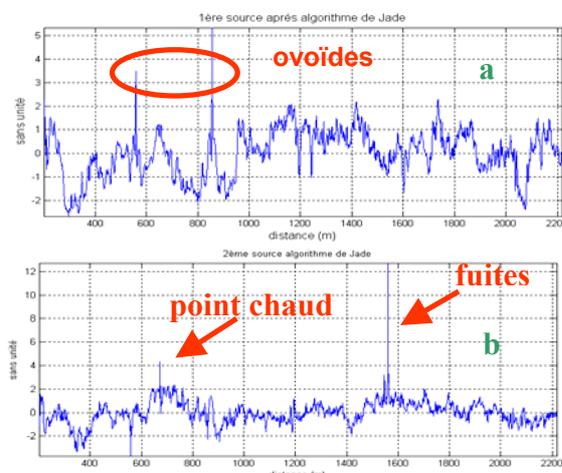


FIG. 7 : Deux sources estimées par une ACI

Après soustraction de la source perturbatrice estimée au résidu obtenu après ACP, nous obtenons le résidu final qui permet de visualiser les fuites (cf. FIG. 8). Toutefois, cette image laisse encore apparaître un bruit possédant des cohérences temporelle et spatiale qui sont certainement relatives aux conditions extérieures.

Le résidu final ne permet pas de voir directement les fuites sur des images de cette taille. C'est pourquoi un filtrage morphologique est réalisé (dilatation) pour permettre une meilleure localisation des fuites (cf. FIG. 9).

Ce résultat permet de visualiser correctement les fuites « naissantes » mais soulève deux problèmes encore non résolus : d'une part comment éliminer les fausses alarmes relatives à des conditions extérieures (par exemple les deux trait horizontaux relatifs aux ovoïdes) ou les cohérences verticales relatives certainement à des précipitations et d'autre part que faire si la fuite est déjà présente avant la mise en place de l'instrumentation.

Références

- [1] *Distributed sensing of seepage and movements using optical fibres - Results from some embankment dams in Sweden :*

<http://www.sensor.net.co.uk/industries/dams/DamMonitoringArticle.cfm>

- [2] Watley D., Johansson S., *Optical allusions*, International Water Power and Dam Construction, 2004
- [3] Mars J., Mari J-L., Glangeaud F., Lacoume J-L., *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens, Tome 3 : Techniques Avancées*, Ed. Technip, 2004
- [4] Cardoso J-F., Souloumiac A., *Blind Beafoming for non gaussian signals*, IEEE Proceeding-F, déc. 1993

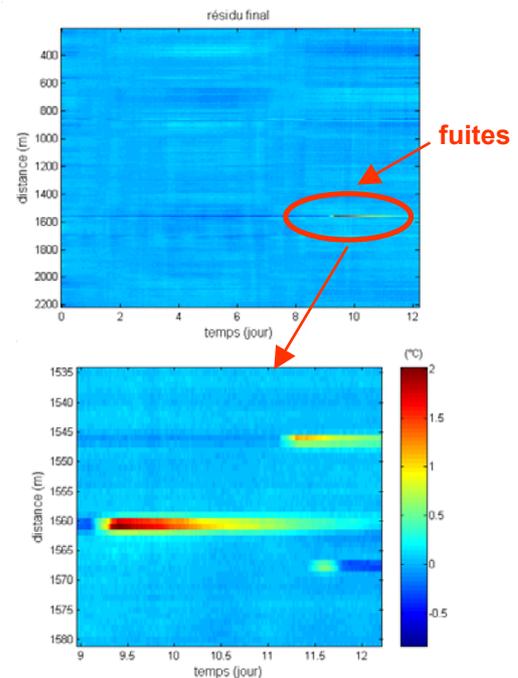


FIG. 8 : Image du résidu final après ACP puis ACI

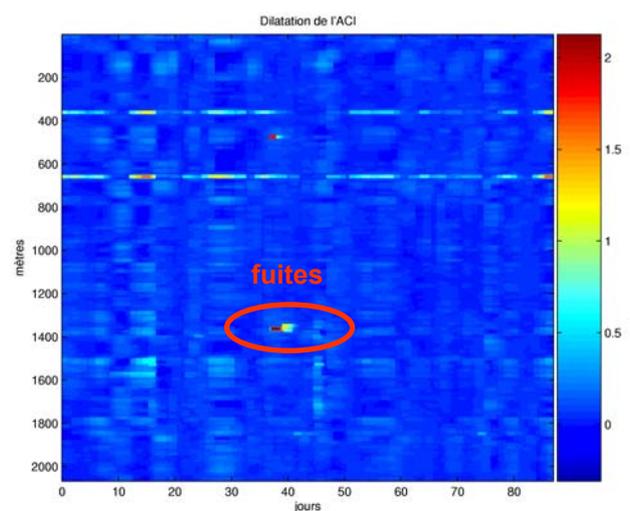


FIG. 9 : Résultat de l'opérateur de dilatation sur l'image du résidu final