

Approches comparées de la thermométrie et des mesures de résistivité pour caractériser les écoulements d'une digue

*Comparative approach of ground temperature measurements and resistivity
measurements to evaluate flow within an embankment dike*

Aurélie Garandet, Laurence Duchesne

Compagnie Nationale du Rhône, 2, rue André Bonin, 69004 Lyon
a.garandet@cnr.tm.fr, l.duchesne@cnr.tm.fr,

Jürgen Dornstädter, Barbara Heinemann

GTC Kappelmeyer GmbH, Heinrich-Wittmann-Straße 7a, D-76131 Karlsruhe, Germany
dornstaedter@gtc-info.de

Pierre Frappin

Soldata Geophysic, RD 1085 – N°3209 – BP13, 38300 Nivolas Vermelle
Pierre.frappin@soldata-geophysic.com

MOTS CLÉS

Erosion interne, vitesses de filtration, traçage géophysique, mesure de température in-situ, mesure de potentiel électrique, complémentarité des méthodes, diagnostic, auscultation.

RÉSUMÉ

Le phénomène d'érosion interne est la pathologie identifiée comme l'une des plus récurrentes dans la problématique de vieillissement des digues. Les moyens d'auscultation courant qui permettent d'alerter sur cette pathologie restent impuissants pour statuer sur l'ampleur et l'état d'avancement du phénomène.

Les dispositifs d'instrumentation développés en partenariat avec les deux entreprises GTC Kappelmeyer et SDG, qui permettent la mesure de la vitesse des écoulements en place, ont un double objectif : localiser les origines du phénomène, définir et suivre son évolution dans le temps. L'analyse porte sur la comparaison et la complémentarité des deux approches différentes, l'une basée sur les échanges thermiques entre l'eau et le sol, et l'autre sur la modification du potentiel par les écoulements souterrains.

La conclusion des analyses de ces deux méthodes met en avant l'importance du recoupement et la nécessité de bien adapter les systèmes d'auscultation à la pathologie, spécifiquement dans l'identification d'un phénomène complexe, comme l'érosion interne.

ABSTRACT

The phenomenon of internal erosion has been identified as one of the most recurrent pathologies in the more global problem of dike aging. The sounding methods currently used have permitted raising the alarm regarding this pathology, but they are incapable of assessing its magnitude and progression.

The objective of the instrumentation systems developed in partnership with two companies, namely GTC Kappelmeyer and SDG, which measure the velocity of flows in situ, is twofold: to localise the origins of the phenomenon, and define its evolution through time. The analysis focuses on the comparison and synergy between two different approaches, one based on thermal exchanges between water and the ground, and the other on the modification of potential by underground flows.

The conclusion of the analyses of these two methods highlights the importance of crosschecking and the need to efficiently adapt sounding systems to the pathology, specifically to identify a complex phenomenon such as internal erosion.

1. INTRODUCTION

C'est récemment et grâce aux différents groupes de travail nationaux (ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques - ERINOH) et internationaux (Internal Erosion Working Group - IEWG) que l'on connaît mieux le phénomène d'érosion interne. Parmi les diverses avancées, on sait que ce phénomène ne peut s'initier sans la concomitance de matériaux sensibles et des conditions d'écoulement « critiques ». La géotechnique et ses différents essais de sols (sondages carottés avec analyses granulométriques, sédimentométrie, hole erosion test, etc), ainsi que la connaissance de la mise en œuvre de l'ouvrage (couches de remblais mises en œuvre par compactage ou par déversement, mode de préparation du sol de fondation support, nature des matériaux apportés, etc.) contribuent à qualifier convenablement les conditions de sols.

Aujourd'hui, sur certaines zones d'incidents détectées par la surveillance et l'auscultation en place, il est nécessaire de compléter la connaissance de l'ouvrage, en particulier sur la caractérisation des écoulements internes, pour statuer sur la dynamique du phénomène

Nous nous proposons ici de décrire deux méthodes, applicables in situ, qui permettent de connaître l'hydrodynamique de l'écoulement dans une digue sous différents aspects : localisation des zones les plus perméables, localisation des vitesses importantes et évaluation de celles-ci, détermination de l'origine des écoulements (nappe de plaine, retenue...).

La première méthode présentée est une méthode basée sur la mesure de température du sol. L'eau, à une certaine température, s'infiltrant à travers le sol, fonctionne comme un traceur. La mesure de température dans le cœur de la digue (sondages thermométriques) peut s'appliquer pour la détection de zones de fuites. Il existe deux techniques : celle permettant de réaliser les campagnes avec le contraste des saisons (été et hiver), celle, indépendante du climat, assurant une chauffe du capteur (Heat Pulse Methode). L'analyse des températures permet d'identifier les zones de percolations préférentielles et l'analyse des variations des températures dans le temps permet d'évaluer le facteur prépondérant du risque d'érosion interne : la vitesse de filtration.

La deuxième méthode est une méthode géophysique basée sur la mesure du potentiel électrique. Les mesures de la variation du potentiel électrique au sein de la digue sont liées au fait qu'en présence d'une résurgence liée à une fuite, les équipotentielles ont tendance à se déformer autour de la zone empruntée par l'eau à travers l'ouvrage. La mise à la masse permet d'appréhender la géométrie et les dimensions des écoulements. L'injection d'un traceur type saumure et le suivi du potentiel électrique permettent quand à eux d'identifier les vitesses de l'écoulement.

L'article précise comment ces deux méthodes peuvent s'employer autant dans la compréhension que dans la surveillance d'un secteur de digue soumis au processus d'érosion interne. Il est abordé des exemples concrets sur lesquels les deux dispositifs ont été testés en précisant leur domaine d'application, les avantages et inconvénients, les aptitudes au suivi d'une zone d'érosion interne et l'apport pour la conception d'un projet de confortement de l'ouvrage. Cette analyse est faite pour le cas des digues en charge permanente. La complémentarité de ces deux technologies est mise en évidence.

2. L'IMPORTANCE DE LA CARACTERISATION DES ECOULEMENTS DANS UNE DIGUE

2.1 L'érosion interne et ses typologies

L'érosion interne est une des causes principales de rupture des ouvrages en terre dans le monde (50% des cas de rupture, selon ICOLD [5]). Elle est définie comme une migration de particules sous l'effet d'un écoulement hydraulique souterrain dans un sol. Cette migration engendre une modification des caractéristiques hydrauliques et mécaniques du matériau constituant l'ouvrage, et notamment sa perméabilité. Cette modification progressive de la structure peut être à l'origine de la rupture de l'ouvrage. Les mécanismes responsables de ces désordres sont complexes car ils mobilisent de nombreux phénomènes interdépendants dont l'étude est pluridisciplinaire car placée à la frontière hydraulique-géotechnique.

Le processus d'érosion interne peut être divisé en quatre phases [5] qui sont :

- l'initiation de l'érosion (*initiation*) ;
- le prolongement de l'érosion (*continuation*) ;
- l'évolution, menant au renard hydraulique (*progression*) ;
- et la formation d'une brèche (*breach*).

On distingue quatre types d'initiation: érosion de contact (*contact erosion*), érosion de conduit (*piping*), suffusion (*suffusion*), érosion régressive (*backward erosion*).

Ces différents processus s'initient dans des contextes géotechniques et sous contrainte hydraulique particuliers. Les résultats des six dernières années de recherche, portés par les groupes de travail cités précédemment, ont montré que la vitesse d'écoulement dans la digue était un paramètre prépondérant de ce processus, notamment pour l'érosion de contact.

2.2 Conclusions et récapitulatifs des paramètres à mesurer

Afin d'identifier au mieux les dispositions de surveillance, d'auscultation et les schémas de maintenance, il convient également de connaître l'ensemble de la dynamique du phénomène en place.

In fine, pour permettre l'analyse comportementale de l'ouvrage, il y a lieu de définir l'écoulement par les trois paramètres suivants :

- localisation/délimitation des zones les plus perméables ;
- évaluation des vitesses ;
- détermination de l'origine de l'écoulement, direction et sens de ce dernier.

Ils contribuent à :

- délimiter le secteur où les vitesses sont préjudiciables, (en plan et en hauteur) ;
- d'identifier si l'écoulement provient de la nappe d'accompagnement du fleuve, et/ou du fleuve lui-même en charge contre la digue ;
- d'identifier les cheminements de l'écoulement. Il convient de noter que les écoulements au travers de la digue ne sont pas toujours transversaux à la digue, mais peuvent être également ascendants, longitudinaux, voire inverses au sens d'écoulement du fleuve.

Au regard de l'identification de ces critères, il est alors possible d'envisager une solution de confortement adaptée au problème rencontré, et qui, dans la majorité des cas consiste à réaliser une coupure des venues d'eau.

3. DESCRIPTION DES METHODES

3.1 Description et caractéristiques de deux méthodes de relevé de température du sol

3.1.1 Sondages thermométriques

Cette technique permet la mesure des températures dans les digues en terre jusqu'à des profondeurs de 30-40 m environ. Des tubes métalliques sont implantés dans le sol le long d'un alignement afin de constituer un linéaire de sondages thermométriques. Des chaînes de capteurs de température sont introduites dans les tubes, les capteurs étant généralement espacés de 1 m. Les températures in-situ aux différentes profondeurs sont enregistrées après stabilisation à la température du sol. Celles-ci étant retranscrites immédiatement sur l'ordinateur, l'espacement des sondages peut aussitôt être adapté au droit des anomalies de température détectées. Les limites horizontales et verticales des zones de fuites sont ainsi localisées sur site comme présenté sur la figure 1.

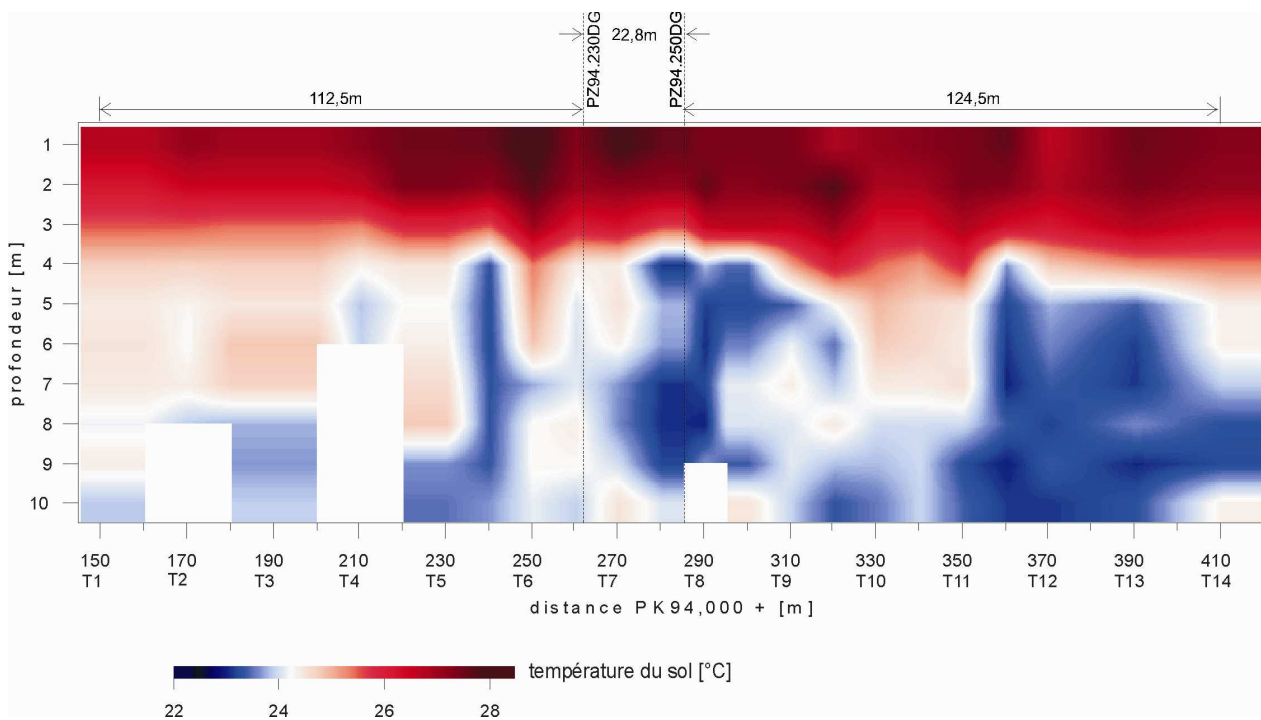


Figure 1: Distribution des températures mesurées entre PK 94.2 et PK 94.35 la zone représentant la température du Rhône (22,9 °C) est soumise à des percolations.

Les sondages thermométriques sont appropriés pour l'auscultation des digues existantes, et aussi pour le contrôle de qualité de diverses constructions et de travaux de réfection. A ce jour, ils ont été appliqués sur un ensemble de plus de 500 km de digue et sur différents autres ouvrages hydrauliques, ce qui signe une demande croissante en matière de détection fuites et démontre la fiabilité de la technique.

3.1.2 Balayage des températures le long des câbles de fibres optiques

La mesure des températures le long des fibres optiques est basée sur l'émission d'une impulsion Laser de courte durée (< 10 ns) dans la fibre. La lumière réfléchiée est analysée avec la spectroscopie Raman, de laquelle résulte une mesure de la température au point de réflexion. L'endroit du point de mesure est une distance le long de la fibre qui est calculée à partir de la vitesse de la lumière et de sa durée de propagation. Avec cette méthode, une mesure des températures distribuées le long de l'ensemble du câble de fibres optiques est possible.

Dans le cadre de travaux de réfection, les câbles de fibres optiques sont souvent posés directement à l'arrière des dispositifs d'étanchéité où les températures ne manifestent aucune différence évidente envers la température de l'eau de la retenue. Dans ces cas-là, les fibres optiques sont revalorisées par des conduits électriques afin de générer de la chaleur autour du câble. L'ensemble des fibres optiques et des conduits électriques compose un câble hybride. L'installation de ces câbles hybrides permet la mesure des températures pendant une période d'échauffement (heat-pulse-method, HPM). Comme la chaleur induite par un courant électrique est dissipée au droit des suintements la température obtenue le long des fibres augmente plus aux endroits non percolés qu'aux endroits percolés (Fig. 2). En appliquant la méthode HPM, la détection de fuites est indépendante de la température de l'eau et du sol.

Il faut aussi noter qu'une analyse plus élaborée de la méthode HPM fournit une estimation des vitesses apparentes de filtration.

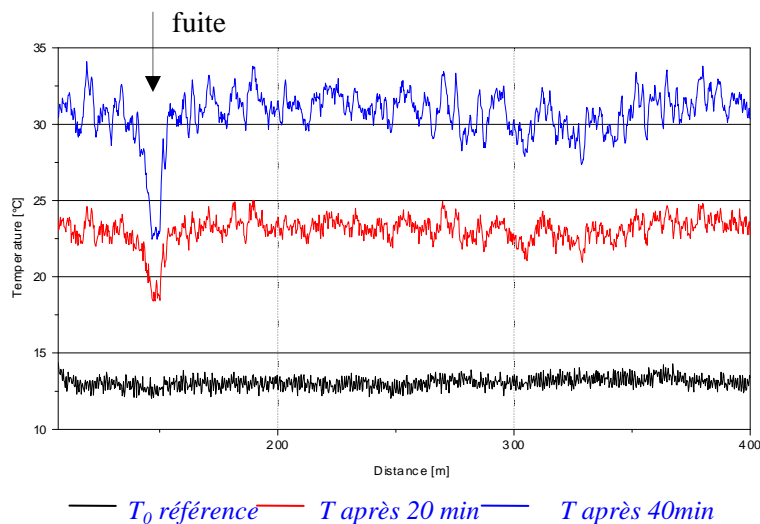


Figure 2: Températures mesurées le long d'un câble hybride à différents instants pendant la phase de chauffe : manifestation d'une zone de fuite distincte.

Depuis 1996 (première application du balayage des températures le long de fibres optiques [1]), plus de 150 km de câbles hybrides ont été installés dans le monde entier dans le cadre des travaux de construction et de réfection, tant pour la surveillance continue que pour l'inspection occasionnelle [2].

Cette technique est bien adaptée pour la surveillance des ouvrages neufs ou pour des ouvrages en cours de réfection pour lesquels les fibres optiques peuvent être installées assez facilement et dans n'importe quelle partie de l'ouvrage. Cela peut être bien plus délicat dans le cas d'un ouvrage existant pour lequel la mise en place peut nécessiter des moyens très conséquent de terrassement et de sécurisation de la tranchée ; c'est particulièrement le cas pour les digues en charge. Dans ce contexte, les tubes thermométriques détaillés dans le paragraphe précédent peuvent être utilisés pour permettre la mesure de température en profondeur.

3.1.3 Vitesses d'écoulement à partir des sondages thermométriques

Grace aux sondages thermométriques, les zones percolées sont décelables et leurs étendues peuvent être précisées selon le maillage utilisé. Des relevés répétés de température du sol permettent l'évaluation des vitesses apparentes de filtration au droit des sondages implantés au centre d'une zone percolée[4].

Le graphique 3 illustre les variations des températures du sol à différentes profondeurs dans une digue en fonction du temps. Elles sont perturbées par des infiltrations en profondeur. Aux profondeurs correspondantes à la zone percolée, les variations des températures du sol approchent les fluctuations des températures de la retenue amont, celles ci ayant des variations saisonnières, hebdomadaires et mêmes journalières. Ces variations réapparaissent plus ou moins atténuées selon la vitesse d'écoulement dans le corps de digue (voir mesures à 4 m, 6 m et 8 m de profondeur en graphique 3). Le déphasage (nommé dt [s]) d'une variation évidente identifiée dans le graphe des températures de l'eau et dans un graphe des températures du sol correspond à la durée que l'eau prend du point d'entrée (dans le corps de la digue) au point de mesure (capteur de température). En supposant une longueur L [m] pour le cheminement de l'eau, la vitesse apparente de filtration (estimation de 1^{er} ordre) au point de mesure considéré est estimée par :

$$V_{\text{eau}} = L / (dt). \quad (4)$$

L'évaluation des vitesses d'écoulement dans la zone percolée implique l'enregistrement d'une variation temporelle évidente. Il est préconisé de positionner le sondage thermométrique à l'endroit du maximum de l'anomalie décelée pour l'analyse et la détermination de la vitesse au droit de la zone érodée.

L'application de cette méthode définit avec une précision satisfaisante des vitesses de filtration comprises entre 10^{-2} m/s (variations journalières manifestant un déphasage < 20 min) et 10^{-6} m/s (variations saisonnières manifestant un déphasage de 2 à 3 mois).

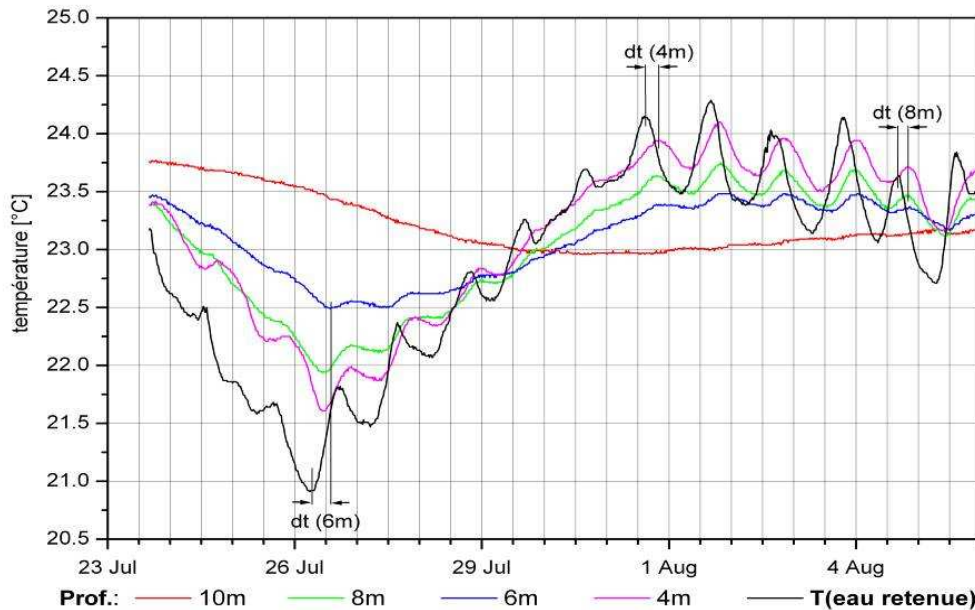


Figure 3: Tracés des températures dans le temps à différentes profondeurs manifestant des variations saisonnières et même journalières (un sondage au PK 94,2 RG du Rhône).

Le relevé continu des températures sur un linéaire de sondages thermométriques donne des vitesses d'écoulement fiables en deux dimensions sur une coupe du sous-sol le long de l'alignement des sondages, comme présenté en figure 8. En théorie, l'intégrale des vitesses obtenues le long de l'alignement des sondages donne une mesure du total des eaux suintantes sur le linéaire considéré. L'occurrence d'érosion ou de colmatage est validée par la mesure répétitive ou continue des vitesses apparentes de filtration.

3.3 Description et caractéristiques de la mesure de résistivité

Dans le cas général, la mesure de résistivité permet de qualifier les sols, selon leur nature et leur teneur en eau. En présence d'écoulements dans la digue certaines variations de résistivité peuvent s'avérer significatives. Mais dans ce dernier cas, la méthode de la mise à la masse s'avère plus performante est vient compléter efficacement la résistivité.

3.3.1 Principe de la mise à la masse

La méthode consiste à placer une électrode d'émission de courant dans un corps conducteur par l'intermédiaire d'une zone de fuite ou dans un piézomètre,. Le circuit est fermé par une électrode rejetée à l'infini. Si le contraste de résistivité avec le terrain environnant est suffisant, le corps conducteur (l'eau en l'occurrence) va jouer le rôle d'électrode d'émission lors de l'envoi de courant. Les équipotentielles vont alors se déformer et épouser grossièrement la zone dans laquelle l'eau transite à travers la digue.

Ce phénomène peut être renforcé dans une certaine mesure en injectant une saumure soit depuis l'amont dans le canal, soit depuis un piézomètre, ce qui va alors considérablement amplifier les axes de circulation dans la digue. On parle alors de traçage électrique ou traçage géophysique, qui s'accompagne généralement de contrôles complémentaires (conductivité, température) sur les différents points d'eau mesurables du site d'étude.

3.3.2 Principe des traçages électriques

Pour réaliser un traçage électrique, on envoie dans le sol de l'eau salée, généralement dans un forage, et on injecte périodiquement du courant électrique au même point. La masse d'eau salée se comporte comme un corps conducteur qui crée une anomalie de la répartition du potentiel électrique. En terrain homogène, le potentiel électrique V décroît proportionnellement à la distance mesurée à partir du point d'injection. Par contre, dans un bon conducteur, il résulte de la loi d'Ohm (voir ci-dessous) que V est quasiment constant. Si la source de courant est dans le corps conducteur, on a un effet de « mise à la masse » avec une anomalie positive du potentiel au-dessus des extensions du conducteur. Dans le cas d'une poche de saumure qui se

déplace et qui n'est plus reliée à la source de courant, la stabilité du potentiel dans la poche implique l'apparition d'une anomalie positive à l'opposé de la source et d'une anomalie négative vers la source de courant. Ces anomalies se propagent, en s'atténuant, jusqu'en surface. Lors d'un traçage, on enregistre périodiquement les valeurs de V en surface avec des électrodes réparties dans toute la zone étudiée. Les cartes obtenues sont utilisées pour suivre les déplacements dans le sol de la masse d'eau salée.

Le tableau 1 ci-dessous synthétise les bases théoriques :

INTERPRETATION DES VARIATIONS DU POTENTIEL

- $V = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot AM}$ **Pôle - Pôle:** $\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot AM \cdot \frac{V}{I}$
- **Si la densité de courant augmente sur la ligne de courant entre M et l'infini et si les résistivités n'y changent pas, le potentiel en M augmente.**
- **Effet de Mise à la Masse**

Tableau 1: Bases théoriques des variations du potentiel (extrait de « *Éléments pour l'interprétation des cartes de variations du potentiel électrique lors des variations de conductivités du sol, Soldata Geophysics, juin 2012* »).

L' analogie entre Potentiel Electrique et Potentiel Hydraulique :

La similitude entre la loi d'Ohm $J = \sigma \cdot dV/dl$

... et la loi de Darcy $Q/S = K \cdot dH/dl$

... conduit à une analogie entre la circulation du courant électrique et les écoulements en hydrogéologie. Le potentiel hydraulique H, ou la pression, correspond au potentiel électrique V. Ce sont deux fonctions harmoniques.

Le coefficient de perméabilité K correspond à la conductivité σ . Le débit Q correspond à l'intensité du courant I .

Résultats de la modélisation :

Les planches ci-après (Fig. 4) présentent les cartes des variations du potentiel électrique en surface pendant différents évènements d'un traçage au sel. Elles ont été obtenues avec le logiciel CYLMOD.

Pour chacun de ces évènements, on trouvera sur les figures la description en coupe verticale du modèle et une carte des anomalies calculées en surface. Sur les coupes, les structures où la conductivité augmente à cause du déplacement de la saumure sont en violet et celles où elle ne varie pas sont en blanc. Le terrain sans saumure est en marron.

Remplissage du forage avec la saumure :

La première planche de la figure 4 présente les variations du potentiel pour deux positions de la source de courant quand on remplit le forage de saumure qui prend la place de l'eau douce. On suppose que la résistivité passe de 30 à 0,1 ohm-mètre.

Quand la source de courant S est située vers le haut (cas $S=S1$), le forage devenu très conducteur réalise un « court-circuit » entre S et le terrain au fond où le potentiel était faible. Il va donc canaliser le courant vers le bas au détriment des autres directions et notamment du courant qui passait par la surface avant d'aller vers l'infini. En conséquence, le potentiel en surface va partout diminuer. On a le phénomène inverse quand S est située vers le bas du forage (cas $S=S3$). Lorsqu'on remplit de saumure un forage situé dans un terrain homogène, le potentiel augmente en surface autour du forage quand la source de courant S est située dans la partie inférieure du forage et l'amplitude de la réponse augmente quand S se rapproche du fond. Quand on remplit le forage de saumure, il devient un très bon conducteur qui est mis à la masse : le potentiel y devient presque constant. Les équipotentielles se déforment pour l'entourer.

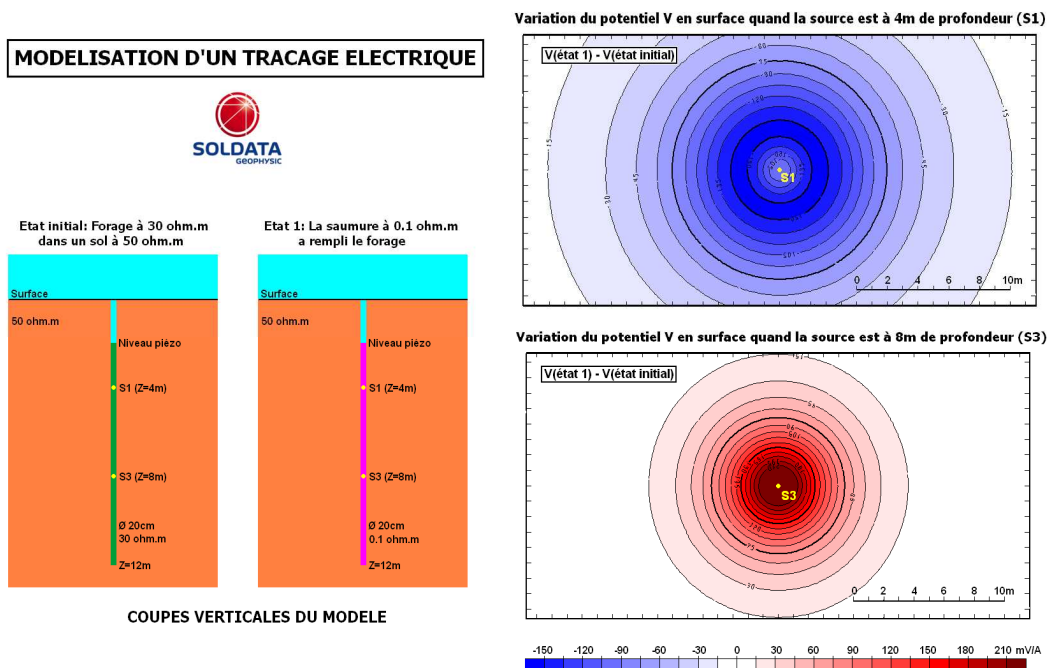


Figure 4: présentation des variations du potentiel pour deux positions de la source de courant à 4m et 8 m de profondeur.

Modélisation du cheminement horizontal d'une poche de saumure jusqu'à sa dispersion :

La figure 5 contient une sélection des cartes obtenues pour les événements successifs d'un même traçage simulé :

1. Injection de la saumure dans le forage et diffusion initiale pour créer une zone envahie. On suppose ici que la zone envahie est un cylindre ayant pour axe le forage. L'ensemble est porté à un potentiel élevé par effet de mise à la masse. Il en résulte une anomalie positive du potentiel électrique en surface.
2. La saumure commence à s'écouler dans le sol à partir du forage. Elle crée un corps conducteur dans lequel le potentiel varie peu en vertu de la loi d'Ohm. Cela produit une anomalie positive à l'avant de la saumure. Le volume occupé par le corps conducteur augmente, ce qui entraîne une baisse globale de son potentiel. D'où une anomalie négative au dessus du forage.
3. On continue à injecter de l'eau salée dans le forage et la saumure s'écoule dans le sol pour occuper un volume croissant. Les anomalies positive et négative du potentiel s'amplifient (Fig. 5)
4. Après l'arrêt de l'injection d'eau salée, la résistivité remonte dans la zone envahie autour du forage ainsi que dans la partie du sol où la saumure est passée mais qui n'est plus alimentée. La remontée de la résistance à l'évacuation du courant entraîne une remontée du potentiel autour du forage.
5. Lorsque la saumure s'éloigne et se disperse, l'effet de mise à la masse ne se fait plus guère sentir qu'autour du forage grâce au reliquat de sel qui y subsiste. L'augmentation de la résistivité et la réduction du volume concerné par la mise à la masse provoquent l'augmentation du potentiel autour du forage malgré la réduction des contrastes de résistivité avec le milieu environnant. Dans la zone occupée par la saumure, le potentiel baisse sensiblement à cause de la réduction de l'effet de mise à la masse. L'anomalie subsiste puisque le sol est rendu conducteur mais les anomalies sont fortement décalées vers des valeurs négatives.

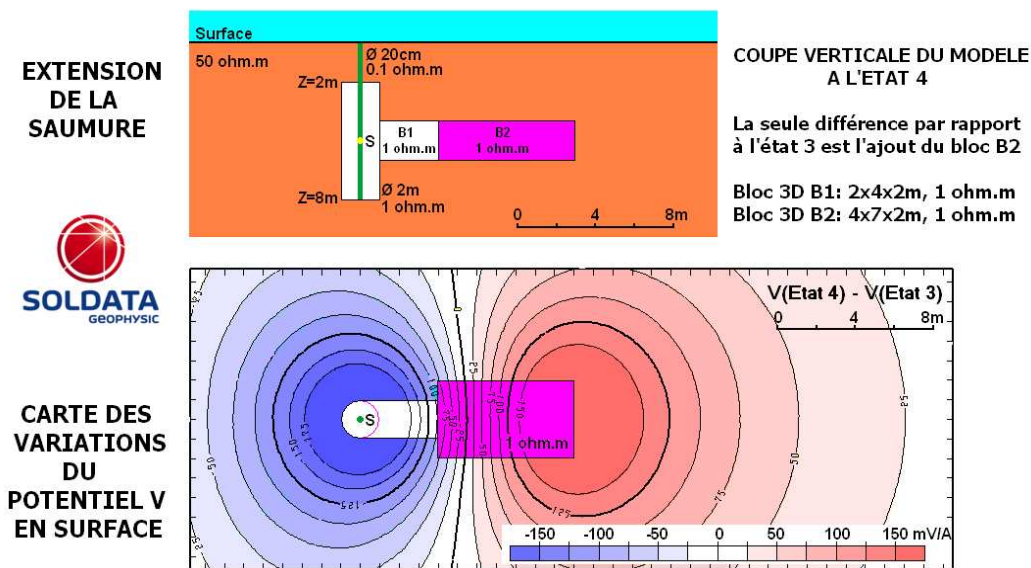


Figure 5: Variations du potentiel lors du déplacement d'une poche de saumure

Vitesse des écoulements : l'analyse des variations des potentiels dans le temps et l'espace, accompagnée de mesures sur les points d'eau existant le cas échéant, permet une approche des vitesses de transfert à travers l'ouvrage.

4. UN EXEMPLE D'APPLICATION

L'application de ces technologies est illustrée sur une digue du Rhône. Il s'agit de la digue de retenue située sur l'aménagement de Bourg-Lès-Valence vers le PK 94,2 en rive gauche, à l'aval de la ville de Tain l'Hermitage. Cette digue réalisée en 1967 a été construite en majeure partie en déblai par rapport au terrain naturel. Ainsi, c'est le terrain naturel de nature alluvionnaire (graves sablo-limoneuses) qui s'est retrouvé en charge après la mise en eau de l'aménagement de Bourg-lès-Valence.

Depuis 2001, la digue présente des signes visibles de suffusion, qui se manifestent par des venues d'eau en pied de digue déposant des limons et des sables fins (Fig. 6). Ces dépôts s'observent de façon disparate sur environ 2 km de digue. Deux secteurs, l'un de 250 m, l'autre de 150 m ont été équipés avec des tubes thermométriques de 10 à 15 m de profondeur et des mesures de température ont été effectuées sur 3 années consécutives). Ces mêmes secteurs ont été investigués par géophysique : mise à la masse sur les différentes fuites présentes en pied de digue avec mise en place de panneaux électriques à trois hauteurs différentes du talus de digue.



Figure 6 : Vue d'une des zones de digue présentant de la suffusion en pied de digue, PK 94.2 RG

Une partie des résultats de la campagne de thermométrie est présentée dans la figure 7. Celle ci synthétise deux campagnes effectuées à une année d'intervalle. Il s'agit d'une coupe longitudinale de la digue représentée sous forme de cellules d'un mètre de hauteur et de 10 à 15 mètres de longueur. La couleur dans chacune des cases représente l'indication de la vitesse (bleu, vitesse « faible » ; rouge, vitesse « élevée ») déduite par la méthode de déphasage expliquée plus haut et sur le graphique 3.

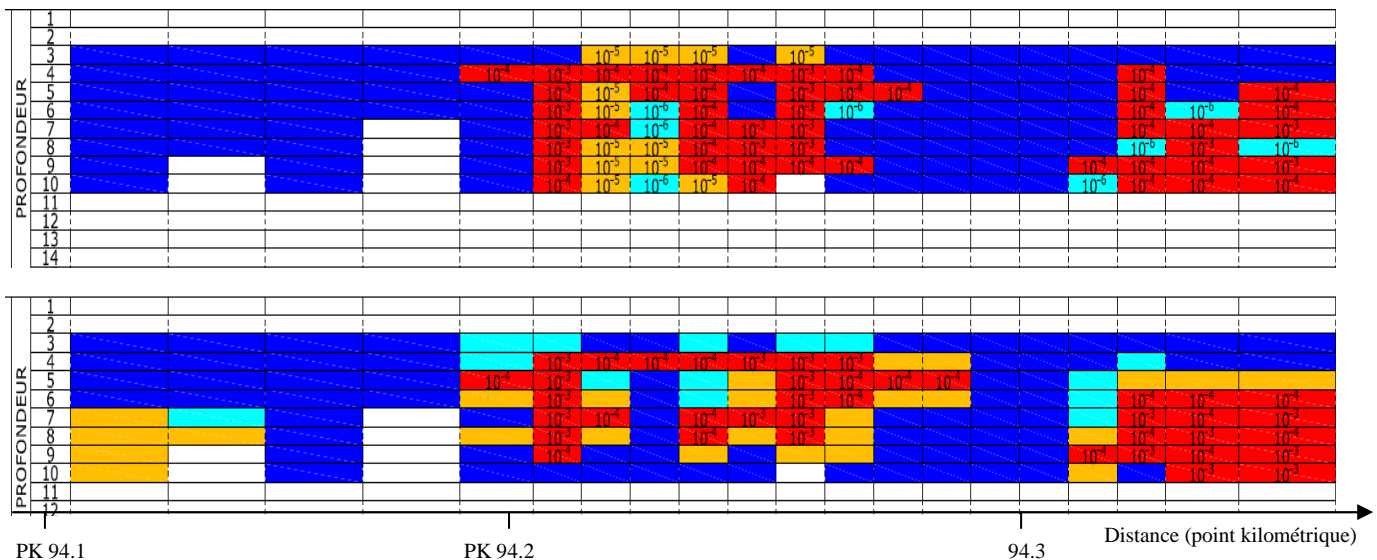


Figure 7 : Distribution des vitesses mesurées entre pk 94.2 et le Pk 94.35 (campagne thermométrique de 2009 sur le graphe en haut et campagne 2010 sur le graphe en bas).

Nous notons que des zones rouges (vitesse de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m/s) sont bien distinctes des zones bleues (vitesses $< 10^{-6}$ m/s). Il existe donc des secteurs de circulation préférentielle bien définis sur cette digue. Nous en avons repérés cinq sur l'ensemble des 400 m investigués par la thermométrie.

Par ailleurs, entre la campagne de 2009 et celle de 2010, bien que quelques variations de vitesse dans les cheminements préférentiels semblent se manifester à l'échelle de la cellule, il n'a pas été observé grande évolution dans la distribution des vitesses au global sur les 400 m de digue. La troisième campagne, en 2011, confirme ce constat.

Ces trois campagnes ont aussi montré que les zones d'écoulements « élevés » sont limitées entre 4 et 10 m de profondeur.

La campagne de géophysique menée en 2009 a permis d'apporter une 3^{ème} dimension à la mesure thermométrique réalisée en crête de digue. En effet, la mise en place de trois panneaux électriques à hauteur différentes sur le talus de digue et une mise à la masse depuis les fuites situées en pied de digue ont permis de « remonter » vers l'origine de l'écoulement tout en indiquant le chemin suivi. Ainsi, il a été vu que la fuite n°5 (Fig. 8) semble plutôt alimentée par des venues d'eaux longitudinales à la digue contrairement aux fuites n°1, 2, 3, 4. Sur celles-ci l'écoulement est transversal entre le canal et le contre canal.

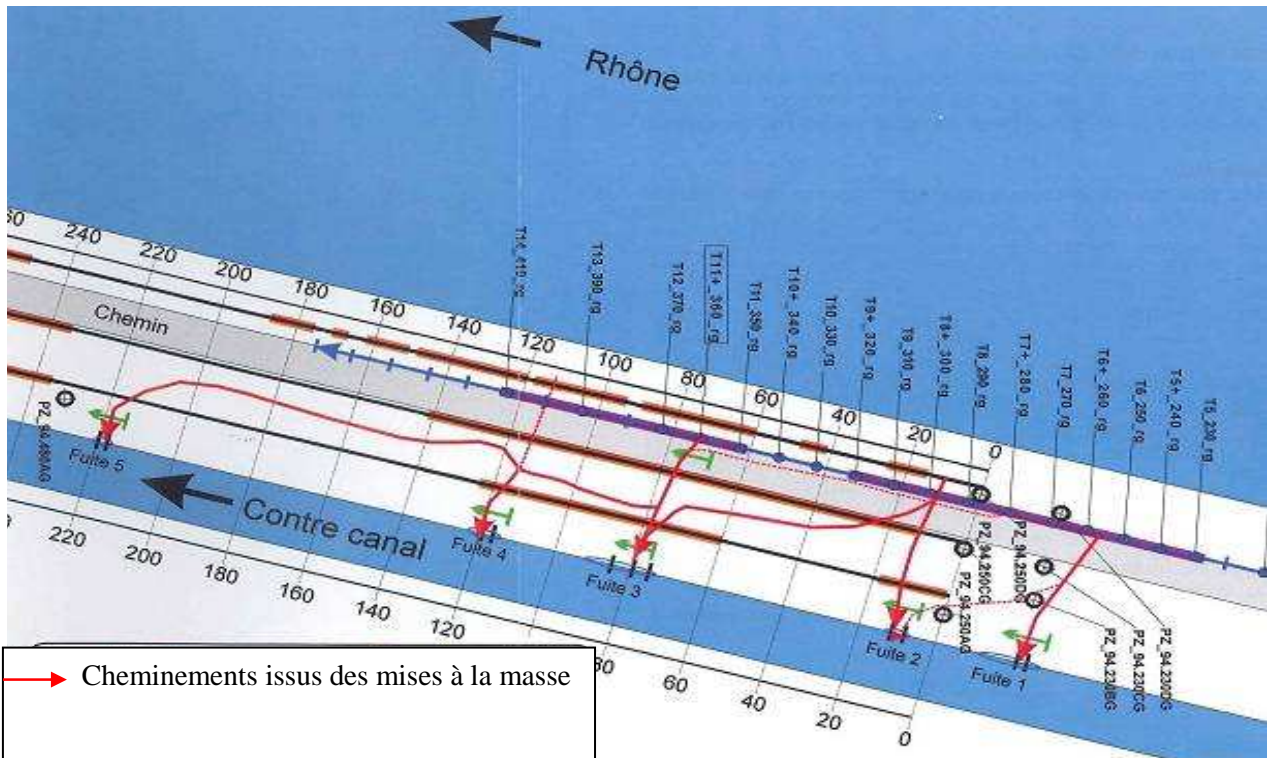


Figure 8 : résultats de la campagne géophysique de mise à la masse de 2009

Les investigations géophysiques de 2009 plus étendues ont permis de prédéterminer les zones d'équipements en tubes thermométriques pour les campagnes de 2010 et 2011. Ces dernières ont confirmé et ont permis d'affiner les écoulements « élevés » dans les zones de faibles résistivités observées en 2009.

En conclusion sur le processus d'érosion interne, sur cet exemple de tronçon de digue de l'aménagement de Bourg les Valence, il a été montré que les cinq zones soumises à un phénomène de suffusion évoluaient peu dans le temps, grâce aux trois campagnes thermométriques. Ce résultat se confirme par d'autres observations, comme par exemple la quantité de dépôts visibles en pied de digue.

Ces résultats communiqués dans le diagnostic de sureté de l'ouvrage, ont permis d'adapter les fréquences d'inspections, le type d'auscultation à mettre en œuvre vis-à-vis du phénomène observé. Les seuils d'évolution sont fixés pour permettre la décision d'engager les actions de maintenance.

5 AVANTAGES, INCONVENIENTS ET LIMITES D'APPLICATION DES METHODES

5.1 Mesures thermométriques

Le tableau 2 présente le niveau d'adéquation de la méthode, selon les objectifs recherchés qui peuvent être soit de diagnostiquer la digue, soit de mettre en place un dispositif de surveillance. Il est appliqué aux digues en charge.

	Paramètres recherchés (application aux digues en charge permanente)	Méthode thermométrique	
		Mesure par capteur de température ponctuel	Mesure par capteur de T° continue ou méthode HPM
Reconnaitances & diagnostic de la digue	Localisation des zones les plus perméables par rapport à l'ensemble de l'ouvrage	Bien adaptée - Permet d'avoir la mesure en 2 D (profondeur et linéaire de digue)	Adaptée
	Mesure des vitesses d'écoulement	Pas adaptée	Adaptée
	Détermination de l'origine des écoulements	Adaptée (plusieurs lignes de sondages parallèles)	Adaptée
Auscultation & surveillance de la digue	Erosion interne à développement lent (ou a un stade peu avancé)	Adaptée	Adaptée
	Erosion interne à développement rapide (ou a un stade avancée)	Pas adaptée	Bien adaptée

Tableau 2 : adéquation de la méthode de température – mesures ponctuelles et continues

Pour la mesure en continu, nous notons que les tubes thermométriques permettent de recouper la majeure partie du corps de digue et de sa fondation, ce qui est impossible avec la fibre optique pour le cas d'une digue existante. En effet, la mise en œuvre de la fibre requiert la réalisation d'une tranchée. Cette tranchée doit être limitée en profondeur afin de ne pas déstabiliser la digue.

Une des limites de la mesure de température par tubes thermométriques avec la chaîne de capteurs est le linéaire à investiguer. En effet, en sachant que la mise en place des tubes thermométriques se fait par vibrofonçage, il devient peu économique de vouloir équiper une digue en charge avec cette technique au-delà d'une dizaine de kilomètres. Notons cependant que la mesure de température reste économique lorsque les tubes ont été installés facilement au cours de la réalisation d'un confortement (de type paroi au coulis).

L'ordre de grandeur du coût de la méthode thermométrique par capteur avec mesure en continu (pour détermination de la vitesse d'écoulement) pour le linéaire d'investigation d'environ 400 m sur la digue de Bourg-les-Valence, est de 30 000 euros.

Mesures de résistivité (traçage et mise à la masse)

Le tableau 3 présente le niveau d'adéquation de la méthode, selon les objectifs recherchés qui peuvent être soit de diagnostiquer la digue, soit de mettre en place un dispositif de surveillance. Il est appliqué aux digues en charge.

	Paramètres recherchés (application aux digues en charge permanente)	Traçage géophysique (panneaux électriques et injection de saumure)	Mise à la masse
Reconnaitances & diagnostic de la digue	Localisation des zones les plus perméables/ l'ensemble de l'ouvrage	Mal adapté	Bien adapté si les fuites sont visibles et accessibles
	Mesure des vitesses d'écoulement	Bien adapté	Non adapté
	Détermination de l'origine des écoulements	Bien adapté	Moyennement adapté
Auscultation & surveillance de la digue	Erosion interne à développement lent (ou à un stade peu avancé)	Adapté	Non adapté
	Erosion interne à développement rapide (ou a un stade avancée)	Non adapté	Non adapté

Tableau 3 : adéquation de la méthode de résistivité

La mise à la masse est le moyen simple le plus adapté à la connaissance du cheminement d'un écoulement. La technique ne fonctionne qu'avec la présence d'une fuite sur le site. En l'absence de fuite, l'alternative est alors le traçage géophysique via un réseau de piézomètres implantés sur la digue.

Limites :

- Panneau électrique : la possibilité de repérer d'éventuelles zones de circulations dans une digue est liée à une certaine homogénéité de l'ouvrage dans sa constitution, des passées ou horizons plus argileux pouvant entraîner des confusions dans l'analyse.
- Mise à la masse : une des limites de la mise à la masse est l'impossibilité de déterminer la profondeur des écoulements. Dans le cas d'un traçage géophysique cette limite est très atténuée, à partir d'un piézomètre, à condition d'avoir la coupe géologique de l'ouvrage et du sous-sol. L'analyse des potentiels renseigne alors dans une certaine mesure sur la profondeur de circulation.

L'ordre de grandeur du cout de la campagne de mise à la masse sur la digue de Bourg-les Valence pour un linéaire d'investigation d'environ 500 m est de 15 000 euros.

6 COMPARAISON ET COMPLEMENTARITE DES METHODES

Les diverses investigations de thermométrie et de mesures de résistivité sur la digue de Bourg les Valence, ainsi que la pratique de ces mêmes méthodes dans d'autres contextes (surveillance sur paroi étanche, autres zones d'érosion interne, avec notamment érosion de contact) ont montré la pertinence de ces techniques dans la compréhension de l'écoulement. Chacune permet de couvrir un ou deux des trois objectifs recherchés, qui sont:

- localisation/délimitation des zones les plus perméables : on choisira la mise à la masse ou la thermométrie ;
- évaluation des vitesses : on choisira la thermométrie méthode continue (ou HMP) ou le traçage à la saumure ;
- détermination de l'origine de l'écoulement, direction et sens de ce dernier : on choisira le traçage à la saumure ou la mise à la masse.

La complémentarité de ces méthodes est notable sur deux points essentiellement :

- complémentarité d'échelle entre la géophysique (mise à la masse) et la mesure thermométrique. La géophysique donne une vision globale des zones à faible résistivité, ce qui permet ensuite de prévoir une campagne thermométrique ajustée aux points repérés par la géophysique et ainsi d'optimiser économiquement l'auscultation ;
- le traçage à la saumure ou la mise à la masse, couplés avec la mesure thermométrique, rendent possible une vision 3 D de l'écoulement sur l'ensemble du corps de digue.
- La visualisation en trois dimensions de l'écoulement sur un secteur endigué présentant une érosion interne est essentielle. Elle permet de s'orienter vers la bonne solution de confortement : si l'écoulement provient de la retenue amont, qu'il est transversal à la digue et limité sur une certaine hauteur, le traitement sera un écran étanche parallèle à la digue et de hauteur suffisante pour recouper l'écoulement principal. Par contre, si l'écoulement est majoritairement longitudinal à la digue, l'écran étanche parallèle à la digue n'est plus valable. Les solutions s'orienteront vers d'autres alternatives, elles permettront d'améliorer la résistance de l'ouvrage à l'érosion soit par la création de filtre, soit par un renforcement intrinsèque du noyau érosif.

7. CONCLUSIONS

La chaîne d'analyse déclinée depuis la surveillance, le suivi de l'auscultation, l'analyse comportementale et le diagnostic de sûreté se doit d'être de plus en plus pertinente et adaptée aux phénomènes complexes auxquels fait face l'ouvrage lors de son vieillissement. En effet, elle est le point d'entrée à l'évaluation des risques dont le maître d'ouvrage est garant vis-à-vis des autorités réglementaires.

Les deux méthodes d'investigation de mesure de résistivité et de température sont innovantes et montrent leur acuité vis-à-vis des données recherchées.

Ces méthodes sont certes simples à mettre en œuvre, mais demandent une solide expertise et expérience du prestataire pour assurer l'adéquation du résultat. Elles restent toujours couplées à une bonne connaissance géotechnique et hydrogéologique.

Les bénéfices apportés par ces deux méthodes, sur une meilleure appréhension du niveau de sûreté, montrent qu'il faut rester dans une démarche d'amélioration continue et de partenariat. Afin qu'ensemble, la « boîte à outils » pour le diagnostic et la surveillance des digues progresse.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Aufleger, M., Dornstädter, J., Fabritius, A., & Strobl, Th. (1998). *Fibre optic temperature measurements for leakage detection - applications in the reconstruction of dams*. - 66th ICOLD annual meeting, New Delhi, pp. 181-189, International Commission on Large Dams, Paris.
- [2] Aufleger, M., Dornstädter, J., Strobl, Th., Conra, M., Perzlmaier, S., Goltz, M. (2007). *10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau*. - 14. Deutsches Talsperrensensymposium/ 7th ICOLD European Club Dam Symposium, pp. 8-14, Freising, Germany.
- [3] Dornstädter J. (1997). *Detection of internal erosion in embankment dams*. Q.73R.7. 2: 87-101, Proceedings of the 19th Congress of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Florence, Italy
- [4] Dornstädter J., Heinneman B. (2010). *In situ detection of internal erosion*, Proceedings of the 8th ICOLD, European Club Dam Symposium, p 481-485, Innsbruck, Austria.
- [5] ICOLD-CIGB, *Internal erosion of existing dams, levees, and dikes, and theirs foundations*, Bulletin N°1, Draft of 17 april 2012.