

Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température en forage ou le long d'une fibre optique

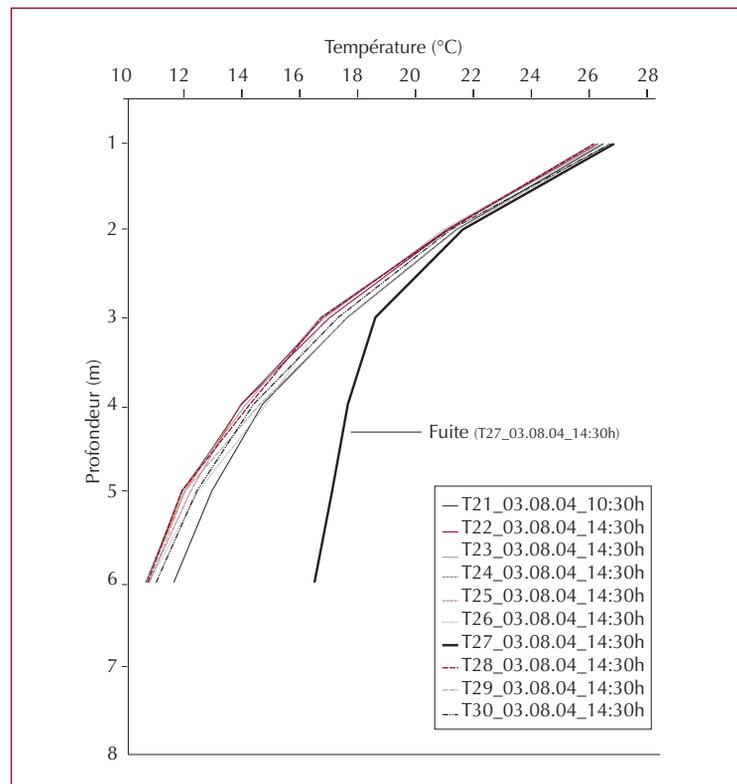
Jean-Jacques Fry

La détection thermométrique est une méthode employée par les géothermiciens depuis plusieurs décennies. Elle a été développée pour la prospection des sources d'énergie géothermique. Dans le domaine des barrages en remblai, elle est utilisée depuis plus de 20 ans. Elle a la capacité d'identifier les écoulements préférentiels, comme le montrent les nombreux travaux en Suède et en Allemagne. Les digues, qui sont des ouvrages de hauteur modeste et de fondation hétérogène se prêtent particulièrement bien à cette méthode de détection.

Le principe de la mesure des fuites par thermométrie

Le principe de la mesure des fuites par thermométrie repose sur la détection de l'anomalie thermique provoquée par un écoulement préférentiel dans une digue. L'origine de l'anomalie thermique, est une soudaine variation de transport thermique. En absence de fuite, le transfert de chaleur est causé uniquement par conduction, qui est l'échauffement du sol sans écoulement à partir de la température de l'air à l'aval et de l'eau à l'amont. En présence d'une fuite, le sol reçoit une quantité de chaleur supplémentaire, transportée par l'eau, ce phénomène est appelé advection (figure 1).

L'analyse thermométrique profonde détecte les fuites par l'advection horizontale, c'est-à-dire le transport de chaleur à partir de l'eau du canal dans les couches initialement ségréguées ou érodées ultérieurement, qui modifie le champ de température imposé par la conduction.



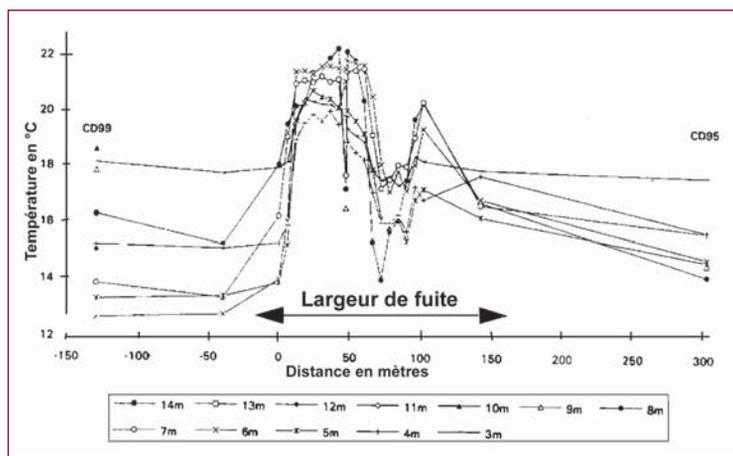
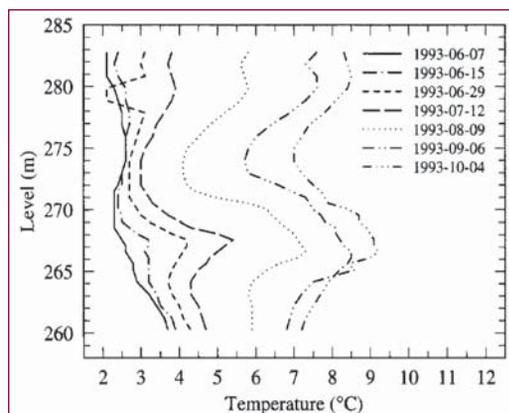
▲ Figure 1 – Anomalie thermique repérée sur un des profils verticaux de température dans une digue.

Les deux sources de chaleur les plus influentes sur le pourtour de la digue sont la température de l'air et celle de l'eau du canal. Les variations de l'air et de l'eau sont cycliques selon la période annuelle. Sous notre climat, elles ont

Les contacts

EDF CIH, Savoie
Technolac, 73373
Le Bourget-du-Lac
Cedex

► Figure 2 – Fuite détectée sur un site à 267 m par des mesures réalisées entre le 07/06/93 et le 04/10/93.



▲ Figure 3 – Détermination de la longueur de fuite.

l'avantage d'avoir une amplitude de l'ordre de 20 °C pour l'eau et plus pour l'air. L'analyse des fluctuations saisonnières dans une digue montre que (figure 2) :

- la profondeur d'influence des variations annuelles par conduction est d'environ 15 m ;
- l'advection devient prépondérante devant la conduction à partir de 5 m pour un matériau étanche dont la perméabilité est inférieure à 10^{-7} m/s : toute fuite au-delà de 5 m de profondeur créera donc une anomalie thermique nette ;
- plusieurs mesures dans le temps évitent une erreur d'interprétation ;
- la comparaison du profil de température de sections proches met en évidence la longueur perturbée par la fuite et qu'il convient de réparer.

La mise en œuvre

Deux techniques, correspondant à deux types de maintenance distincts, peuvent être mises en œuvre :

- la technique de mesure dans des tubes creux verticaux vibrofoncés : maintenance curative en vue d'un confortement ;
- la technique de mesure dans des piézomètres existants : maintenance préventive avec auscultation renforcée.

La détection par mesure unique dans des tubes

La mise en œuvre de cette technique est basée sur le brevet GTC Kappelmeyer GmbH en Allemagne. Le mode opératoire comprend les opérations suivantes : vibrofonçage le long de la digue de tubes creux en alliage spécial à un pas constant, mesure des températures tous les mètres avec une chaîne de thermistances, arrachage des tubes.

La profondeur d'investigation ne dépasse pas 20 m. L'implantation sur les profils en long dépend de l'extension, constatée à l'exutoire, ou supputée, de la zone de fuite, et de la nature des matériaux constitutifs de la digue. L'espacement entre les tubes est lié à la précision souhaitée lors de la campagne et à l'enveloppe budgétaire allouée à l'étude ; il varie de 20 m pour de grands linéaires en sablo-graveleux à 5 m pour des sols limono-argileux.

Cette méthode permet de positionner en plan et en cote les zones de cheminement préférentiel de l'eau du canal ou de la rivière percolant à travers la digue à partir de la comparaison de la température de la retenue et des isothermes à travers la digue (figure 3).

La détection par mesure mensuelle

Il est utile d'acquérir une série de mesures dans le temps pour pouvoir conclure d'une manière plus sûre sur l'importance et l'emplacement d'une fuite soupçonnée. Avec une année de mesures mensuelles, il est possible d'en extraire le débit de fuite et une valeur de perméabilité de la zone fuyarde.

L'étude du déphasage en fonction du temps et de l'amortissement en fonction de la distance de la température du remblai, par rapport à celle de la retenue, permet de quantifier le débit de fuites (le phénomène de conduction l'emporte si le débit de fuite est insignifiant et le phénomène d'advection est prépondérant si le débit est fort). Johansson (1997) déduit le débit et la perméabilité

d'une intégration mathématique et d'une interprétation physique de l'équation de transport de la chaleur. Il définit deux méthodes d'évaluation de la perméabilité d'une zone de fuite.

Le principe de la première méthode repose sur le déphasage temporel entre la température d'un piézomètre et celle de l'eau du canal. Soit M le point considéré dans un profil vertical à une distance x de la retenue. On évalue la durée du déphasage de la température de ce point par rapport à la retenue, t_d , on en déduit la vitesse thermique v_t qui est reliée à la vitesse de Darcy v et donc à la perméabilité K et au gradient i, par le rapport des capacités calorifiques volumiques du sol C_s et de l'eau C_w en écrivant la relation :

$$V_t = \frac{x}{t_d} = \frac{C_w}{C_s} \cdot v = \frac{C_w}{C_s} \cdot K \cdot i$$

Une deuxième méthode repose sur la mesure du maxima de la variation annuelle de la température, $T_{max}-T_{min}$, en plusieurs points situés sur une verticale dans un piézomètre ou un puits drainant. Du profil de $T_{max}-T_{min}$ en fonction de la profondeur, l'épaisseur H de la zone de fuite est estimée. La deuxième étape consiste à connaître l'amortissement T' des écarts thermiques maximaux annuels. T' est le rapport de l'écart maximal de température au point M sur le rapport maximal des températures de la retenue :

$$T' = \frac{(T_{max} - T_{min})_M}{(T_{max} - T_{min})_{Re\ tenue}}$$

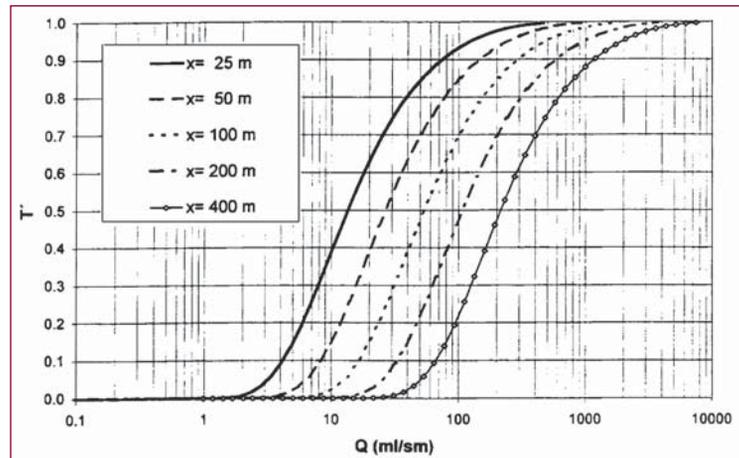
T' fixe le nombre de Peclét X' , nombre adimensionnel qui compare le transfert thermique par convection au transfert par conduction. X' donne accès à la vitesse de Darcy :

$$X' = \frac{C_w \cdot v \cdot H^2}{x \cdot \lambda}$$

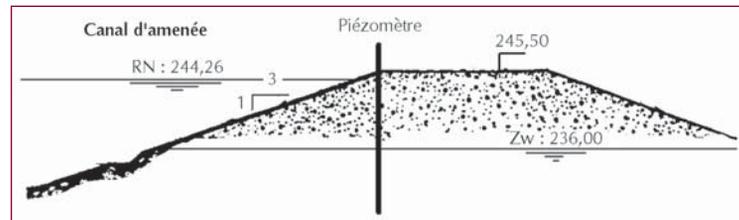
La vitesse de Darcy est déduite de l'abaque de la figure 4. Connaissant T' et l'épaisseur H de la zone de fuite, on trouve X' et on en déduit v, vitesse de Darcy et K, la perméabilité.

Application à la digue rive droite de Kembs

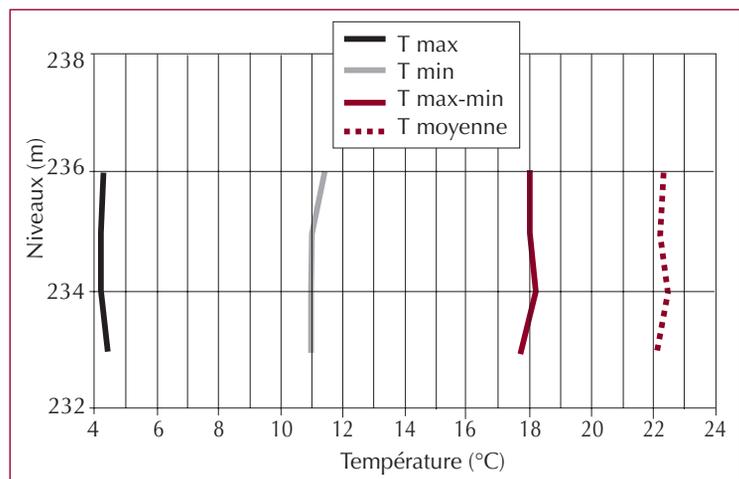
La digue de Kembs endigue le premier bief du Grand Canal d'Alsace. Elle est réalisée en grave sableuse sur une fondation de même nature. L'étanchéité est constituée de dalles béton.



▲ Figure 4 – Abaque reliant le nombre de Peclét X' , à T' et H.



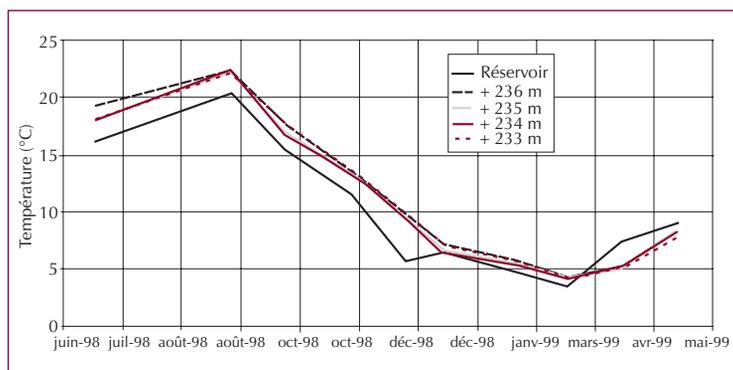
▲ Figure 5 – Coupe type de la digue et position du piézomètre.



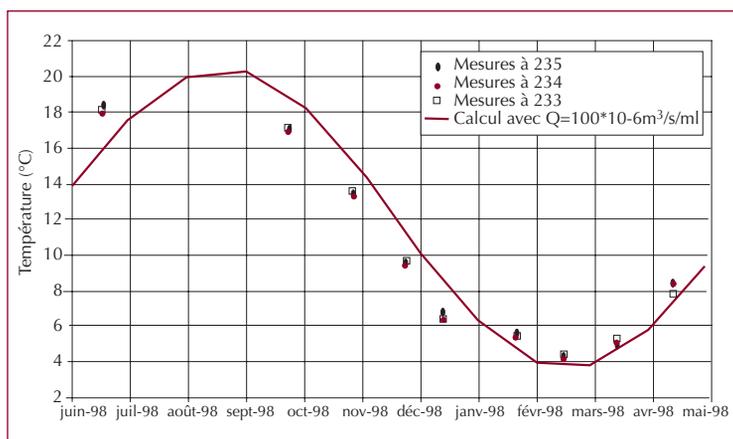
▲ Figure 6 – Profil RG 3.0, statistiques sur les températures.

Un suivi saisonnier des piézomètres a mis en évidence des fuites ponctuelles. Une d'entre elles est localisée par le piézomètre RG au PK Canal 3.0 km (figure 5). La température a été mesurée tous les mètres en fond de piézomètre (figure 6).

▼ Figure 7 – Variation annuelle des températures du canal et du piézomètre.

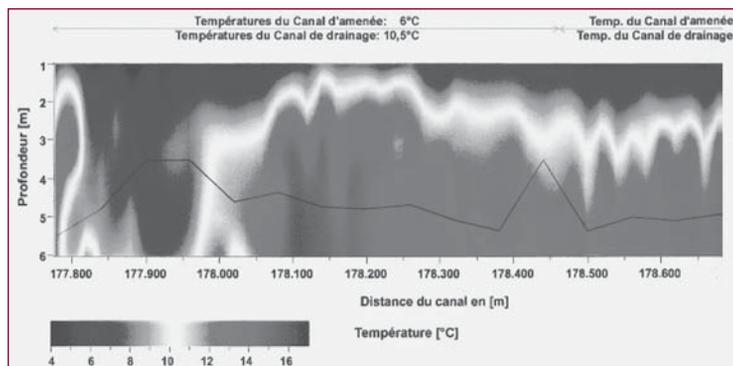


Une forte dépendance des températures vis-à-vis de la variation saisonnière du canal est le principal indicateur d'anomalie sur toute la hauteur de nappe interceptée par le piézomètre (figure 7), avec une plage de variation thermique égale à celle du canal.



▲ Figure 8 – (RG 3.0), Comparaison entre les températures mesurées et calculées.

▼ Figure 9 – Panneau thermique représentant la concentration des fuites.



La simulation des transferts en figure 8 correspond à un débit de fuite de $100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ soit 6 l/min/m.

D'autre part, une campagne de thermométrie a été lancée en hiver pour localiser les fuites. Les mesures ont été réalisées dans les tubes vibrofoncés tous les 20 m au bord de la piste d'entretien pour quantifier les zones fuyantes en pied aval de la digue. Les résultats présentés sous forme de panneau thermique sur la figure 9 localisent une fuite importante du PK 177,800 au PK 177,970, zone où la température est très proche de celle du Rhin (la ligne brisée noire symbolise le fond du contre canal).

Bilan et perspectives de la méthode thermométrique

La comparaison entre la thermométrie et les méthodes géophysiques classiques (électrofiltration, traçages globaux) est favorable à la thermométrie. Cette dernière est précise, fiable et plus facile à interpréter pour un coût comparable. La méthode thermométrique, avec l'interprétation qualitative des résultats, est très efficace pour détecter les zones de fuite et elle est adaptée pour orienter le choix et l'implantation du confortement approprié. Elle peut en outre permettre de contrôler *a posteriori* l'efficacité de travaux d'étanchement (interne ou externe) réalisés dans l'ouvrage. Elle est donc très utile à l'exploitant.

Les limitations de la thermométrie sont :

- la profondeur à tester ;
- la période d'intervention : janvier-février et juillet-août sont les deux saisons où le contraste de température est le plus fort entre l'eau du canal et l'eau de la nappe ;
- la perméabilité des sols : le rayon d'action est très limité dans les sols gileux.

Une limite importante de l'application de la thermométrie est le faible nombre de points de mesures en regard de l'importance du linéaire à ausculter. L'obtention d'une mesure en continu serait la solution à la détection des fuites ponctuelles.

La fibre optique, en permettant des mesures de température tous les mètres, n'est-elle pas la solution d'avenir ?

L'utilisation de la fibre optique pour la détection des fuites

Historique

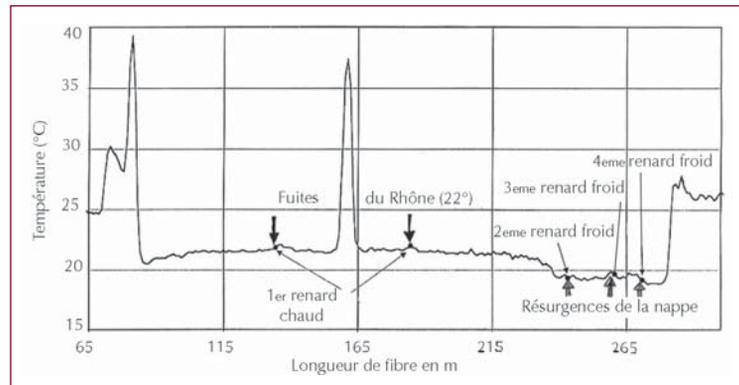
En 1994, au cours d'une discussion entre EDF et Jürgen Dornstädter de GTC à Karlsruhe, il ressort que l'utilisation de la fibre optique réunit les qualités nécessaires à une détection automatisée des fuites sur le grand linéaire d'une digue : grand nombre de mesures, fiabilité, précision. En effet, elle est déjà utilisée par la Direction de la Production Transport d'EDF pour détecter les points de chaleur consécutifs aux ruptures de lignes électriques enterrées.

En 1995, EDF réalise un premier test sur la digue de Cusset. La température du contre-canal, est environ de 21,4°. Si la température du Rhône, est quasi identique, 22°, et malheureusement empêche de détecter les fuites du Rhône, en revanche la température de la nappe de 16° autorise la détection de ses résurgences. La température de l'air atteint 38° cet été là. Une boucle de 400 m de fibre est lestée à une profondeur de 15 à 80 cm dans le contre-canal, pour obtenir une section de mesure de 200 m. Une zone de 40 m plus froide est mise en évidence. Elle correspond à l'emplacement de 4 résurgences de la nappe (figure 10). Après la vérification de la faisabilité de la mesure, son utilisation apparaît prometteuse.

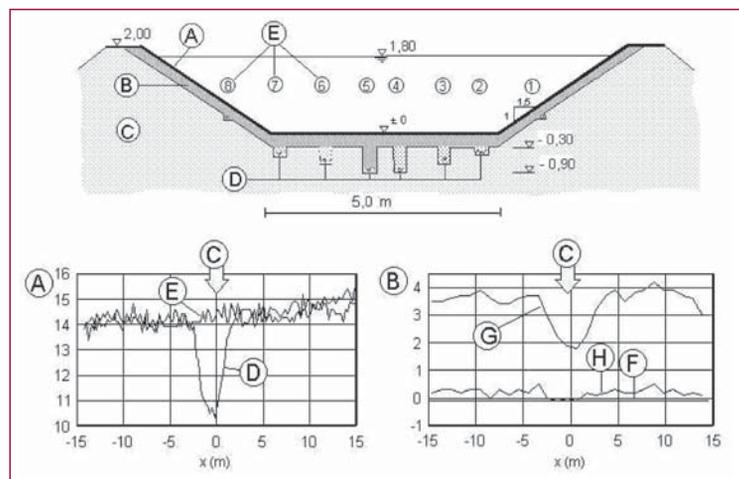
En 1997, sous l'impulsion de GTC, l'université de Munich teste un tronçon de digue de 2 m de hauteur étanché par une géomembrane PEHD percée en laboratoire. Les conditions de pose de la fibre sont paramétrées afin d'en quantifier l'influence. Les résultats démontrent la capacité indéniable de la fibre à localiser la fuite par deux approches différentes (figure 11).

La fibre dans les tranchées D détecte la fuite à la position C ($X = 0$). En l'absence de fuite la température est comprise entre 14° et 15°, après fuite elle chute à 10,5°. Elle remonte à 14° après réparation. Une autre façon de détecter la fuite consiste à chauffer la fibre. Après 3 minutes de chauffe, une élévation (G sur la figure 11) de température de 3,5 °C est constatée partout, excepté à l'emplacement C de la fuite. Cette méthode élimine le risque d'incertitude dans les périodes où l'eau de la nappe est à la même température que le sol, elle est brevetée par GTC.

En 1998, une fibre optique est posée dans la digue rive gauche du barrage de Lovons appartenant à Graininge, à l'époque filiale suédoise d'EDF. Johans-



▲ Figure 10 – Première application de la fibre optique à la détection des fuites sur la digue de Cusset.



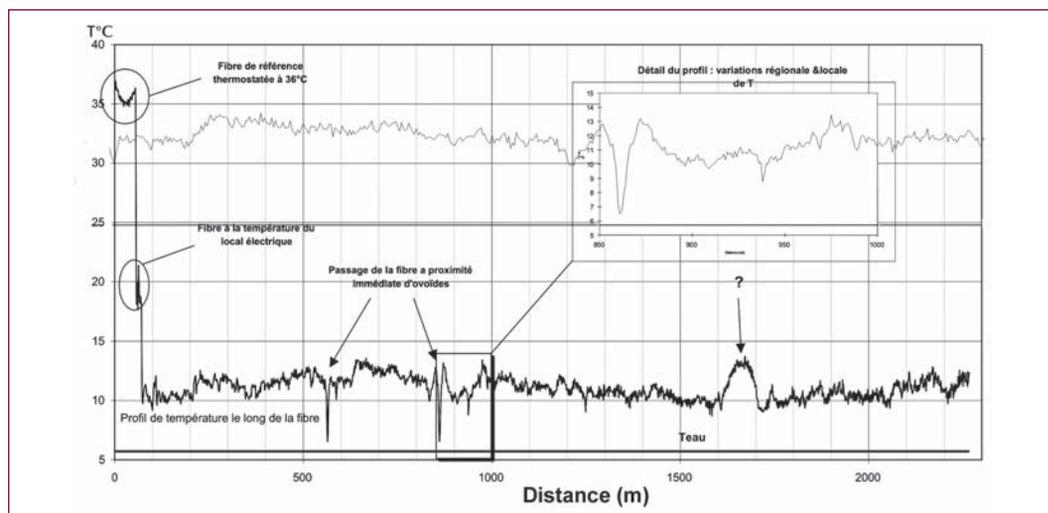
son, en contact avec EDF depuis 1993, en est le maître d'œuvre avec sa société Hydro-Research. La fibre de 1,5 km de longueur emmaillote le noyau sur plusieurs niveaux, l'appareillage de mesure est dans l'usine. Les mesures mettent en évidence que le nouveau noyau est sain et étanche, mais qu'en revanche des fuites résiduelles passent à la limite de l'ancien et du nouveau noyau.

En 2003, le ministère de la Recherche lance le projet RGCU¹ Hydrodetect, dont la finalité est l'élaboration d'un nouveau produit pour réhabiliter les digues à moindre coût. Ce produit combine un filtre en géotextile, première barrière de protection à l'érosion interne et une fibre optique, seconde barrière en prévention de l'augmentation pathologique du débit.

Cette même année 2003, EDF entreprend de tester une fibre optique pour la surveillance en continu de la digue rive droite du canal d'Orai-

1. Réseau Recherche Innovation en Génie Civil Urbain.

► Figure 12
– Températures
mesurées en janvier
2003.



son. Cette digue est constituée d'alluvions de la Durance, mélangées à des déblais de poudingues et limons. L'étanchéité est assurée par des dalles de béton. Lorsqu'un joint entre dalles lâche, des fuites importantes peuvent être signalées. Les deux derniers kilomètres sont choisis, car la digue y présente sa hauteur maximale et les fuites les plus importantes y sont apparues.

Pour 2 238 m de câble approvisionnés, 2 213 m ont été enfouis au pied aval du canal courant 2002. Le câble contient 4 fibres. Elles sont soudées deux à deux permettant ainsi des mesures en boucle sur deux fibres. La tranchée d'un mètre de profondeur est creusée à l'amont du caniveau bétonné.

La fibre est raccordée au laser et à l'interféromètre du DTS 800 Sensa, placé dans une baie électrique, au sein de l'usine. Le branchement de la mesure de la température et du niveau de l'eau du canal est réalisé à l'usine. Un PC déclenche, contrôle et stocke les informations. Il est piloté depuis EDF-DTG à Grenoble pour les tests paramétriques.

Les mesures commencent en janvier 2003. En novembre 2003, un nouveau laser, OTS 4000 de Siemens est installé par Cerberus et comparé au DTS. S'il existe un décalage de 2° entre les deux restitutions, les variations relatives sont identiques. Ces deux appareils ont des technologies différentes. Le DTS analyse dans le domaine temporel, l'OTS travaille dans le domaine fréquentiel.

Une puissance de chauffage de 15 W/m est extraite d'un transformateur et appliquée à la

fibre, afin de tester les deux méthodes de détection, la méthode passive mesurant la température naturelle et la méthode active à température imposée par chauffe.

Les premières mesures faites en détection passive mettent en évidence des fluctuations importantes, liées à un contexte hydrogéologique variable. Les fuites collectées par les ovoides sont identifiées par les températures les plus froides (6°) en janvier 2002 (figure 12).

Depuis l'installation, aucune observation visuelle ne relate de fuite. Pourtant, l'analyse localise plusieurs singularités sur le tracé, sans qu'il soit possible de conclure qu'elles représentent des fuites.

Une fuite de 40 l/mn a été artificiellement reproduite et effectivement détectée par le dispositif en température naturelle. Une fuite artificielle beaucoup plus faible (1,5 l/mn) n'a pas été décelée.

La détection active à température imposée a fait l'objet d'études paramétriques qui ont porté dans un premier temps sur la recherche des paramètres de chauffe : durée de chauffe, fréquence de la mesure, mode de restitution des résultats, analyse statistique, choix des indicateurs.

La méthode active permet de détecter la fuite artificielle de 1,5 l/mn comme le montre la figure 13.

L'amélioration du diagnostic passera par une amélioration de la précision et surtout de la fiabilité. Les pannes constatées nuisent à l'interrogation permanente du DTS. L'effort futur portera sur la fiabilisation de la continuité de la surveillance.

En 2004, le 27 avril, un colloque international, organisé à Paris par l'IRES² et le groupe européen

2. Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil.

de la CIGB dresse un inventaire de l'utilisation de la technique. Plus de 35 sites de barrage ou de digue, principalement en Europe, ont été équipés et suivis par fibre optique, principalement par GTC et Hydro-Research.

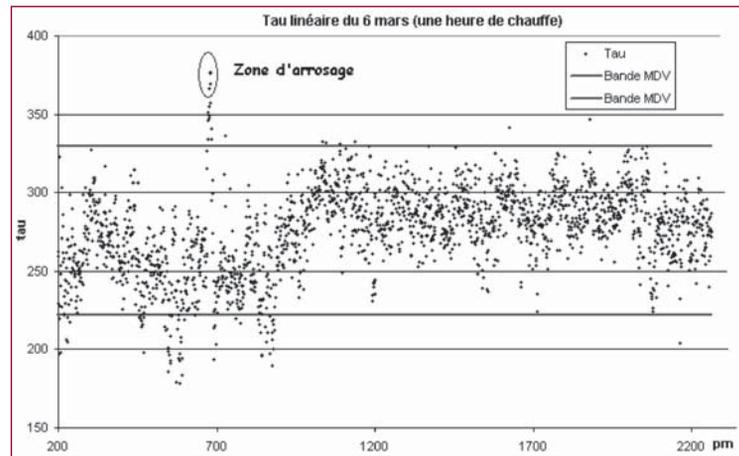
Le principe

La mesure thermique par fibre optique utilise l'effet de la température sur l'intensité de la radiation rétro-diffusée d'un rayonnement émis par un laser : l'effet Raman. La fibre présente des défauts (*scattering point*) inclus à intervalle régulier (1 m ou moins). Un laser branché à l'entrée de la fibre, lui impulse un signal lumineux à une période de 10 ns. Chaque défaut renvoie la lumière dont le contenu fréquentiel est analysé. Le contenu fréquentiel contient trois pics, le pic de Rayleigh, le pic de Stokes et d'anti-Stokes. L'amplitude et la fréquence de base de ces derniers dépend de la température. Leur mesure par interféromètre permet d'accéder à la valeur de la température (figure 14).

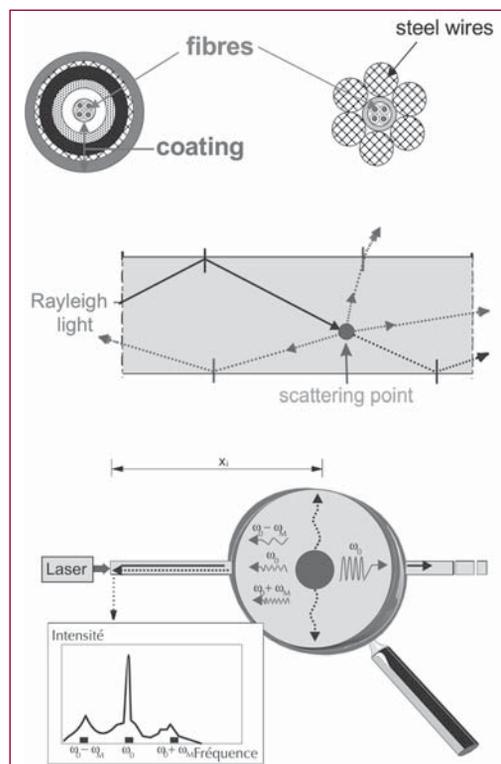
Les fibres optiques industrielles contiennent plusieurs fibres entourées de raidisseurs en fil de cuivre et protégées par une gaine étanche. GTC a l'idée d'utiliser ces fils de cuivre en résistance chauffante. GTC met au point la *heat pulse method* ou méthode à température imposée pour pallier l'incertitude de la mesure de température naturelle.

Conclusion à propos de l'utilisation de la fibre optique

La fibre optique a été posée sur 35 aménagements pour détecter des fuites. En général la surveillance est discontinue : mesure mensuelle ou semestrielle. L'expérience du canal d'Oraison teste cette technique dans le cadre d'une surveillance continue. Les tests réalisés montrent l'aptitude de la fibre à détecter des fuites faibles. En revanche la permanence de la surveillance n'est pas encore obtenue. Une fiabilisation de l'instrumentation est l'objectif actuel primordial. Ensuite, la mise en forme industrielle d'un système d'alarme est l'objectif final. □



▲ Figure 13 – Repérage de la fuite après chauffe.



◀ Figure 14 – Principe de la mesure de température par fibre optique (GTC, 2004).

Résumé

Les mesures de température sont très utiles pour détecter les fuites d'une digue. Cet article rappelle le principe de la détection thermique, présente un exemple et introduit l'utilisation de la fibre optique. La fibre optique est un outil prometteur, testé notamment par EDF sur le canal d'Oraison.

Abstract

Temperature measurements are very effective for dike leakage detecting. This paper reminds the principles of thermal detection, shows one application and sums up the principles of the use of fiber optic. The fiber optic is a promising tool, under test by EDF at Oraison canal.

Bibliographie

CFGB, 1997, Bulletin spécial Érosion interne : typologie, détection et réparation, *Barrages et Réservoirs*.

Irex, 2004, Compte-rendu des journées Irex-EWG Internal Erosion du 26 et 27 avril 2004 consacrée à la détection par fibre optique, CD-Rom EDF-CIH.