

Systèmes d'auscultation de digues basés sur des mesures de température et des déformations par fibre optique

Dyke monitoring systems based on fibre optics temperature and strain measurements

Jean-Robert Courivaud¹, Jean-Jacques Fry

EDF CIH Savoie Technolac 73373 Le Bourget du Lac Cedex

jean-robot.courivaud@edf.fr, jean-jacques.fry@edf.fr

Patrick Pinettes

GeophyConsult Savoie Technolac – 12, allée du lac de garde – B.P. 231 – 73374 Le Bourget du Lac Cedex

pinettes@geophyconsult.com

Alain Cassard, Julien Miceli

SAFEGE - 27, route de la Wantzenau – 67800 Hoenheim

alain.cassard@safege.fr, julien.miceli@safege.fr

Olivier Artières

TenCate Geosynthetics – 9 rue Marcel Paul – B.P. 40080 – 95873 Bezons Cedex

o.artieres@tencate.com

MOTS CLÉS

Sûreté, surveillance, barrage, canal, remblai, fuite, érosion interne, stabilité.

RÉSUMÉ

Pour les ouvrages hydrauliques en remblai de grand linéaire, l'objectif de l'auscultation est de fournir au maître d'ouvrage des renseignements fiables et précis à la fois sur l'évolution à long terme de leurs comportements hydraulique et mécanique, et sur l'apparition d'indicateurs de défaillance en cas de chargements extrêmes. En complément des mesures d'auscultation conventionnelles, qui fournissent des informations ponctuelles dans l'espace sur le comportement de l'ouvrage, la surveillance des fuites par des mesures réparties de température par fibre optique permet d'identifier des signes précoces de l'érosion interne de manière continue tout le long de l'ouvrage. Cet article présente tout d'abord le déploiement de cette technologie innovante sur les digues des biefs de Gamsheim et Iffezheim, sur le Rhin. L'objectif de ce projet est de concevoir et réaliser un nouveau système d'auscultation permettant à la fois le suivi à long terme des comportements hydraulique et mécanique et l'alerte précoce du maître d'ouvrage en cas d'apparition de pathologies potentiellement graves. Ce système d'auscultation repose sur des mesures de température par fibre optique sur la totalité du linéaire (38 km), sur des mesures limnimétriques, de température du Rhin ainsi que sur des mesures piézométriques télémétrées. Le second projet présenté est une digue maritime de Boston, en Angleterre, qui est soumise à un fort marnage journalier lié à la marée. Cette digue a été équipée d'une solution d'auscultation composée d'un géotextile qui porte et protège plusieurs câbles de fibres optiques permettant une mesure simultanée de la déformation et de la température.

ABSTRACT

The aim of dykes and levees monitoring is to provide owners with precise and reliable information on long-term hydraulic and mechanical behaviour of the structures in conjunction with early warnings in case of extreme loads. In addition to conventional monitoring technologies which provide information at selected points of the embankment, leakage monitoring via distributed temperature measurements with fibre optics allows the detection of early signs of internal erosion all along the embankment. The present article presents firstly the deployment of this new technology on the Gamsheim and Iffezheim dykes, on the Rhine river. The aim of this project is to design and install a new monitoring system with the objective to allow the long-term follow-up of hydraulic and mechanical behaviours as well as early warnings if potentially serious pathologies appear. This monitoring system based on distributed temperature measurements by fiber optics throughout an entire linear of 38 km is being installed, together with remote water level and temperature measurements in the Rhine river and remote piezometric measurements. The second project presented is a sea dyke in Boston, UK, which is subject to strong tides. This dyke was equipped with a monitoring solution including a geotextile that brings and protects several fiber optic cables enabling simultaneous strain and temperature measurements.

¹ Auteur correspondant

1. PROBLEMATIQUE DE LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES EN REMBLAI DE GRAND LINEAIRE ET CONCEPT DE MAINTENANCE PREVENTIVE

Les ouvrages hydrauliques en remblai de grand linéaire, barrages latéraux de canaux ou d'endiguement fluviaux ou digues de protection contre les inondations, présentent actuellement en France, comme dans la plupart des autres pays, un enjeu majeur pour la sûreté. Souvent anciens (généralement âgés de 40 ans à plus de 100 ans, et de plusieurs siècles pour certaines digues de protection contre les inondations), ces ouvrages et leur fondation sont généralement mal connus de leur propriétaire, notamment leurs propriétés géologiques, géotechniques et hydrauliques. D'autre part, leur grand linéaire rend le suivi de leur comportement difficile.

Les modes de rupture potentiels principaux de ces ouvrages sont l'érosion interne et l'érosion externe par surverse ou par affouillement. Les modes de rupture dus au cisaillement (instabilité par grand glissement ou rupture suite à un séisme) sont, en France, moins prépondérants que les deux premiers, sans pour autant pouvoir être négligés. La surveillance du comportement hydraulique de ces ouvrages, et en particulier, la surveillance des fuites, est donc un élément majeur dans leur dispositif de sécurité.

Les moyens conventionnels pour effectuer ce suivi du comportement hydraulique sont d'une part l'inspection visuelle et d'autre part l'auscultation, cette dernière reposant surtout sur les mesures de débit dans les ouvrages de drainage (canaux de drainage ou collecteurs de drains), qui sont des mesures directes des fuites ainsi que les mesures piézométriques qui peuvent fournir une information indirecte sur les fuites. Ces moyens de surveillance conventionnels, qui sont toujours ponctuels dans l'espace, se révèlent souvent inaptes à mettre en évidence des pathologies d'érosion interne pourtant avérées sur l'ouvrage.

En termes de sûreté, le maître d'ouvrage doit donc faire face à une double problématique :

- comment détecter l'érosion interne ? Bien que ses localisations privilégiées au sein de l'ouvrage soient connues (contacts remblai / structures béton ou ouvrages traversant, conditions de fort chargement hydraulique en particulier), l'érosion interne peut néanmoins se développer de manière soudaine et aléatoire tout le long d'un ouvrage. Ceci rend la détection de ce phénomène souvent impossible par des capteurs ponctuels et les mesures intégratrices sur des tronçons de l'ouvrage, comme les mesures de débit de drainage, ne sont pas toujours exploitables, surtout lorsqu'elles sont effectuées dans des canaux de drainage qui sont également alimentés par des affluents ou par la nappe phréatique ;

- comment assurer à la fois un suivi du comportement hydraulique sur le long terme et disposer en même temps d'un moyen fiable d'alerte précoce en cas d'apparition d'une pathologie potentiellement grave ?

A ces questions de sûreté, vient s'ajouter également pour le maître d'ouvrage la dimension économique :

- est-il possible de disposer d'un plan de maintenance garantissant la sûreté de l'ouvrage tout en optimisant les travaux de réparation ou de confortement, en ne confortant que là où c'est nécessaire ? En effet, les linéaires importants de ces ouvrages peuvent rapidement rendre les coûts de travaux de confortement extrêmement élevés (l'ordre de grandeur étant de 1 à 5 M€/km) et conforter des zones saines par manque d'approfondissement ou d'optimisation des études est économiquement inadmissible.

Pour répondre à ces questions, le concept de maintenance préventive appliquée aux ouvrages hydrauliques en remblai consiste à mettre en œuvre un système de surveillance, une méthode d'interprétation associée et une organisation humaine adaptée qui permettent de suivre au cours du temps l'évolution des marges de sécurité de l'ouvrage à partir des résultats des données de surveillance, de manière à ce que le maître d'ouvrage soit capable d'identifier le plus tôt possible et de manière précise dans l'espace, les tronçons de son ouvrage dont les marges de sécurité sont devenues insuffisantes. Cela lui permet de réaliser ensuite les opérations de maintenance adaptées au risque identifié et uniquement sur le secteur qui le nécessite.

Les étapes de la maintenance préventive sont ainsi au nombre de quatre :

1. acquisition des données de surveillance (inspection visuelle et auscultation) ;
2. analyse des données de surveillance pour aboutir à une estimation quantitative ou semi-quantitative de paramètres de sécurité de l'ouvrage ;
3. comparaison des paramètres de sécurité obtenus aux critères de sécurité préalablement établis et détermination des marges de sécurité de l'ouvrage ;
4. en fonction des marges de sécurité obtenues, décision sur les éventuelles actions de maintenance à engager.

Quatre niveaux de risques (critères de sécurité) peuvent être définis dans le cadre d'une maintenance préventive (ci-dessous lorsqu'ils sont appliqués à l'érosion interne) :

1. niveau d'anomalie : variation soudaine et supérieure au bruit de mesure du paramètre de surveillance ;
2. niveau d'alarme : l'initiation de l'érosion interne est très probable ;
3. niveau d'intervention : le développement de l'érosion interne n'est plus tolérable ;
4. niveau critique : une rupture est probable. L'ouvrage devra probablement être mis en sécurité et si cela n'était pas possible, l'évacuation des populations pourrait être déclenchée. Ce niveau est défini pour déterminer la marge de sécurité vis-à-vis du risque de rupture en termes de vitesse de percolation, pression interstitielle, débit de fuite,...

Les méthodologies conduisant à la détermination des paramètres et critères de sécurité sont déterminées à l'issue d'un diagnostic de sûreté et doivent être présentées dans la consigne de surveillance de l'ouvrage. Dans tous les cas, ces critères doivent être affinés et évoluer en fonction du comportement de l'ouvrage.

2. LA SURVEILLANCE DES FUITES PAR LES MESURES REPARTIES DE TEMPERATURE PAR FIBRES OPTIQUES

2.1 Intérêt des mesures de température pour la détection de fuites

Depuis plusieurs décennies, la thermométrie s'est avérée comme l'une des mesures les plus pertinentes pour détecter la présence de fuites au sein d'ouvrages en terre. Reposant sur l'écart de température existant entre le massif non exposé à la fuite, où la température est régie par le phénomène de conduction de la chaleur imposée aux limites de l'ouvrage, et la zone de fuite, dont la température est régie par le transport par convection de la chaleur de l'écoulement de fuite, la thermométrie conventionnelle est utilisée couramment en phase de reconnaissances sur les ouvrages, par des mesures de profils verticaux de température réalisées dans des forages [6]. Les capacités de la thermométrie ont été démultipliées dès lors que la technologie a permis d'effectuer des mesures réparties de température à l'aide de fibres optiques [1]. Cette avancée a ouvert la voie à une utilisation des mesures de température dans le cadre de l'auscultation et de la génération d'alertes.

2.2 Principe général de la surveillance des fuites par fibre optique

La mesure consiste à envoyer un rayon lumineux (rayon laser) dans une fibre optique standard installée à l'intérieur d'un ouvrage hydraulique en remblai. Le système de mesure est constitué de la fibre et d'un interrogateur opto-électronique. Le principe de mesure est basé sur la réflectométrie résolue dans le temps. Une source laser émise par l'interrogateur envoie des impulsions de courte durée (quelques ns) dans la fibre optique où la silice réagit en absorbant et rétrodiffusant une partie de l'onde incidente. Le signal rétrodiffusé est analysé par l'interrogateur en y associant le temps d'aller-retour de l'onde lié à la distance de l'appareil. Le spectre de rétrodiffusion comprend plusieurs raies caractéristiques (cf. Fig. 1), dont :

- ✓ la raie Rayleigh correspondant aux fluctuations de densité et de composition de la silice. Elle est utilisée dans les réflectomètres télécom pour vérifier l'intégrité des liaisons optiques ;
- ✓ les raies Brillouin liées aux modes acousto-optiques, dépendant de la température et de la déformation de la fibre ;
- ✓ les raies Raman liées aux vibrations moléculaires de la silice. Le rapport d'intensité des deux raies Stokes et anti-Stokes est directement lié à la température de la fibre.

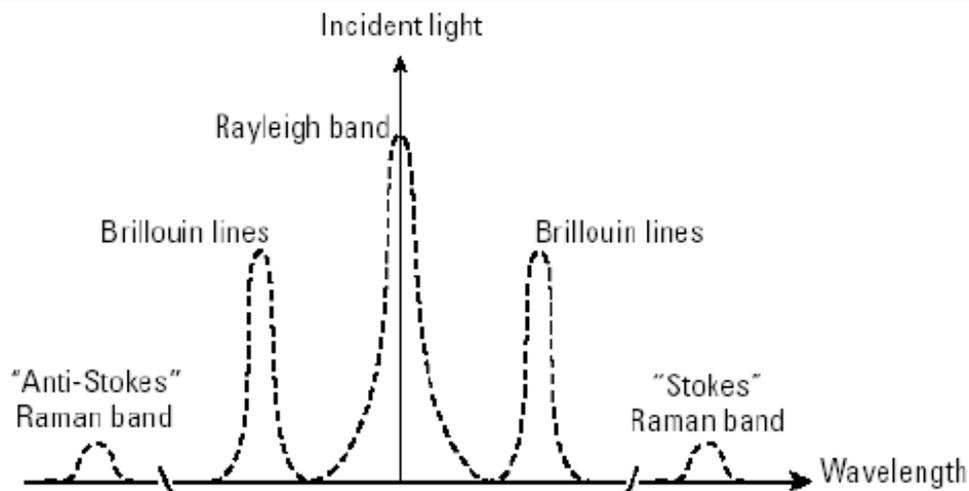


Figure 1 : Spectre de rétro-diffusion de la silice (d'après [1])

L'utilisation d'une fibre optique de type multi-modes permet d'utiliser l'effet Raman et de disposer d'une mesure répartie de la température tout le long de celle-ci. Les interrogateurs opto-électroniques disponibles sur le marché actuellement permettent d'obtenir une mesure de température tous les mètres, avec une portée allant jusqu'à 30 km. La précision de cette mesure de température est de 0,1°C, mais celle-ci se dégrade pour les portées supérieures à 10 km. Le pas de temps d'acquisition des mesures peut varier d'une mesure toutes les 10 minutes à une mesure par an voire moins.

En disposant ainsi d'une mesure répartie de température au sein de l'ouvrage, positionnée judicieusement selon l'objectif à atteindre (ex. : contrôle d'une étanchéité en parement amont ou surveillance des fuites en pied de talus aval), la surveillance se base sur les principes de la thermométrie appliquée à la détection des fuites : là où la fibre optique intercepte une fuite, elle mesure une température régie par le transport de chaleur par convection le long de la fuite.

Deux méthodes différentes peuvent être utilisées : la méthode passive et la méthode active.

2.3 Principe de la surveillance des fuites par fibre optique au moyen de la méthode passive

La méthode dite passive consiste à analyser les mesures de températures acquises par la fibre optique. La détection d'anomalies de température à partir des mesures brutes de température de la fibre optique étant généralement impossible, le recours à des méthodes d'analyse, basées soit sur une approche physico-statistique, soit sur des approches de traitement du signal, est indispensable pour interpréter correctement ces données.

Pour mener correctement ces interprétations, des mesures complémentaires de température de l'air, de l'eau à l'amont de l'ouvrage et de l'eau de la nappe sont généralement nécessaires.

Des essais effectués en laboratoire et sur sites expérimentaux ont permis de montrer que le rayon de détection d'une fuite autour de la fibre optique est de 1 à 2 m en employant cette méthode.

Les méthodes d'analyse basées sur l'approche physico-statistique nécessitent de disposer d'une chronique continue de données sur au moins 3 à 6 mois, à raison d'une mesure par jour pour être en mesure de fournir un diagnostic sur la présence ou l'absence de fuite [7]. Moyennant cette contrainte, ces méthodes peuvent être utilisées pour surveiller le comportement hydraulique à long terme comme pour générer des alertes en cas d'apparition soudaine d'une pathologie potentiellement grave.

Certaines méthodes basées sur le traitement du signal ne nécessitent qu'une chronique continue de quelques jours de données pour être en mesure de fournir un diagnostic sur la présence ou l'absence de fuite [8]. Ces méthodes peuvent ensuite être utilisées aussi bien pour la surveillance à long terme que pour la génération d'alertes.

2.4 Principe de la surveillance des fuites par fibre optique au moyen de la méthode de chauffe (ou méthode active)

La méthode de mesure avec chauffe reprend les mêmes principes de base de la mesure distribuée de température par fibre optique, utilisant l'effet Raman présenté précédemment. La fibre optique est en plus entourée d'un câble de cuivre chauffé par effet Joule sur une courte période de temps. La puissance électrique nécessaire à cette chauffe est de 3 à 15 W/m. L'enregistrement de l'évolution de la température au cours de la période de chauffe permet de distinguer des comportements traduisant un phénomène dominant de conduction (absence de fuite) ou un phénomène dominant de convection (présence de fuite). L'évolution de la température mesurée au cours de la mise en œuvre de cette méthode est représentée sur la figure 2 ci-dessous.

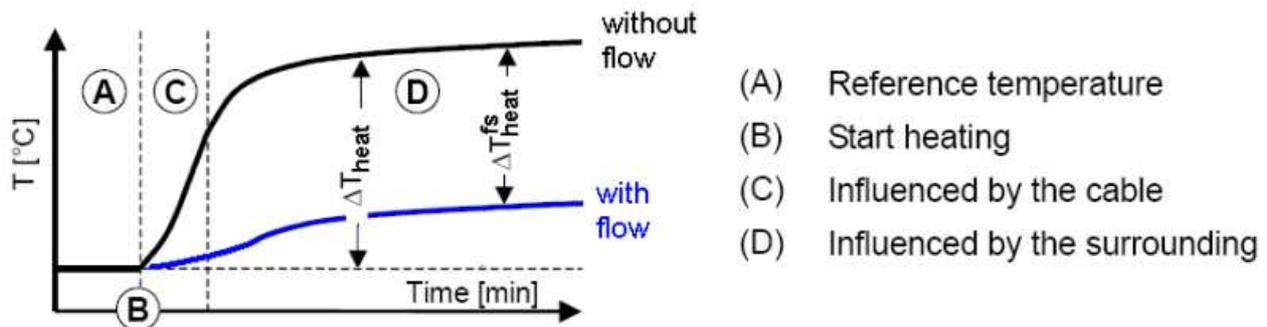


Figure 2 : Evolution de la température de la fibre optique au cours d'un essai de chauffe (d'après [2])

Des essais effectués en laboratoire ont permis de montrer que le rayon de détection d'une fuite autour de la fibre optique est de 15 à 20 cm avec cette méthode.

La réalisation d'une mesure de chauffe et son interprétation durent environ 3 h. Cette méthode ne nécessite pas d'avoir acquis au préalable un historique de mesures. Elle est donc bien adaptée pour certaines problématiques de surveillance à courte échelle de temps (remise en eau d'ouvrage par exemple). Néanmoins, cette méthode nécessite, en particulier pour des raisons de sécurité, la présence d'un intervenant sur site lors de la mesure, ce qui limite fortement son utilisation pour des problématiques de surveillance lors d'une mise en charge rapide et non prévisible à l'avance de l'ouvrage.

La puissance électrique recommandée pour utiliser cette méthode est par ailleurs de 10 à 15 W/m, ce qui, pratiquement, rend très lourde sa mise en œuvre sur des ouvrages de plus de 5 km de longueur, du fait des équipements électriques de transformation et de pilotage de la puissance électrique dans l'installation qui sont nécessaires.

La méthode de chauffe s'avère donc bien adaptée aux canaux ou barrages en remblai d'assez faible longueur (≤ 5 km) et notamment pour la surveillance lors des mises en eau, ou tout autre type de surveillance caractérisé par une courte échelle de temps (quelques heures à quelques jours) et par la possibilité qu'un intervenant spécialisé dans le fonctionnement des équipements électriques de puissance soit présent sur site.

3. CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTEME D'AUSCULTATION DES DIGUES RIVE GAUCHE DU RHIN SUR LES BIEFS DE GAMBSHEIM ET D'IFFEZHEIM

3.1 Objectif et contenu du projet

Voies Navigables de France, Direction Interrégionale de Strasbourg, a lancé mi-2007 un projet de diagnostic et d'instrumentation des digues de canalisation de la rive gauche du Rhin au niveau des biefs de Gamsheim et d'Iffezheim, visant à définir un dispositif d'auscultation permettant d'assurer une surveillance efficace de ces digues, afin de garantir la sécurité des personnes et des biens à l'aval des ouvrages, de s'assurer de leur pérennité et d'assurer la disponibilité de la voie d'eau. SAFEGE s'est associée à geophyConsult et EDF pour assurer la conception et la maîtrise d'œuvre de la réalisation d'un tel dispositif d'auscultation en proposant un système de surveillance basé sur des mesures réparties et continues de la température par fibre optique au cœur de l'ouvrage, ainsi que sur des mesures limnimétriques et piézométriques télémetrées en temps réel.

La première partie de ce projet a consisté à réaliser un diagnostic de sûreté des ouvrages, dont le linéaire total est de 38 km, à partir des données historiques et des rapports des études de reconnaissances préalables commanditées par VNF (reconnaisances géophysiques et géotechniques). Bien que ne prévoyant pas la réalisation de calculs de stabilité, ce diagnostic de sûreté a mis en évidence les zones de pathologies des ouvrages et permis d'estimer leurs marges de sécurité vis-à-vis de leurs modes de rupture potentiels. Ces éléments ont conduit à la définition de l'architecture d'un nouveau dispositif d'auscultation adapté aux pathologies observées.

La seconde partie du projet a consisté à concevoir progressivement et de manière de plus en plus détaillée ce dispositif d'auscultation. L'installation de surveillance des fuites par fibre optique a fait l'objet d'une conception spécifique, avec la mise en œuvre d'une modélisation thermo-hydraulique aux éléments finis de la digue, selon différentes sections transversales, de manière à valider le positionnement de la fibre optique au sein des ouvrages. La modélisation montre que le système d'auscultation sera effectivement en mesure, tout au long de l'année, de détecter chacun des scénarii de fuite pris en compte.



Figure 3 : Digue rive gauche du Rhin sur le bief de Gamsheim

Parallèlement à la réalisation de cette installation, une nouvelle consigne de surveillance est en cours d'élaboration, afin de mettre en pratique le concept de maintenance préventive exposé précédemment. Cette partie de l'étude n'est pas présentée dans cet article car elle n'est pas finalisée.

3.2 Diagnostic de sûreté

3.2.1 Méthodologie

Le diagnostic de sûreté des digues rive gauche du Rhin, sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim, a consisté tout d'abord à collecter et analyser les données disponibles sur ces ouvrages, relatives à la conception, à la géomorphologie, à la surveillance, à la maintenance et aux reconnaissances géophysiques et géotechniques. En complément à l'analyse de ces données historiques et de reconnaissances, une inspection visuelle complète des ouvrages a été effectuée par l'équipe projet, afin de mettre en évidence d'éventuels indicateurs de défaillance des ouvrages. Les contraintes environnementales ont également été recensées.

À partir de la synthèse de ces données d'entrée, les modes de rupture potentiels ont pu être sélectionnés et une analyse des barrières de défense des ouvrages vis-à-vis de chaque mode de rupture a été menée.

3.2.2 Sélection des modes de rupture potentiels

L'érosion externe par surverse est le premier mode de rupture potentiel à considérer pour ces ouvrages. Un fort risque correspondant à ce mode de rupture a été identifié en situation de crue de projet sur un linéaire de 1,4 km sur le bief de Gamsheim et sur un linéaire de 10 km sur le bief d'Iffezheim.

Le risque de rupture par érosion externe de type affouillement n'a pas été écarté, bien qu'il paraisse plus faible que le risque lié à la surverse.

L'érosion interne a été identifiée au sein des ouvrages et de leur fondation, à travers des mécanismes à dynamique lente, de type suffusion et érosion de contact. Un chargement hydraulique exceptionnel, tel que la crue de projet, appliqué à ces ouvrages, pourrait engendrer le développement de processus d'érosion interne à dynamique rapide pouvant entraîner la rupture. En particulier, en situation de crue de projet, des écoulements de percolation par-dessus le noyau limoneux se produiraient sur une très grande partie du linéaire.

Enfin, le cisaillement, à travers l'instabilité statique d'une part et les conséquences d'un séisme (instabilité dynamique et liquéfaction) d'autre part, constitue un mode de rupture qui ne peut pas être écarté *a priori* pour ces digues.

3.2.3 Analyse des barrières de défense des ouvrages dans leur état actuel

Face à chaque mode de rupture potentiel, l'ouvrage doit, pour satisfaire aux critères de sécurité, disposer de deux voire trois barrières de défense correctement justifiées et réalisées. Les barrières de défense sont de deux types :

- ✓ les barrières de défense passives, qui sont des composants structurels de l'ouvrage : étanchéité, filtration, stabilité, et évacuation ;
- ✓ la barrière de défense active qui est la surveillance, elle-même décomposée en analyse des inspections visuelles et interprétation des données d'auscultation.
- ✓

Dans les conditions normales d'exploitation ou de crues moyennes du Rhin, la sécurité des digues rive gauche des biefs de Gamsheim et d'Iffezheim repose sur les barrières de défense passives que sont la filtration, l'évacuation, le drainage et l'étanchéité, qui présentent des points de faiblesse, dans la fondation ou au contact entre le remblai et la fondation. La barrière de défense active, la surveillance, est dans ces conditions, primordiale pour assurer la sécurité des digues par l'analyse des informations recueillies au cours des inspections visuelles. Cependant, les désordres mis en évidence dans ce diagnostic, liés principalement à des processus d'érosion interne à dynamique lente, ne permettent pas de garantir la fonctionnalité des barrières étanchéité, évacuation et drainage à long terme.

En situation de crue de projet, la sécurité de ces ouvrages repose toujours sur les barrières de défense stabilité et drainage, mais la barrière étanchéité se trouverait largement en défaut à cause des zones de percolation au-dessus du noyau (sur un linéaire d'au moins 8 km sur le bief de Gamsheim et sur un linéaire d'au moins 17 km sur le bief d'Iffezheim). D'autre part, la présence de gradients hydrauliques exceptionnels pourrait également aggraver les zones de fuites déjà identifiées à la base du remblai en conditions normales, en plusieurs endroits. La barrière surveillance, dans son état actuel, ne serait pas en mesure d'informer le maître

d'ouvrage de désordres d'une manière suffisamment précoce pour disposer du temps nécessaire à la mise en sécurité des personnes et des biens.

Les différents types de pathologies identifiés dans ce diagnostic de sûreté, pouvant se produire en situation d'exploitation normale et/ou en situation de crue de projet, sont schématisés sur la Figure 4 ci-dessous.

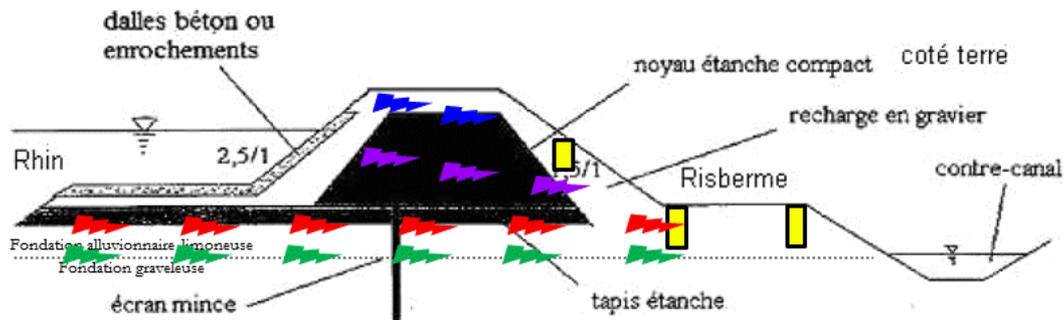


Figure 4 : Schématisation des principales pathologies des digues rive gauche des biefs de Gamsheim et Iffezheim en situation d'exploitation courante et de crue de projet.

- en bleu : écoulement de percolation au-dessus du noyau et érosion du noyau (situation de crue de projet) ;
- en violet : écoulement de percolation à la base du noyau et érosion interne associée (situation d'exploitation normale et de crue de projet) ;
- en rouge : écoulement et érosion interne à l'interface entre le noyau et les matériaux de la fondation superficielle (situation d'exploitation normale et de crue de projet) ;
- en vert : écoulement de percolation et érosion interne de type érosion de contact à l'interface entre la couche de fondation superficielle constituée d'alluvions limoneuses et la couche sous-jacente constituée d'alluvions graveleuses.
- en jaune, les localisations potentielles de la fibre optique, au fond de tranchées de faible profondeur, considérées au début de l'étude de conception de cette installation.

3.3 Conception de l'installation de surveillance des fuites par fibre optique

A partir des conclusions du diagnostic de sûreté et après prise en compte des contraintes liées aux caractéristiques des écoulements et à la nature des fondations, le système d'auscultation par fibres optiques a été conçu pour détecter préférentiellement les fuites au contact remblai / fondation. Les simulations thermo-hydrauliques d'avant-projet ont en effet montré qu'il n'est pas possible de détecter avec la même fibre optique les fuites présentes à ce niveau et les fuites plus profondes situées au contact entre les couches d'alluvions limoneuses et d'alluvions graveleuses. Par ailleurs, il n'était économiquement pas envisageable de creuser une tranchée de 3 à 4 m de profondeur dans la nappe sur un linéaire de 38 km.

La fibre optique sera donc installée dans une tranchée peu profonde (1 m à 1,5 m de profondeur) creusée le long du pied du talus aval des digues. Cette localisation de la fibre optique au sein de l'ouvrage a été validée suivant une méthodologie particulière basée sur une modélisation thermo-hydraulique qui est présentée ci-après. Cette méthodologie consiste, dans un premier temps, à simuler les mesures de température que générerait la fibre optique à l'emplacement où l'on souhaite l'installer, avec la prise en compte d'une anomalie de type fuite au sein de l'ouvrage, puis à vérifier à l'aide des deux modèles de traitement des données brutes de température par fibre optique qui ont été développés par EDF, que la fuite est bien détectée par au moins l'un des deux modèles.

Sur la base des éléments recueillis dans le diagnostic de sûreté et notamment lors du recueil des données historiques, les ouvrages ont été modélisés par quatre profils en travers, représentant les différents types de section rencontrés sur tout le linéaire. Pour chaque profil en travers, un modèle géométrique, un modèle géologique, un modèle géotechnique et un modèle hydraulique ont été définis. L'un de ces quatre profils en travers est représenté sur la Figure 6 ci-dessous, sur la base du profil en travers issu des données historiques représenté sur la Figure 5. Pour chaque profil en travers, un défaut a été modélisé, pour représenter une zone de fuite. Sur le profil en travers représenté sur la Figure 6 ci-dessous, la zone de fuite est modélisée par une couche de 40 cm d'épaisseur à l'interface entre le noyau limoneux et la couche de fondation superficielle

d'alluvions limoneuses, caractérisée par une perméabilité assez élevée de 10^{-4} m/s et entraînant un débit de fuite de $1 \text{ litre} \times \text{min}^{-1} \times \text{m}^{-1}$.

A partir de ces quatre profils en travers, quatre modèles thermo-hydrauliques aux éléments finis ont été construits, dont un des maillages est représenté sur la Figure 7 ci-dessous. Les conditions aux limites de température de l'air, de l'eau du Rhin et de la nappe phréatique issues de chroniques de mesures, ont été appliquées à chaque modèle thermo-hydraulique pour calculer en chaque nœud du maillage les paramètres température, vitesse de l'écoulement et pression interstitielle. Les données de température issues de ces calculs aux points où la position de la fibre optique devait être validée ont ensuite été utilisées comme données d'entrée des modèles d'analyse des données de fibre optique. Lorsque l'anomalie de type fuite est bien identifiée par au moins l'un de ces modèles, la position de la fibre optique au sein de l'ouvrage a été considérée comme validée.

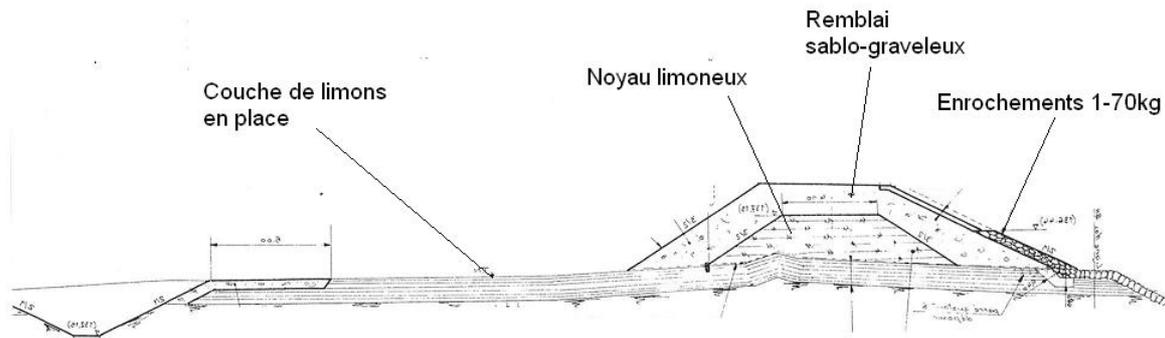


Figure 5 : Plan de conception de la digue de Gamsheim au PK 296,800

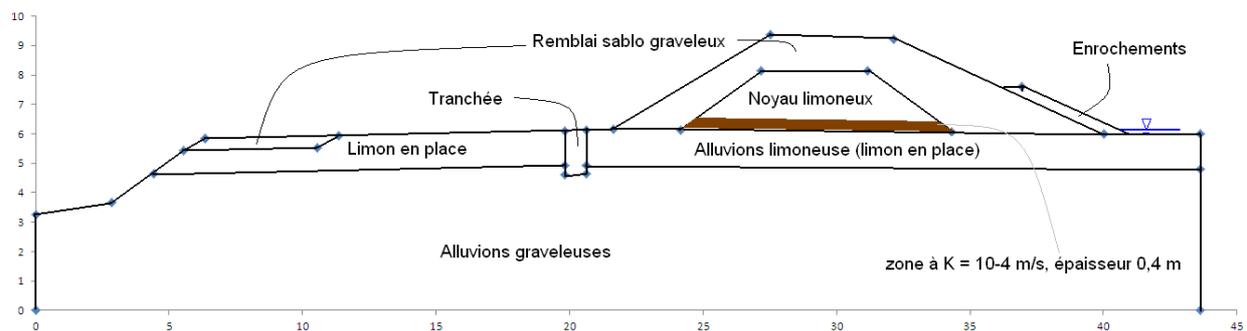


Figure 6 : Exemple de l'un des quatre modèles des ouvrages, présentant à la fois le modèle géométrique, le modèle géologique, le modèle géotechnique et la modélisation d'un défaut

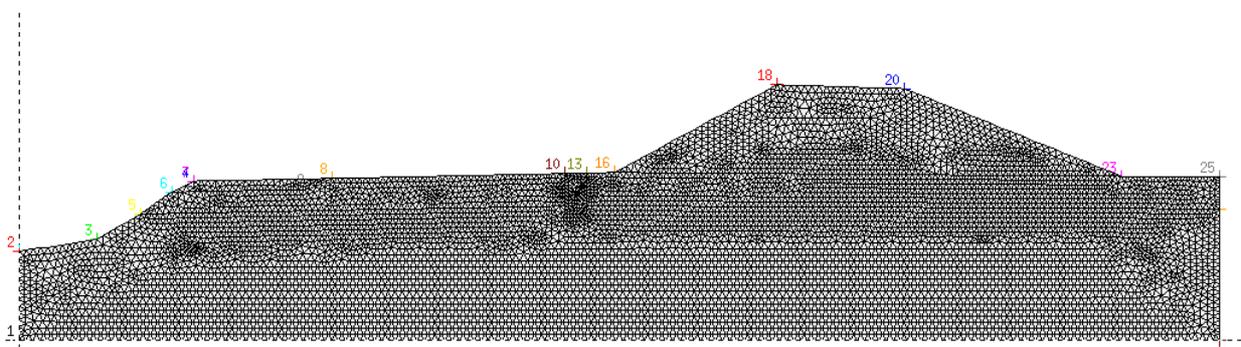


Figure 7 : Maillage utilisé pour la modélisation numérique thermo-hydraulique des ouvrages et localisation des points de mesure

Afin de simuler des conditions d'analyse des données de fibre optique encore plus proches de la réalité, et en particulier pour obtenir des données réparties de température le long des ouvrages, un linéaire de canal synthétique a été reconstitué, pour chaque profil modélisé, à partir des données 2D de chaque modélisation.

Il ne s'agit donc pas d'une modélisation 3D, qui aurait été très coûteuse en temps calcul, mais d'une modélisation « pseudo-3D », constituée de la juxtaposition de sections 2D de l'ouvrage. Comme le montre la Figure 8, le linéaire considéré mesure 100 m de longueur, soit 100 points de mesures (une mesure par mètre linéaire) simulant les mesures de la fibre optique. Ce linéaire représente un tronçon homogène du point de vue du type de section transversale de digue, dont une partie seulement est affectée d'un défaut engendrant un débit de fuite, localisé arbitrairement à 50 m des extrémités du tronçon d'ouvrage. Naturellement, un bruit de mesure aléatoire a été appliqué à l'ensemble des données pour représenter le bruit de mesure attendu en cas de mesures réparties par fibres optiques.

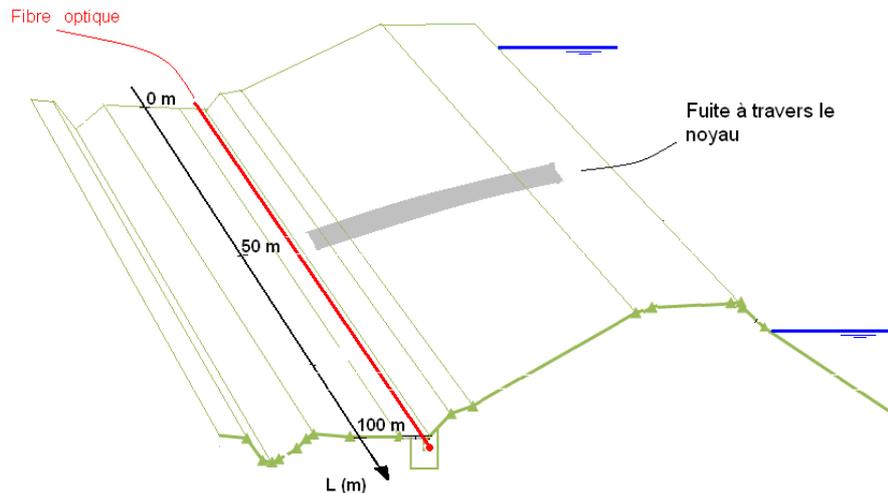


Figure 8 : Schéma de principe du linéaire synthétique

Les températures synthétiques modélisées sont représentées sur la Figure 9, en fonction du temps (abscisse) et de la distance le long de l'ouvrage (ordonnée). Cette figure représente les données brutes de température auxquelles a été soustraite la moyenne spatiale (moyenne des températures mesurées tout le long de la fibre à un instant) pour chaque pas de temps.

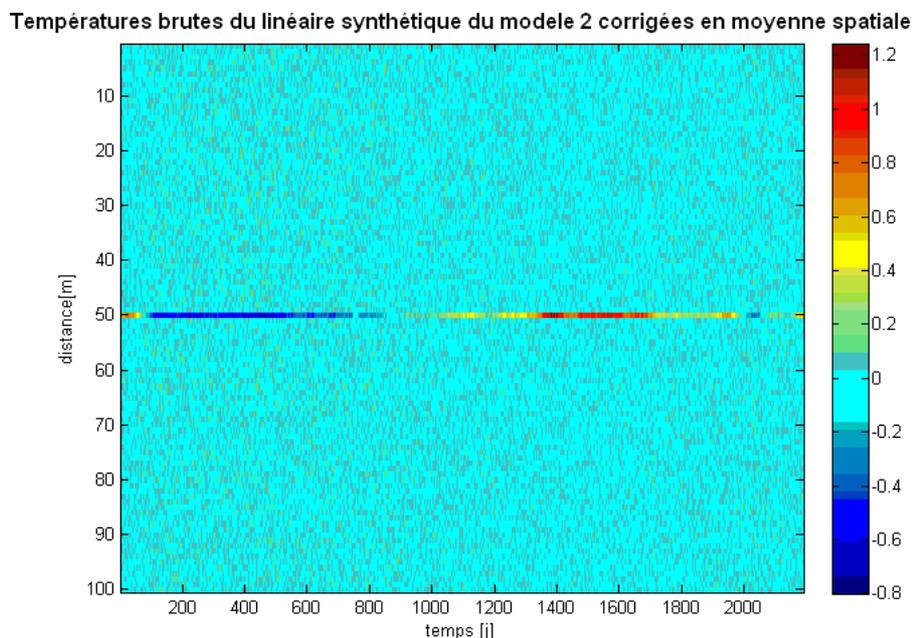


Figure 9 : Températures sur un linéaire de 100 m d'ouvrage correspondant au profil en travers n°2, après soustraction de la moyenne spatiale pour chaque pas de temps, en °C.

Les résultats de l'analyse de ces données de température synthétiques à l'aide du modèle MORITO, développé par EDF et basé sur une approche physico-statistique, sont présentés sur la Figure 10.

Le principe du modèle MORITO est de calculer la température que mesurerait la fibre optique si le transport de chaleur dans son milieu environnant n'était soumis qu'au phénomène de conduction : les

conditions de limite de température (air et eau) appliquées aux frontières de l'ouvrage se propagent au sein de celui-ci avec un certain amortissement et un déphasage (équation de la chaleur sans convection). Pour caler les paramètres de ce modèle, un ajustement statistique est mené en utilisant les mesures de température de la fibre optique. Selon que la température extérieure de l'eau ou de l'air est considérée comme expliquant le mieux la température de la fibre optique, l'une ou l'autre est utilisée pour réaliser cet ajustement statistique, qui consiste à caler les paramètres du modèle pour minimiser l'écart entre la température modélisée et la mesure de température de la fibre optique. L'évolution de la moyenne des carrés de ces écarts tout le long de la fibre optique est ensuite représentée sur un graphique (cf. Figure 10). Les secteurs où cet écart est nettement supérieur au bruit de mesure correspondent à des zones de fuite.

Sur la Figure 10, on peut clairement voir que la zone d'anomalie, située à l'abscisse 50 m, est correctement mise en évidence par ce modèle.

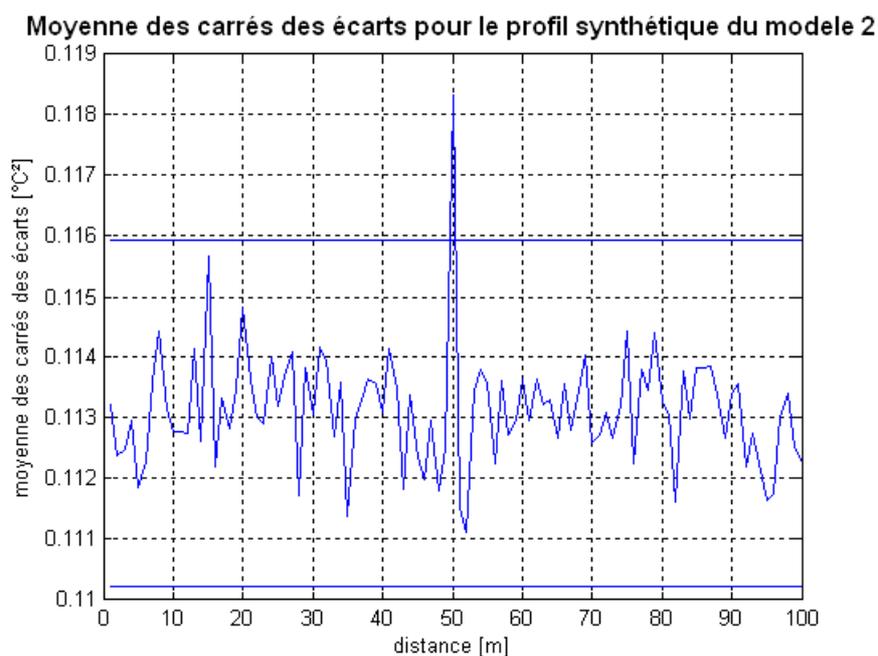


Figure 10 : Résultats de l'analyse MORITO appliquée aux températures du linéaire synthétique relatif au profil en travers n°2

Cette analyse a donc permis de valider que la localisation de la fibre optique au sein de l'ouvrage, retenue a priori, à savoir au pied du talus aval de la digue dans une tranchée d'1 m de profondeur, permettra bien de détecter, par la méthode passive et au moyen du modèle MORITO, une fuite circulant à la base du noyau de la digue.

L'installation de surveillance des fuites par fibre optique sera complétée par des mesures de température de l'air, de l'eau du Rhin et de l'eau de la nappe phréatique.

3.4 Conception de l'installation d'auscultation conventionnelle complémentaire télémétrée

En complément de la surveillance des fuites par fibre optique, le nouveau dispositif d'auscultation qui sera réalisé sur les digues des biefs de Gamsheim et Iffezheim comprendra des mesures piézométriques, des mesures limnimétriques et des mesures topographiques. Les mesures de débit dans les canaux de drainage n'ont pas été retenues pour la surveillance de ces ouvrages, en raison, d'une part, des grandes difficultés à interpréter ces données et, d'autre part, des dimensions du canal de drainage qui est confondu avec la rivière Ill sur une partie du linéaire. Les nombreux affluents et diffluents des canaux de drainage, ainsi que leur alimentation par la nappe phréatique rendent très compliquée l'estimation des débits percolant à travers les digues.

Les mesures piézométriques sont un dispositif complémentaire qui aide à la compréhension des phénomènes qui se produisent dans des zones d'anomalies identifiées de longue date comme des zones de faiblesse des

ouvrages. Elles contribuent à la fois au suivi à long terme du comportement hydraulique des ouvrages et à l'interprétation des anomalies détectées en situation de crue ou post-sismique. Une partie des piézomètres existants actuellement sur ces digues et des nouveaux piézomètres qui seront installés dans le cadre de ce projet sera équipée de systèmes de télémesure, autonomes en énergie et protégés contre le vandalisme.

Les mesures limnimétriques dans le Rhin auront pour objectif, en étant positionnées judicieusement sur chaque bief, de permettre de déterminer avec une bonne précision, par interpolation, le niveau d'eau du Rhin à chaque instant sur tout le linéaire des ouvrages. Hors période de crue, ces mesures contribueront à l'interprétation des données de piézométrie. En période de crue, elles constitueront également une mesure d'alerte vis à vis du risque de surverse du noyau des digues. Les limnigraphes qui seront installés dans le cadre de ce projet seront équipés des mêmes dispositifs d'alimentation en énergie que les piézomètres.

La technologie retenue pour la télétransmission des données d'auscultation entre la centrale d'acquisition associée à chaque capteur et le local de VNF où l'ensemble des données d'auscultation sera centralisé et sauvegardé permettra de résister à des événements hydro-météorologiques violents et sera protégée contre le vandalisme.

En complément des systèmes de mesure installés sur les ouvrages, des mesures topographiques seront effectuées tous les 10 ans. Ces mesures topographiques ne participent qu'au suivi à long terme des ouvrages. Elles permettront d'identifier et de surveiller des zones de tassement sur la crête ou des zones de déformation sur le talus aval ou la risberme.

3.5 Données sur l'estimation du coût de conception et de réalisation du système d'auscultation

Les coûts d'ingénierie pour la conception et la réalisation du nouveau système d'auscultation de ces digues, incluant la rédaction de la nouvelle consigne de surveillance, sont de l'ordre de 250 k€.

Les coûts de réalisation de ce système, incluant les coûts de génie civil et les coûts des fournitures, sont actuellement estimés à 2,6 M€.

On peut donc en déduire un coût de 75 k€ au kilomètre, pour la réalisation d'un système d'auscultation complet, sans réalisation concomitante d'un confortement structurel de l'ouvrage, et incluant une fibre optique installée dans une tranchée peu profonde en pied de talus de l'ouvrage et des équipements d'auscultation conventionnels téléométrés.

3.6 Exploitation et maintenance de ce nouveau système d'auscultation

Pour remplir pleinement ses objectifs, ce nouveau système d'auscultation devra, une fois réalisé et réceptionné, être exploité et maintenu par une équipe d'ingénieurs et techniciens disposant de compétences approfondies et de références dans les domaines suivants :

- diagnostic et surveillance des ouvrages hydrauliques en remblai, avec une connaissance approfondie de leurs modes de rupture potentiels et des moyens et méthodes d'analyse permettant d'effectuer un diagnostic. Cette compétence sera capitale lors de la mise en œuvre du concept de maintenance préventive ;
- maintenance et interprétation des moyens d'auscultation conventionnels des ouvrages hydrauliques en remblai (piézomètres, limnigraphes, mesures topographiques). Cette compétence sera capitale pour d'une part maintenir en état de fonctionnement satisfaisant ces équipements de mesure et d'autre part pour interpréter correctement les données ;
- analyse et interprétation des données de température réparties par fibre optique. Il s'agira de la compétence centrale pour l'exploitation de ce système d'auscultation. Cette compétence nécessite de disposer de logiciels d'analyse des données de température par fibre optique ayant fait l'objet de publications et de validations sur plusieurs ouvrages réels de même type et d'avoir acquis suffisamment d'expérience dans leur mise en œuvre ;
- maintenance de l'installation de surveillance des fuites par fibre optique. Cette compétence dans le domaine des installations de fibre optique sera capitale pour assurer la pérennité long-terme de cette installation.
- maintenance des installations de télémesure. Elle exigera des compétences dans les technologies d'instrumentation et de télétransmission des données. Elle sera capitale pour assurer la pérennité à long terme de l'installation de

télémesure et garantir la fonctionnalité de la surveillance, en particulier en période d'événement météorologique exceptionnel, lorsque les réseaux traditionnels (téléphone, électrique, etc.) seront susceptibles d'être mis en défaut ;

- archivage à long terme des données d'auscultation. L'échelle de temps de cet archivage sera celle de la vie de l'ouvrage, c'est-à-dire au moins la centaine d'années. Les choix technologiques et l'organisation humaine associée devront donc se positionner avec des perspectives de très long terme.

Il appartiendra à VNF de mettre en place une organisation humaine, internalisée ou externalisée, qui disposera de ces compétences pour exploiter et maintenir sur le long terme ce système d'auscultation, ces missions étant hors du domaine du présent marché de maîtrise d'œuvre.

4. SURVEILLANCE D'UNE DIGUE MARITIME PAR UNE SOLUTION D'AUSCULTATION COMBINANT UN GEOTEXTILE ET DES MESURES DE TEMPERATURE ET DE DEFORMATION PAR FIBRE OPTIQUE

4.1 La mesure simultanée température-déformation par le capteur composite géotextile fibres optiques

Outre les problèmes de fuite et d'érosion évoqués précédemment, les ouvrages hydrauliques en terre sont sujets comme tout ouvrage en terre à des mouvements de sol, tassements, fissuration ou glissements, qui peuvent s'avérer également préjudiciables pour leur sécurité. L'association de câbles optiques sur un géotextile permet de détecter des déformations de sol très faibles, inférieures à 0,01%, comme cela a été montré sur de nombreux ouvrages depuis près de 8 ans [3]. En effet, le géotextile offre un excellent frottement avec le sol et transmet les mouvements du sol vers le câble optique sur lequel il est liaisonné. La partie géotextile apporte également ses fonctions hydrauliques et mécaniques, notamment le renforcement du sol ou sa filtration. Le géotextile offre d'autre part un bon niveau de protection des fibres optiques et la capacité à porter plusieurs lignes optiques.

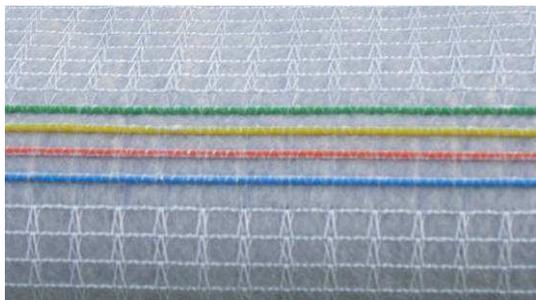


Figure 11 : Le capteur composite textile et les câbles optiques (en couleur) pour la mesure simultanée de la température et de la déformation.

Par ailleurs, la mesure de la déformation des sols pour la détection des mouvements de sol est très complémentaire à la mesure de la température pour la détection des fuites et permet d'améliorer la détection des phénomènes d'érosion occasionnant des conduits ou des cavités [4].

4.2 Le site de Boston (UK)

Boston est une ville de la côte Est de l'Angleterre sujette à un risque élevé d'inondation. Elle est raccordée à la mer par un canal qui est soumis à un fort marnage dû à la marée jusqu'à 6 m d'amplitude au printemps (Figure 12). Une digue en terre du centre ville à proximité de l'écluse « Grand Sluice » présente des signes d'instabilité avec des zones de glissement. Cet ouvrage est géré par l'« Environment Agency » et il a été choisi comme tronçon de démonstration de technologies d'auscultation dans le cadre du projet européen Urbanflood du 7ème PCRD [5]. Il a été instrumenté sur une longueur de 300 m environ par le capteur composite géotextile fibre optique pour suivre l'évolution des glissements de terrain. Ainsi, avec une résolution longitudinale de 1m, ce sont 600 points qui sont acquis en simultanément à chaque pas de mesure.



Figure 12 : Le canal au centre de Boston, à marée haute et à marée basse.

4.3 Installation du système d'auscultation

Le capteur conditionné en rouleaux de 0,76 m de large et de 600 m de long a été déroulé en continu sur deux niveaux le long du talus, permettant d'intercepter les loupes de glissement (Figure 13). Les bandes sont placées dans une tranchée peu profonde de 20 ou 30 cm de profondeur, afin de ne pas créer d'instabilité locale. Pour la même raison, l'installation est réalisée par sections successives de 20 m de long. Les câbles optiques sont raccordés directement à l'instrumentation placée dans un local de l'écluse situé à proximité.

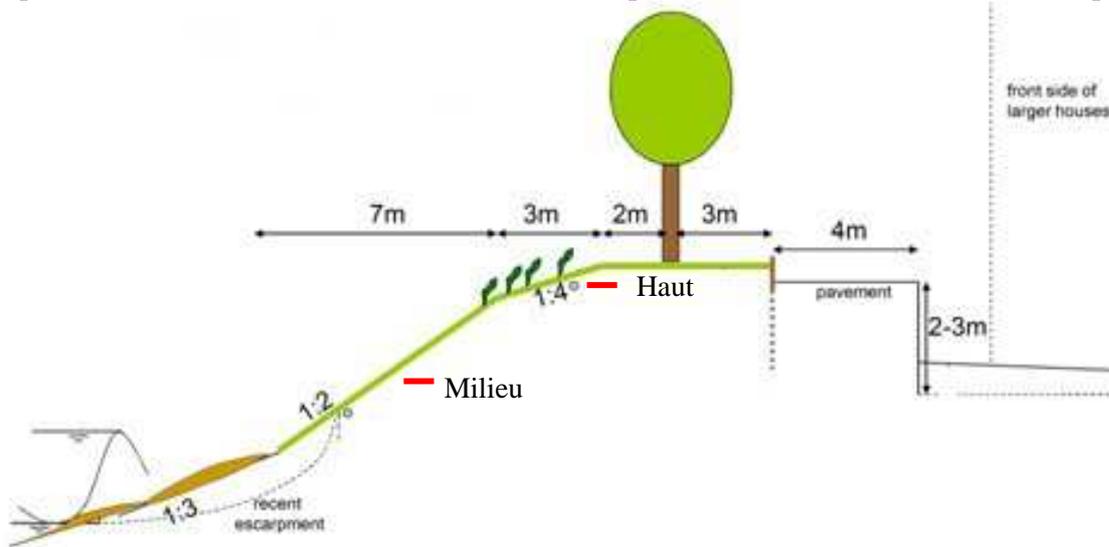


Figure 13 : Coupe de la digue auscultée et position des deux niveaux de bandes capteur (en rouge).



Figure 14 : Déroulage de la bande capteur dans la tranchée inférieure.

4.4 Premières mesures

Les mesures des déformations le long du capteur sont effectuées par TenCate Geosynthetics. Les données brutes sont ensuite analysées par les partenaires du projet Urbanflood. L'interrogateur opto-électronique

Brillouin connecté au capteur a une résolution de mesure de la déformation inférieure à 100 microdéformations, soit 0,01%. La résolution longitudinale pour ce projet est de 50 cm.

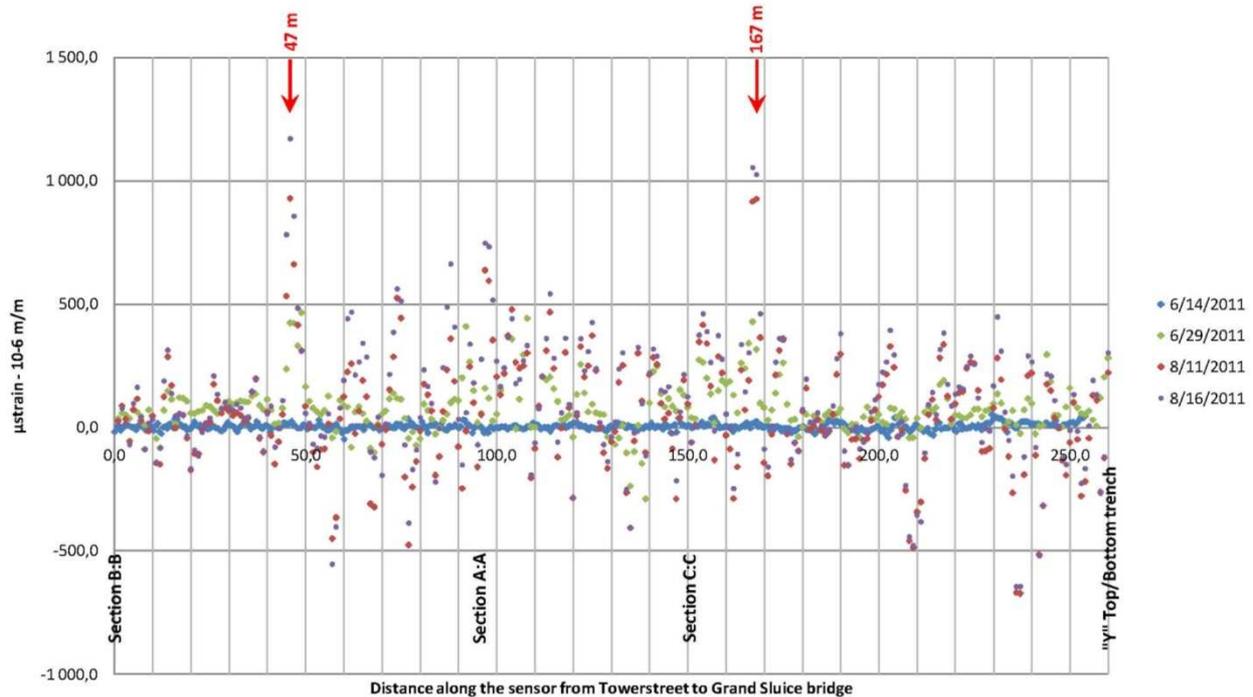


Figure 15 : Evolution des déformations relatives (référence 14/06/11) le long de la digue mesurées par la bande supérieure pendant deux mois consécutifs.

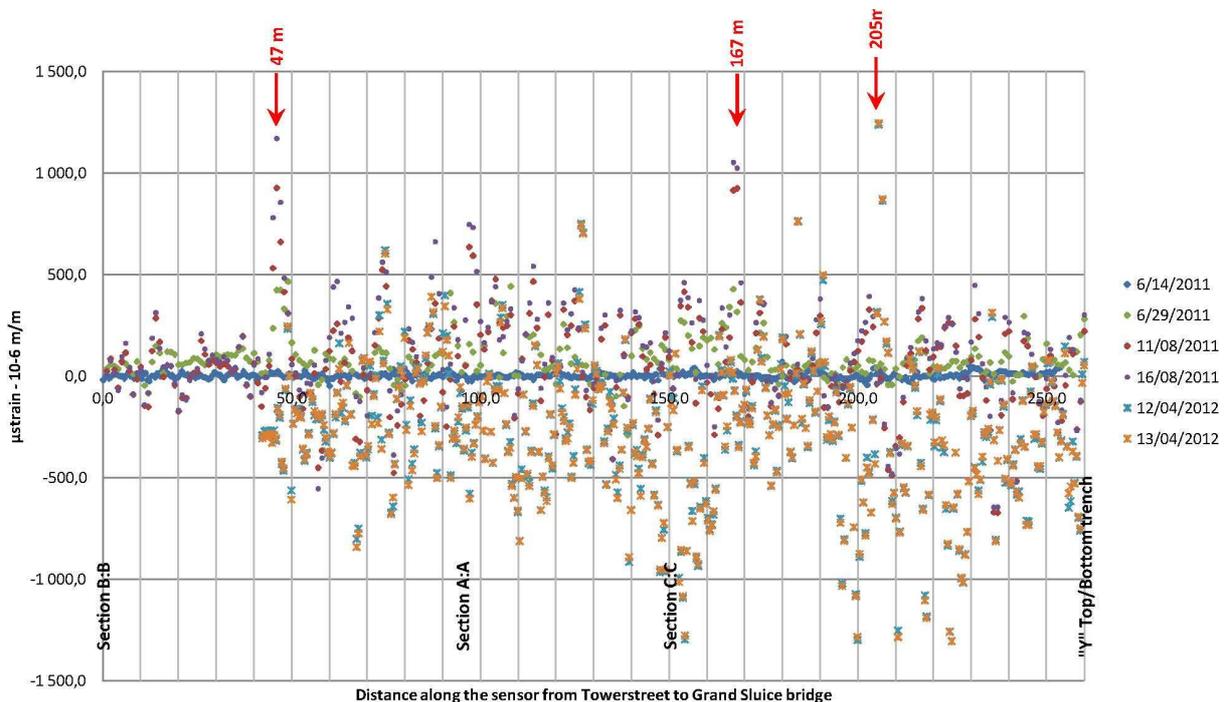


Figure 16: Evolution des déformations relatives (référence 14/06/11) le long de la digue mesurées par la bande supérieure pendant dix mois consécutifs.

La première série de mesures a été effectuée en continu sur une période de 2 mois. On observe sur la figure 15 que l'évolution des déformations relatives le long de l'ouvrage est assez faible, en moyenne 500 microdéformations, soit 0,05%. Deux sections, respectivement à 47 m et à 167 m, montrent des déformations supérieures à 0,1%. Un autre point de mesure réalisé après 9 mois (Figure 16) indique une stabilisation du mouvement à ces deux abscisses et l'apparition d'un nouveau mouvement à 205 m. L'ouvrage reste néanmoins stable, sans zone de rupture évolutive. Les mesures périodiques continuent, à raison de deux par an environ.

4.5 Budget

Le budget couvrant la fourniture et l'installation des capteurs TenCate GeoDetect® S-BR, incluant les travaux de terrassement (ouverture et comblement de la tranchée), est d'environ 25 k€, soit environ 40 € par mètre de bande capteur posée. Sur des ouvrages hydrauliques traditionnellement plus longs, ce montant unitaire peut être fortement réduit.

Dans le cadre de ce projet expérimental, le choix du demandeur s'est porté sur une mesure initiale continue sur une période de 2 mois, nécessitant la location d'une instrumentation opto-électronique température/déformation associée à un modem pour le contrôle à distance et l'envoi des données, tout cela pour un montant d'environ 20 k€. Les mesures suivantes sont réalisées à la demande.

Il convient de rajouter à ce budget les études préliminaires de conception, comme cela a déjà été mentionné au § 3.5, ainsi que l'analyse des données brutes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Voies Navigables de France de les avoir autorisés à présenter cette communication sur le projet de maîtrise d'œuvre d'un système d'auscultation des digues rive gauche des biefs de Gambenheim et d'Iffezheim sur le Rhin, ainsi que les partenaires du projet Urbanflood et l'Environment Agency en charge du site de Boston.

Ils remercient également tous les acteurs ayant travaillé sur ces projets pour leur contribution dans l'élaboration de cette communication collective.

REFERENCES

- [1] J.-M. Hénault, S. Blairon. 2006. Exemple d'application de capteurs à fibre optique. Détection de fuites dans les digues en terre par thermométrie à fibre optique. CMOI.
- [2] S. PERZLMAIER, M. AUFLEGER, M. CONRAD. 2004. Distributed Fiber Optic Temperature Measurements in Hydraulic Engineering. Prospects of the Heat-up Method. ICOLD annual meeting, Seoul.
- [3] O. ARTIERES, L. BRIANCON, A. ROBINET, 2011. Auscultation des ouvrages en terres avec un système de détection et d'alerte par fibres optiques. Compte-rendu de la conférence Rencontres Géosynthétiques 2011, 22-24 Mars 2011, Tours, pp. 197-208.
- [4] O. ARTIERES, Y.L. BECK, A.A. KHAN, P. CUNAT, J.J. FRY, J.R. COURIVAUD, C. GUIDOUX, P. PINETTES, 2010. Assessment of Dam and Dikes behaviour with a fiber optic based monitoring solution. Proc. of the 2nd Dam Maintenance Conference, Zaragoza, November 2010, pp. 79-86.
- [5] J. SIMM, D. JORDAN, A. TOPPLE, I. MOKHOV, A. PYAYT, T. ABDOUN & V. BENNETT, J. BROEKHUIJSEN & R. MEIJER, 2012. Interpreting sensor measurements in dikes - experiences from UrbanFlood pilot sites. Proc. of the FLOODrisk 2012 conference, Rotterdam, 20-22 November 2012, Rotterdam, The Netherlands. To be published.
- [6] J. DORNSTÄDTER, B. HEINEMANN, 2012. Temperature as Tracer for In situ Detection for Internal Erosion. Proc of the International Conference on Scour and Erosion-6, Paris, 27-31 août 2012, pp. 199-205.
- [7] C. VEDRENNE, J.-P. FABRE, J.-R. COURIVAUD, J.-J. FRY, 2009. Détection et quantification des fuites par thermométrie distribuée le long d'une fibre optique. 23^{ème} congrès CIGB, Brasilia, juin 2009.
- [8] A. A. KHAN, P. CUNAT, Y.-L. BECK, J.-I. MARS, V. VRABIE, J.-P. FABRE, 2010. Distributed fibre optic temperature sensors for leakage detection in hydraulic structures. 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010.