



HAL
open science

Retour d'expérience sur l'instrumentation des levées de Loire

Lucile Saussaye, Y. Boussafir, Sébastien Patouillard

► **To cite this version:**

Lucile Saussaye, Y. Boussafir, Sébastien Patouillard. Retour d'expérience sur l'instrumentation des levées de Loire. Colloque Dignes 2024, Inrae, Mar 2024, Aix-en-Provence, France. 10.5281/zenodo.10620255 . hal-04536062

HAL Id: hal-04536062

<https://hal.science/hal-04536062>

Submitted on 7 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Retour d'expérience sur l'instrumentation des levées de Loire

Feedback on the Loire levees instrumentation

L. Saussaye¹, Y. Boussafir², S. Patouillard³

¹ Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, lucile.saussaye@cerema.fr

² Université Gustave Eiffel, GERS/SRO, Marne-la-Vallée, France, yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

³ DREAL Centre-Val de Loire, SEBRINAL/DETL, Orléans, France,
sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

Les références sur l'instrumentation des digues de protection sont relativement rares comparées à celles concernant les barrages et plus généralement la géotechnique. Les opérations de travaux de fiabilisation des systèmes d'endiguement de la Loire moyenne ont amené une réflexion sur l'opportunité de mettre en place des dispositifs d'auscultation sur certains tronçons de digues afin de répondre à plusieurs enjeux : s'assurer globalement de la pérennité des ouvrages, surveiller l'évolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique et assurer la surveillance des ouvrages dans différentes situations. L'article s'appuie sur 4 cas documentés dans les départements d'Indre-et-Loire et de Loir-et-Cher :

- la mise en place d'un suivi de la perméabilité de la levée de Veuves (pour la pérennité de la solution de confortement de corps de digue par tranchée de sol mixé et durabilité du matériau sol-ciment) ;
- le suivi de la durabilité du matériau sol-ciment dans l'écran étanche de la levée de Tours Loire amont à Montlouis-sur-Loire ;
- l'instrumentation d'une recharge aval de digue à La Riche pour l'observation de son comportement vis-à-vis de son environnement afin d'adapter la conception de tels ouvrages au changement climatique ;
- la perspective d'instrumentation dans la levée de La Riche (pour la surveillance en crue).

Pour chacun de ces cas, les auteurs présentent le contexte et la mise en œuvre de l'instrumentation, les caractéristiques des différents équipements (essais, forages, capteurs, sondes, piézomètres, caméras) et protocoles de suivi. Même si l'utilité des cas présentés n'est pas remise en cause, l'opportunité de l'instrumentation est questionnée au regard des limites liées aux dimensions des ouvrages (plusieurs dizaines de kilomètres) et aux échelles de temps considérées (plusieurs centaines d'années). La conclusion met l'accent sur les perspectives de développement des dispositifs d'instrumentation des digues qui font appel à l'inventivité tout en gardant une certaine humilité compte tenu de ces limites.

Mots-clés

digue, instrumentation, perméabilité, capteur, piézomètre

Abstract

There are relatively few references on the instrumentation of protective dykes compared with dams and, more generally, geotechnical engineering. Work to improve the reliability of diking systems on the Middle Loire has led to consideration of the advisability of installing monitoring systems on certain sections of dike in order to address a number of issues: the durability of reinforcement works, changes in the behaviour of a dike in the face of climate change, and flood monitoring of works. The article is based on 4 documented cases in the Indre-et-Loire and Loir-et-Cher departments:

- monitoring the permeability of the Veuves levee (to ensure the long-term viability of the solution of reinforcing the body of the dyke using a mixed soil trench and the durability of the soil-cement material);
- monitoring the durability of the soil-cement material in the watertight screen of the Tours Loire upstream levee at Montlouis-sur-Loire;
- instrumentation of a downstream dyke recharge at La Riche to observe its behaviour in relation to its environment, with a view to adapting the design of such structures to climate change;
- the prospect of instrumentation in the La Riche levee (for flood monitoring).

For each of these cases, the authors present the context and implementation of the instrumentation, the characteristics of the various pieces of equipment (tests, boreholes, sensors, probes, piezometers, cameras) and the monitoring protocols. Although the usefulness of the cases presented is not called into question, the appropriateness of instrumentation is questioned in the light of the limitations associated with the size of the structures (several tens of kilometres) and the time scales considered (several hundred years). The conclusion emphasises the prospects for developing instrumentation systems for dykes, which call for inventiveness and a certain humility given these limitations.

Key Words

levee, instrumentation, permeability, sensor, piezometer

Introduction

Les digues en terre constituent un élément majeur des systèmes d'endiguement et de protection contre les inondations et les submersions marines. Contrairement aux barrages, leur gestion et leur surveillance sont confrontées à des problématiques spécifiques comme :

- la gestion et la surveillance de très longs linéaires ;
- des configurations de gestion complexes, comme par exemple gérer simultanément les systèmes en rive gauche et rive droite en contexte fluvial, gérer des ouvrages longitudinaux et transversaux, etc.
- des ouvrages anciens dont la composition et la nature de matériaux mis en œuvre sont hétérogènes, parfois méconnues ;
- des problèmes d'accessibilité aux sites en sécurité en empruntant des voies routières banalisées et des accès limités, surtout en période de crue.

Bien que cela ne soit pas demandé réglementairement, de nombreux gestionnaires de digues ont ressenti ces dernières années le besoin d'un investissement particulier en matière d'instrumentation de leurs ouvrages, parfois anciens, en complément des dispositifs existant de visite de surveillance. C'est ainsi que certaines opérations de travaux de fiabilisation des systèmes d'endiguement de la Loire moyenne ont conduit à mettre en place des dispositifs d'auscultation et d'instrumentation sur les tronçons présentés dans l'article.

Le rôle de l'instrumentation vis-à-vis des mécanismes de défaillances des digues

Les références sur l'instrumentation des digues de protection sont relativement rares comparées à celles concernant les barrages et plus généralement la géotechnique. D'après la norme NF EN 18674-1, l'instrumentation doit pouvoir répondre à une question précise. Un plan d'instrumentation est proposé en réponse à cette question. Dans le cas des digues de protection, le plan d'instrumentation pourrait être établi pour répondre à 2 principaux objectifs :

1. Surveiller la performance de l'ouvrage en période de vigilance (par exemple, en période de crue) ;
2. Évaluer la performance de l'ouvrage lors des étapes de surveillance effectuées par le gestionnaire, typiquement en complément des visites.

Le 1^{er} objectif est celui qui intéresse le plus les gestionnaires. Il a notamment pu être testé par l'usage de la fibre optique complétée par d'autres dispositifs comme les piézomètres par exemple. Le dispositif permet alors la surveillance en continu de longs linéaires sur un seul écran de contrôle avec des dispositifs d'alerte permettant de cibler les interventions des opérateurs sur le terrain. Il fonctionne d'autant mieux que la digue est régulièrement mise en charge (idéalement en continu comme pour les digues de canaux) et ne s'adapte pas forcément aux grands linéaires de digues sèches rarement sollicitées. De nombreux gestionnaires ayant expérimenté la fibre optique pour cet usage ont pu faire état de retour d'expérience sur ces pratiques [1]. Ce retour est positif dans le cas des digues en charge, lorsque le contraste de température et le sol est suffisant pour permettre la détection de fuite.

Le 2^e objectif, qui porte sur l'évaluation de la performance dans le temps grâce à une instrumentation, est par contre novateur et nécessite encore des développements et des réflexions.

Les cas les plus couramment rencontrés ces dernières années sur la Loire sont souvent initiés pour vérifier la performance de certains renforcements et tester leur durabilité. Ce suivi permet alors d'améliorer les connaissances en matière de techniques de renforcement des digues.

La DREAL Centre-Val de Loire, en tant que maître d'œuvre des travaux de fiabilisation des digues domaniales de la Loire moyenne, s'est investie pour répondre à cet objectif durant ces dernières années, au travers d'expérimentations en vraie grandeur, nécessitant une instrumentation dédiée.

Plus globalement, l'instrumentation est amenée à se développer en tant qu'outil d'aide à la décision et d'information sur le comportement et le suivi de l'ouvrage ou d'un matériau dans le temps, car elle permet : (1) d'éviter de multiplier les reconnaissances lors de chaque diagnostic, (2) de compléter l'inspection visuelle de surface par des éléments d'informations portant sur les parties d'ouvrages difficilement accessibles et de tester la performance de chacune des fonctions, (3) de disposer d'outils de pronostic en matière de durée de vie résiduelle et de gestion prévisionnelle de l'infrastructure.

Cependant, la réglementation n'étant pas établie en matière d'instrumentation de digues, certains maîtres d'ouvrages peuvent se révéler frileux à mettre en place des outils « invasifs » par crainte de générer des défauts.

La stabilité de l'ouvrage doit pouvoir s'examiner en rapport avec les 6 mécanismes de rupture redoutés classiquement (Tableau 1) [1]. Trois mécanismes spécifiques s'ajoutent à la liste en cas de risque sismique, et la liste peut être rallongée par autant de mécanismes redoutés pour l'ouvrage. Ainsi, des aléas naturels peuvent faire l'objet d'un suivi spécifique comme :

- une situation de grand glissement de terrain ou d'effondrement de versant dans la retenue ;
- une situation d'avalanche dans la retenue ;
- un effondrement karstique ;
- voire le soulèvement de blocs de sols fissurés par la sécheresse comme évoqué par Dyer *et al.* [2].

Le plan d'instrumentation doit s'adapter au suivi des mécanismes les plus probables, selon l'analyse des risques de l'ouvrage. Le Tableau 1 récapitule les objectifs recherchés et les mesures physiques envisageables pour chaque mécanisme de rupture redouté. Les études de dangers peuvent permettre de hiérarchiser les sites à surveiller au regard des mécanismes de défaillance les plus probables, car une des questions à envisager pour le plan d'instrumentation porte sur la localisation des dispositifs.

TABLEAU 1. Liste des mécanismes de défaillance redoutés sur une digue, des objectifs à rechercher au travers d'un plan d'instrumentation et mesures envisageables.

Mécanisme de défaillance surveillé	Objectif à suivre ou mesurer par l'instrumentation	Mesures physiques et capteurs envisageables
Surverse (et érosion externe régressive)	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi du niveau d'eau libre dans le cours d'eau - Croisement avec la topographie de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Limnimètre - Inspection visuelle : localisation des points bas et des zones de surverse (caméra, drone, inspection à pied, etc.) - Mesure de topographie (Lidar, photogrammétrie, etc.)

Mécanisme de défaillance surveillé	Objectif à suivre ou mesurer par l'instrumentation	Mesures physiques et capteurs envisageables
Erosion interne	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi des modifications de l'écoulement d'eau dans l'ouvrage et localisation - Suivi de l'efficacité des filtres existants le cas échéant - Localisation de résurgence d'eau au travers de l'ouvrage - Suivi topographique de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Variation de température (fibre optique, thermographie infrarouge) - Variation de teneur en eau (sonde TDR) - Inspection visuelle : localisation des résurgences (cheminée de sable/sand boil) ou des points de soutirages (cavité) (caméra, drone, inspection à pied, etc.) - Mesure de topographie (Lidar, photogrammétrie, etc.)
Défaut de stabilité mécanique de la digue : glissement côté terre, glissement côté eau, déstabilisation générale, etc.	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi des déformations de l'ouvrage - Évaluation des modules d'élasticité des matériaux - Suivi topographique de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Inclinomètre, extensomètre en forage, fibre optique - Inspection visuelle : localisation des bombements en talus, de la création de fissures longitudinales et en arc de cercle (caméra, drone, inspection à pied, etc.), localisation des zones de rupture - Mesures de teneurs en eau (sonde TDR) - Mesure de topographie (Lidar, photogrammétrie, etc.)
Défaut de capacité portante du sol support au droit de la digue et de stabilité au grand glissement	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi des déformations du sol de fondation de l'ouvrage - Suivi topographique de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Inclinomètre, extensomètre, fibre optique - Tassomètres, profilomètre hydrostatique - Cellule de pression interstitielle (CPI) - Mesure de topographie (Lidar, photogrammétrie, théodolite, etc.)
Soulèvement hydraulique du terrain naturel (côté terre)	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi du niveau d'eau dans le sol de fondation - Suivi de la pression interstitielle de l'eau dans le sol de fondation - Localisation de résurgence d'eau au niveau du sol de fondation 	<ul style="list-style-type: none"> - Piézomètre, cellule de pression interstitielle (CPI) - Inspection visuelle : localisation des bombements ou des fissurations du sol de fondation, localisation des résurgences d'eau (caméra, drone, inspection à pied, etc.) - Mesures de température par caméra thermique ou fibre optique - Mesure de contraintes et de température sur fibre optique
Erosion externe (affouillement côté eau)	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi visuel des zones d'érosion - Suivi topographique de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection visuelle : localisation des zones d'érosion en talus (caméra, drone, inspection à pied, etc.) - Mesure de topographie (Lidar, photogrammétrie, etc.), bathymétrie
Cas de séisme : liquéfaction, situation de seiche, rupture de l'ouvrage	<ul style="list-style-type: none"> - Enregistrement de l'intensité sismique 	<ul style="list-style-type: none"> - Accéléromètre, géophones tridimensionnels
Effondrement karstique	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi des déformations et des contraintes dans l'ouvrage - Suivi des variations du toit de la nappe 	<ul style="list-style-type: none"> - Profil tassométrique longitudinal, géogrille équipée de fibre optique - Inspection visuelle : recherche d'affaissements, d'apparition de cavités en surface (caméra optique, caméra thermique, drone, inspection à pied, etc.) - Suivi topographique (Lidar, photogrammétrie, théodolite) - Piézomètre

Mécanisme de défaillance surveillé	Objectif à suivre ou mesurer par l'instrumentation	Mesures physiques et capteurs envisageables
Soulèvement hydraulique de blocs fissurés par la sécheresse	<ul style="list-style-type: none"> - Indicateurs de sécheresse - Suivi du niveau d'eau libre dans le cours d'eau (le niveau critique étant inférieur à la cote de la crête de l'ouvrage) 	<ul style="list-style-type: none"> - Inspection visuelle : localisation de réseaux de fissures (caméra, drone, inspection à pied, etc.) - Mesures de teneur en eau et de succion - Limnimètre (le niveau d'eau recherché étant à définir en fonction de la profondeur des fissures)

Instrumentation pour suivre la pérennité d'un renforcement de digue

Mise en place d'un suivi de la perméabilité de la levée de Veuves

La levée de Veuves fait partie du grand système d'endiguement protégeant le val de Cisse-Vouvray en rive droite de la Loire entre Blois et Tours. En 2014, un écran étanche par tranchée de sol mixé (*deep soil mixing*), tel qu'illustré par la Figure 1, a été constitué dans le corps de cette levée sur un tronçon d'un kilomètre.



FIGURE 1. Vue générale de la réalisation d'un écran par tranchée de sol mixé (source : DREAL CVL/DETL © Cédric Helsly).

Suite aux contrôles de qualité du mélange sol-ciment réalisés en phase d'exécution de l'écran, ne permettant pas d'atteindre les critères d'étanchéité en tout point de l'écran, un suivi de l'écran a été mis en place pour évaluer la pérennité de la solution de confortement de la levée. Ce suivi consiste à répéter les mesures de perméabilité in situ dans l'écran (Figure 2), tous les 1 à 2 ans, sur une période de 10 ans. Au-delà de cette période, l'avis d'un organisme agréé sera sollicité afin de définir la nécessité de poursuivre le suivi et les modalités de celui-ci. Les résultats d'essais ayant conduit au suivi ainsi que les résultats du suivi sont présentés de manière détaillée dans d'autres communications [3-4]. Le suivi a permis de confirmer que l'écran améliore effectivement l'étanchéité de la digue, en traitant les hétérogénéités de la structure dont plusieurs réseaux abandonnés.



FIGURE 2. Mise en place d'un tubage d'essai de perméabilité pour le suivi à 10 ans d'une tranchée de sol mixe (source : DREAL CVL/DETL).

Mise en place d'un suivi de la durabilité du matériau sol-ciment dans l'écran étanche à Montlouis-sur-Loire

La levée de Tours Loire amont a également été renforcée en 2017 à Montlouis-sur-Loire par un écran étanche réalisé en tranchée de sol mixé. Afin d'améliorer la connaissance de ce type de confortement, mis en œuvre depuis 4 ans sur les levées de la Loire moyenne, il est décidé d'instrumenter cet écran. La Figure 3 illustre la mise en place de sondes TDR dans l'écran venant d'être réalisé, entre 1,50 et 5,50 m de profondeur. Elles mesurent la teneur en eau volumique et la température de l'écran, toutes les 3 heures, afin d'enregistrer les variations journalières et/ou de détecter un événement météorologique ou une crue. L'instrumentation s'accompagne de mesures comparatives dans le corps de digue, à 1 m de profondeur, ainsi que de 2 piézomètres mis en place de part et d'autre de l'écran, afin d'évaluer les variations de la nappe et l'influence de l'écran sur celles-ci, et d'une station météorologique permettant d'évaluer l'influence des variations de l'environnement sur le comportement de l'écran. L'écran étanche et le corps de digue subissent des cycles d'humidification-séchage dont l'intensité varie selon les saisons. En surface, l'écran subit des variations de température similaires à celles du corps de digue. Les variations de teneur en eau volumique et de température sont d'autant plus importantes que la mesure est proche de la surface. Le suivi, prolongé jusqu'en 2023, est présenté dans différentes communications et publications [4-6]. Il permet de tirer des enseignements nécessaires pour adapter des essais de vieillissement de type cycles humidification-séchage en laboratoire aux cas de sollicitations réelles par exemple.



FIGURE 3. Mise en place d'une instrumentation dans une tranchée de sol mixé pour l'évaluation de son comportement à long terme vis-à-vis de son environnement (source : Univ. Eiffel).

Instrumentation pour suivre l'évolution structurelle de la digue

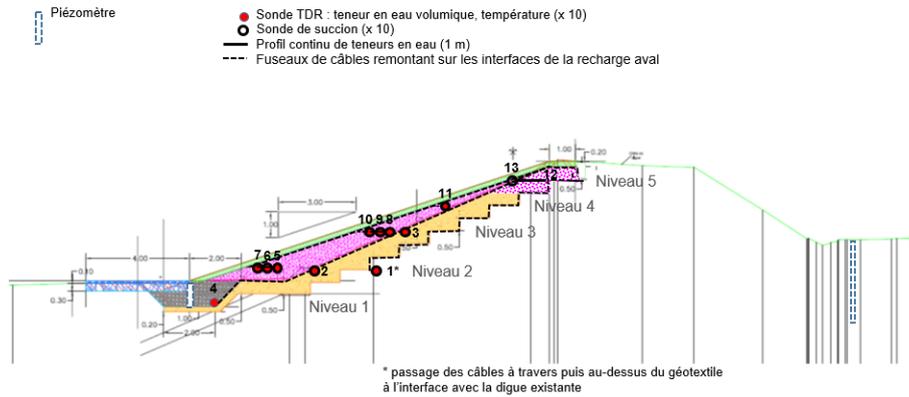
Les deux exemples ci-dessous illustrent l'utilisation d'une instrumentation permettant de répondre à deux questions distinctes : l'effet du changement climatique sur les ouvrages hydrauliques et la surveillance en période de crue sur la digue de La Riche (37).

Mise en place d'un observatoire du comportement au changement climatique de la digue à La Riche

Depuis l'été 2022, la question de l'adaptation des ouvrages hydrauliques et de leur conception vis-à-vis du changement climatique devient prégnante. Les contraintes environnementales qui s'appliquent conduisent à modifier l'aléa inondation. Certains auteurs alertent également sur les modifications des performances des digues notamment sous l'effet des phénomènes de retrait en période estivales, qui conduisent à créer de la perméabilité de fissures. Pour répondre à ces questions, l'instrumentation permet d'apporter des réponses basées sur l'observation réelle d'un site.

La conception du plan d'instrumentation (Figure 4a) prévoit ainsi un suivi de l'ouvrage basé sur un ensemble de capteurs positionnés dans le remblai, couplés à une observation de la météorologie. Les capteurs permettent de suivre l'évolution des états hydriques des sols grâce à des sondes TDR et des sondes tensiométriques (mesure de succion) (Figure 4b et Figure 4c). L'objectif est d'acquérir à pas de temps réguliers, toutes les 3 heures, des données couplées entre l'état du sol et les données atmosphériques. Le site étant proche de Tours et d'une échelle de mesure de la Loire, le suivi de la digue sera pratiquement simultané avec celui du niveau d'eau. Le niveau de la nappe de Loire sera suivi par ailleurs à l'aide d'un piézomètre inclus dans le plan d'instrumentation de l'ouvrage. Le détail de l'instrumentation est développé dans une autre communication [7]. L'installation s'est déroulée entre avril et octobre 2023, afin que l'ensemble de l'instrumentation soit opérationnel (programmation, adaptations, réparations, etc.). Les premiers résultats du suivi seront produits à partir de 2025.

(a)



(b)



(c)



FIGURE 4. Mise en place d’une instrumentation de talus de digue côté val pour l’observation de son comportement vis-à-vis de son environnement (source : Univ. Eiffel/Cerema).

Opportunité de pérenniser une instrumentation pour la surveillance en crue

Il est constaté une évolution des enjeux au sein de la zone protégée par le système d’endiguement du val de Tours, avec par exemple l’extension de l’urbanisation à Tours (Figure 5). Ceci invite à réfléchir au suivi de la levée au niveau de points spécifiques. Le site de La Riche instrumenté à l’automne 2023 est repéré en rose sur les cartes.



FIGURE 5. Évolution des enjeux d’une zone protégée au cours du temps (source : DREAL CVL/DETL).

L’instrumentation préconisée tient compte des écoulements d’eau à travers le corps de digue et son sol de fondation (Figure 6), le secteur ayant été renforcé en 2020 par un écran étanche réalisé

par tranchée de sol mixé. Elle est constituée d'un réseau de piézomètres localisés dans le corps de digue, de part et d'autre de l'écran, afin d'en évaluer son influence sur les écoulements (ligne piézométrique), et de mesures de perméabilité de l'écran in situ, afin d'évaluer la pérennité du confortement. Le suivi, qui sera mis en place début 2024, est prévu sur une période de 10 ans, avec des relevés manuels (sonde à eau) réalisés à minima tous les 2 ans, afin d'évaluer la pérennité des performances du confortement. Dans le cas de relevés ciblés lors de périodes de crue, un suivi piézométrique journalier peut être assuré à l'aide de sonde piézométrique de type Diver.

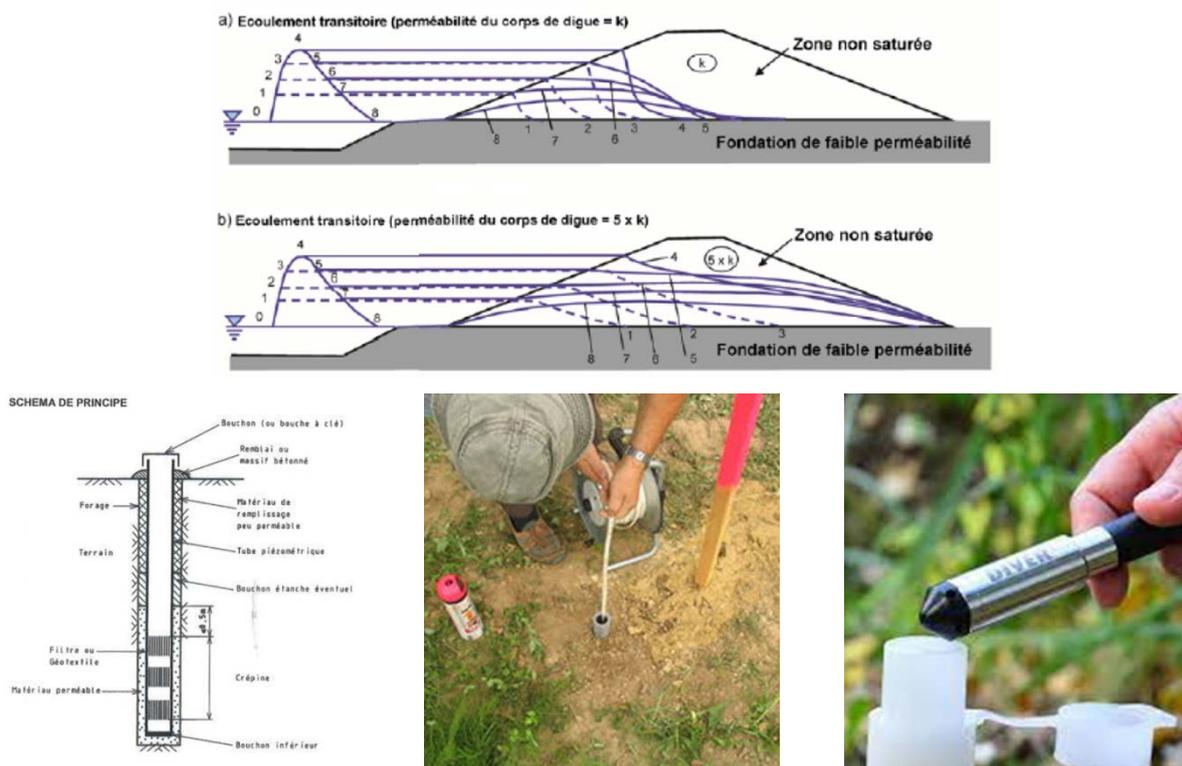


FIGURE 6. Mise en place d'une instrumentation de digue et de son confortement pour son suivi à 10 ans (sources : [8], Wikihydro, Wikigeotech, SDEC France).

Conclusion et perspectives

Il existe une documentation importante concernant l'auscultation des barrages (CIGB), ce qui n'est pas le cas pour les digues de protection contre les inondations et les submersions.

Historiquement et en fonction des enjeux, un suivi des niveaux d'eau pouvant les solliciter est opéré, mais les mesures du comportement structural des digues sont rares et relèvent d'initiatives particulières.

4 exemples d'instrumentation ont été développés dans cette communication, selon 3 objectifs différents :

- évaluer la pérennité des ouvrages de confortement tels que les écrans étanches sol-ciment ;

- évaluer l'évolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique (à associer aux évolutions prévisibles du fonctionnement des cours d'eau et/ou des sollicitations maritimes) ;
- surveiller des ouvrages en crue ; ce sujet concentre les attentes des gestionnaires les plus fortes mais comporte aujourd'hui plusieurs limites, développées ci-dessous.

Si aujourd'hui, l'instrumentation des digues est une démarche volontaire et nécessite de faire appel à l'inventivité, le développement de tels dispositifs est appelé à se poursuivre, en s'adaptant aux spécificités des digues.

Une réflexion sur les limites de l'instrumentation a été initiée et conduit à garder une certaine humilité vis-à-vis des ambitions d'auscultation des digues. Ainsi, la première contrainte identifiée porte sur la dimension des systèmes d'endiguement qui implique la gestion d'un grand linéaire d'ouvrages et une sensibilité importante de ces ouvrages aux évolutions de l'environnement à grande échelle (dont impact du changement climatique). Ceci impose de définir une stratégie pour sélectionner les sites à instrumenter.

La seconde contrainte pour un dispositif d'instrumentation tient aux échelles de temps : ancienneté, vieillissement (dont l'intérieur du corps de l'ouvrage), faible récurrence des sollicitations des ouvrages (exemple des digues sèches), évolution des pratiques de gestion, évolution des techniques d'auscultation, continuité et pérennité du dispositif dans le temps...

Ainsi, même si l'utilité de l'auscultation des digues pour les cas présentés n'est pas remise en cause, l'opportunité de l'instrumentation est questionnée au regard des contraintes liées aux dimensions des ouvrages (plusieurs centaines de kilomètres) et aux échelles de temps considérées (plusieurs centaines d'années).

Références

- [1] Boussafir Y. (2019). *Mise au point d'une méthodologie d'instrumentation de digue en terre. Rapport*. Convention DGPR-Ifsttar 2019 n°2201189104 du 4 juin 2019, Action 13, 35 p.
- [2] Dyer M., Utili S., Zielinski M. (2009). *Field survey of dessiccation fissuring of flood embankments*. Proceedings of Civil Engineers, Water Management 162, June 2009 Issue WM3, pp.221-232.
- [3] Patouillard S., Saussaye L., Durand E., Manceau N. Le Kouby A., Coulet A. (2019). *Retour d'expérience sur les renforcements des levées en deep soil mixing*. Colloque Dignes 2019, Aix-en-Provence, France, 20-21 mars 2019.
- [4] S. Patouillard, L. Saussaye, A. Le Kouby, L. Gervais (2024). *Ecrans d'étanchéité dans les levées de la Loire : retour d'expérience sur 10 ans de « deep soil mixing »*. Colloque Dignes 2024, 27-29 mars 2024, Aix-en-Provence, France.
- [5] Le Kouby A., Saussaye L., Patouillard S. (2022). *Feedback on the monitoring of a dike reinforced with Deep soil mixing technique in Loire river*. 11th International Symposium on Field Monitoring in Geomechanics (ISFMG) 2022, Londres, Angleterre, 4-7 septembre 2022.
- [6] Le Kouby A., Hemmati S., Khat H., Saleh E., Saussaye L., Coulet A., Morandière K., Patouillard S., Boussafir Y. (2022). *Etude des interactions sol-atmosphère sur la digue de Montlouis-sur-Loire (37)*. 11^e Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lyon, France, juin 2022.
- [7] Boussafir Y., Mercadier D., Saussaye L., Bisson J., Patouillard S., Matynia A., Brulé C., Guirado F. (2024). *Instrumentation de la digue de La Riche : première étape vers un observatoire des interactions sols-climat*. Colloque Dignes 2024, 27-29 mars 2024, Aix-en-Provence, France.
- [8] Ciria (2013). *The International Levee Handbook*. C731. Ed. Ciria. 1332 p.