



## **Instrumentation de la digue de La Riche : première étape vers un observatoire des interactions sols-climat**

Y. Boussafir, Dimitri Mercadier, Lucile Saussaye, Julien Bisson, Sébastien Patouillard, Anthony Matynia, Christian Brulé, Franck Guirado

### **► To cite this version:**

Y. Boussafir, Dimitri Mercadier, Lucile Saussaye, Julien Bisson, Sébastien Patouillard, et al.. Instrumentation de la digue de La Riche : première étape vers un observatoire des interactions sols-climat. Colloque Dignes 2024, Inrae, Mar 2024, Aix-en-Provence, France. <hal-04536051>

**HAL Id: hal-04536051**

**<https://hal.science/hal-04536051v1>**

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.



HAL Authorization

# Instrumentation de la digue de La Riche : première étape vers un observatoire des interactions sols-climat

## *Levee of La Riche's Instrumentation: a first step forward soil-atmosphere interaction observation*

**Y. Boussafir<sup>1</sup>, D. Mercadier<sup>2</sup>, L. Saussaye<sup>3</sup>, J. Bisson<sup>4</sup>,  
S. Patouillard<sup>4</sup>, A. Matynia<sup>5</sup>, C. Brulé<sup>6</sup>, F. Guirado<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Université Gustave Eiffel / GERS / SRO, Marne-la-Vallée, France, [yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr](mailto:yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr)

<sup>2</sup> Cerema DTer Normandie-Centre, Rouen, France, [dimitri.mercadier@cerema.fr](mailto:dimitri.mercadier@cerema.fr)

<sup>3</sup> Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, [luile.saussey@cerema.fr](mailto:luile.saussey@cerema.fr)

<sup>4</sup> Dreal Centre-Val de Loire, Orléans, France, [sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr](mailto:sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>5</sup> Direction Départementale des Territoires d'Indre-et-Loire, Tours, France,  
[anthony.matynia@developpement-durable.gouv.fr](mailto:anthony.matynia@developpement-durable.gouv.fr)

<sup>6</sup> Tours Métropole val de Loire, Tours, France, [c.brule@tours-metropole.fr](mailto:c.brule@tours-metropole.fr)

### Résumé

Le changement climatique a des effets perceptibles sur notre environnement immédiat, que ce soit sur la modification de la météorologie, le niveau d'eau dans les rivières, l'intensité des aléas « inondations », la sévérité des étiages ou les niveaux de nappes phréatiques. Les effets indirects pouvant impacter les ouvrages hydrauliques sont malheureusement rarement quantifiés mais commencent à être documentés. Certains gestionnaires commencent également à se préoccuper de ces effets et souhaitent s'en prémunir.

La recherche de nouveaux indicateurs de performance des ouvrages en lien avec les effets du changement climatique nécessite de disposer de données quantitatives. L'article présentera l'observatoire des interactions sols-climat mis en place sur la digue de La Riche grâce au partenariat entre la Dreal Centre - Val de Loire, Tours Métropole val de Loire, la Direction Départementale des Territoires d'Indre-et-Loire, le Cerema et l'Université Gustave Eiffel. Les capteurs mis en place en mars 2023 à l'occasion des travaux d'épaississement de la digue de La Riche, permettront d'acquérir des données couplées de sol et de météorologie. Le jeu de capteurs prévu pour le suivi comprend des sondes tensiométriques, des sondes de mesure de teneur en eau volumique et de température, une station météorologique, des piézomètres et une caméra. L'interprétation de ces données devrait enrichir notre compréhension des phénomènes et permettre de développer une doctrine concernant l'adaptation des ouvrages en terre de protection contre les inondations au changement climatique. L'article présente le détail de l'instrumentation mise en œuvre et les objectifs recherchés.

### Mots-clés

changement climatique – instrumentation – digue – capteurs – observatoire

## Abstract

Climate changes are having perceptible effects on our immediate environment, whether in terms of changes in weather patterns, water levels in rivers, the intensity of flood hazards, the severity of low-water periods or groundwater levels. They may also have effects on levees (Dyer *et al.*, 2007 and 2009; Bottema *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2018), but these are not enough documented. Some managers wish to protect themselves against this and are taking steps to do so (Etablissement Public Loire, 2018).

New indicators of the performance of structures in relation to climate change are needed to help define the damage to protection structures. This article presents the soil-climate interaction observatory set up on La Riche levee thanks to the Dreal Centre-Val de Loire, Tours Métropole Val de Loire, the Direction Départementale des Territoires of Indre-et-Loire, Cerema and the Gustave Eiffel University. The sensors, which were installed in March 2023 during reinforcement work, will procure coupled data both from soil and meteorological data. The set of sensors planned for monitoring includes tensiometric probes, probes for measuring volumetric water content and temperature, a weather station, piezometers and a camera. Interpretation of these data should enhance our understanding of the soil-atmosphere interaction phenomena and enable us to develop a doctrine for adapting structures as levees to climate change. This article presents details of the instrumentation used and the objectives sought.

## Key Words

climate change – monitoring – levee – sensors - observatory

## Introduction

La première obligation en matière de conception des ouvrages hydrauliques de protection contre les inondations, telle que détaillée dans les recommandations du CFBR [1], est d'examiner la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis de différents mécanismes de rupture plutôt bien connus. Par rapport à ces références, l'adaptation au changement climatique des ouvrages hydrauliques en est encore à ses balbutiements, d'une part, parce que ses effets sur l'ouvrage ne sont pas correctement conceptualisés, d'autre part, parce que l'intensité des phénomènes et leur transcription en outils de modélisation, sont en cours de développement. L'objectif du travail présenté ici est de faire le point sur les connaissances actuelles en matière d'impact du changement climatique sur les ouvrages hydrauliques et de détailler une première étape de construction d'un observatoire qui permettra de statuer sur les effets des changements atmosphériques sur les performances des digues.

### Les effets du changement climatique sur les ouvrages hydrauliques

Le changement climatique devient une réalité perceptible se traduisant par des modifications de la météorologie, variables d'un pays voire d'une région à une autre. Ces modifications ont des répercussions sur les débits des cours d'eau (Figure 1), le niveau des nappes, la faune et la flore et également sur l'état des sols [2].

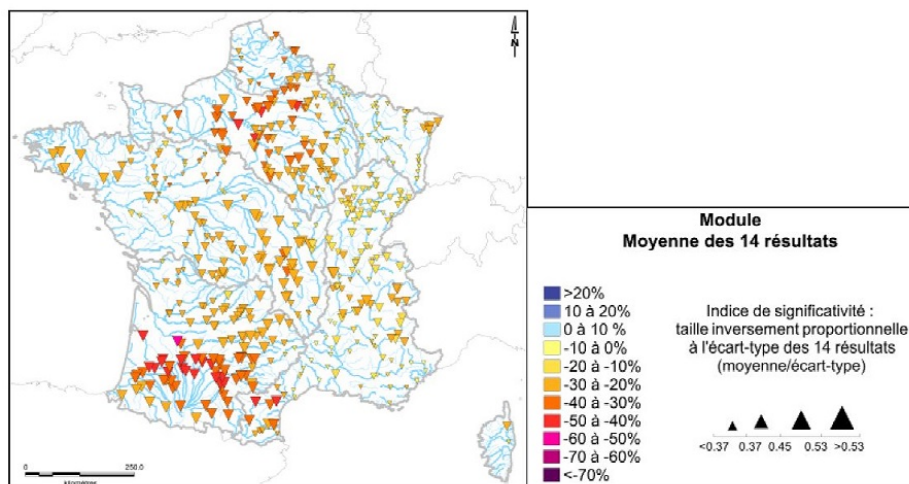


FIGURE 1. Évolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel (module) entre 1961-1990 et 2046-2065. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques  $\times$  7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations [7].

Dans le cas des barrages et des digues, le phénomène majeur évoqué lorsqu'on parle de changement climatique est souvent lié aux modifications des régimes de crues et d'étiages [3][4]. Ces modifications ont évidemment des répercussions sur le dimensionnement des ouvrages vis-à-vis des sollicitations hydrauliques auxquels ils seront soumis. Toutefois, cela peut entraîner des effets qui dépassent la seule variation de l'aléa inondation [5], comme présenté brièvement ci-dessous.

### *Les caractéristiques du changement climatique à l'échelle du territoire*

Le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC donne un aperçu des évolutions climatiques passées et des évolutions probables à venir [6]. Les principales caractéristiques du changement climatique se manifestent par une augmentation de la température moyenne de l'air et des températures extrêmes, une modification de la répartition des pluies, une augmentation du niveau de la mer, une modification de sa température de surface et de son pH, une modification des courants marins, etc. Ces données sont intégrées dans différents modèles climatiques qui simulent des scénarios d'évolution du climat, eux-mêmes dépendant notamment des émissions de gaz à effets de serre futures.

Sur la base de ces modèles et scénarios, le projet Explore 2070 [7] a fourni des cartes illustrant les évolutions possibles des débits dans les cours d'eau et du niveau d'eau des nappes à l'horizon 2070 (Figure 1). Il est ainsi constaté que les évolutions ne seraient pas également réparties sur le territoire et que le changement climatique serait particulièrement impactant dans le sud et le nord de la France. Le site internet <http://www.drias-climat.fr/> intègre les résultats de ces travaux et permet de visualiser les paramètres d'entrée que sont les températures de l'air, maximales, minimales, moyennes, etc.

### *Les effets globaux du changement climatique sur les digues*

Dans son analyse exploratoire, l'Établissement Public Loire présente une synthèse bibliographique des multiples impacts du changement climatique sur les ouvrages de protection [5]. Des modifications probables sont attendues sur les espèces végétales et animales, les conditions de résidence des animaux fouisseurs, la teneur en eau des sols, les vents, le niveau d'eau dans les estuaires, la migration des bouchons vaseux, la salinisation des eaux, le risque incendie, et, évidemment, des modifications des régimes de crues, des débits moyens et d'étiage.

Les auteurs de ce rapport soulignent néanmoins les fortes incertitudes qui pèsent sur ces paramètres, même si certains impacts sont déjà perceptibles dans le bassin de la Loire. Ils évoquent aussi le fait que pratiquement aucun de ces impacts ne correspond à des risques majeurs pour la stabilité des ouvrages mais qu'il convient de s'en préoccuper en termes de gestion et d'adaptation. Néanmoins, les conclusions insistent sur la méconnaissance générale des phénomènes et pointent notamment le sujet des mouvements dus à la dessiccation des corps de digue qui entraîne des risques de fissures, donc de modification de la perméabilité de l'ouvrage.

### *Les effets des modifications de conditions atmosphériques sur les sols des digues*

L'atmosphère se caractérise par différents paramètres météorologiques mesurables comme la température de l'air mesurée à différentes hauteurs, la vitesse du vent, la pluviométrie, l'ensoleillement, l'humidité relative de l'air, etc. Toute modification de l'atmosphère au travers de la météorologie a des répercussions sur l'état hydrique des sols pédologiques mais également sur les substratums ou sur les matériaux constitutifs des digues. Or, le changement climatique modifie la saisonnalité et les conditions atmosphériques qui environnent les digues et ces modifications ont des répercussions sur les ouvrages [8 ; 9].

En France métropolitaine, la météorologie est très marquée par l'alternance des saisons qui se traduit par une variation de l'état hydrique des sols [12] : humidification et rechargement des nappes en période hivernale, séchage et diminution du niveau des nappes en période estivale. C'est au cours de cette période que le séchage conduit au phénomène de retrait, particulièrement sensible dans les sols fins ou argileux (Figure 2). Lorsque la teneur en eau descend en dessous de certains seuils, le retrait engendre de la fissuration dans les sols fins et modifie les propriétés du matériau

[10]. La matrice minérale se rétracte, se comportant comme des blocs compacts et peu perméables. Des fissures se créent verticalement et horizontalement, ce qui génère une perméabilité en grand préjudiciable au bon comportement de l'ouvrage.

Ce phénomène, connu de longue date, est amplifié par le changement climatique et l'allongement et la répétition des épisodes de sécheresse, y compris au-delà de la saison strictement estivale. Des régions jusqu'ici épargnées par la sécheresse des sols observent aujourd'hui des phénomènes qui inquiètent certains auteurs, qui tous alertent sur le risque que cela peut faire peser sur la stabilité de l'ouvrage en cas de crue [10 ; 11]. Un nouveau scénario de rupture redouté est détaillé par Dyer [10] à partir de l'observation du réseau de fissures développé dans la digue de Thorngumbald située en Angleterre (Figure 2c).

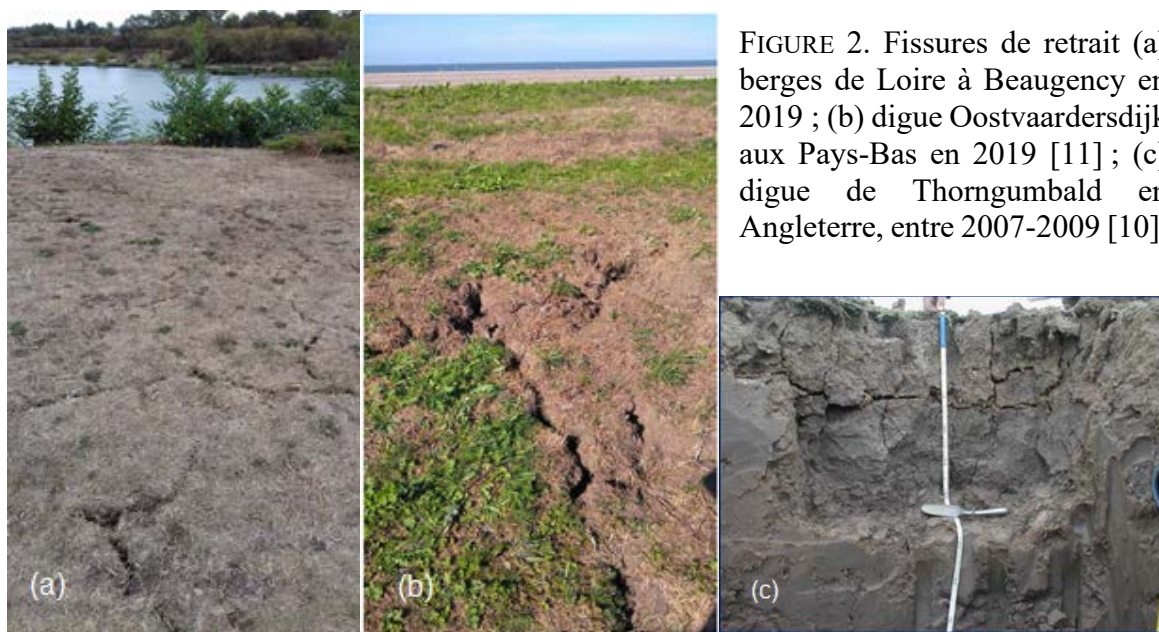


FIGURE 2. Fissures de retrait (a) berges de Loire à Beaugency en 2019 ; (b) digue Oostvaardersdijk aux Pays-Bas en 2019 [11] ; (c) digue de Thorngumbald en Angleterre, entre 2007-2009 [10].

En France, l'été 2022 a particulièrement inquiété des gestionnaires sur le risque que le phénomène de retrait pouvait faire peser sur la protection apportée par les digues. La difficulté à répondre simplement à cette question a mis en évidence le manque d'outils permettant de caractériser la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques par rapport à ces phénomènes nouveaux.

### L'instrumentation de la digue de La Riche (37)

Une instrumentation permet d'équiper un ouvrage de capteurs ou de dispositifs de mesure qui vont fournir des informations sur l'état physique de l'ouvrage. L'ensemble des informations collectées permet de répondre à une question posée. En phase de conception, on veille à conjuguer différents dispositifs de mesures qui permettent d'interpréter les résultats et de conclure sur la question posée. Dans le cas de la sécheresse, la question posée porte sur l'observation d'un front de dessiccation au sein de l'ouvrage et sur l'ouverture d'un jeu de fissures pouvant modifier la perméabilité de cet ouvrage sur une certaine profondeur.

En 2020, l'université Gustave Eiffel a proposé au Ministère de la Transition Ecologique et à la

Direction Générale de la Prévention des Risques, en partenariat avec le Cerema Normandie-Centre, de réaliser une instrumentation qui permettrait de suivre les interactions sol-atmosphère sur une digue. La digue de La Riche en Indre-et-Loire (37), devant faire l'objet de travaux de renforcement, a été sélectionnée pour réaliser ce projet d'observatoire. L'objectif de l'instrumentation était dans un premier temps d'observer l'évolution du sol sous l'effet de la météorologie ambiante et d'apporter des réponses sur le comportement du sol et les modifications de ses propriétés en profondeur. À terme, les conclusions de l'observatoire devraient permettre de définir des indicateurs pertinents pour anticiper le risque sécheresse sur les ouvrages hydrauliques.

#### *Observer les variations d'état hydrique du sol*

L'instrumentation de la digue a été basée sur la mise en place des dispositifs suivants :

- 10 sondes TDR (Time Domain Reflectometry) permettant de mesure la teneur en eau volumique et la température au droit de la sonde (Figure 3) ;
- 1 sonde TDR permettant de mesurer un profil de teneur en eau volumique à l'aide de 9 capteurs intégrés et pré-équipée de 25 m de câble ;
- 10 sondes tensiométriques pour évaluer la succion dans les sols (Figure 3) ;
- 2 piézomètres pour suivre le toit de la nappe phréatique ;
- 1 station de mesure météorologique simplifiée, (Figure 4) ;
- 1 appareil photo numérique avec une mémoire 16 GB et résistant à -40 / +60 °C pour observer la surface du talus ;
- 1 centrale d'acquisition (-40 à +70 °C), reliée à un Modem 4G et à un site de stockage des données (Figure 4).

L'idée principale de ce dispositif est de suivre l'évolution au cours du temps des teneurs en eau volumiques et des températures mesurées par les sondes TDR et de les coupler avec les sondes tensiométriques qui enregistrent, dans le même temps, la succion qui se développe dans le sol (Figure 3). Les deux types de capteurs n'enregistrent pas la même information physique : l'un restitue une teneur en eau volumique en % grâce à la mesure de la vitesse d'une onde se propageant entre deux broches métalliques proportionnelles à la permittivité diélectrique du matériau, l'autre évalue la pression capillaire en kPa grâce à la mesure d'une résistance d'un élément interne du capteur dont le lien entre teneur en eau et pression capillaire a été préalablement établi.





FIGURE 3. Pose d'une sonde TDR (blanche) et d'une sonde de succion (verte) à La Riche.

En période estivale, les paramètres météorologiques vont avoir des répercussions directes sur l'état des digues en terre. Le phénomène de séchage qui se caractérise par une évapotranspiration à la surface de l'ouvrage va créer une pression capillaire négative, également appelée succion en géotechnique. Les capteurs vont permettre de mesurer la propagation de ce front de dessiccation dans le sol grâce aux sondes tensiométriques, et évaluer la quantité d'eau résiduelle grâce aux sondes TDR.

Au cours du séchage, le sol va progressivement se désaturer : l'eau s'évapore et est remplacée par de l'air. Cette phase s'accompagne d'une diminution du volume du sol et de sa teneur en eau mais le phénomène est malheureusement encore mal modélisé à l'échelle de l'ouvrage car il nécessite des modèles thermo-hydro-mécaniques plutôt sophistiqués. L'instrumentation permettra de caler les modèles de comportement si possible simplifiés, reliant les paramètres météorologiques et les propriétés de la digue.

C'est en effet grâce au couplage entre la station météorologique qui permettra de tracer l'historique des données atmosphériques environnantes et les mesures de teneurs en eau et de succions constatées au même moment dans le sol, que l'on pourra caler des modèles d'interaction sol-atmosphère et ainsi prévoir le comportement de l'ouvrage.





FIGURE 4. Installation de la station météorologique et de l'armoire hébergeant la centrale d'acquisition.

#### *Localisation et détail de l'instrumentation de la digue de La Riche*

La digue de La Riche est une digue historique faisant l'objet d'un renforcement par drainage et filtration sous un rechargement en matériau semi-perméable côté zone protégée [14].

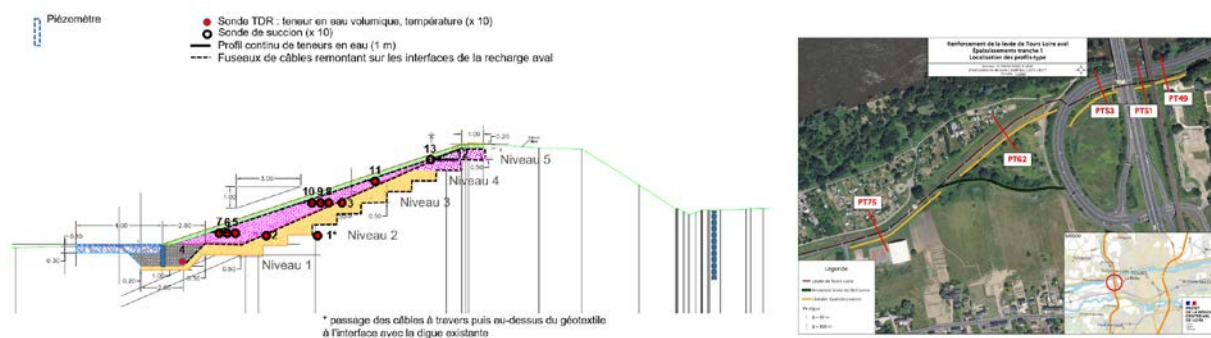


FIGURE 5. Instrumentation de la digue de La Riche au profil 53 du chantier de renforcement.

La Figure 5 permet de localiser la position des différents capteurs sur le profil 53 retenu pour la localisation de l'observatoire. On distingue sur ce profil la couche de sable faisant office de massif drainant (en jaune) séparé du corps de digue existant par un géotextile de filtration. L'ensemble a été réalisé par redans pour assurer un ancrage stable de l'ensemble. La recharge en matériau semi-perméable est représentée en magenta et assure la stabilité mécanique globale.

Les capteurs ont été positionnés dans la partie de l'ouvrage la plus concernée par les interactions avec l'atmosphère pour pouvoir suivre l'évolution des variations d'états hydriques des sols depuis le bas jusqu'au haut de l'ouvrage. En effet, l'humidification des sols peut dépendre de l'exposition aux intempéries et du ruissellement sur le talus. Cela peut conduire à une humidification préférentielle de la partie basse du talus. À l'inverse, la partie haute peut subir des phénomènes de dessiccation plus importants, notamment au niveau de la crête. Les sondes ont été positionnées en ligne pour suivre la propagation du phénomène avec la profondeur et horizontalement pour des

questions pratiques en lien avec la mise en œuvre des matériaux couche par couche. Chaque capteur a été localisé par GPS pour le récolement de l'ensemble.

La caméra posée avec la station météorologique doit permettre d'observer l'évolution de la végétation et, dans l'idéal, de visualiser le développement de fissures à la surface du talus.

### L'interprétation des données de monitoring pour l'analyse de la stabilité de la digue

La propagation des fronts d'humidification et de dessiccation dans les digues en terre peut être modélisée à l'aide de l'équation de Richards dans le sol non saturé ou de Darcy en sol saturé. Ces modèles permettent d'évaluer la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur et la propagation d'un front d'humidité/dessiccation depuis la surface du modèle. Cependant, ils ne permettent pas d'évaluer le retrait volumique et encore moins la possibilité d'apparition de fissures. Pour arriver à une meilleure caractérisation des phénomènes, des travaux complémentaires doivent mettre en relation sur un modèle numérique pouvant faire des analyses hydriques et mécaniques couplées : les courbes de rétention d'eau, les courbes de retrait volumique, les données atmosphériques, les propriétés de conductivité hydrauliques du sol saturé et non saturé et les caractéristiques intrinsèques de type masse volumique, cohésion et angle de frottement [13].

Des travaux menés en Angleterre [10] et aux Etats-Unis [15] ont conceptualisé un nouveau scénario de rupture, lié à l'existence des fissures de retrait dans les digues, et qualifié de « soulèvement hydrauliques de blocs d'argiles fissurés » (Figure 6). Ce scénario de rupture relativement nouveau, est pris sérieusement en compte en Angleterre [10] et au Pays-Bas [11]. En France, la sécheresse vécue en 2022 a alerté les services instructeurs de la sécurité des ouvrages hydrauliques et a pu mettre en évidence le manque d'information sur les phénomènes que peuvent subir les digues et sur les risques encourus en termes de stabilité.

La présomption de ce scénario de rupture à partir d'un premier mécanisme caractérisé par le retrait des sols, est à constater au moins une fois sur de vraies digues pour pouvoir ensuite généraliser l'observation et envisager des actions à l'échelle nationale. C'est tout l'enjeu de ce travail.

Le phénomène de retrait ne présente un risque pour les digues que s'il y a concomitance entre une période de sécheresse intense et un aléa inondation. Ainsi, seuls des indicateurs météorologiques seraient pertinents pour évaluer dans le même temps l'impact sur l'ouvrage d'une période de sécheresse avec la présence probable de réseaux de fissures, et la probabilité d'apparition d'un aléa inondation.

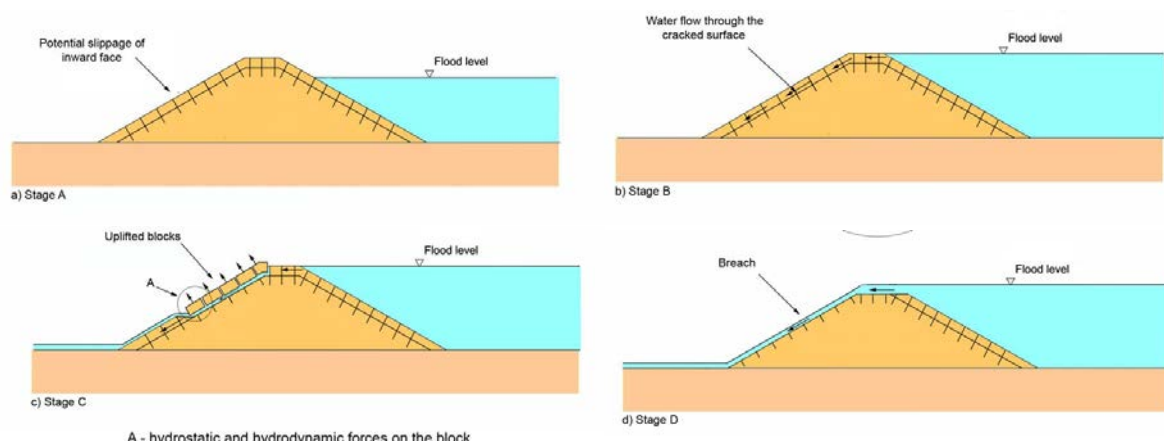


FIGURE 6. Le scénario de rupture par soulèvement hydraulique de blocs fissurés par la sécheresse décrit par (Dyer *et al.*, 2007). a) blocs de sols fissurés ; b) infiltration de l'eau via le réseau de fissures ; c) soulèvement des blocs de sols et circulation d'eau sur le talus côté zone protégée ; d) développement du mécanisme de défaillance.

Cette connaissance reste à établir. Le monitoring proposé sur la Digue de La Riche, bien que sommaire, vise à combler en partie le manque d'information sur les interactions sol-atmosphère, car à ce jour, il n'existe pas réellement d'observatoire permettant de faire. Cela devrait faire le lien, le cas échéant, avec un mécanisme de rupture qui pourrait être celui décrit par Dyer [10].

## Conclusion

Les travaux de renforcement de la digue de La Riche (37) ont permis d'héberger une instrumentation dans des matériaux naturels constituant le talus élargi côté zone protégée de l'ouvrage. Grâce à la participation des acteurs remerciés ci-dessous, l'instrumentation constituée pour l'essentiel de capteurs mesurant la teneur en eau volumique, la température et la succion, constitue la base d'un projet d'observatoire des effets du changement climatique sur le comportement des ouvrages hydrauliques.

La pose des différents capteurs a pu être réalisée au printemps 2023 et devrait pouvoir être suivie d'une première phase d'acquisition de données. L'objectif sera de suivre ensuite l'évolution physique des matériaux sur plusieurs années, de manière à pouvoir dégager des conclusions et des modèles simulant l'évolution des propriétés des sols sous l'effet de leur environnement atmosphérique, d'évaluer leur performance après une période de sécheresse, puis, selon les conclusions qui se dégageront de ces travaux, de définir les besoins d'adaptation ou de gestion qui permettront de faire face aux changements climatiques redoutés.

Un tel observatoire ne s'avère nécessaire que par manque d'informations sur le comportement des digues en terre et sur la réalité des interactions sol-atmosphère. La transposition de ce modèle de monitoring sera intéressante dans quelques années pour évaluer d'autres environnements météorologiques (dans le Sud ou dans l'Est de la France par exemple) pouvant être plus ou moins impactants sur le comportement de l'ouvrage. À terme, la généralisation de tels dispositifs ne devrait s'envisager que si les modèles d'interaction sol-atmosphère s'avéraient moins convaincants qu'une mesure directe dans l'ouvrage. Ceci conduirait à mener une réflexion spécifique sur le besoin d'instrumenter les digues en terre.

## Remerciements

Le projet d'instrumentation a été réalisé avec le soutien de la DGPR au travers des conventions annuelles d'activité de l'Université Gustave Eiffel et du Cerema, le soutien de Tours Métropole Val de Loire, de la Direction Départementale des Territoires d'Indre-et-Loire et de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Centre-Val de Loire. L'entreprise NGE, titulaire du marché travaux de renforcement de la levée de La Riche, est également remerciée pour sa collaboration aux travaux de pose.

## Références

- [1] CFBR (2015). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*. Editions du Comité Français des Barrages et Réservoirs. 132 pages.
- [2] Sayers P. Walsh Cl., Dawson RJ. (2015). Climate Impacts on flood and coastal erosion infrastructures. *Infrastructure Asset Management*, 2(2), pp.69-83.
- [3] Bulletin CIGB (2016). *Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources*. Bull.169, 89 pages.
- [4] Etablissement Public Loire (2017). *Adaptation de la gestion des barrages de Naussac et Villerest aux impacts du changement climatique*. Livret n°2. Édition EPL. 18 pages.
- [5] Établissement Public Loire (2018). *Analyse exploratoire de la question des impacts du changement climatique sur la gestion des ouvrages de protection contre les inondations sur le bassin de la Loire et ses affluents*. Édition EPL. 121 pages.
- [6] Bednar-Friedl B. *et al.* (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Europe*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New-York, NY, USA, pp.1817-1927.
- [7] Explore 2070 (2012). *Hydrologie de surface. A1. Rapport de Synthèse*. Contribution de BRL ingénierie, Irstea et MétéoFrance.
- [8] Insana A. *et al.* (2021). Climate Change adaptation of geo-structures in Europe: Emerging issues and future steps. *Geosciences*, 2021, 11, 488.
- [9] Tang A.M. *et al.* (2018). Atmosphere-vegetation-soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*.
- [10] 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.
- [11] Bottema M., Vonk B., Janssen H., Van Waveren H. (2019). *Mitigating drought risk for levees*. 11<sup>th</sup> ICOLD European Club Symposium, Chania, Crete, 2-4 october 2019. Proceedings. 12 pages.
- [12] Bicalho K., Boussafir Y., Cui Y.-J. (2018). *Performance of an instrumented embankment constructed with lime-treated silty clay during four-years in the Northeast of France*. Transportation Geotechnics.
- [13] Ayssami D., Hemmati S., Chevalier C., Boussafir Y., Reiffsteck P. (2024). *Proposition d'une démarche pour évaluer le risque d'érosion interne d'une digue fluviale : Étude paramétrique hydraulique*. Colloque Digues2024, Aix-en-Provence, 27-29 mars 2024.
- [14] Debieu G., Patouillard S. (2024). REX du chantier de renforcement de la levée de Tours Loire aval à La Riche, par épaissement côté val et filtre granulaire
- [15] Khandelwal S. (2011). *Effect of desiccation cracks on earth embankments*. Master of Science. Texas A&M University. 182 pages.