

# Monitoring de la digue de La Riche - observatoire du changement climatique

## A levee monitoring in France for climate change observation

Yasmina BOUSSAFIR<sup>1</sup>, Dimitri MERCADIER<sup>2</sup>, Lucile SAUSSAYE<sup>3</sup>, Christian BRULE<sup>4</sup>, Sébastien PATOUILARD<sup>5</sup>,

1 Laboratoire Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques, Université Gustave Eiffel, Marne la Vallée, France

2 Cerema, DERDI, Rouen, France

3 Cerema EndSUM (Evaluation non destructive des structures et des matériaux), Blois, France

4 Tours Métropole Val de Loire, Tours, France

5 Ministère de la Transition Ecologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature, DGPR, Orléans, France

\*[yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr](mailto:yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr)

**RESUME :** La digue de La Riche (37) a fait l'objet de travaux de renforcement en 2023. A cette occasion, grâce à un partenariat entre la Métropole de Tours, la Direction Départementale des Territoires, l'université Gustave Eiffel et le Cerema ont pu poser plusieurs capteurs permettant d'observer les interactions entre l'environnement météorologique et les matériaux qui composent la digue. L'objectif de ce travail est de pouvoir disposer d'un site d'observation des effets du changement climatique sur la stabilité des ouvrages de protection contre les inondations. L'article présente le site et les données acquises depuis deux années. Une des finalités de l'observatoire est de caractériser le risque de fissuration de la digue. Les premiers résultats permettent d'observer le comportement d'un ouvrage en sol compacté aux jeunes âges au travers des enregistrements de sondes de teneurs en eau volumiques et de sondes de succion.

**ABSTRACT:** The La Riche levee in France, near Tours (37) was reinforced in 2023. Thanks to a partnership between Tours Metropolis, the Departmental Directorate of Territories, Gustave Eiffel University and Cerema realized a monitoring of the levee and dug sensors to observe interactions between the meteorological environment and the fill materials that reinforced the levee. The aim of this work is to provide a site for observing the effects of climate change on the stability of flood protection structures. The article presents the site and the data acquired over the past two years. A specific goal is to characterise cracks. The initial results records the behavior of a young compacted soil structure through its volumetric water content and suction.

**Mots-clés:** digue ; instrumentation ; interaction sol-atmosphère ; succion ; teneur en eau volumique ; météorologie.

### 1 INTRODUCTION

Les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages en terre construites pour retenir les eaux des rivières en cas de crue et les canaliser vers les exutoires naturels. Dans le cas de la Loire ou du Rhône, les premières traces écrites font remonter l'origine des digues au Moyen Âge (Dion, 1961). Construites en plusieurs étapes au fil de leur histoire ou reconstruites après des désordres voire des défaillances ponctuelles, ces ouvrages font l'objet d'une surveillance attentive de la part de l'Etat car ces ouvrages protègent beaucoup d'enjeux. Les référentiels qui permettent de construire, diagnostiquer ou gérer les digues sont donc nombreux. Néanmoins, de nouveaux défis apparaissent depuis quelques années, au travers des évolutions météorologiques et climatiques que nous rencontrons, caractérisées sur le territoire métropolitain par une accentuation des

sécheresses et une modification des régimes de crues. Ces phénomènes posent questions, notamment au regard de la tenue des ouvrages et nécessitent d'améliorer nos connaissances et probablement revoir les méthodes de gestion de ces ouvrages.

Ainsi, certains pays comme les Pays-Bas ou le Royaume-Uni s'inquiètent des effets de sécheresses sur la performance des digues et sur leur capacité à pouvoir retenir les eaux d'inondation. En cause, la création de grands jeux de fissures de retrait et des variations volumiques liées à la dessiccation des sols, qui modifient possiblement les perméabilités et la résistance des matériaux.

Si l'observation de ces fissures est bien réel dans ces pays (Bottema, 2019 ; Dyer et al., 2009 ; Illés, 2022 ; Khandelwal, 2011 ; Satrya et al., 2017 ; Vahedifard et al., 2015), il n'en est pas encore fait vraiment état en France. Des travaux doivent encore

être menés afin d'aider à la quantification de ces phénomènes, d'évaluer leur impact sur la stabilité des digues et proposer des solutions d'adaptation.

L'université Gustave Eiffel s'est engagé depuis 2020 dans un projet de recherche sur la durabilité des digues, incluant la concrétisation d'observatoires des interactions entre les sols des digues et l'atmosphère. Un premier observatoire a été mis en place physiquement en 2023 grâce à un partenariat avec le Cerema, la DREAL Centre-Val-de-Loire et l'agglomération de Tours. Le présent article décrit le site, l'instrumentation mise en place et les premiers résultats acquis en deux ans de fonctionnement.

## 2 GENÈSE DU PROJET ET DESCRIPTION DU SITE

La digue de La Riche fait partie du système d'endiguement Tours Loire Aval. Dans le cadre de la Gestion des Milieux Aquatiques et de la Prévention des Inondations (GEMAPI), les ouvrages sont passés d'une maîtrise d'ouvrage État à une gestion assurée par Tours Métropole. Mais auparavant, des travaux de confortement devaient être réalisés pour réduire le risque de défaillance par érosion interne et instabilité mécanique. Pour cela, des travaux ont été engagés par la Direction Départementale des Territoires (DDT) d'Indre-et-Loire comprenant, selon les secteurs, la réalisation d'un écran vertical étanche par soil-mixing, ou la pose d'un complexe de drainage-filtration sous une recharge imperméable sur le talus côté zone protégée (Figure 3). Ces travaux sont habituels des renforcements des digues de Loire (CFBR, 2021).

Ces travaux offraient une réelle opportunité pour instrumenter un site dans les meilleures conditions. En effet, la pose de capteurs dans le corps de l'ouvrage en cours de travaux permet d'éviter la réalisation de forages ou des poses intrusives. Cela permet aussi de localiser très précisément les capteurs et veiller à une qualité de pose optimale. Un des risques posés par la présence d'éléments traversant est, en effet, de créer des zones de faiblesse dans le corps de digue. La pose des capteurs et des fils concomitante au compactage permet de réduire grandement les risques de faiblesse. Travailler dans une zone neutralisée pour les entreprises, est aussi un gage de travail en sécurité, tout en bénéficiant d'un environnement facilitateur pour le matériel et les engins à disposition. Dans ce cadre, les prélèvements de matériaux représentatifs pouvaient facilement s'organiser, sans limitation de quantité.

Il a donc été proposé très tôt, grâce aux relations du Cerema de Blois avec la DREAL Centre-Val-de-Loire, de créer le site instrumenté dans la partie concernée par la réalisation d'un épaissement de talus.

La rédaction du marché ainsi que la maîtrise d'œuvre des travaux de confortement étant confiés à la DREAL Centre-Val-de-Loire, les équipes de l'Université Gustave Eiffel et du Cerema ont très tôt travaillé avec la maîtrise d'œuvre travaux afin de concevoir une instrumentation et un programme de pose validés par les parties prenantes et intégrés dans le marché Travaux.

Le projet d'instrumentation reposait sur l'idée d'une observation des mécanismes d'interaction entre l'atmosphère et les sols de digues sur le long terme. La durée initiale proposée était de 10 années, période nécessaire pour disposer d'une chronique d'évènements météorologiques représentatifs. Lorsque les périodes d'observations sont courtes (1 à 2 ans) elles sont tributaires d'évènements météorologiques particuliers comme un été pluvieux, une canicule, un hiver sec, qui ne permettent pas de tirer d'enseignements ou des généralités. Pour réaliser ces observations, il était capital d'engager une convention de partenariat de long terme.

Plusieurs réunions ont été organisées en 2021, pour poser les bases d'un accord concernant l'instrumentation et le suivi durant 10 ans après travaux. L'accord a été formalisé dans une convention, incluant Tours Métropole, futur gestionnaire de l'ouvrage.

La rédaction du marché Travaux s'est déroulée en fin d'année 2021 début 2022. L'université Gustave Eiffel a pu faire part de propositions permettant d'intégrer l'instrumentation dans le cahier des clauses techniques et le cahier des clauses administratives.

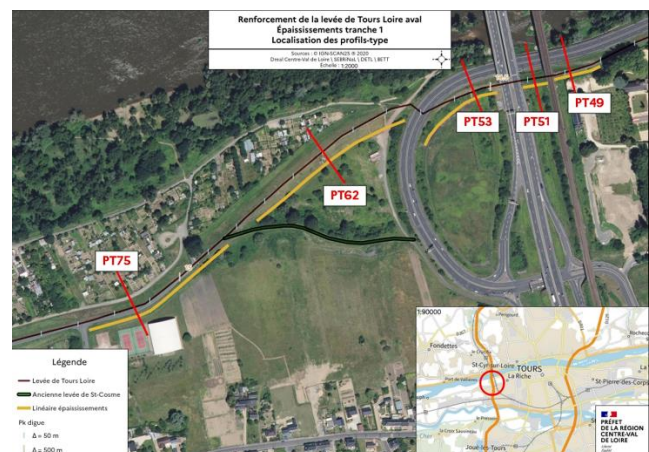


Figure 1. Localisation de la zone de travaux de renforcement de la digue de La Riche (37) en trait jaune (source : DREAL Centre-Val de Loire)

Dans les éléments soumis à discussion, figurait la localisation du profil à instrumenter. C'est finalement dans la boucle du demi-échangeur, au droit du profil en travers 53 (numérotation travaux, Figure 1) qu'a été choisi de poser les capteurs enterrés. Cette portion de

digues présentait l'intérêt d'une accessibilité aux véhicules de service, et d'être éloignée des habitations (pour éviter les dégradations malveillantes). Dans les autres avantages, figurait l'existence d'une autre instrumentation pour le comptage du trafic routier sur l'avenue Proudhon, axe reliant la voie rapide au pont sur la Loire (Figure 2). Le regroupement des instruments de mesure a donc constitué un objectif supplémentaire car il permettait également de sensibiliser les équipes chargées de l'entretien de l'ouvrage.



Figure 2. Vue d'ensemble du site avec de gauche à droite, la Loire, l'avenue Proudhon, la digue et la boucle intérieure de l'échangeur, objet des travaux de renforcement

La digue fait environ 2 m de haut par rapport à la route et 4 m à l'intérieur de la boucle de l'échangeur.

### 3 OBJECTIFS ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation a été conçue pour évaluer l'effet des variations météorologiques et atmosphériques sur les matériaux de la digue. Ces variations (pluviométrie, ensoleillement, humidité relative, vitesse du vent, etc.) ont des répercussions sur les propriétés des matériaux en lien avec leur teneur en eau. Une fois mis en œuvre, les matériaux subissent l'influence de leur environnement, influence qui varie en fonction de la localisation géographique, de l'orientation de l'ouvrage, de l'hydrogéologie mais aussi de l'environnement biologique et anthropique. De nombreux travaux ont pu mettre en évidence l'influence de l'atmosphère sur les modifications d'humidification et de séchage des sols (Bicalho et al., 2018 ; Boussafir et al., 2018). Ces variations peuvent se traduire en laboratoire par des cycles hydriques. Ayssami et al. (2025), Mehenni et al. (2016), Mankour (2019), De Baecque (2019) ont pu constater que les cycles hydriques modifiaient les propriétés géotechniques des matériaux ainsi que leur microstructure. Les questions en suspens restent celles de définir l'amplitude des cycles hydriques auxquels sont vraiment confrontés les matériaux.

L'amplitude d'un cycle peut en effet conduire à observer des variations de saturation très importantes,

comme par exemple 10-80% pour des matériaux proches de la surface de l'ouvrage ou 40-80% pour des matériaux protégés au cœur de l'ouvrage. Or pour évaluer correctement l'impact d'un cycle sur les dégradations et les épaisseurs concernées par les interactions avec l'atmosphère, il est nécessaire de mesurer in situ la profondeur et l'intensité des variations de teneur en eau en lien avec les données atmosphériques réelles.

Ces questions ont constitué l'objectif principal de l'observatoire construit à La Riche et ont guidé le choix des capteurs et leur localisation dans l'ouvrage.

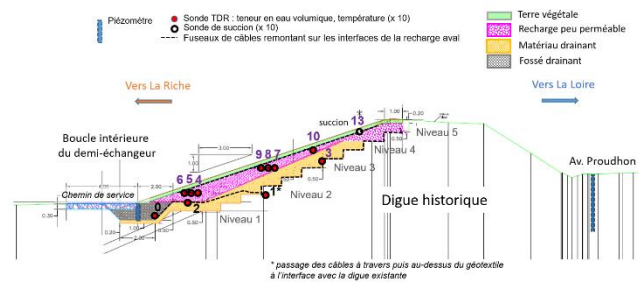


Figure 3. Profil en travers de la digue de La Riche et de l'instrumentation réalisée. Les numéros correspondent aux numéros des capteurs

Une autre perspective de long terme de l'instrumentation est de pouvoir aider au diagnostic de risque de fissuration et autres signes liés au retrait par dessiccation des sols. Le mécanisme de dessiccation se caractérise par les phénomènes suivants :

- Diminution de la quantité d'eau libre;
- Augmentation de la pression capillaire, appelée succion en mécanique des sols non-saturés ;
- Retrait volumique des sols, abaissement topographique de la crête de l'ouvrage ;
- Selon l'argilosité des sols, apparition de fissures de retrait.

Chacun de ces signaux peut se mesurer par des capteurs ou des appareillages tels que récapitulés dans le Tableau 1.

#### 3.1 Variation de la teneur en eau et de la succion dans les matériaux naturels

Pour pouvoir retracer une courbe de rétention d'eau *in situ* et évaluer l'importance de la variation conjointe de la teneur en eau et de la succion, il fallait relier les deux données et coupler deux types de capteurs : un capteur de succion et un capteur de teneur en eau.

Les jeux de sondes ont été posés dans la recharge (Figure 4) au plus proche du talus pour être dans la zone d'influence du mécanisme de séchage qui est le plus fort au niveau de la surface et qui diminue avec la profondeur, jusqu'à approximativement 1 m sous la surface du talus.

Tableau 1. Dispositifs de mesures envisageables pour suivre un mécanisme de dessiccation des sols

Mécanisme suivi	Valeur(s) suivie(s)	Capteur ou mesure envisageable
Diminution de la quantité d'eau libre dans le sol	Teneur en eau Couleur du sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sonde TDR (Time Domain Reflectancy)</li> <li>• Sonde neutron – neutron (mesure radioactive)</li> <li>• Résistivité ou conductivité électrique par tomographie électrique</li> </ul>
Augmentation de la pression capillaire, appelée succion en mécanique des sols non-saturés	Succion (ou pression capillaire)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensiomètre</li> </ul>
Retrait volumique des sols, abaissement topographique de la crête de l'ouvrage	Volume Altitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Topographie</li> <li>• Capteur de déplacement</li> <li>• Fibre optique (mesure de la contrainte)</li> </ul>
Apparition de fissures de retrait	Discontinuités	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Photographie</li> <li>• Capteur de déplacement</li> <li>• Fibre optique (mesure de la contrainte)</li> </ul>
Données atmosphériques et météorologique	Pluviométrie Evapotranspiration	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Station météorologique autonome</li> </ul>

En pratique le site a été équipé de (Figure 3) :

- 10 sondes TDR (*Time Domain Reflectancy*) de chez Campbell, type CS655 - SDI12 dotées de tiges de 12 cm, permettant de mesurer la teneur en eau volumique et la température au droit de la sonde, pré-équipées de 25 m de câble ;
- 10 sondes tensiométriques pour évaluer la succion dans les sols de marque Watermark, type Sonde 253 sans condensateur d'arrêt et pré-équipées de 25 m de câble ;



Figure 4. Sonde de teneur en eau (boîtier blanc et sonde de succion (cylindre gris et vert) posés côte à côte dans la recharge du talus

D'un point de vue pratique, ces capteurs ont été répartis sur 4 niveaux, selon des lignes horizontales pour respecter les surfaces de compactage et le travail du chantier, et raccorder régulièrement les câbles jusqu'à la centrale d'acquisition.

Les capteurs posés dans la recharge en talus (n°4 à 10, n°13, Figure 3) présentent l'avantage de suivre l'évolution des matériaux à partir de l'état de compactage et des performances initiales.

Le capteur n°1 a été posé dans la digue historique, ce qui permet de suivre les états hydriques au coeur de l'ouvrage.

Les capteurs n°0, 2 et 3 suivent les matériaux qui composent le filtre et le fossé drainant en pied de talus. Ces capteurs sont complétés par un piézomètre dans le massif drainant afin de vérifier son mode de fonctionnement. Un autre piézomètre a été posé en pied de talus avenue Proudhon, côté Loire.

Un capteur innovant composé d'un profil continu de 9 capteurs de teneur en eau répartis sur une tige d'un mètre de long, devait permettre de suivre les états hydrique en crête d'ouvrage, associé à un capteur de succion (n°13) en extrémité de la tige, du côté du talus. Malheureusement le capteur innovant n'a jamais pu fonctionner.

### 3.2 Les données météorologiques

Le site a été équipé d'une station de mesure météorologique simplifiée, type ClimaVUE50 de chez Campbell, sortie SDI-12 et pré-équipée de 30 m de câble. Cette station permet de mesurer : la pluviométrie, la vitesse (anémomètre) et l'orientation du vent (girouette), une sonde d'humidité de surface, des sondes de températures (au sol, à 1 et 2 m de hauteur), un capteur d'humidité relative à 2 m, un capteur de rayonnement solaire et un baromètre. L'ensemble a été posé dans un endroit clôturé proche du profil 53 (Figure 5).

### 3.3 Autres données

Le site a été équipé d'une caméra pour observer les variations de végétation et si possible les fissures qui pourraient être observées sur les talus. La caméra a été fixée sur le mat météo. Beaucoup trop éloignée pour observer les fissures, elle permet par contre d'observer

les évolutions de végétation qui peuvent parfois expliquer les valeurs de succions dans le sol.



Figure 5. Vue du site en 2024 avec localisation de la station météo, du profil instrumenté et l'armoire de centralisation

## 4 LES PREMIERES ACQUISITIONS

Le site est en fonctionnement depuis 2023 et a permis de capitaliser deux années de fonctionnement, entre mai 2023 et mai 2025. Les analyses sont reportées par partie d'ouvrage dans les paragraphes qui suivent.

### 4.1 Le corps de digue historique

Le couple de sondes n°1 est implanté dans le corps de digue ancien, à environ 2 m verticalement, sous la surface du talus. On constate à cette profondeur (Figure 6), que la teneur en eau ne fluctue pas beaucoup, entre 41 et 43 % de teneur en eau volumique. Elle reste donc stable et évolue avec de faibles variations, en déphasage avec la période météorologique extérieure. Ainsi, on constate que les maxima de teneur en eau s'observent en juillet-août et les minima en janvier-février. Il y a donc une très faible influence de la météorologie extérieure à cette profondeur, qui se répercute avec un déphasage de presque 6 mois par rapport à ce qui serait normalement attendu (c'est-à-dire des teneurs en eau élevées en hiver et basses en été).

Curieusement, la succion semble être plus sensible à la météorologie ou à la croissance des plantes, car, bien que peu élevée, elle augmente de juillet à septembre, preuve d'un phénomène de séchage peu intense à l'œuvre, avec des valeurs qui plafonnent à 25 kPa (par comparaison, les valeurs de succions en surface atteignent facilement plus de 200 kPa). La succion chute fin septembre, signe là encore d'une bonne concordance d'une fin du séchage des sols avec l'environnement immédiat.

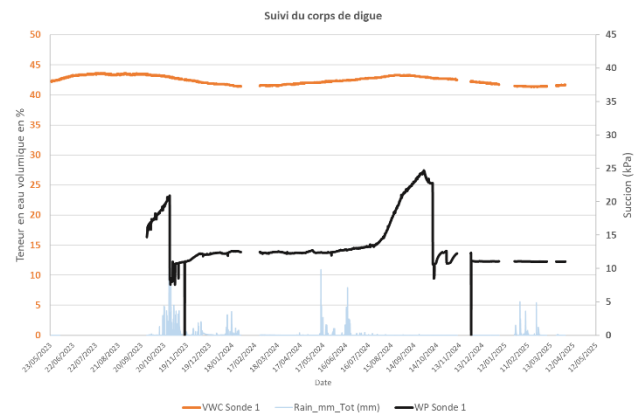


Figure 6. Suivi de la succion (courbe noire) et de la teneur en eau volumique (courbe orange) dans le corps de digue ancien (mai 2023 à mai 2025). Enregistrement de la pluviométrie (en bleu) sur la même période.

### 4.2 Le drain en pied de digue

Le jeu de sondes n°0 est implanté dans le fond du drain de pied de digue. Le drain est composé d'un sable fin propre, insensible à l'eau, de couleur ocre. Il est séparé du sol de fondation par un géotextile.

L'évolution des teneurs en eau dans le drain est représentée sur la courbe orange Figure 7. Dans un premier temps, entre la pose datée du 14/03 jusqu'au 26/10/2023, le sable sèche lentement. Les valeurs de la sonde sont cohérentes avec la teneur en eau mesurée au moment de la pose qui était de 8,4 %.

Un épisode de pluie en octobre 2023 fait brutalement augmenter la teneur en eau, qui atteint 27 %. Après le pic de pluie, la teneur en eau redescend ensuite vers 12 % avec des variations significatives des différents épisodes de pluies. Ceci continue à s'observer durant toutes la période hivernale.

Cela signifie qu'à partir d'octobre, de l'eau arrive dans le drain et que celui-ci fonctionne correctement.

On peut cependant remarquer que les pics de teneurs en eau ne sont pas proportionnels aux pics de pluviométrie : il se peut que l'eau collectée dans le drain ne soit pas que le résultat de l'infiltration verticale mais également le résultat d'une collecte des eaux de drainage, ce qui est rassurant sur le fonctionnement du drain de pied de digue.

À partir de mars-avril (sauf épisodes de pluies marquées en mai et juin) 2024, et jusqu'en septembre de l'année 2024, le sable va ensuite sécher progressivement où il atteint sa valeur la plus faible, de l'ordre de 4 %. Dès la mi-septembre, les teneurs en eau vont ensuite fluctuer en permanence entre des valeurs significatives de la saturation (20 à 25 % voire plus) et des valeurs de teneur en eau résiduelle après

ressuage (de l'ordre de 11-13 %), et ceci jusqu'à la fin de l'enregistrement (le 01/04/2025).

Les mesures de la succion dans le sable sont relativement faibles, de l'ordre de la dizaine de kPa. Ceci est cohérent avec ce que l'on peut attendre comme succion dans des sables.

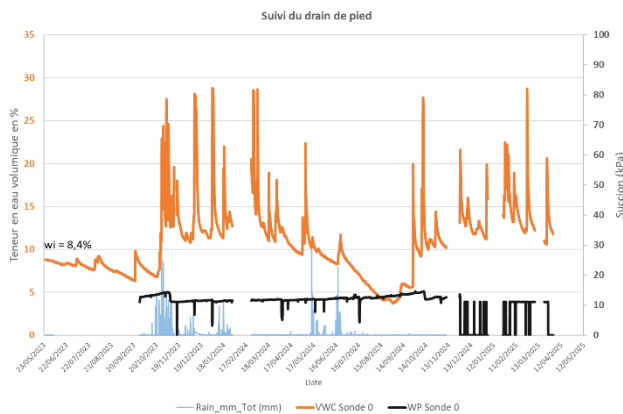


Figure 7. Suivi de la succion (courbe grise) et de la teneur en eau volumique (courbe orange) dans le drain de pied de digue (mai 2023 à mai 2025). Enregistrement de la pluviométrie (en bleu) sur la même période.

### 4.3 Le filtre drainant en talus

Le filtre drainant est équipé des jeux de sondes n°2 et 3. Le matériau qui compose le filtre est le même sable fin propre, que celui présent en pied de digue. Ce matériau est engagé côté talus et crête de digue par le matériau qui constitue la recharge. Vers l'intérieur, le matériau sableux repose sur le corps de digue historique en-dessous. Un géotextile de séparation est présent à l'interface entre le sable et le corps de digue ancien. En théorie, le sable du filtre n'a pas de surface d'échange avec l'atmosphère car il est recouvert par le matériau de la recharge.

On observe sur la Figure 8, que les teneurs en eau dans le filtre sont beaucoup plus faibles que celles dans le même matériau situé en pied de digue.

La sonde la plus haute dans le talus (n°3, courbe bleue) relève des valeurs de teneurs en eau encore plus faible que la sonde la plus basse dans le talus (n°2, courbe brune), ce qui s'explique par le drainage gravitaire qui doit se manifester dans cette partie d'ouvrage.

Dans l'ensemble, toutes les sondes indiquent que le matériau sèche entre avril et septembre, puis s'humidifie pendant la période humide.

Il est intéressant de noter également que les sondes n°2 et 3 sèchent sans discontinuité depuis leur pose jusqu'à la forte période pluvieuse d'octobre 2023. S'ensuit un ressuage, sans les grandes variations que l'on peut constater au niveau du drain de pied, puis un séchage à partir de mai jusqu'à octobre 2024.

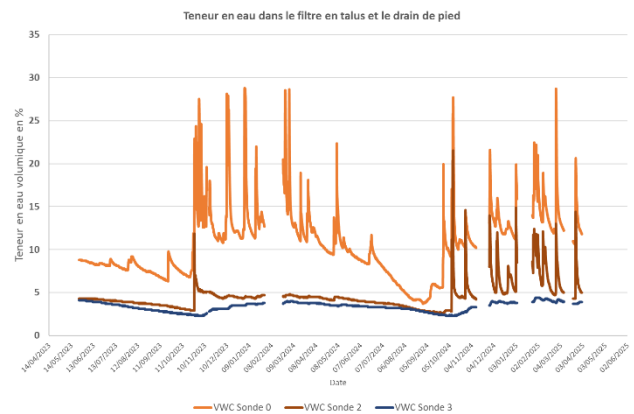


Figure 8. Suivi de la teneur en eau volumique dans le filtre en talus – courbe brune et bleue) et dans le drain de pied (courbe orange) (mai 2023 à mai 2025).

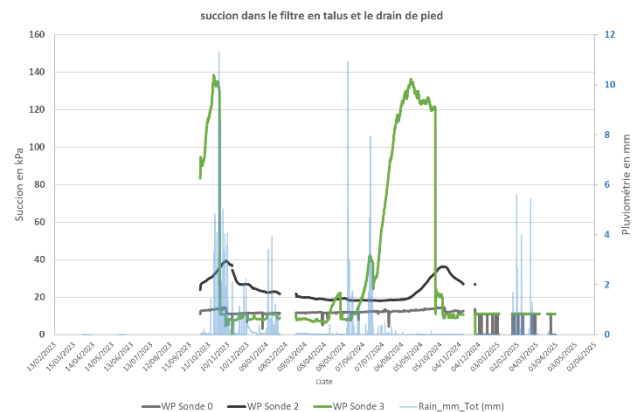


Figure 9. Suivi de la succion dans le filtre en talus et dans le drain de pied de talus (mai 2023 à mai 2025). La pluviométrie (en bleu) sur la même période.

À partir d'octobre 2024, le matériau semble beaucoup plus sensible aux événements pluvieux. La sonde n°2 en bas de talus, indique que le sable du filtre s'humidifie au même rythme que le matériau en pied de digue, mais avec des teneurs en eau plus faibles, comprises entre 5 % et 14-15 % (contre respectivement 11-13 % et 20-25 % pour le drain de pied de digue). On n'observera pas ce phénomène sur la sonde n°3 qui est plus haute dans le talus, et dont les valeurs restent faibles, de l'ordre de 4 %.

Les sondes de succion dans le filtre en talus et le drain de pied de talus (Figure 9) indiquent des dynamiques de séchage importante en sommet de talus (sonde n°3) avec des valeurs plutôt élevées de succion, de l'ordre de 140 kPa, inhabituelles pour du sable. En pied de talus et dans le pied de digue, les succions sont basses et s'expliquent par la teneur en eau plutôt élevée du matériau. Le séchage observé au niveau de la sonde n°2 dans les mois d'octobre coïncide aussi avec une augmentation des valeurs de succion.

#### 4.4 Le massif de recharge

Les séries de sondes n°4 – 5 – 6 (niveau 2) et n°7 – 8 – 9 (niveau 3) ont été posées selon deux lignes horizontales : une en pied de talus et l'autre en milieu de talus. Elles permettent de suivre l'évolution des états hydriques en fonction de la profondeur et de la position dans le talus. La sonde la plus proche de la surface du talus est à 0,25 m de la surface, la deuxième sonde est à 0,50 m de la surface et la sonde la plus profonde est à 0,75 m de la surface.



Figure 10. Pose des sondes TDR (en blanc) et succion (en vert) n°9, 8 et 7 à mi-hauteur de la digue (niveau 3). Le trait à la bombe en haut de la photo matérialise la position future du talus après enlèvement du mètre excédentaire.

L'évolution des succions en talus (Figure 11 et Figure 12) est caractéristique de ce que l'on peut observer sur d'autres sites instrumentés, à savoir des valeurs très faibles une majeure partie de l'année, significatives d'un état plutôt humide, et des valeurs qui augmentent progressivement à partir d'avril-mai, en lien avec la période de croissance de végétaux et le début de la période sèche estivale.

Au cours d'une année complète (2024), le séchage débute à partir du mois d'avril pour la sonde située vers 0,50 m de profondeur, à partir de mai pour les sondes à -0,25 et -0,75 m de profondeur dans le bas du talus (niveau 2) et à partir d'avril pour les trois sondes du niveau 3, situé en milieu de talus. L'épisode sec se termine brutalement à la fin du mois de septembre. A partir d'octobre, les matériaux reviennent à un état humide voire saturé.

En complément, on constate aussi que, dans l'ensemble, les valeurs de teneurs en eau mesurées (Figure 13 et Figure 14) sont cohérentes avec les

valeurs de succions. Elles sont très élevées d'octobre à avril, puis elles diminuent significativement avec la dynamique de séchage à partir d'avril, et remontent ensuite brutalement à partir d'octobre, suivant en cela les alternances entre saison sèche et saison humide.

Dans le détail on relèvera cependant des différences entre les capteurs situés en bas (niveau 2) et ceux en milieu de talus (niveau 3).

En bas de talus (Figure 13), les teneurs en eau à la surface (-0,25 m – sonde n°6), sont plus faibles qu'en profondeur.

Pour autant, la sonde la plus profonde, à -0,75 m (sonde n°4) a une teneur en eau plus faible que la sonde située à -0,50 m (sonde n°5) ce qui n'est pas très logique. Il peut s'agir soit d'un problème de calibrage de la sonde, soit d'une réalité physique. Les variations de teneurs en eau à la surface (-0,25 m) sont importantes, de l'ordre de 20 % avec des minimums d'environ 7 % et des maximums de l'ordre de 27 %. À profondeur intermédiaire (-0,50 m) les variations sont encore de l'ordre de 20 % avec des minimums de 15 % et des maximums de 35 %. En profondeur (-0,75 m) les variations sont atténuées et de l'ordre de 10 % environ, avec des minimums de 22 % et des maximums de 32 %. On peut observer que les variations de teneurs en eau à 0,25 et 0,50 m de profondeur sont très similaires et assez prononcées, alors qu'en profondeur, les variations sont beaucoup plus atténuées, preuve d'une infiltration très modérée à forte profondeur. Les teneurs en eau jusqu'à profondeur moyenne suivent assez bien les variations de la pluviométrie lorsque celle-ci atteint des valeurs significatives de pluviométrie (> 2 mm).

En milieu de talus (Figure 14), les valeurs de teneurs en eau augmentent logiquement avec la profondeur. Les sols sont plus secs en surface et plus humides en profondeur. L'amplitude des variations de teneurs en eau est de l'ordre de 10 % en surface avec des minimums de 15 % et des maximums de 25 %. À profondeur moyenne l'amplitude est de 15 % avec des minimums de 16 % et des maximums de 31 %. En profondeur, l'amplitude de teneur en eau est de 12 % avec des minimums de 20 % et des maximums de 32 %. Même si les valeurs sont différentes, on observe un comportement en variations assez bien corrélé entre les trois sondes, ce qui indique que les infiltrations se répercutent proportionnellement avec la profondeur.

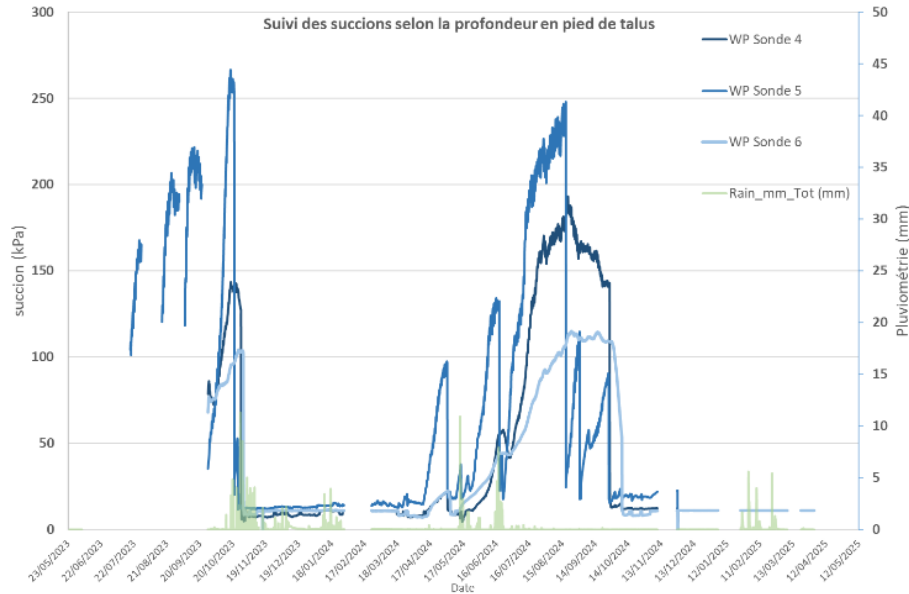


Figure 11. Suivi de la suction en fonction de la profondeur en pied de talus

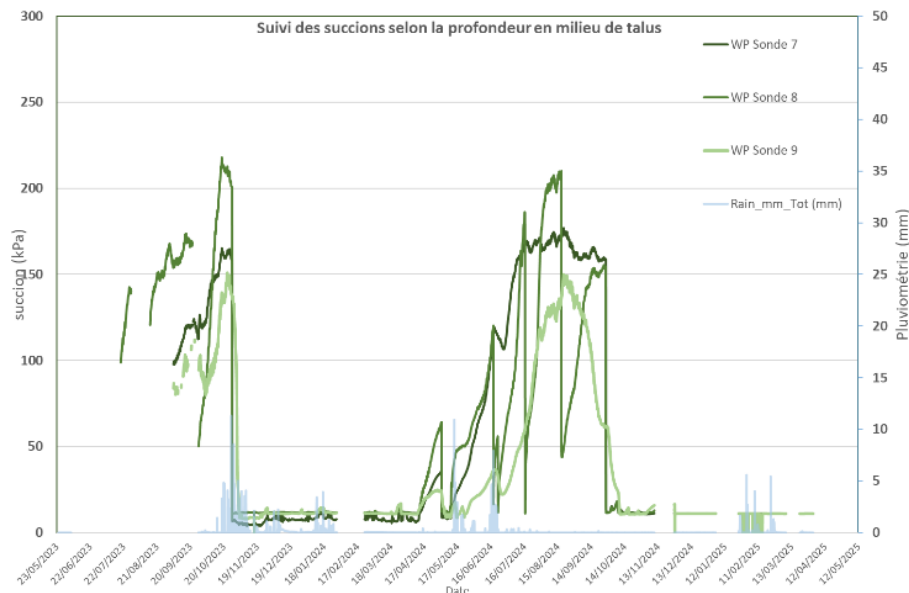


Figure 12. Suivi de la suction en fonction de la profondeur en milieu de talus (du plus foncé en profondeur, au plus clair vers la surface), avec indication de la pluviométrie en bas du graphique

## 5 CONCLUSION

L'acquisition de données permet d'observer les interactions sol-atmosphère sur une digue renforcée en 2023 par recharge, pose de filtre en talus et fossé drainant en pied de digue. Les deux premières années de suivi font ressortir les enseignements suivants:

- Le corps de digue ancien : on constate que les teneurs en eau du matériau qui constitue le corps de digue ancien sont influencées par les variations météorologiques mais avec un décalage de 6 mois environ. Même si ces variations de teneur en eau sont

faibles (+/- 2 %) elles restent plutôt surprenantes pour cette partie d'ouvrage protégée par le filtre et la recharge. Dans le même temps, les suctions n'évoluent pas.

- Le drain de pied de digue : à l'exception d'un évènement pluvieux intense, le drain de pied semble ne pas enregistrer d'arrivées d'eau entre le moment de la mise en place du drain (mai 2023) jusqu'en octobre 2024, soit plus d'une année après la mise en service. Après une année de service où le drain ne semble pas fonctionner, on constate que le matériau s'humidifie ensuite très régulièrement, avec une origine de l'eau qui reste à définir car elle ne semble pas corrélée directement avec la pluviométrie.

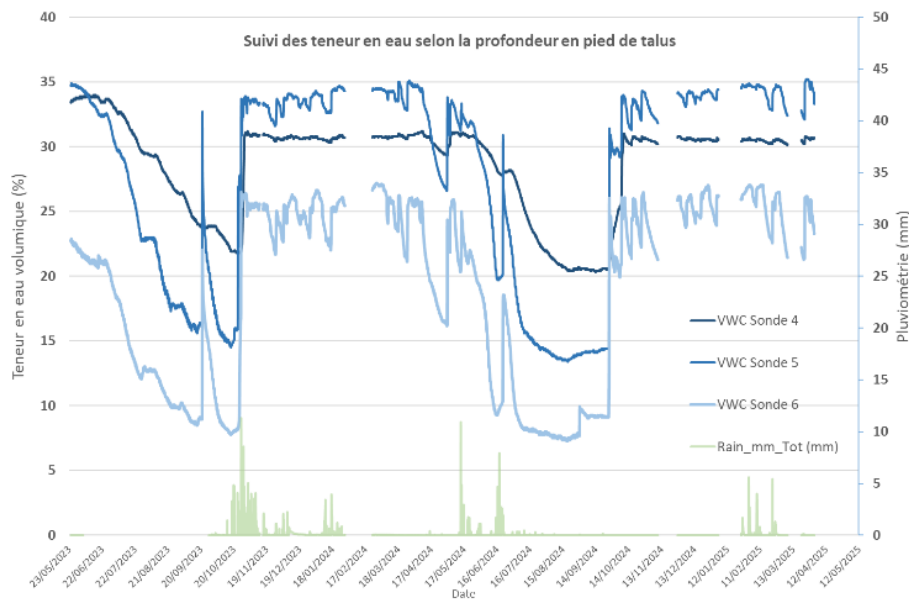


Figure 13. Suivi de la teneur en eau en fonction de la profondeur en pied de talus

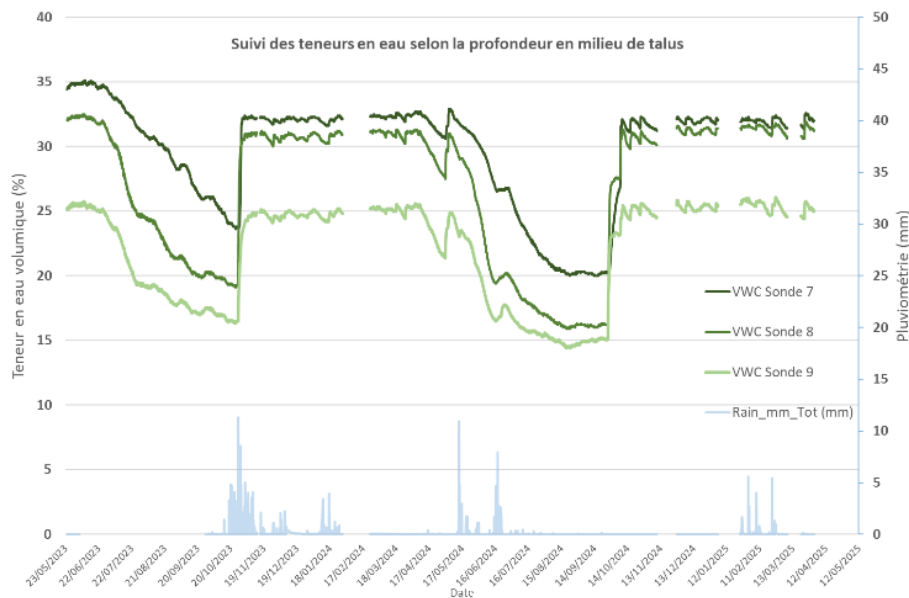


Figure 14. Suivi de la teneur en eau en fonction de la profondeur en milieu de talus (du plus foncé en profondeur au plus clair vers la surface), avec indication de la pluviométrie en bas du graphique

- Le filtre en talus : le matériau qui compose cette partie d'ouvrage en surélévation par rapport au terrain naturel sèche durant les deux années d'observation. Les valeurs de teneurs en eau se stabilisent autour d'une teneur en eau résiduelle. Aucun évènement pluvieux ne semble se répercuter sur le filtre dans sa partie haute.
- La recharge poids : composé d'un matériau contenant une part non négligeable de fines, le massif de recharge est logiquement sollicité par l'environnement météorologique ambiant. Le matériau sèche très fortement du printemps jusqu'au début de l'automne, avec un maximum atteint à la mi-août 2024. L'intensité du séchage est la plus forte sous

la surface du talus et s'atténue avec la profondeur. À 0,75 m de profondeur (sur une ligne horizontale) on enregistre encore du séchage. Pendant la période hivernale humide, de fin septembre à début avril, le matériau retourne à un état saturé. L'amplitude de variation de teneur en eau volumique est très prononcées en surface (+/- 20 %) et s'atténuent en profondeur (+/- 10 %).

Ces données constituent une première étape dans l'observation des échanges sol-atmosphère. Il reste de nombreuses données à interpréter, telles que les valeurs de niveaux d'eau dans le sol, les relations entre succion et teneur en eau volumique, ainsi que les images des talus. Ces informations permettront de

compléter les observations sur le comportement de l'ouvrage en relation avec l'atmosphère ambiante.

Les prochaines étapes seront ensuite focalisées sur la modélisation des échanges hydriques, ce qui permettra de définir des indicateurs météorologiques ayant un impact sur les performances de la digue. Un des axes principal de la recherche sera de détecter l'apparition des fissures de retrait en talus, de faire le lien avec les valeurs physiques de teneur en eau et de succion mesurées dans le sol et la météorologie et, enfin, d'évaluer leur impact sur la performance de l'ouvrage en cas d'inondation.

## 6 REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre des conventions entre le Cerema, l'université Gustave Eiffel et la DGPR. Nos remerciements vont à la DGPR, la Métropole de Tours et aux personnes de la DREAL Centre-Val-de-Loire qui se reconnaîtront ici et sans qui l'expérimentation n'aurait pas pu être possible.

## 7 RÉFÉRENCES

- Ayssami, D., Boussafir, Y., Hemmati, S., Chevalier, C., Reiffsteck, P., 2025. Effect of varying hydric cycles on the different properties of a silt-kaolinite mixture. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 29, 3527–3552. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2523891>
- 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* 17, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.009>
- Bottema, M., 2019. Mitigating drought risk for levees. 11th ICOLD European Club Symposium Proceedings. Chania, Crete, 2-4 October 2019.
- Boussafir, Y., Bicalho, K.V., Cui, Y.-J., Mercadier, D., 2018. Vers une meilleure compréhension des interactions sol-atmosphère d'un remblai grâce au monitoring.
- CFBR, 2021. Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai - cadre général.
- De Baecque, M., 2019. Caractérisation multi-physique de la durabilité d'un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes. Université Paris Est, Marne-la-Vallée.
- Dion, R., 1961. Histoire des levées de la Loire, CNRS Editions. ed.
- Dyer, M., Utili, S., Zielinski, M., 2009. Field survey of desiccation fissuring of flood embankments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* 162, 221–232. <https://doi.org/10.1680/wama.2009.162.3.221>
- Illés, Z., 2022. Effect of climate change on earthworks of infrastructure: statistical evaluation of the cause of dike pavement cracks. *Geoenvironmental Disasters*.
- Khandelwal, Siddharth, 2011. Effect of desiccation cracks on earth embankments (Master of Science). Texas A&M University.
- Mankour Y., 2019. Durabilité des digues fluviales. Thèse Université Paris-Est.
- Mehenni, A., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2016. Impact of Lime, Cement, and Clay Treatments on the Internal Erosion of Compacted Soils. *J. Mater. Civ. Eng.* 28, 04016071. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001573](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001573)
- Satrya, T.R., Soemitro, R.A.A., Mukunoki, T., 2017. Change of Soil Properties in the Bengawan Solo River Embankment due to Drying–Wetting Cycles 48.
- Vahedifard, F., AghaKouchak, A., Robinson, J.D., 2015. Drought threatens California's levees. *Science* 349, 799–799. <https://doi.org/10.1126/science.349.6250.799-a>