



## Ouvrages Fluviaux

Journée présentée par

Sylvie Bretelle, Pascal Aguado (CFMS) et Philippe Gotteland (FNTP)

À la Maison des Travaux Publics

Journée parrainée par HUESKER et NGE



## Ouvrages Fluviaux

De l'intérêt de l'instrumentation et du suivi des  
digues de protection – exemple des levées de Loire

PATOUILLARD, Sébastien (DREAL-CVL) – SAUSSAYE, Lucile (Cerema)

Contributeurs : Yasmina Boussafir, Loïc Gervais, Alain Le Kouby,  
Christophe Chevalier

18 JANVIER 2023

# Généralités sur l'instrumentation des ouvrages hydrauliques

## Qu'est-ce qu'une instrumentation ?

- Terme générique désignant la **mise en place de divers instruments de mesures** (capteurs, etc.) permettant **d'acquérir des données** pour la **surveillance**, le **contrôle** ou l'**observation**
- L'instrumentation d'un ouvrage nécessite :
  - Une **question**
  - Une **phase de conception**
  - Une phase de **mise en œuvre** et de **suivi/acquisition**
  - Une phase **d'exploitation** des données et **d'interprétation**
  - Une phase de **maintenance** des dispositifs (pérennisation vs arrêt)



## Le corpus documentaire

- Il est très fourni pour les **barrages** ou la **géotechnique**
- Dans le domaine des barrages, sujet fortement documenté depuis 1969 (CIGB)
- En géotechnique, norme NF EN 18674-1 « *Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 1 : règles générales* »



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Généralités sur l'instrumentation des ouvrages hydrauliques

## L'état actuel de la pratique pour les digues

- Historiquement, **les digues de protection** des grands fleuves bénéficient d'outils de mesure des hauteurs d'eau (voire des débits) en lien avec les enjeux en période de crue et d'étiages (échelles limnimétriques, réseau de stations hydrométriques, etc.)
- Les mesures du **comportement structurel des digues** relèvent d'**initiatives particulières** (fibre optique pour de la gestion de crise, des piézomètres et quelques autres dispositifs d'alerte liés à la surveillance de certains tronçons)
- En France, quelques sites répertoriés au travers de communications (cf. carte digues de canaux et de protection confondues)
- En Europe, une 10<sup>aine</sup> de projets de recherche, mais peu d'instrumentations « opérationnelles »
- Dans le monde, de nombreuses communications sur du suivi aéroporté, ou par satellites, mais peu d'instrumentations proprement dites
- Principales attentes des gestionnaires : **surveillance des ouvrages** pendant les crues, **maintenance préventive** en complément des inspections techniques programmées



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Généralités sur l'instrumentation des ouvrages hydrauliques

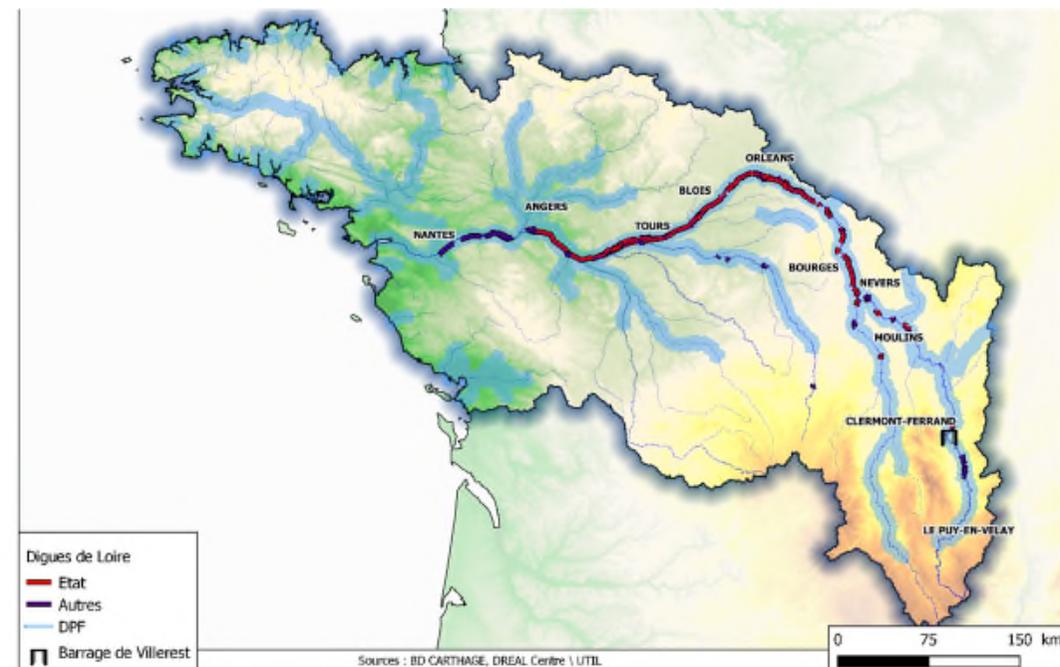
## Exemples d'instrumentation sur les levées de Loire

Réflexion sur l'opportunité de mettre en place des dispositifs d'auscultation et d'instrumentation sur certains tronçons de levées de la Loire Moyenne afin de répondre à plusieurs enjeux :

- 1- Pérennité de certains ouvrages de confortement des digues
- 2- Tenue des digues vis-à-vis du changement climatique
- 3- Surveillance des digues en crue

Pour illustrer cette réflexion, la présentation s'appuie sur 3 exemples documentés :

- Suivi de la levée à Veuves (41)
- Instrumentation de la levée de Tours Loire amont à Montlouis-sur-Loire (37)
- Instrumentation de la levée de Tours Loire aval à La Riche (37)





# Pérennité des ouvrages de confortement



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES –  
EXEMPLE DES DIGUES DE LOIRE  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

## 2 chantiers d'écran étanche par tranchée de sol mixé à Veuves et Montlouis-sur-Loire

Objectifs :

- Vérifier la pérennité de la solution de confortement de corps de digue par tranchée de sol mixé
- Evaluer la durabilité du matériau sol-ciment



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée de Veuves (41)

- Levée du val de Cisse-Vouvray, 45 km, en rive droite de la Loire : protège environ 10 000 habitants contre les inondations
- Travaux de réalisation de tranchée de sol mixé de mars à avril 2014



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée de Veuves (41)

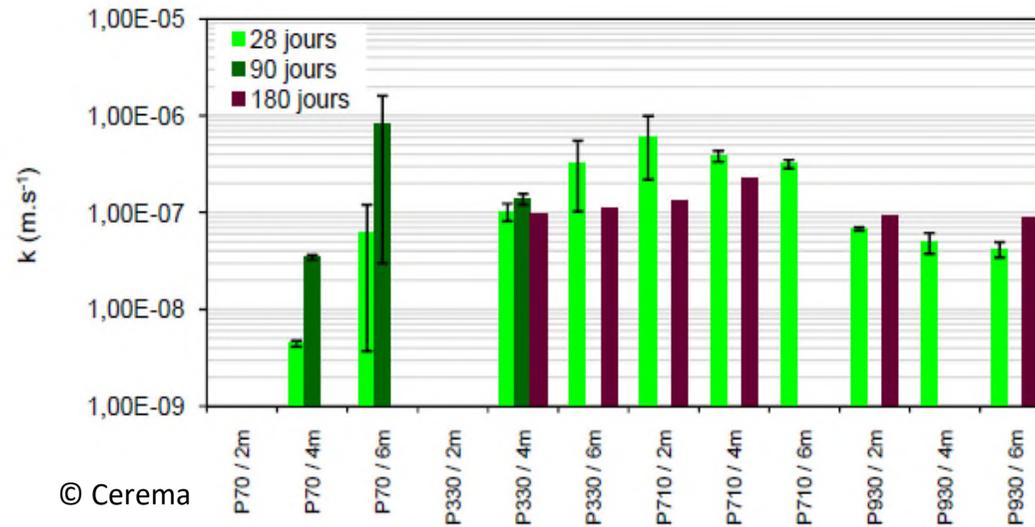
➡ Planche d'essais :

- Contrôle interne :
  - éprouvettes pour les mesures de perméabilité inexploitable
  - résistances à la compression simple  $R_{c28} < 1,5 \text{ MPa}$  (non conforme)
- Contrôle extérieur :
  - $k_{28} > 1.10^{-8} \text{ m/s}$  (non conforme)
  - éprouvettes pour les essais de résistance à la compression simple inexploitable

# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée de Veuves (41)

➤ Exécution de la tranchée :  $k_{28} > 10^{-8}$  m/s (laboratoire, essai d'infiltration simple anneau),  $R_{c28} < 1,5$  MPa



➤ Essais dans la planche d'essais en juillet 2014 :  $k_{28} < 10^{-8}$  m/s, éprouvettes pour  $R_c$  non exploitables  
→ mise en place d'un suivi sur 10 ans

DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée de Veuves (41)

- 1<sup>er</sup> protocole : mesures de perméabilité en forage sur 3 points particuliers de la tranchée
- Essais dans l'écran et dans le corps de digue pour comparaison en mars 2015



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée de Veuves (41)

- 2<sup>ème</sup> protocole : mesures de perméabilité sur 10 ans de l'écran sur 3 points particuliers de la tranchée
- Suivi en 2016, 2017, 2019 et 2021 ; prochaine mesure en 2023



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée Tours Loire amont à Montlouis-sur-Loire (37)

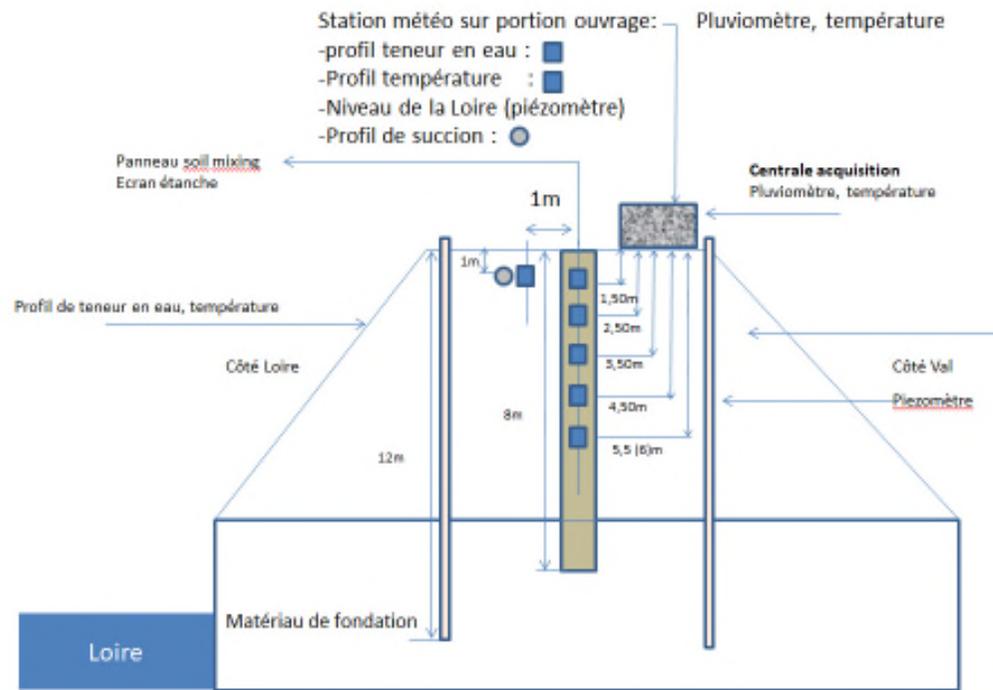
- Levée de Tours Loire amont, 10 km, en rive gauche de la Loire : protège environ 120 000 habitants contre les inondations
- Travaux de réalisation de tranchée de sol mixé en octobre 2017



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOULLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

- Instrumentation de la tranchée de sol mixé et du corps de digue
- Mise en place d'une station météorologique (température, pluviométrie)



© Univ. Eiffel

Ecran étanche

2 sondes TDR dans le corps de digue à 1 m de profondeur



© Univ. Eiffel

Sonde TDR



Centrale d'acquisition et station météo

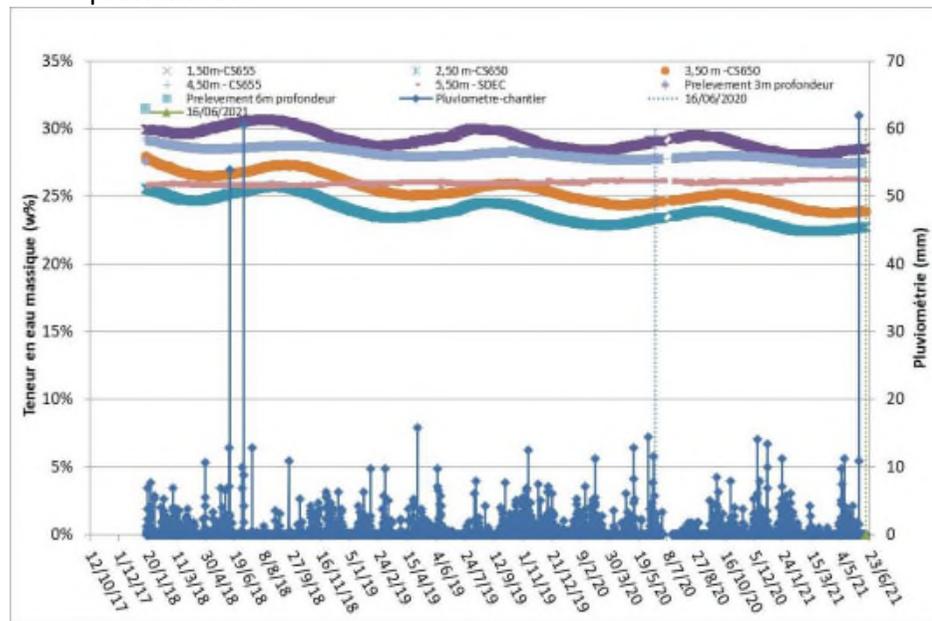


DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
 PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
 18 JANVIER 2023

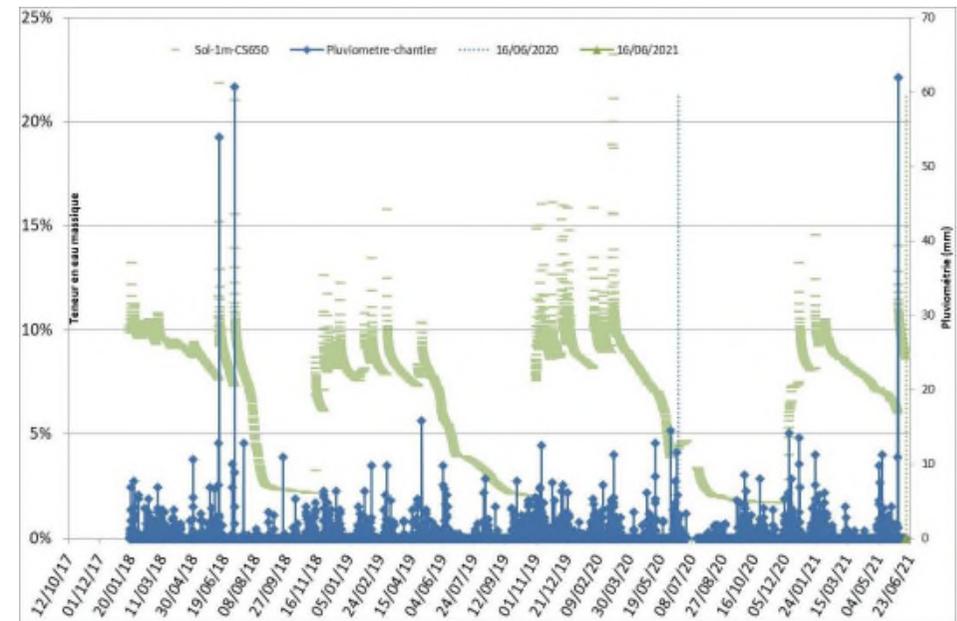
# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée Tours Loire amont à Montlouis-sur-Loire (37)

➤ Teneurs en eau volumique de la tranchée de sol mixé vs pluviométrie



➤ Teneur en eau volumique du corps de digue vs pluviométrie



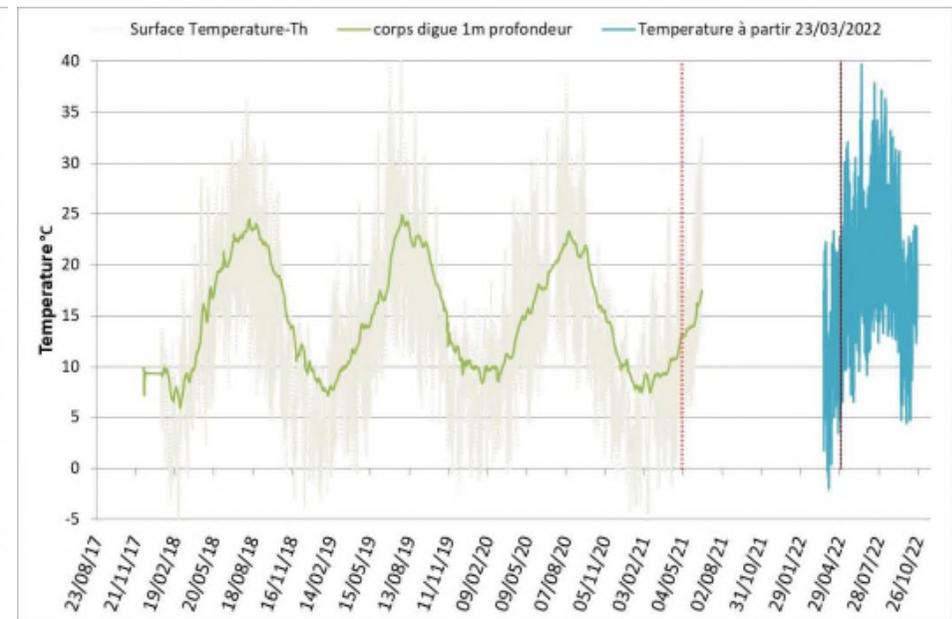
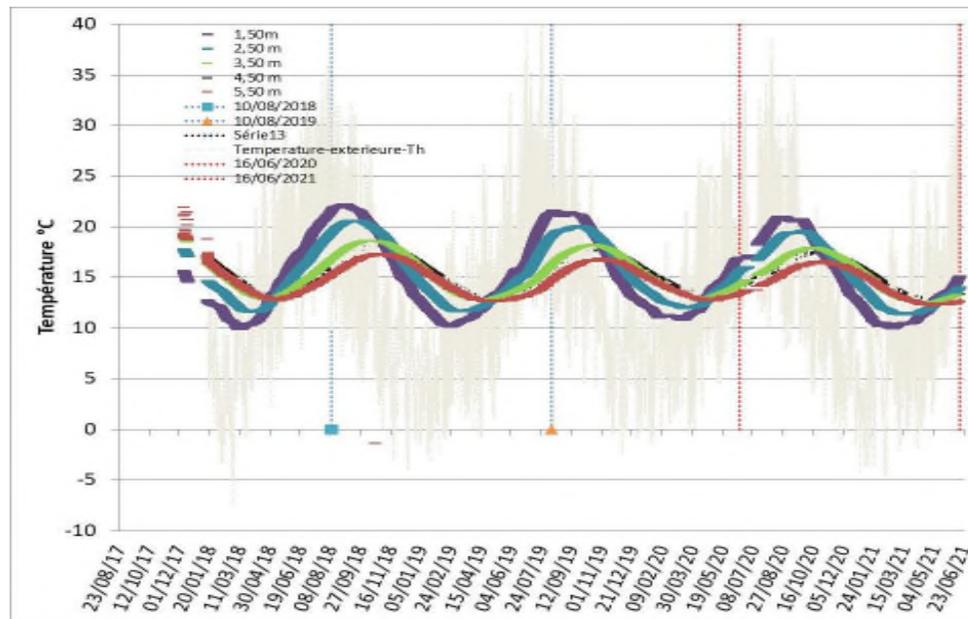
DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Pérennité des ouvrages de confortement

## Exemple du suivi de la tranchée de sol mixé de la levée Tours Loire amont à Montlouis-sur-Loire (37)

Températures de la tranchée de sol mixé vs température extérieure

Température du corps de digue vs pluviométrie



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Evolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique

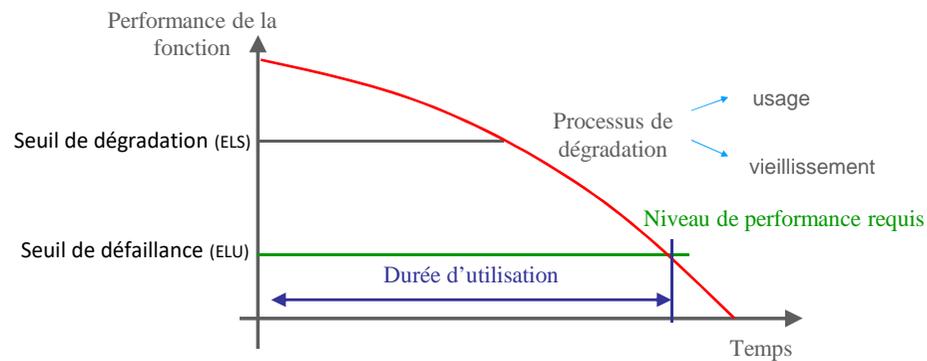
# Evolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique

## Exemple de l'instrumentation de la levée de Tours Loire aval à La Riche (37) à l'occasion de la réalisation de l'épaississement côté val (recharge aval)

- Levée de Tours Loire aval, 16 km, en rive gauche de la Loire : protège environ 100 000 habitants contre les inondations
- Travaux de réalisation de recharge aval de janvier à avril 2023

Objectif de l'instrumentation :

- **Observation** du comportement de la digue vis-à-vis de son environnement
- **Adaptation de la conception** des ouvrages de protection contre les inondations au changement climatique



(Tourment et al., 2013)

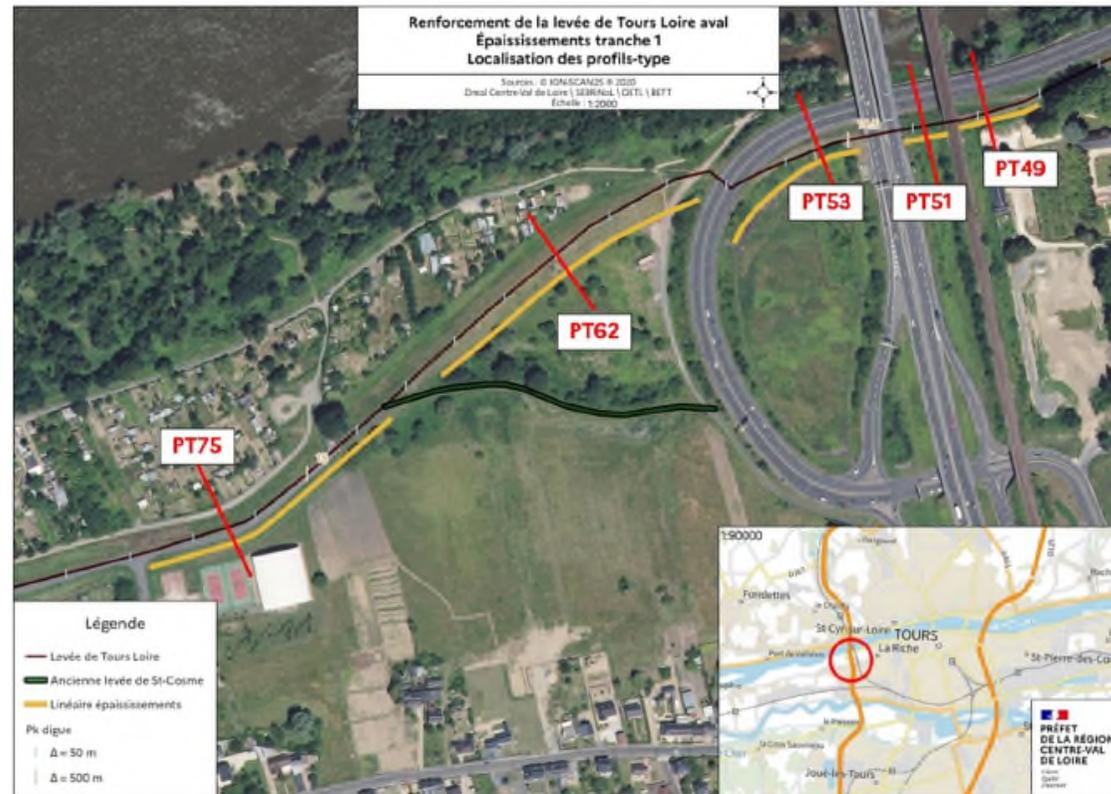


Digue de Thorngumbald, Royaume-Uni (Dyer et al., 2007)



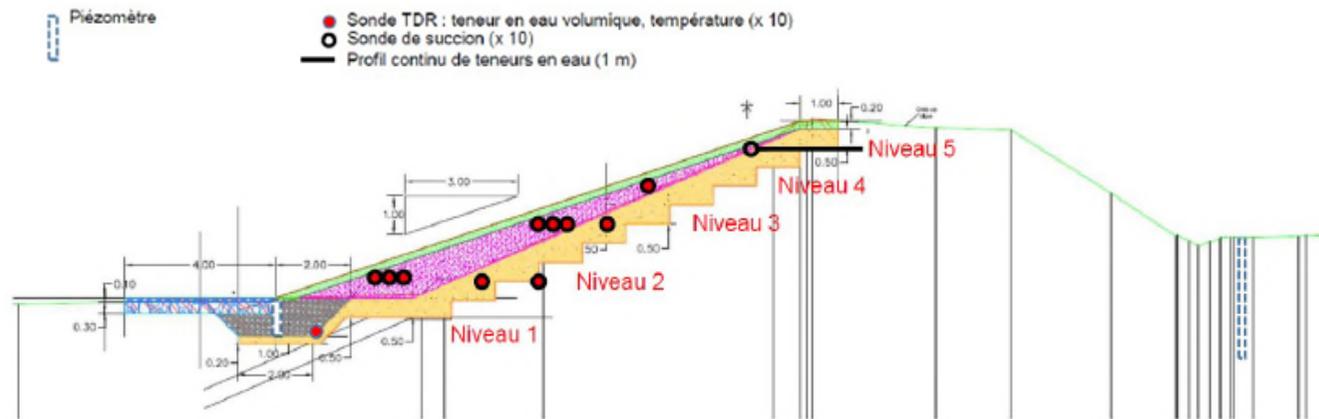
Digue en Charente-Maritime (Nedelec et al., 2013)

# Evolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Evolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique



- 10 sondes TDR : mesures de teneur en eau volumique et de température
- 1 ligne de 1 m équipée de sondes de mesures de la teneur en eau volumique
- 10 sondes de succion : mesures de la tension de l'eau dans le sol (suction)



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023





# Surveillance des ouvrages en crue

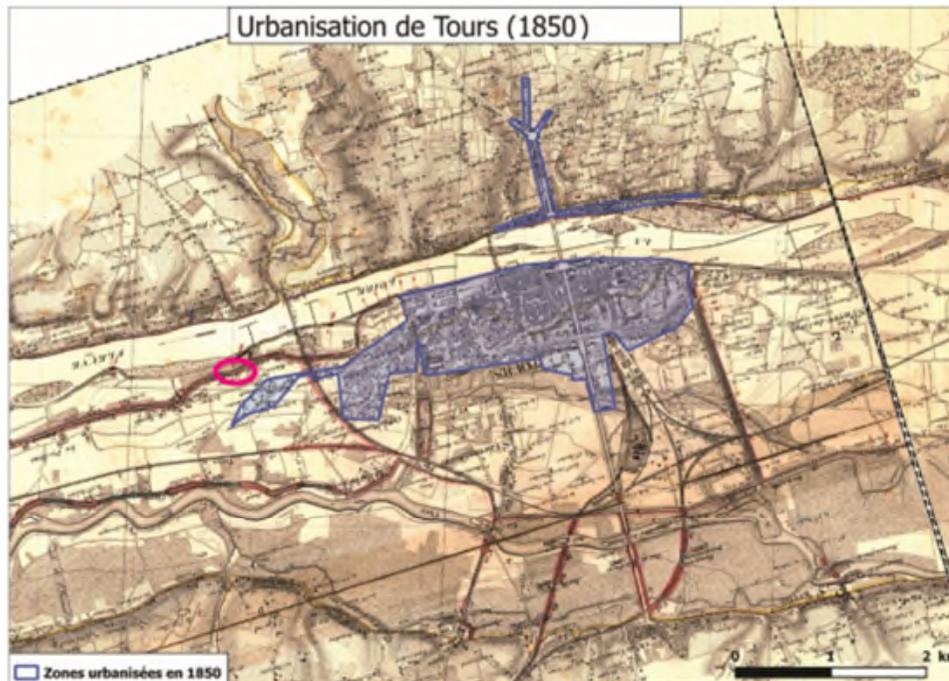


DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES –  
EXEMPLE DES DIGUES DE LOIRE  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Surveillance des ouvrages en crue

## Perspective d'instrumentation du système d'endiguement de Tours (37)

➤ Surveillance via l'instrumentation de la levée de Tours Loire aval à La Riche (37)



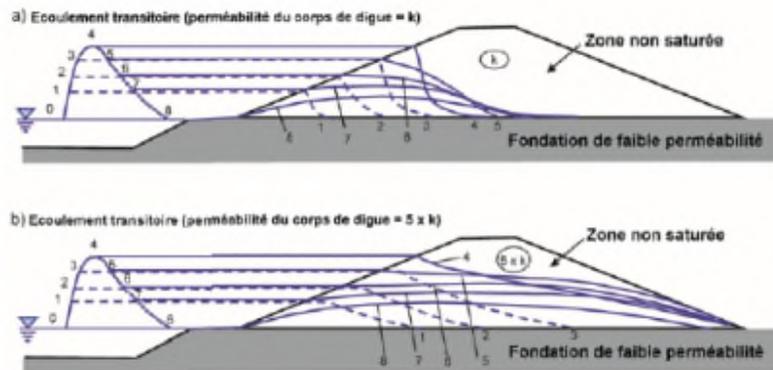
DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Surveillance des ouvrages en crue

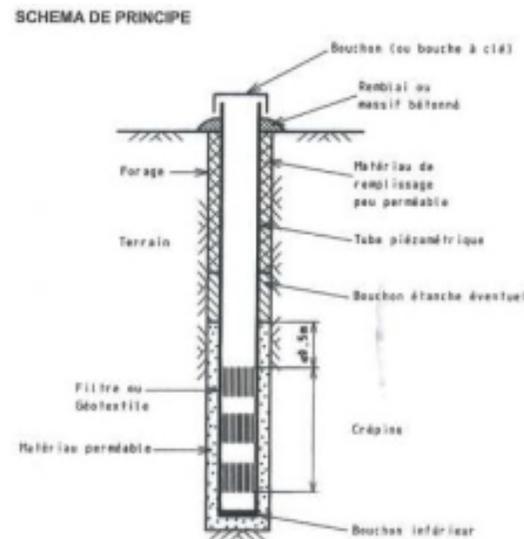
## Perspective d'instrumentation du système d'endiguement de Tours (37)

Objectif :

- Instrumentation de la levée par piézomètres
- Surveillance en crue



CIRIA, 2013



© Wikhydro, Wikigeotech



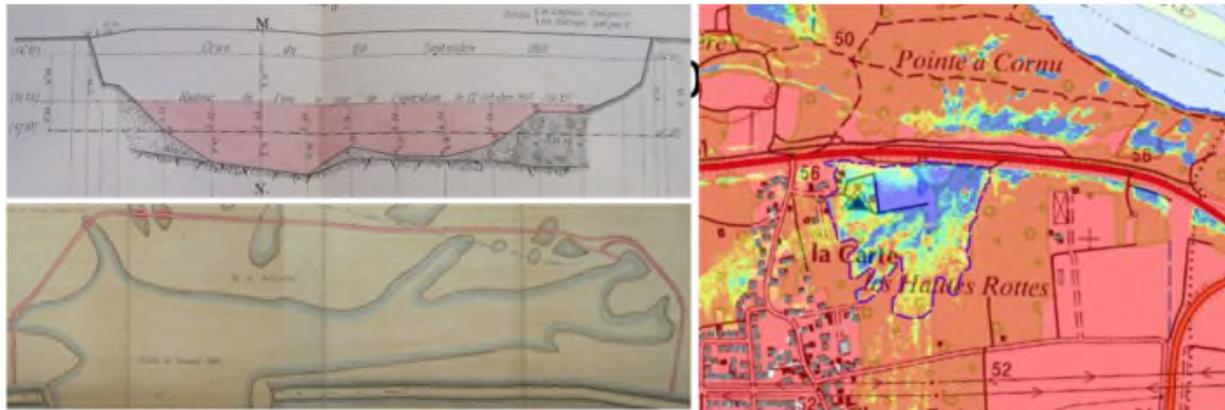
© SDEC France

DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
 PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
 18 JANVIER 2023

# Surveillance des ouvrages en crue

## Perspective d'instrumentation du système d'endiguement de Tours (37)

➤ Exemple de site propice à l'instrumentation pour une surveillance en crue



**Brèche de Conneuil dans la levée de Tours Loire amont lors de la crue de septembre-octobre 1866 :**

- 1- Dessin en coupe de 1866
- 2- Dessin en plan de la réparation provisoire après la crue (digue entourant la fosse d'érosion côté fleuve)
- 3- Modèle numérique de terrain actuel à l'emplacement de la brèche

Source : DREAL CVL / DETL

DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023



# Conclusions et perspectives



DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES –  
EXEMPLE DES DIGUES DE LOIRE  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Conclusions et perspectives

➤ **Documentation** importante concernant l'auscultation et l'**instrumentation des barrages** (CIGB)

➤ Pour les digues de protection :

Pas d'obligation réglementaire pour les digues de protection

Historiquement et en fonction des enjeux, elles font l'objet de **suivis des hauteurs d'eau / débits**

**MAIS** les mesures du **comportement structurel des digues** sont rares et relèvent d'**initiatives particulières**

➤ **3 exemples d'instrumentations / 3 usages différents / plusieurs objectifs couverts**

Pérennité des ouvrages de confortement tels que les écrans étanches sol-ciment  
(mais pas que)

Evolution du comportement d'une digue vis-à-vis du changement climatique  
(à lier avec les évolutions du cours d'eau)

Surveillance des ouvrages en crue  
(sujet sur lequel les attentes sont les plus fortes mais qui comporte aujourd'hui plusieurs limites)

DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOUILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

# Conclusions et perspectives

## Réflexion sur les limites de l'instrumentation des digues de protection

### ➤ Limites liées aux **dimensions des systèmes d'endiguement**

Gestion sur un grand linéaire

Sensibilité importante aux évolutions de l'environnement à grande échelle  
(dont impact du changement climatique, mais pas que...)

### ➤ Limites liées **l'échelle de temps**

Vieillessement des ouvrages (dont intérieur du corps de l'ouvrage)

Récurrance de sollicitation des ouvrages

Evolution de la gestion

DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOULLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

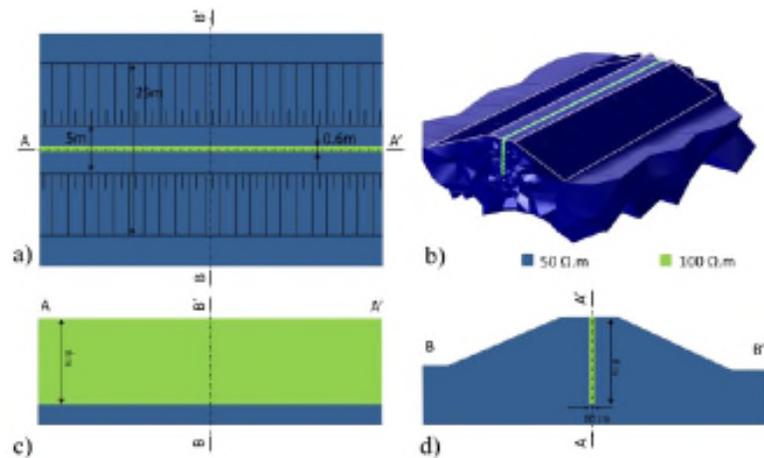


**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**

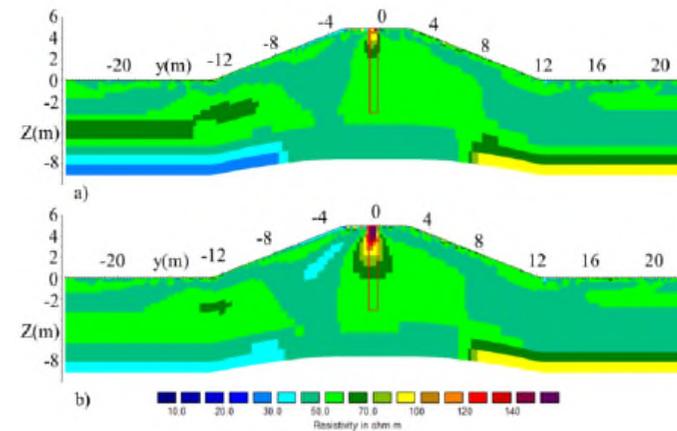


# Pérennité des ouvrages de confortement

➤ Fargier *et al.* (2016). Renforcement des digues de Loire par la méthode deep soil mixing : contrôle par techniques géophysiques. JNGG 2016, Nancy, France



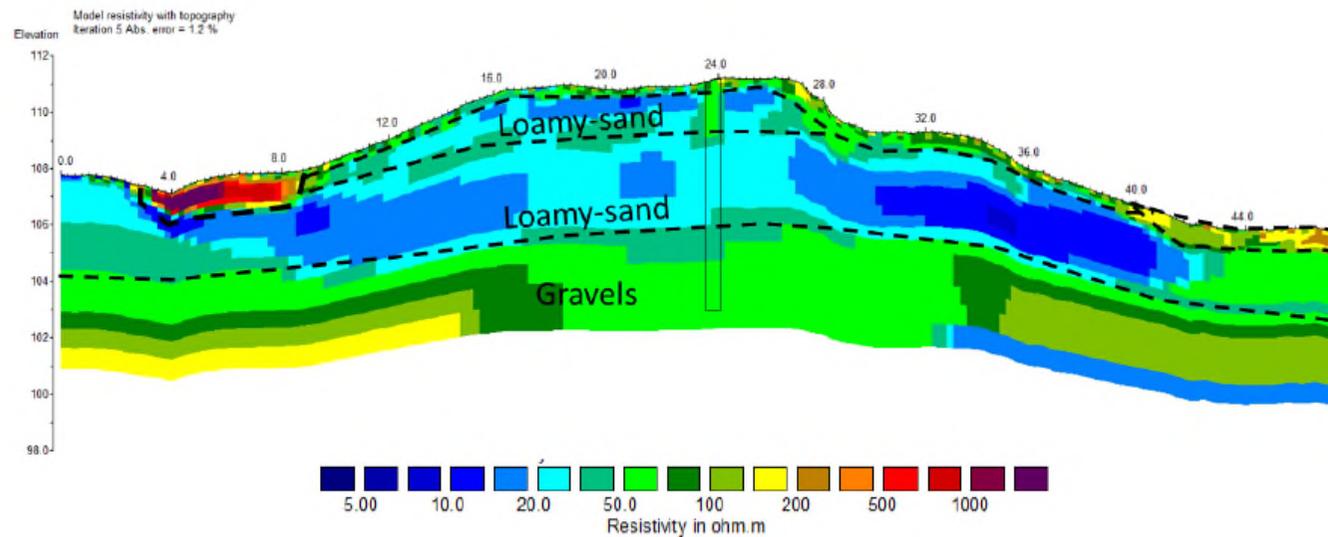
Milieu simulé par éléments finis de la digue (en bleu) et de l'écran étanche (en vert) : (a) vue en plan, (b) en perspective, (c) section longitudinale et (d) et section transversale (d)



Inversion des données pour un écran étanche de résistivité 100  $\Omega$ .m (en haut) et 200  $\Omega$ .m (en bas)

# Pérennité des ouvrages de confortement

- Fargier *et al.* (2016). Renforcement des digues de Loire par la méthode deep soil mixing : contrôle par techniques géophysiques. JNGG 2016, Nancy, France



## Coupe transversale de la résistivité électrique de la digue

La position de l'écran étanche est surimposée par un rectangle noir  
Les couches composant la digue sont également distinguées par un tracé en pointillés

DE L'INTERET DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI DES DIGUES  
PATOILLARD, Sébastien – SAUSSAYE, Lucile  
18 JANVIER 2023

