

Approche multi-méthode pour le diagnostic d'état des ouvrages hydrauliques de grand linéaire

Multi-method approach for diagnosing the condition of long linear hydraulic structures

*Christophe VERGNIAULT*¹, *Cyrille DOGOR*¹, *Vincent GUIHARD*², *Guy D'URSO*², *Pierre VAUDELET*³, *André REVIL*⁴, *Jean-Robert COURIVAUD*⁵, *Bruno DAUMAS*⁶

1 EDF-DI-TEGG, 905, Avenue du camp de Menthe Cedex 02, 13097 Aix-en-Provence, FRANCE, christophe.vergniault@edf.fr, cyrille.dogor@edf.fr

2 EDF R&D, département PRISME, bâtiment U, 6 quai Watier, BP 49, 78401 CHATOU – France, vincent.guihard@edf.fr, guy.durso@edf.fr

3 NAGA Geophysics, 12 allée du lac de Garde, Technolac - 73374 Le Bourget-du-Lac, pierre.vaudelet@naga-geophysics.com;

4 Université Savoie Mont-Blanc EDYTEM CNRS UMR 5204 5 Boulevard de la Mer Caspienne, 73370 Le Bourget-du-Lac, France, andre.revil@univ-smb.fr

5 EDF – Hydro, Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH), Savoie Technolac, 4 allée du Lac de Tignes, 73290 La Motte Servolex, jean-robot.courivaud@edf.fr

6 EDF Hydro, CIH Aix-en-Provence, service Génie Civil, 1165 Avenue JRG Gautier de la Lauzière, 13290 Aix-en-Provence, bruno.daumas@edf.fr

Résumé. Dans la méthodologie mise en œuvre par EDF pour le diagnostic d'état d'une structure hydraulique de grand linéaire (type digue de canal), les reconnaissances complémentaires géophysiques ont un poids important pour pouvoir effectuer le diagnostic en minimisant les contraintes sur l'exploitation du canal. Un plot d'essais, représentant 300 ml sur les 22 km d'un canal, a été réalisé afin d'évaluer in-situ la pertinence de la démarche usuelle. Cet article résume ce plot d'essai et les résultats obtenus. L'enseignement méthodologique tiré confirme la pertinence d'avoir une approche graduelle, des méthodes dont la production est la plus grande (PS) vers celles qui présentent le plus de contraintes d'acquisition (acoustique), mais en passant également par une nouvelle étape avec la combinaison ERT&PP. Cet enchaînement de mesures demande toutefois une forte anticipation et de prendre le temps de croiser les nombreuses sources d'informations pour converger vers un diagnostic collégial, à l'image de la démarche du domaine médical.

Abstract. In the methodology carried out by EDF for the diagnosis of the state of a long linear hydraulic structure (canal type), the additional geophysical surveys have a significant weight to be able to carry out the diagnosis while minimizing the constraints on the operation of the canal. A trial survey, representing 300 ml over the 22 km of the canal, was carried out in order to assess in situ the relevance of the usual approach. This article summarizes this trial phase and the results obtained. The methodological lesson learned confirms the relevance of having a gradual approach, from methods with the greatest production (PS) to those with the most acquisition constraints (acoustics), but also going through a new stage with the ERT & PP combination. However, this sequence of measures requires strong anticipation and taking the time to cross-reference the many sources of information to converge on a collegial diagnosis, like the approach in the medical field.

1 Introduction

Dans le domaine médical, effectuer un diagnostic c'est dénommer une situation à partir d'un recueil de signes (étude sémiologique) en se basant sur des examens cliniques (anamnèse) et ceux complémentaires d'un plateau technique pour les examens paracliniques (biopsie, fibroscopie, imagerie). Cet enchainement est illustré par la moitié gauche de la figure 1. L'ensemble des différents diagnostics sont partagés et recoupés par les différents spécialistes, voire toute une équipe, pour converger vers un diagnostic collégial afin de maximiser sa robustesse et gérer les conséquences. Toutes proportions gardées sur les conséquences, un parallèle est réalisable entre le domaine médical et celui d'un diagnostic pour un projet d'ouvrage ou directement sur un ouvrage de génie-civil. L'examen clinique du médecin devient celui du géologue ou du géotechnicien. Les examens paracliniques par biopsies, fibroscopies deviennent carottages et diagaphies. Les méthodes d'imagerie se retrouvent également, mais le scanner l'échographie et l'électroencéphalogramme deviennent radar, sismique et Polarisation Spontanée et le radiologue devient géophysicien. Cet enchainement est illustré par la moitié droite de la figure 1. La partie en bas à droite de la figure illustre que le modèle final reflète au mieux l'objet étudié quand l'ensemble des différents diagnostics sont partagés pour converger vers un diagnostic collégial et dans la négative le modèle peut déformer sensiblement l'objet.

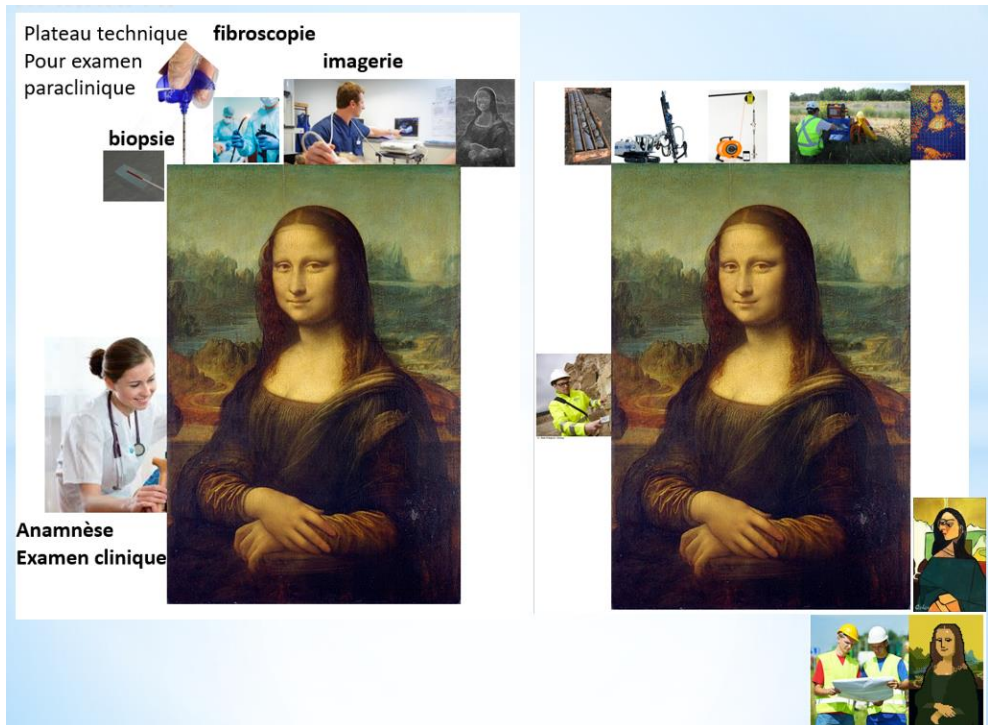


Figure 1 : parallèle entre un diagnostic médical et de génie-civil, L'examen clinique du médecin devient celui du géologue ou du géotechnicien. Les examens paracliniques par biopsies, fibroscopies deviennent carottages et diagaphies. Les méthodes d'imagerie se retrouvent également, mais le scanner l'échographie et l'électroencéphalogramme deviennent radar, sismique et Polarisation Spontanée et le radiologue devient géophysicien. Enfin, le modèle final reflète au mieux l'objet étudié quand l'ensemble des différents diagnostics sont partagés pour converger vers un diagnostic collégial.

Le parallèle avec le diagnostic médical étant fait, si on se focalise sur la transposition au cas précis d'un diagnostic d'état d'une structure hydraulique de grand linéaire (type digue de canal), dans la méthodologie mise en œuvre par EDF, on peut noter le poids important des reconnaissances complémentaires géophysiques pour pouvoir effectuer le diagnostic en limitant l'impact sur l'exploitation, soit sans vidange du canal. En effet, dans le cadre de l'Examen Préalable au Diagnostic Exhaustif (EPDE) du tronçon d'un canal, servant à actualiser son Etude De Dangers (EDD), conformément aux prescriptions techniques définies par des arrêtés du Ministère de la transition écologique et solidaire (Arrêtés du 6 août et 3 septembre 2018), fréquemment il est réalisé une acquisition géophysique aquatique d'ensemble qui est sensible aux écoulements dans les remblais, par la méthode de la Polarisation Spontanée (PS, cf. § méthode PS). Puis le diagnostic sur les zones suspectes est affiné par une analyse de la signature du bruit de fond acoustique afin d'isoler des zones de perte (Bory et al., 2018).

Toutefois, dans certains contextes géologiques des verrous existent, notamment quand la fraction argileuse ou limoneuse domine, différentes simulations montrent que l'amplitude de la signature des potentiels de Polarisation Spontanée (PS) attendue en cas de fuite serait trop faible (quelques mV, cf. § méthode PS) pour être détectée de façon fiable avec les dispositifs opérationnels sur le marché (il faut plutôt considérer un seuil de 10 mV).

En conséquence, en phase de préparation à un EPDE sur un tronçon de canal, un plot d'essais, représentant 300 ml sur les 22 km du canal, a été réalisé afin d'évaluer in-situ la pertinence de la démarche usuelle de diagnostic. De plus, afin de pallier aux limites mise en évidence par simulation, l'objet de ce plot d'essais était également d'évaluer la pertinence des dernières évolutions, aussi bien en matériels (pour la méthode PS et acoustique) que méthodologique (avec la combinaison de la Tomographie de Résistivité Electrique et de la Polarisation Provoquée). La zone étudiée a été choisie, car elle est représentative de tronçon avec une pathologie d'écoulement faible dans le remblai, connu et suivi.

Sur la zone d'études, les méthodes géophysiques suivantes ont été successivement mises en œuvre:

- la Polarisation Spontanée (PS) aquatique,
- la Tomographie de Résistivité Electrique (ERT), combinée à la Polarisation Provoquée (PP),
- le bruit de fond dans le domaine acoustique (Fuite Buster)

L'implantation de ces profils est schématisée sur la figure 2.

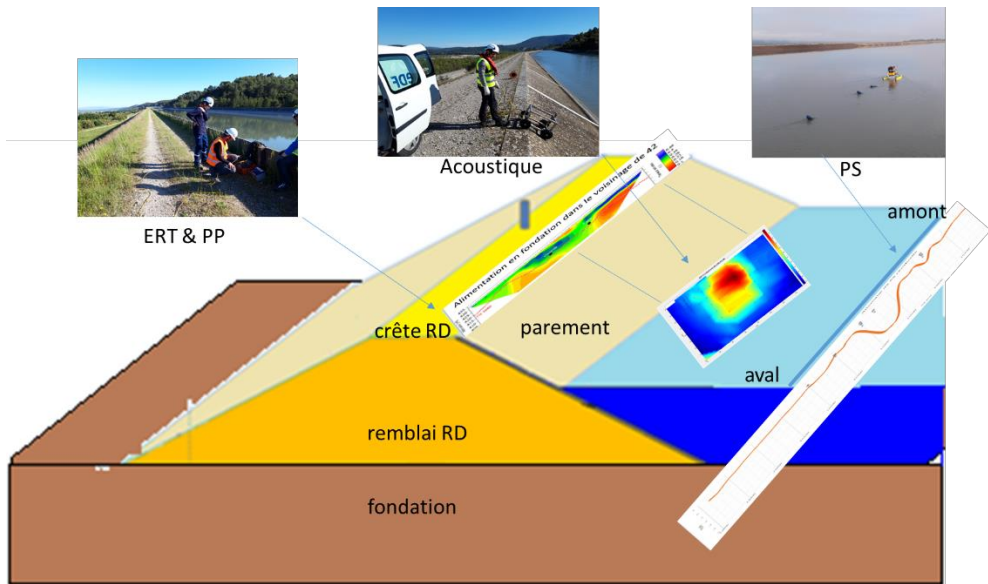


Figure 2 : Schéma d'implantation des profils réalisés avec la PS sur le plan d'eau, ERT&PP en crête et l'acoustique le long du parement sous eau.

L'objet de cet article est de montrer l'apport favorable d'une nouvelle combinaison d'investigations complémentaires géophysiques, dans la réalisation d'un diagnostic d'état d'une structure hydraulique de grand linéaire (canal), en s'appuyant sur les résultats du plot d'essais.

Afin de répondre à l'objectif posé, cet article est construit de la façon suivante. Dans un premier temps on trouvera des généralités sur l'ensemble des méthodes exploitées. Ensuite on exposera les travaux réalisés pour lever les verrous et enfin on discutera des résultats d'un plot d'essai.

2 Généralités sur les méthodes mises en œuvre

La polarisation spontanée (PS)

Un écoulement d'eau dans un milieu poreux génère naturellement un courant électrique appelé courant électrocinétique. Ce courant électrique est associé à un champ électrique appelé potentiel spontané. Les fluctuations du champ de potentiel spontané peuvent être mesurées en utilisant des électrodes non polarisables. La méthode géophysique qui s'intéresse à la mesure de ces fluctuations, est dite la méthode du Potentiel Spontané (PS). Elle est l'une des rares méthodes à être très sensible aux flux hydriques, relativement peu coûteuse et facile à mettre en œuvre, car elle ne nécessite que l'utilisation de deux électrodes non polarisables que l'on connecte à un voltmètre. De ce fait, la méthode PS est un outil intéressant pour la détection des fuites dans les digues et les barrages.

Des travaux conduits par EDF et ISTERRE sur une digue expérimentale (Soueid-Ahmed et al., 2019) ont permis de valider le développement d'une chaîne de simulation numérique et de montrer l'importance que peut avoir cette modélisation dans la compréhension et l'interprétation des signaux de potentiel spontané qui peuvent être affectés par d'autres sources de potentiels comme ceux d'oxydo-réduction. Les simulations montrent notamment qu'une zone de pertes se traduit par une anomalie négative caractéristique.

En amont d'une campagne, il est également important de définir par cette modélisation les gammes des fuites détectables dans un contexte donné, afin de vérifier que le rapport coût bénéfice justifie la reconnaissance.

La tomographie de résistivité électrique (ERT)

Cette méthode électrique consiste à appliquer une suite de créneaux de courant (mesure dite en courant continu) entre deux électrodes implantées dans le sol et à mesurer la différence de potentiel entre deux électrodes de mesure. En présence d'une flûte d'électrodes, les points d'injection et de mesure sont pilotés par un programme informatique (protocole). Ceci permet de combiner la réalisation d'une série de sondages et de traînées suivant un profil. La mesure est celle d'une résistivité apparente, qui est fonction de la nature du sous-sol et de la dimension du dispositif utilisé. Ces résistivités apparentes mesurées peuvent être représentées sous forme de pseudo sections, qui reflètent qualitativement la variation spatiale de la résistivité apparente, mais qui n'est pas une coupe des résistivités et profondeurs vraies des structures du sous-sol. Pour cela, à partir de la pseudo-section il est possible en utilisant des logiciels de modélisation itérative (inversion) d'obtenir une coupe de la variation de la résistivité calculée, variation qui peut être alors interprétée géologiquement.

Cette méthode est un bon compromis entre qualité et prix pour définir l'épaisseur de la couverture, d'une zone altérée, préalablement à d'éventuels travaux de terrassement. En revanche, elle manque de contraste pour différencier un sable sous nappe d'un matériau argileux. De plus, souvent la résolution est trop faible pour imager finement une structure avec précision et définir avec fiabilité les profondeurs.

Enfin, il est important de noter que les travaux menés par EDF (Vergniault et al., 2017) ont permis de conclure qu'avec une mise en œuvre au centre de la crête d'une digue peu à moyennement résistive ($< 300 \text{ ohm.m}$), cette méthode est peu affectée par la géométrie spécifique de la digue, alors qu'à une distance d'une modification topographique inférieure à l'espacement inter électrode il y a un effet et il faut le prendre en compte dans l'inversion. Dans le cas où les matériaux dépassent les 1000 ohm.m , l'impact du bassin doit être étudié plus finement.

La Polarisation Provoquée (PP)

La méthode de polarisation provoquée mesure un paramètre appelé chargeabilité. Le produit de la chargeabilité M par la conductivité électrique est appelée chargeabilité normalisée M_n . Elle traduit l'emmagasinement réversible de charges électriques dans le sous-sol.

Les mesures de terrain en PP ne sont pas aussi aisées que les mesures de résistivité électrique et le principe est schématisé par la figure suivante. Dans le domaine temporel, un courant est imposé pour une durée relativement longue (temps d'injection (T_{on}) de 1 seconde par exemple) sur les électrodes A et B ; la différence de potentiel est enregistrée aux électrodes M et N après un temps mort (typiquement 0.2 à 0.4 s qui correspond aux perturbations électromagnétiques par induction et couplage capacitif dans les câbles). Après l'arrêt du courant primaire, entre les électrodes A et B, la différence de potentiel secondaire suit une loi exponentielle par rapport au temps. Sur l'ABEM SAS1000 ou SAS4000, on mesure la réponse sur dix fenêtres généralement de 0.1 seconde chacune. Pour additionner des mesures, mieux vaut faire un stack par mesure et relancer l'ensemble de l'acquisition.

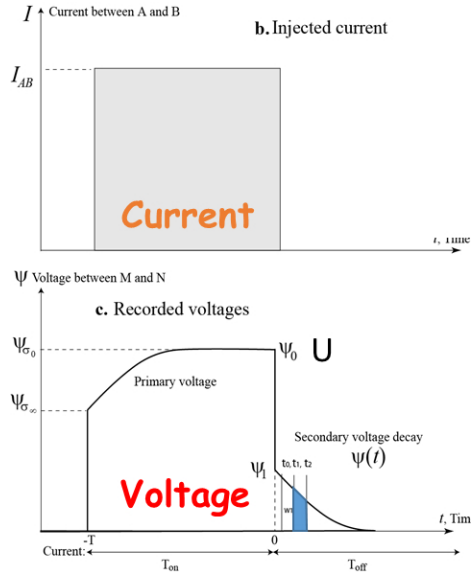


Figure 3 : Dans le domaine temporel, un courant est imposé pour une durée relativement longue (temps d'injection (T_{on})) sur les électrodes A et B (graphe du haut) ; la différence de potentiel est enregistrée aux électrodes M et N (graphe du bas) après un temps mort. Sur l'ABEM SAS1000 ou SAS4000, on mesure la réponse sur dix fenêtres généralement de 0.1 seconde chacune (zone bleue).

Les deux formules suivantes permettent de calculer la chargeabilité (ceci a un impact sur l'unité)

$$M_{12} = \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad [IP \text{ ms}] \quad , \text{Eq 1} \quad M_{12} = \frac{M_{12}(\text{ms})}{(t_2 - t_1)(s)} \quad [IP \text{ mV/V}] \quad , \text{Eq 2}$$

Ensuite, il est possible de calculer la Chargeabilité normalisée (Mn)

$$M_n \text{ (S/m)} = \frac{M_{12}(\text{mV/V})}{1000} * \sigma \text{ (S/m)} \quad , \text{Eq 3}$$

La résolution d'un problème inverse (inversion) permet d'obtenir les tomogrammes des propriétés électriques du sol (résistivité ou conductivité, chargeabilité normalisée). De plus, la chargeabilité normalisée est un paramètre qui dépend linéairement de la capacité d'échange cationique (CEC) et donc de l'argilosité. Dès lors, en définissant certaines hypothèses plus ou moins fortes (cf. relations ci-dessous), il est successivement possible de réaliser des tomogrammes d'argilosité, de teneur en eau et de perméabilité, qui peuvent s'avérer nettement plus parlant pour les hydrogéologues et géotechniciens (Soueid-Ahmed et al., 2020).

Evaluation de l'argilosité à partir de Mn et σ :

$$CEC = \frac{Mn}{\Phi^{(m-1)} * \rho_g * \lambda} \quad , \text{Eq 4 avec} \quad \Phi = \left[\sigma - \frac{Mn}{R} \right] / \sigma_w \quad \left(\frac{1}{m} \right) \quad , \text{Eq 5}$$

La conductivité de l'eau porale σ_w est mesurable, mais des hypothèses doivent être prises pour m (entre 1.6 et 2.1), ρ_g la densité des grains, λ la mobilité des charges et R le rapport de la chargeabilité normalisée sur la conductivité de surface (entre 0.08 et 0.12).

Evaluation de la teneur en eau à partir de Mn et σ

$$w(\%) = S * \phi \quad , \text{Eq 6}$$

Donc sous nappe la teneur en eau volumique est directement liée à la porosité.

Hors nappe, c'est plutôt la saturation le paramètre clef en considérant un milieu globalement homogène

$$S = \frac{\sqrt[n]{(F * \rho_w) / \rho}}{\rho} \quad , \text{Eq 7 avec } \rho \text{ les résistivités de l'eau porale et de la matrice}$$

Le facteur de formation F , lui est obtenu par la relation suivante :

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma - \left(\frac{Mn}{R}\right)} = \phi^{-m} \quad , \text{Eq 8}$$

Il faut donc bien distinguer le cas hors nappe et sous nappe. La teneur en eau apparente étant calculé en considérant une saturation complète.

Evaluation de la perméabilité à partir de Mn et σ

$$k \text{ (m}^2\text{)} = \frac{\Phi^6 * 10^{43}}{(\rho_g * CEC)^2} \quad , \text{Eq 9}$$

***Bleu:** hypothèse forte sur les paramètres pétrophysiques, estimés sans distinction des formations mais la plage peut être réduite par mesures sur échantillon.*

L'acoustique (Fuite Buster)

La chaîne de mesure développée par EDF R&D (D'Urso et al., 2018) permet d'écouter à l'aide d'un hydrophone du bruit de fond dans le domaine acoustique et de l'enregistrer, afin de pouvoir l'analyser dans le but de détecter des fuites dans les retenues.

Les mesures sont classiquement analysées dans le domaine spectral en calculant la densité spectrale de puissance (DSP) du signal acoustique à l'aide d'un programme Matlab de EDF R&D. En effet, le traitement développé par R&D permet de réaliser une analyse statistique sur le spectrogramme (la représentation du contenu fréquentiel du signal en fonction du temps), afin de réaliser un filtrage des anomalies ponctuelles. Ce traitement consiste à réaliser une densité spectrale de puissance (DSP) en calculant un percentile fréquence par fréquence. Sur la base des expériences de la R&D, le percentile 75% est la valeur robuste généralement utilisée pour toutes les analyses.

De plus, la DSP est généralement calculée dans la bande de fréquence 200-5000 Hz, qui correspond au domaine classique des fuites. Les travaux de recherche menés par EDF R&D montrent que dans le domaine spectral, un écoulement se détache du bruit ambiant entre 100 Hz et 10 kHz.

3 Difficultés et défis relevés

Nous avons vu précédemment qu'une méthodologie appliquée par EDF pour le diagnostic des canaux consiste à faire une première acquisition aquatique en polarisation spontanée (PS), puis d'affiner le diagnostic sur les zones suspectes par une analyse du bruit de fond acoustique.

En effet, il est généralement admis qu'une signature d'électrofiltration (signal électrique lié à un écoulement dans un milieu granulaire) se caractérise par une chute de potentiel au droit de la zone de fuite (cf. § méthode PS). Toutefois, dans un contexte géologique comme celui du canal étudié (Remblais avec des alternances de niveaux de limons et sablo-graveleux sur fondation en limons ou sablo-graveleuse), des simulations faites par EDF R&D (étude interne de V. Guihard et présentation AGAP 2019, cf. exemple en figure 4) en 2020 montrent que l'amplitude de la signature des potentiels de Polarisation Spontanée (PS) attendue en cas de fuite serait de l'ordre de 1 mV à 5 mV, avec un maximum de 20 mV dans le cas le plus favorable où le remblai et la fondation seraient composés de matériaux sablo-graveleux et la fuite au niveau du radier. Dès lors, il apparaît que la précision des dispositifs du marché est inadaptée.

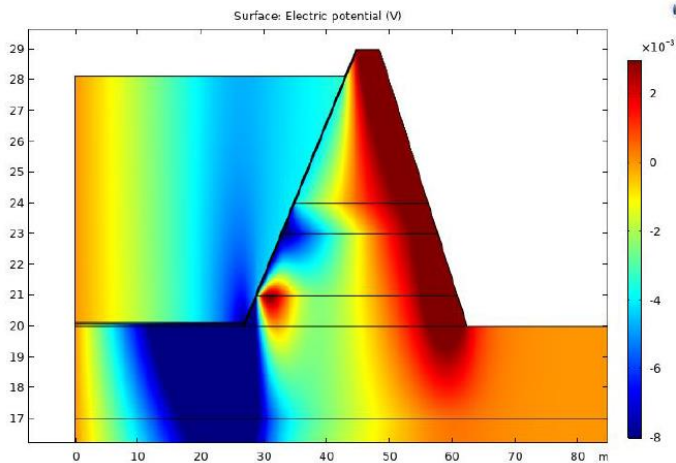


Figure 4 : Simulation d'une fuite en pied d'un remblai composé d'alternances sablo-graveleuses et d'une fondation plus limoneuse

Ceci compromettait donc l'utilisation de la méthode PS pour l'Examen Préalable au Diagnostic Exhaustif et il était nécessaire de trouver une alternative robuste pour pouvoir continuer d'envisager un ETC sans vidange, car analyser tout le canal par la méthode du bruit de fond acoustique (FuiteBuster) est irréalisable en raison des contraintes d'acquisitions de cette dernière méthode (300 points par jour, canal à l'arrêt et météo favorable).

Pour relever ce défi, EDF a donc agi sur plusieurs tableaux, notamment par :

- le développement en interne d'une chaîne de mesure PS de précision (cf. figure 4),
- l'utilisation de la méthode de polarisation provoquée combinée à la tomographie électrique (PP et ERT), mise en œuvre par la société Naga.



Figure 5 : Dispositif de mesure PS aquatique de précision développé par EDF

Le dispositif d'acquisition PS développé par EDF met l'accent sur l'isolation des différents potentiels mesurés. En effet, on a vu précédemment que le potentiel spontané (PS) est une méthode passive consistant à mesurer le champ électrique émis naturellement par le sous-sol à l'aide de deux électrodes impolarisables. Il peut donc être affecté par de nombreuses perturbations dans l'environnement de la chaîne de mesure. Un effort particulier a donc été fait sur l'isolation des voies, aussi bien par la qualité de la carte d'acquisition que celles des connectiques et des câbles.

Par ailleurs, la configuration d'acquisition classiquement utilisée est celle à base fixe où il y a une électrode de référence fixe et une de mesure mobile. Une autre configuration est celle en gradient où les deux électrodes sont mobiles. Après de nombreux essais, pour les mesures aquatiques nous avons opté pour cette configuration, afin de pouvoir embarquer tout le système sur un drone et éviter d'avoir un fil à terre.

La réalisation d'une batterie de tests a permis de vérifier que la chaîne de mesure développée par EDF-DI-TEGG atteint une précision inférieure au mV. Il faut noter que l'ensemble de ces évolutions permet de réaliser non seulement un gain en terme de précision de mesure, mais aussi en terme de vitesse d'acquisition et donc de coût, ainsi qu'en sécurité, car il n'y a pas d'opérateur sur le plan d'eau.

Toutefois, il restait nécessaire de valider in-situ la pertinence de l'approche expérimentale proposée par EDF-DI-TEGG et il a été choisi de faire cela par un plot d'essais.

4 Interprétation des résultats

Approche à grand rendement intermédiaire (base 10 km/jour) : méthode PS

L'acquisition PS aquatique réalisée déborde largement de la zone d'étude du plot d'essais. Le résultat est présenté directement après traitement, dont les principales étapes sont les suivantes : filtrage passe-bas, binning sur 30 cm, calcul du potentiel équivalent pour une base fixe, soustraction de la tendance régionale.

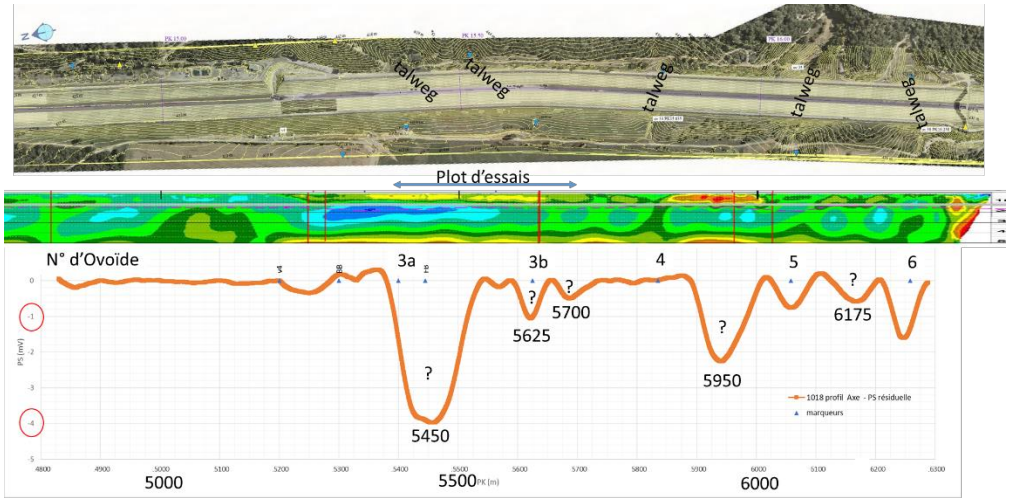
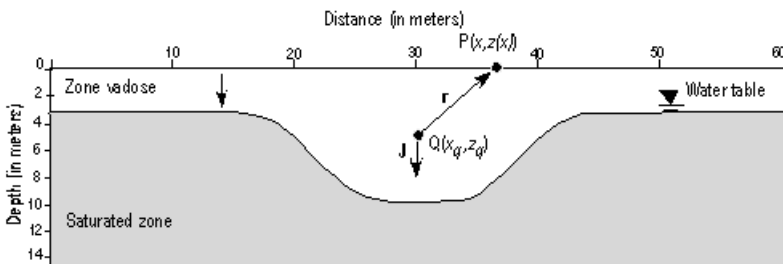


Figure 6 : Figure composite avec l'orthophotographie de la vidange de 2001, les profils ERT de 2012 et la PS aquatique de 2021, après traitement. La zone du plot d'essais est matérialisée par la flèche bleue.

Le premier constat factuel est la cohérence d'anomalies PS négatives et des talwegs soulignés par les ovoïdes 5 et 6. En effet, les ovoïdes sont des buses passant sous le canal et permettant de rétablir les écoulements des vallons perpendiculaires à l'ouvrage. Ce phénomène trouve une explication dans l'ouvrage d'André Revil et al. (2013) dont la figure 7 est extraite. On y note que deux modèles physiques se complètent pour expliquer les signaux PS :

- la percolation gravitaire de l'eau dans la zone vadose,
- la circulation de l'eau dans la zone saturée (qui est le phénomène d'électrofiltration considéré jusqu'à présent)



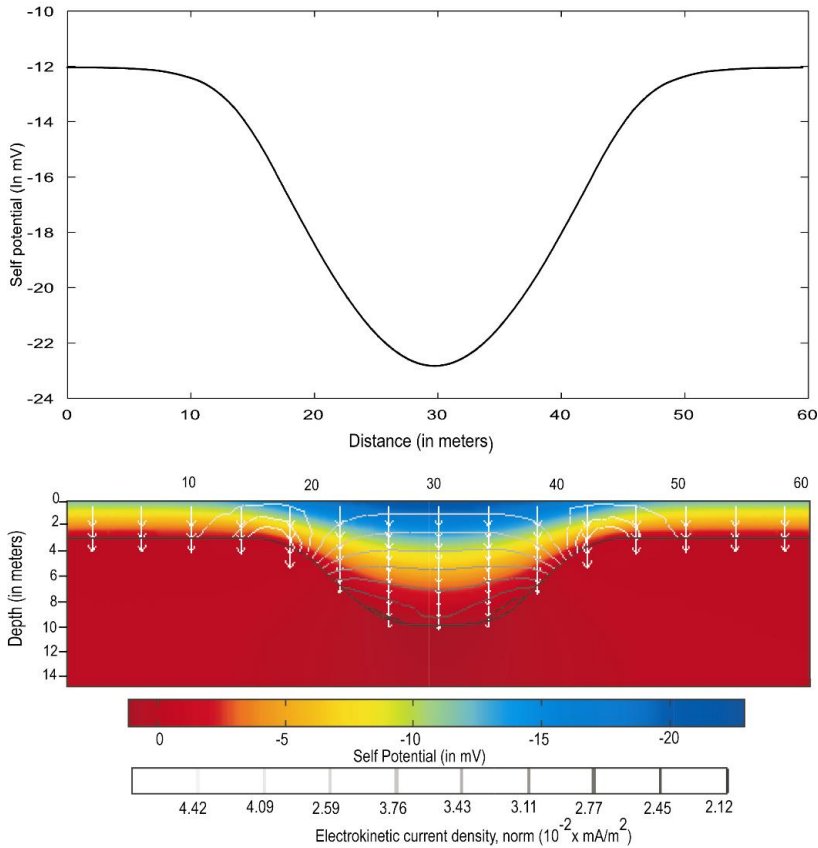


Figure 7 : -a- Schéma de la réponse PS (en mV) calculée à la surface pour un modèle de sol avec une nappe et la zone vadose sus-jacente qui suivent la forme d'un talweg.
 -b- Distribution du potentiel PS (en mV) calculé à l'aide d'un modèle numérique Comsol aux éléments finis. Les courbes de niveau indiquent l'amplitude de la densité de courant (en mA m⁻²), alors que les flèches indiquent la direction et le sens de l'écoulement dans la zone vadose.

Donc, finalement pour un milieu homogène, les variations du profil PS reflètent les variations de l'épaisseur de la zone non saturée. Ceci complique fortement l'utilisation de la méthode PS pour la détection des fuites, car si une fuite existe, alors un signal d'électrofiltration de l'écoulement de fuite va se superposer à celui de la percolation dans la zone vadose.

Pour compliquer encore un peu plus les choses, si un écoulement naturel se fait dans la nappe d'un talweg, perpendiculaire au canal, alors là aussi il faut s'attendre à avoir une signature PS sur l'ensemble des profils suivant l'axe du canal.

En intégrant toutes ces possibilités, trois critères doivent tout de même permettre d'attirer l'attention sur une zone et ainsi permettre en un classement du linéaire investigué :

- si la déflexion PS n'est pas centrée sur un talweg ou non liée à un talweg,
- si l'amplitude de la déflexion PS d'un talweg est nettement plus forte que celle des talwegs équivalents,
- si il n'y a pas de cohérence spatiale de l'anomalie de rive à rive (mais cela nécessite de faire une cartographie)

Idéalement, pour mettre en évidence une fuite, il serait donc intéressant de réaliser des acquisitions dans des conditions de nappe et de retenue antagonistes, mais ceci peut être difficile à concrétiser.

Donc, sur la base des 2 premiers critères précédents, à partir de la figure 6 on note :

- 4 zones singulières, car non centrées sur un ovoïde: PK 5.450, 5.700, 5.950 et 6.175 ; il est possible d'ajouter à cela l'anomalie du PK 5.625 qui est certes centrée au droit de l'ovoïde 3b, mais tout comme le 3a, l'ovoïde est en fait une buse non traversante juste pour améliorer le drainage et sans lien avec un thalweg
- 2 zones où l'amplitude des anomalies est la plus notable, respectivement de 4 et 2 mV au PK 5.450 et 5.950.

Toutes ces zones sont identifiées par un point d'interrogation sur la figure 5.

Concernant, l'anomalie du PK 5.450, dans l'environnement de l'ovoïde 3a. Elle pourrait en partie s'expliquer par un thalweg naissant, mais la signature PS est 4 fois plus forte que celles des talwegs des ovoïdes 5 et 6 qui sont très marqués dans la topographie. Cette anomalie PS est donc la plus suspecte de la zone.

En conclusion, la zone 50 m à l'aval de l'ovoïde 3a présente une signature PS au radier qui nécessite de poursuivre les investigations et cette zone a été retenue pour le plot d'essais ERT&PP.

Il est à noter que pour réaliser finement l'étape cruciale de sélection des zones d'intérêt, il est important de prendre le temps de croiser les informations, les diagnostics (topographie historique, hauteur des remblais, autres profils géophysiques et la connaissance des correspondants barrages) pour converger vers un diagnostic collégial, comme précisé en introduction.

Approche à rendement intermédiaire (base 500 ml/jour): méthodes ERT&PP

La première étape du traitement des données est de générer les tomogrammes de conductivité et de chargeabilité, par inversion jointes des données ERT et PP (cf. figure 8). La chargeabilité normalisée est calculée à partir de ces deux premiers tomogrammes par l'application de la relation 3.

La chargeabilité étant peu élevée et peu nuancée cela traduit une teneur en fines globalement faible sur l'ensemble du profil. Dès lors, la résistivité dicte fortement le résultat du tomogramme de chargeabilité normalisée. La chargeabilité normalisée est un indicateur de l'argilosité du milieu, ce tomogramme renseigne sur le contenu en argile. Les faibles valeurs traduisent qu'il y a pas ou peu d'argiles, alors que les fortes valeurs traduisent de plus fortes teneurs en argiles. Toutefois, dans notre cas d'étude les valeurs restent globalement faibles en raison de la faible teneur en argile.

Une zone conductrice attire l'attention sur le quart amont du profil, entre l'altitude du radier et du terrain naturel (TN), qui en raison de la faible teneur apparente en fine est à relier à la présence d'eau.

La cote du TN a été déterminée à partir des orthophotographies historiques par StyX4D travaillant avec Naga.

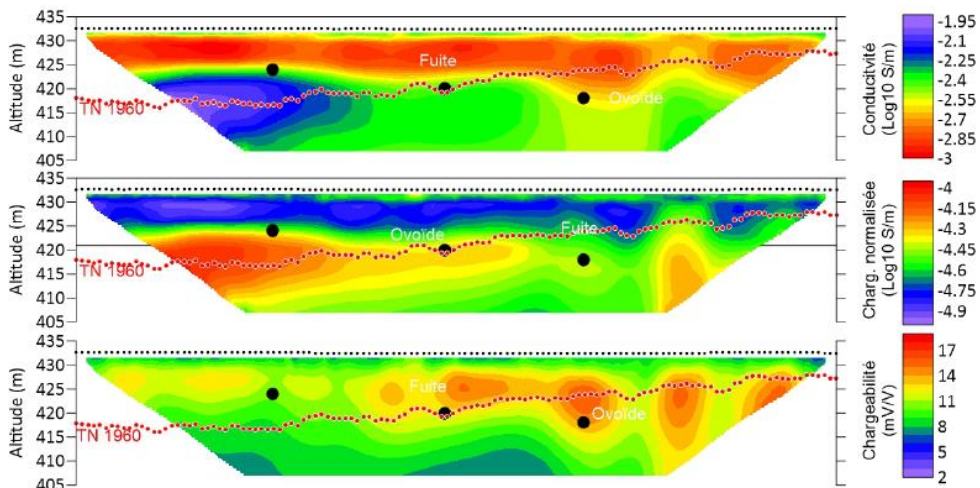


Figure 8 : Tomogrammes de Conductivité, Chargeabilité et chargeabilité normalisée perméabilité, avec un point noir pour localiser respectivement la fuite F1, F2 et l’ovoïde 3b.

Le traitement des tomogrammes précédents permettent en appliquant les relations 4 à 9 avec des hypothèses fortes sur les paramètres pétrophysiques (estimés sans distinction des formations, ni de la nappe) d’accéder à des tomogrammes plus lisibles du point de vue hydrogéologique (teneur en eau, argilosité et perméabilité, cf. § méthodes ERT et PP). En raison des hypothèses prises, l’analyse doit se faire de façon relative pour détecter des anomalies et non en valeur absolue. De plus, il est important d’intégrer le contexte (remblai globalement homogène latéralement en raison d’une construction par levés et hors nappe). Il est à noter que le tomogramme de teneur en eau reflétera fortement la saturation étant dans une zone hors nappe (vadose) jusqu’à l’altitude 412 m NGF.

Sur la figure 9, en cohérence avec le tomogramme de conductivité de la figure 8, la plus forte teneur en eau est au niveau du TN, à l’amont du profil, soit dans l’environnement direct de l’ovoïde 3a. La fuite F1 étant en partie haute de cette anomalie, il n’est pas étonnant qu’elle soit restée sèche lors de nos différentes interventions. En revanche, la fuite F2 est plus basse, au niveau du TN, elle peut donc être alimentée par un cheminement au contact.

Dans le tomogramme de perméabilité, la zone en jaune, au niveau du TN à l’amont du profil est probablement une zone d’écoulements préférentiels.

En cohérence avec le tomogramme de chargeabilité, le tomogramme d’argilosité ne présente pas d’écart véritablement notable et dans l’ensemble les valeurs sont faibles.

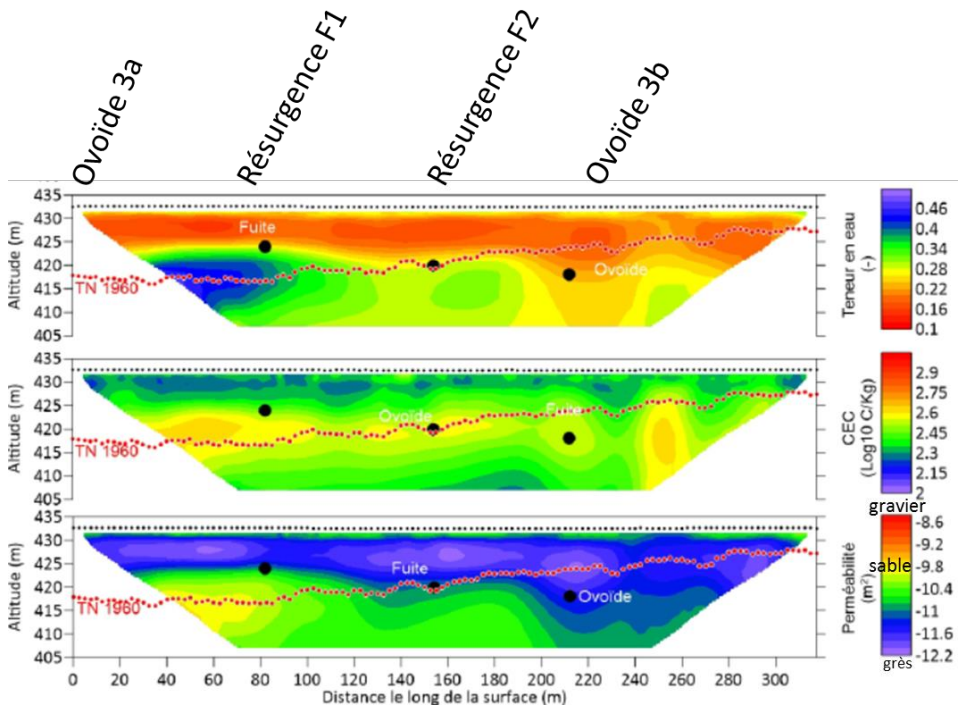


Figure 9 : Tomogrammes de Teneur en eau, argilosité et perméabilité

Le schéma qui se dessine à la lecture des profils dérivés des mesures ERT & PP est donc celui d'une circulation entre la cote du radier et le TN. Ce schéma est cohérent avec celui issu de l'analyse de la PS indiquant un signal d'électrofiltration au radier. Il reste donc à étudier le phénomène localement à partir du bruit de fond dans le domaine acoustique.

Approche locale (300 points/jour): Acoustique point par point (FuiteBuster v1)

La mesure acoustique étant une mesure point par point relativement longue la cartographie réalisée avec cette méthode est limitée. La zone étudiée est celle du parement RD, 45 m à l'aval de l'ovoïde 33a, sur 20 ml de part et d'autre de cet axe et entre 9 et 25 ml le long du parement. 25 ml étant le contact entre le pied du parement et le radier. Ceci représente 135 points de mesure suivant une maille de 2*4m.

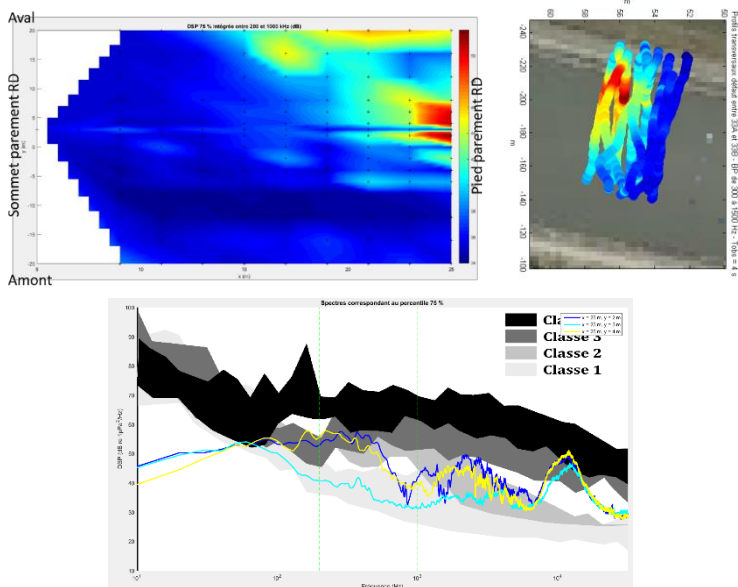


Figure 10 : Cartographie acoustique et DSP, le long du parapet 45 m à l’aval de l’ovoïde 3a et cartographie acoustique au radier avec la version en cours de développement par EDF R&D de la chaîne de mesure acoustique (Fuite Buster v2)

45 m à l’aval de l’ovoïde 3a, il y a bien un bruit au contact radier parapet sur plusieurs enregistrements (cf. cartographie en figure 10) avec un niveau de DSP compatible avec le gabarit des fuites (classe 2, pour courbes jaune pour $y=4$ et bleu foncée en $y=2$). De plus, les mesures faites par EDF R&D sur zone au droit du radier, dans le cadre du développement d’une nouvelle version de Fuite Buster (v2) confirment la présence d’une fuite au radier dans cette zone.

5 Conclusion

Du point de vue méthodologique le plot d’essais a confirmé la pertinence d’avoir une approche graduelle, des méthodes dont la production est la plus grande (PS) vers celles qui présentent le plus de contraintes d’acquisition (acoustique), avec des dispositifs de grande précision et permettant une démarche d’assurance qualité, mais en passant également par une nouvelle étape avec la combinaison ERT&PP.

Cet enchaînement de mesures demande toutefois une forte anticipation pour laisser suffisamment de temps d’analyse entre chaque étape. En effet, pour affiner l’étape de sélection des zones d’intérêt, cruciale pour l’optimisation de l’EPDE sans exclure des zones de désordre, il est important de prendre le temps de croiser les différentes sources d’informations : les diagnostics de surveillance (auscultation et inspection visuelle) ainsi que la topographie historique, la hauteur des remblais, les autres profils géophysiques pour converger vers un diagnostic collégial, à l’image de la démarche du domaine médical.

References

1. Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions Techniques relatives à la sécurité des Barrages, Ministère de la transition écologique et solidaire, Journal Officiel de la République Française, 29 août 2018
2. Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, Ministère de la transition écologique et solidaire, Journal Officiel de la République Française, 5 septembre 2018
3. Bory O., Girard B., Courivaud J.R., Vergniault C., 2018, Techniques de reconnaissances innovantes pour les études d'évaluation de la sûreté des barrages en remblais, Colloque CFBR 2018
4. Guihard V, Soueid-Ahmed A., Steck B., Vergniault C., Revil A., 2019, Auscultation non destructive des digues par la méthode du potentiel spontané, Journées scientifiques AGAP 2019
5. Revil A., Jardani A., 2017, The self-Potential Method, Cambridge university press
6. Soueid-Ahmed A., Steck B., Vergniault C., Revil A., Bolève A., 2019, Auscultation non destructive des digues par la méthode du potentiel spontané, Journées scientifiques AGAP 2019
7. Soueid-Ahmed A., Revil A., Abdulsamad F., Steck B., Vergniault C., Guihard V., 2020, Induced polarization as a tool to non-intrusively characterize embankment hydraulic properties, Engineering Geology 271 (2020) 105604
8. d'Urso G., Quentin-Froignant B., Courivaud J.R., 2018, Objectiver et fiabiliser la détection acoustique de fuites, COGECH 2018, Communication n°44
9. Vergniault C., Steck B., Courivaud J.R., Vincelas G., 2017, Apports d'une maquette de digue pour l'intégration des méthodes géophysiques aux diagnostics de sûreté des ouvrages hydrauliques en remblai : l'exemple de la résistivité, Journées scientifiques AGAP 2017