

FUSION DE DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET GÉOPHYSIQUES POUR LA CARACTÉRISATION D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE

FUSION OF GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL DATA FOR THE CHARACTERIZATION OF A HYDRAULIC STRUCTURE

Théo DEZERT^{1,2}, Yannick FARGIER^{2,3}, Sérgio PALMA LOPES¹, Philippe CÔTE¹

¹ IFSTTAR, GERS, GeoEND, 44344 Bouguenais, France

² Cerema Direction territoriale Normandie-Centre, 41000 Blois, France

³ Univ Lyon, IFSTTAR, GERS, RRO, 69675 Bron, France

RÉSUMÉ – Lors de campagnes d'investigation, les méthodes géotechniques et géophysiques sont souvent utilisées complémentaires. Elles fournissent des données plus ou moins imparfaites et s'expriment à différentes échelles spatiales. Nous utilisons ici la théorie des masses de croyance pour fusionner ces deux types de données acquises sur une digue de Loire. Ce travail permet une meilleure représentation des ensembles constitutifs de l'ouvrage tout en associant des degrés de confiance.

ABSTRACT – Complementary geophysical and geotechnical methods are usually used during investigation campaigns. They provide data with very different spatial scales and levels of imperfection. Here, we propose the fusion of geophysical and geotechnical data considering the theory of belief masses on a real fluvial levee. This work aims at supplying a better visual representation of a levee section with related degrees of belief.

1. Introduction

Les digues de protection fluviales sont des structures construites pour la protection contre les inondations en périodes de crues. Elles sont considérées comme sujettes à défaillance, pouvant entraîner des conséquences désastreuses telles que pertes humaines ou matérielles en cas de rupture. Pour prévenir ces risques de rupture, un diagnostic doit être réalisé afin de faire ressortir les zones à risques de l'ouvrage. Des méthodologies reconnues pour les évaluations des digues impliquent l'utilisation de méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques (Dezert et al., 2019a ; Fauchard et Mériaux, 2007 ; Royet et al., 2013).

Concernant les méthodes de reconnaissance géotechniques, elles sont intrusives et fournissent une information ponctuelle spatialement. Elles sont également précises et adaptées à l'analyse des modes de rupture d'ouvrage. Les méthodes géophysiques, en revanche, sont non-intrusives et fournissent une information physique sur d'importants volumes de sols, avec de grands rendements, mais avec des incertitudes potentiellement significatives. Ces incertitudes sont notamment à imputer aux aspects intégrant des méthodes ainsi qu'à la résolution de problèmes inverses mal posés.

Un enjeu majeur pour l'évaluation des digues est de pouvoir combiner les données acquises par ces deux familles de méthodes, en tenant compte de leurs niveaux d'imperfections (incertitude, imprécision, inconsistance) et de leurs distributions spatiales respectives (Royet et al., 2013), au lieu de proposer une simple superposition graphique des résultats (Sauvin et al., 2013 ; Shaaban et al., 2013). Dans ce travail, nous proposons la fusion d'informations géophysiques et géotechniques (Dezert et al., 2019b) en respectant le cadre fixé par la théorie des masses de croyance (Dempster, 1967 ; Shafer, 1976), en employant deux règles de combinaison.

Le cadre fixé par la théorie des masses de croyance nécessite: (1) de définir un cadre de discernement (Frame of Discernement - *FoD*) du problème considéré, (2) de déterminer

les distributions de masses de croyance pour chaque source d'information (géotechnique et géophysique) et (3) d'utiliser une règle de combinaison pour fusionner les masses de croyance.

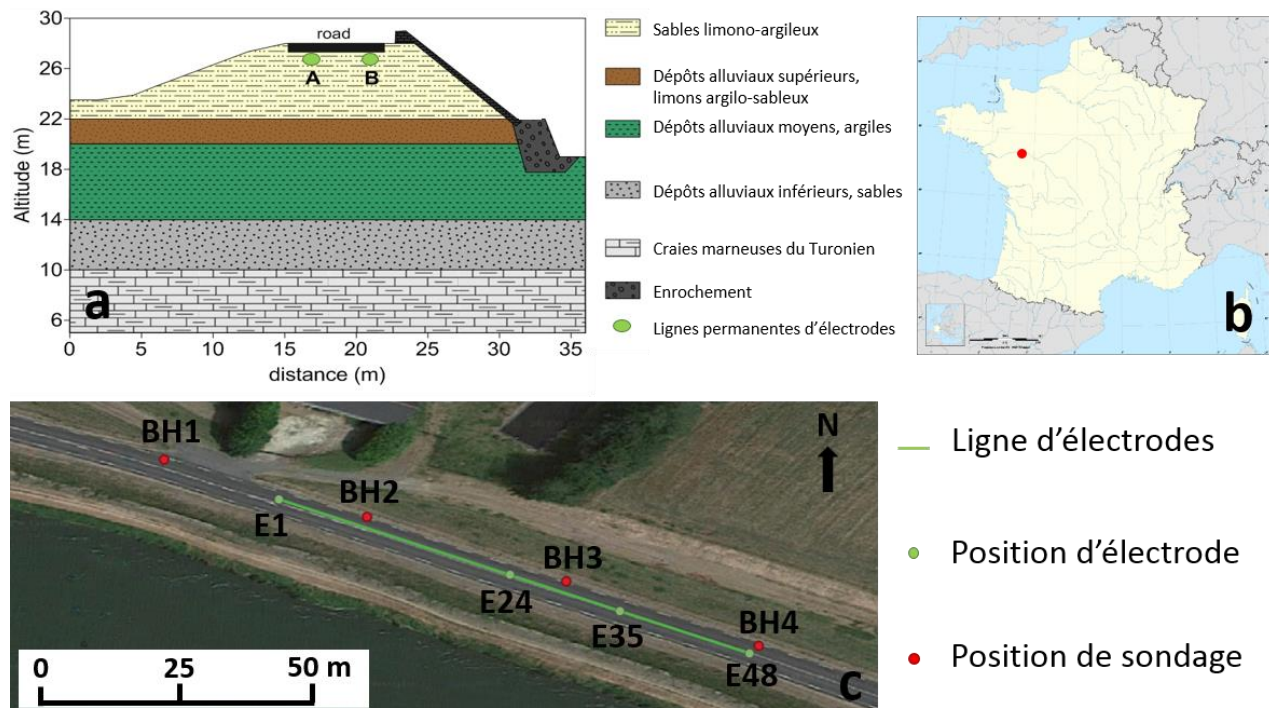
Nous considérons des données acquises sur une véritable digue de protection contre les inondations au cours de l'été 2018, à partir de deux sources d'information géotechniques (pénétrromètre statique et essais de granulométrie) et d'une source d'information géophysique (tomographie de résistivité électrique - TRE).

Il s'agit dans ce travail de mettre en avant la capacité de notre méthodologie à discriminer les ensembles lithologiques constitutifs de l'ouvrage tout en associant un niveau de confiance à la caractérisation proposée. Nous proposons pour cela d'introduire dans un premier temps le site d'étude ainsi que les méthodes d'investigation employées lors de cette campagne de reconnaissance. Nous détaillons ensuite le traitement de l'information géophysique et géotechnique avant de présenter les résultats obtenus à l'issue de la fusion.

2. Site d'étude et méthodes de reconnaissance

2.1. Digue de St-Clément-des-Levées

L'objet de cette étude est une digue de protection fluviale localisée sur la commune de St-Clément-des-Levées (49) à proximité de Saumur dans le val d'Authion (Figure 1.b). Il s'agit d'une levée composée d'un remblai argilo-sableux avec présence d'un socle rocheux (craies) surmonté de matériaux alluvionnaires (Figure.1.a).



2.2. Méthodes d'investigation

2.2.1. Tomographie de résistivité électrique

En 2008, un dispositif de TRE a été mis en place sous forme de deux lignes de 48 électrodes enterrées, espacées de 2 mètres (Figure 1.c). Dans ce travail, nous ne considérons que la ligne située côté val (ligne A, Figure 1.a). Il s'agit d'une ligne d'électrodes disposées à 1.10 m de profondeur sous la chaussée, en crête de digue. Les acquisitions électriques ont été réalisées en configuration Wenner-Schlumberger.

2.2.2. Carottages et essais de granulométrie

Quatre essais carottés sont menés en crête de l'ouvrage (Figure 1.c) à l'aide d'une machine *Texoma*. Les carottes, de 10 cm de diamètre, sont réalisées jusqu'à 7.40 m de profondeur au-delà de la position des électrodes. Elles sont identifiées en laboratoire et des échantillons y sont prélevés afin de réaliser des essais de granulométrie au tamis en suivant la norme NF P94-056 (1996). Les matériaux analysés sont caractérisés en suivant la norme NF P11-300 (1992) permettant de distinguer les matériaux fins (appelés « *matériaux A* » au sens du guide des terrassements routiers – *GTR*) des matériaux sableux à graveleux avec présence de fines (appelés « *matériaux B* » au sens du GTR).

2.2.3. Essais au pénétromètre statique (CPT)

Comme pour les essais carottés, les essais au CPT sont réalisés en quatre points en crête d'ouvrage (Figure 1.c) à l'aide d'une machine *Gouda*, en respectant la norme NF P94-113 (1996). Les essais sont menés jusqu'à une profondeur de 8.80 m sous la position des électrodes et permettent d'acquérir des valeurs de résistance de pointe (q_c en MPa) et de frottement latéral (f_s en MPa). Il est possible de déterminer, à partir de ces deux paramètres, un indice de comportement des sols, I_{SBT} , proposé par Robertson (2010) :

$$I_{SBT} = \sqrt{(3.47 - \log(\frac{q_c}{Pa}))^2 + (1.22 + \log(\frac{f_s}{q_c \cdot 10^2}))^2} \quad (1)$$

Avec $Pa = 0.1$ MPa. Cet indice de comportement des sols fournit des informations sur la nature du sol en matière de classe granulométrique.

3. FoD et distribution des masses de croyance

Afin de travailler dans le cadre théorique des masses de croyance, il s'agit de définir un cadre de discernement, noté θ , contenant les solutions possibles au problème posé. Pour cette étude de digue, nous considérons l'hypothèse θ_1 correspondant à un matériau lithologique à grains fins et l'hypothèse θ_2 correspondant à un matériau lithologique à grains plus grossiers. Nous considérons également une hypothèse supplémentaire, θ_3 , pouvant être associée à des matériaux « *autres* » présentant des propriétés physiques dont les valeurs sont en-dehors des classes de valeurs associées aux deux premières hypothèses. Le FoD s'écrit donc :

$$\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} \quad (2)$$

La construction des distributions de masses de croyance pour chaque source d'information (TRE, essais de granulométrie et CPT) consiste à affecter une masse de croyance $m(\cdot)$ à chaque hypothèse de θ . L'espace des fonctions de masse m est fixé par

toutes les disjonctions possibles des hypothèses de θ et par le niveau de conflit entre les sources d'information, \emptyset , on le note 2^θ :

$$2^\theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_1 \cup \theta_2, \theta_3, \theta_1 \cup \theta_3, \theta_2 \cup \theta_3, \theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3\} \quad (3)$$

Tout comme dans la théorie probabiliste, on définit la fonction masse de croyance m attribuée à l'hypothèse A (définie sur 2^θ) dans $[0, 1]$ telle que :

$$\sum_{A \in 2^\theta} m(A) = 1 \quad (4)$$

Plus $m(A)$ tend vers 1 et plus la confiance en A est importante. La grande différence avec la théorie probabiliste réside dans le fait que A peut représenter l'union de plusieurs hypothèses. Il est donc possible de modéliser l'incertitude et le manque de connaissances.

3.1. Traitement de l'information géophysique

Les résultats de l'acquisition géoélectrique, obtenus après un processus d'inversion (norme L1), à l'aide du logiciel Res2Dinv (Loke et Barker, 1996), sont représentés sur la Figure 2. La profondeur de 0 m correspond à la position des électrodes enterrées. Un ensemble de matériaux plus résistifs (de 50 à 80 $\Omega.m$ environ) semble être présent en surface (sur environ 2-3 m d'épaisseur) suivi de matériaux plus conducteurs sous-jacents. Un ensemble encore plus conducteur ($\approx 15 \Omega.m$) ressort entre 4.5 et 10 m de profondeur et entre $x = 46$ et $x = 70$ m. Cette anomalie avait par ailleurs déjà été détectée lors de précédentes campagnes de reconnaissance géoélectriques (Hervé et Bénot, 2013). La position exacte de l'interface entre ces deux grands ensembles ne peut être déterminée précisément.

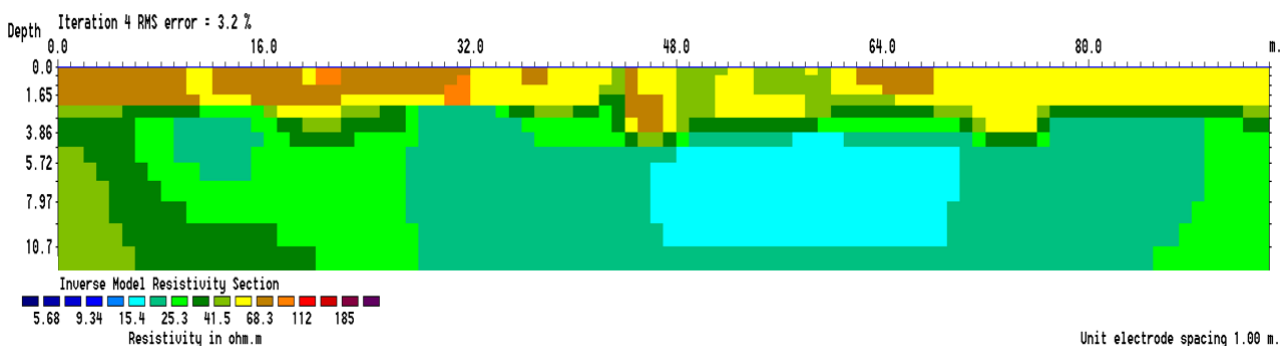


Figure 2. Coupe longitudinale de résistivités inversées de la digue de protection de St-Clément-des-Levées, obtenue après inversion des données de résistivité apparente (Wenner-Schlumberger) acquises à partir de la ligne d'électrodes A (Figure 1.a).

Pour associer, à dire d'experts, des intervalles de résistivités électriques aux hypothèses de θ , une représentation sous forme de distribution en classes modales est utilisée pour visualiser le nombre de mailles dans la section 2D issue de l'inversion, associé à leurs valeurs de résistivités. Cette représentation permet de mettre en évidence deux ensembles principaux de matériaux. Les bornes des intervalles associés aux hypothèses de θ peuvent ainsi être fixées à dire d'experts. Les valeurs des classes, en $\Omega.m$, sont définies tel que: $[16.28; 31.73]$ est associé à θ_1 , $[51.1; 99.57]$ est associé à θ_2 et $[5.19; 16.28 \cup 99.57; 312.45]$ est associé à θ_3 . Puisqu'il est difficile d'associer les valeurs de résistivités intermédiaires à θ_1 et θ_2 à l'une de ces deux classes, $]31.73; 51.1[$ est associé à $\theta_1 \cup \theta_2$, suggérant que ces valeurs de résistivités peuvent être rattachées à l'hypothèse θ_1 ou θ_2 .

Les distributions de masses de croyance $m_1(\cdot)$ sont fixées pour chaque maille de la section inversée à partir du calcul des distances de Wasserstein (Tran et Duckstein, 2002) entre les valeurs de résistivités inversées \pm imprécisions estimées après calcul d'inversion, et les intervalles associés à chaque hypothèse présentée. Chaque cellule est finalement associée à une distribution de masses de croyance normalisées en respectant Eq. (4).

3.2. Traitement de l'information géotechnique

Les hypothèses associées aux caractérisations par les essais de granulométrie et par les essais au CPT sont présentées Figure 3.

Les résultats des analyses granulométriques mettent en évidence l'existence de deux principales classes de sols (NF P11-300, 1992). Les résultats présentant toujours une valeur de D_{max} inférieure à 50 mm, nous utilisons la valeur du tamisat à 80 μm pour distinguer les matériaux A (θ_1) des matériaux B (θ_2). Si cette valeur est supérieure à 35%, le matériau est considéré comme à grains fins, sinon, comme à grains grossiers. Si aucune analyse granulométrique n'a été effectuée sur une fraction de la carotte, nous considérons l'attribution de la masse de croyance sur l'incertitude totale ($\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3$) (Figure 3, en noir).

Les résultats indiquent que les matériaux plus grossiers (θ_2) semblent présents dans la partie supérieure de l'ouvrage (de 0 à 3.40 m de profondeur sous les électrodes pour les carottes 2 et 3) tandis que des matériaux plus fins (θ_1) semblent situés en-dessous.

Pour la caractérisation par la méthode CPT, les matériaux fins sont associés à l'hypothèse θ_1 et sont caractérisés par une valeur de $I_{SBT} > 2.6$. Lorsque $I_{SBT} < 2.6$, les matériaux sont considérés plus grossiers et les résultats du CPT sont associés à l'hypothèse θ_2 . En tenant compte des valeurs d'imprécision, si la valeur de I_{SBT} ne peut pas déterminer la classe du matériau, la masse de croyance est allouée à $\theta_1 \cup \theta_2$. Il apparaît que les classes granulométriques suggérées par les valeurs de I_{SBT} ne sont pas en tout point en accord avec les résultats des analyses granulométriques. L'hypothèse θ_2 est en effet bien plus souvent caractérisée par le CPT que par les essais de granulométrie (Figure 3). En cas d'informations contradictoires entre sources d'informations, une part de masse de croyance sera alors allouée au conflit (\emptyset) lors du processus de fusion à venir.

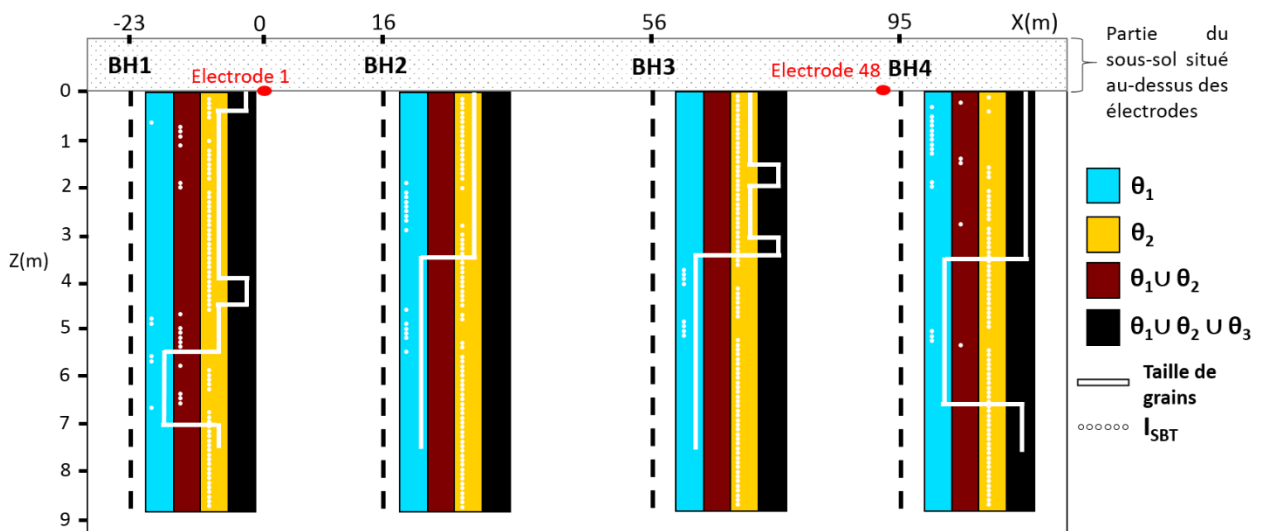


Figure 3. Schéma représentatif de la section de digue étudiée, avec la position des essais géotechniques (pointillés noirs) et des hypothèses du FoD associées aux valeurs de I_{SBT} et aux résultats d'essais de granulométrie.

Une masse de croyance intrasondage proche de 1 est fixée sur l'hypothèse caractérisée par les essais de granulométrie et une masse égale à 0.5 est allouée pour la caractérisation

au CPT. Cette méthode étant moins apte à caractériser la granulométrie d'un matériau. Afin de caractériser l'ensemble de la section du modèle, tel que le fait la TRE (Figure 2), nous imposons une décroissance latérale exponentielle de la masse de croyance à partir du sondage considéré jusqu'au sondage le plus proche. Le taux de décroissance est fonction des valeurs proposées par le sondage à proximité. Ainsi, pour chaque cellule, deux nouvelles distributions de masses de croyance sont générées, $m_2(\cdot)$ et $m_3(\cdot)$, entrant dans le processus de fusion.

Étant donné que les sondages 1 et 4 sont situés à l'extérieur de la section de tomographie (Figure 3), ils n'apparaîtront pas sur les résultats de la fusion. Cependant, les informations qu'ils fournissent permettent de quantifier le taux de décroissance de la confiance en l'information fournie par les sondages 2 et 3.

4. Résultats de fusion

4.1. Règles de combinaison

Pour pouvoir fusionner les masses de croyance issues de la source d'information géophysique et des sources géotechniques, il est nécessaire d'avoir un maillage commun contenant, pour chaque maille, les distributions de masses de croyances de chaque source. Afin de ne pas altérer la qualité de l'information, aucune interpolation n'a été réalisée : il a été décidé de superposer la grille de discrétisation issue de l'inversion 2D (TRE) au découpage géotechnique, fonction du nombre et de la position des sondages. Nous obtenons ainsi un maillage irrégulier mais sans approximation.

La procédure de fusion de données consiste ensuite à combiner $m_1(\cdot)$, $m_2(\cdot)$ et $m_3(\cdot)$, affectées à chaque cellule de la grille. Nous proposons dans ce travail l'utilisation de deux règles de combinaison : i) la règle dite de Smets (Smets, 1990) et ii) la règle PCR6 (Proportional Conflict Redistribution rule n°6) (Martin et Osswald, 2006). La règle de Smets permet de quantifier le niveau de conflit $m_{1,2,3}(\emptyset) > 0$ des trois sources d'information et s'écrit:

$$m_{1,2,3}(X) = \sum_{\substack{X_1, X_2, X_3 \in 2^\theta \\ X_1 \cap X_2 \cap X_3 = X}} \prod_{i=1}^3 m_i(X_i) \quad (5)$$

En revanche, la règle PCR6, d'écriture plus complexe, impose une répartition des masses conflictuelles sur les hypothèses du cadre de discernement, proportionnellement à leur implication dans le calcul des conflits, de sorte à ce que $m_{1,2,3}^{PCR6}(\emptyset) = 0$.

4.2. Résultats et discussion

Les résultats issus de la fusion d'informations géophysiques et géotechniques sont proposés Figure 4. Ils mettent en avant, pour chaque règle de combinaison, les hypothèses ayant les masses de croyance les plus élevées (Figures 4.a et 4.c) et leur valeur de masse associée (Figures 4.b et 4.d).

Ces résultats mettent en évidence la présence d'une interface horizontale entre matériaux à grains fins et à grains grossiers à environ 3.50 m de profondeur. Il est possible d'associer la première couche au remblai (levée) et la seconde aux alluvions. Ces résultats sont en accord avec la représentation interne de l'ouvrage qui était proposée avant la mise en place de cette campagne de reconnaissance (Figure 1.a).

Le conflit prend une place importante dans les résultats obtenus par règle de Smets entre 3 et 8 m de profondeur (Figure 4.a) en raison des informations contradictoires fournies par

la caractérisation au CPT (Figure 3). Il semblerait que la caractérisation des matériaux par l'indice I_{SBT} ne soit pas adaptée à notre procédure de fusion. A l'avenir, il pourrait être pertinent d'utiliser un indice plus adéquat pour la caractérisation granulométrique des matériaux à partir des paramètres mesurés au CPT. Cependant, les résultats de la règle PCR6 normalisent ce conflit et proposent une vue plus nette de la section (Figure 4.c).

Les masses de croyances associées (Figure 4.b et 4.d) mettent en évidence le fait que la caractérisation des matériaux proposés est moins fiable à proximité de l'interface entre les deux ensembles lithologiques ainsi qu'aux endroits où les valeurs de résistivités électriques sont les plus éloignées du centre des classes établies (Figure 2), notamment au niveau de l'anomalie plus conductrice relevée lors de la description des résultats de la TRE.

Si l'investigation sur site devait être renforcée dans le cadre de futures campagnes de reconnaissance, de tels résultats suggèrent un besoin d'informations supplémentaires entre $x = 0$ et $x = 10$ m à partir de 3 mètres de profondeur, là où l'union des hypothèses ($\theta_1 \cup \theta_2$) est majoritaire.

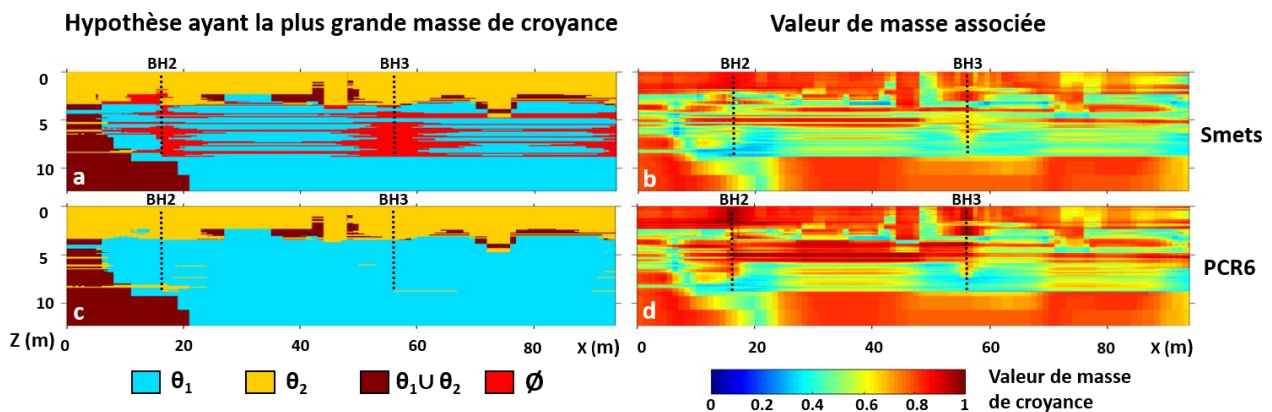


Figure 4. Représentation des hypothèses ayant la plus grande masse de croyance (a, c) et leurs valeurs de masses de croyance associées (b, d) après combinaison des informations issues des trois sources d'information considérées. Les figures (a, b) sont obtenues avec combinaison de Smets et (c, d) sont obtenues avec la règle de PCR6.

5. Conclusions

Dans ce travail, nous avons présenté une méthodologie de fusion d'informations géotechniques et géophysiques basée sur l'utilisation du cadre théorique des masses de croyance. Cette méthodologie permet la prise en compte des spécificités de chaque méthode d'investigation en terme de niveau d'imperfection de l'information et de répartition spatiale de celle-ci, pour proposer une représentation d'une section de digue de protection contre les inondations. Nos résultats, à partir de données de TRE, CPT et analyses granulométriques, mettent en évidence la présence de deux grands ensembles lithologiques et permettent de fixer la position de l'interface horizontale beaucoup plus précisément que la méthode de TRE seule. Ce travail permet également de faire ressortir les zones de conflit à l'aide de la règle de combinaison de Smets ainsi que les zones de moindre confiance suggérant où les investigations doivent être renforcées. Il pourrait être envisagé d'utiliser de tels résultats de fusion pour alimenter des modèles d'aléas de rupture déjà en place, ex : CARDigues (CFBR, 2015 ; Maurin et al., 2013).

6. Remerciements

Nous remercions les techniciens du Cerema impliqués dans la campagne géotechnique de reconnaissance pour leur aide précieuse ainsi que la Région Pays de la Loire pour son soutien financier.

7. Références bibliographiques

- CFBR. (2015). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai.
- Dempster A. P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The annals of mathematical statistics*, 325-339.
- Dezert, T., Fargier, Y., Lopes, S. P., & Côte, P. (2019). Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation: A review. *Engineering Geology*, 105206.
- Dezert, T., Lopes, S. P., Fargier, Y., & Côte, P. (2019). Combination of geophysical and geotechnical data using belief functions: Assessment with numerical and laboratory data. *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103824.
- Fauchard, C. and Mériaux, P. (2007). Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes: Guide for implementation and interpretation. Quae.
- Hervé, S. and Bénot, R. (2013). Digue de la Loire à St-Clément-des-Levées (49) : Suivi par méthodes géophysiques, Compte-rendu des mesures 2012. Technical Report Operation 11R103 DOFEAS, IFSTTAR.
- Jodry, C., Lopes, S. P., Fargier, Y., Sanchez, M., and Côte, P. (2019). 2D-ERT monitoring of soil moisture seasonal behaviour in a river levee: A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 167, 140-151.
- Loke, M. H. and Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, 44(1):131-152.
- Martin, A. and Osswald, C. (2006). A new generalization of the proportional conflict redistribution rule stable in terms of decision. *Advances and applications of DSMT for information fusion : collected works Volume 2, 2 :69-88.*
- Maurin J., Boulay A., Durand E., Piney S., Bridoux B., Tourment R. (2013). Études de dangers des digues de classe A de la Loire et de ses affluents-modèle d'aléas de rupture. *Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, 2ème colloque national, Digues2013 pp. 209-216.*
- NF P11-300. (1992). Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- NF P94-056. (1996). Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.
- NF P94-113. (1996). Sols : reconnaissance et essais - Essai de pénétration statique.
- Robertson, P. K. and Cabal, K. L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. In *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, pages 2-40.
- Royet, P., Palma Lopes, S., Fauchard, C., Mériaux, P., and Auriou, L. (2013). Rapid and cost-effective dike condition assessment methods: geophysics and remote sensing. *FloodProBE Project.*
- Sauvin, S., Lecomte, I., Bazin, S., L'Heureux, J. S., Vanneste, M., Solberg, I. L., & Dalsegg, E. (2013). Towards geophysical and geotechnical integration for quick-clay mapping in Norway. *Near Surface Geophysics*, 11(6), 613-623.
- Shaaban, F., Ismail, A., Massoud, U., Mesbah, H., Lethy, A., & Abbas, A. M. (2013). Geotechnical assessment of ground conditions around a tilted building in Cairo–Egypt using geophysical approaches. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 13(1), 63-72.
- Shafer G. (1976). *A mathematical theory of evidence*. Princeton University Press.
- Smets, P. (1990). The combination of evidence in the transferable belief model. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 12(5) :447-458.
- Tran, L., and Duckstein, L. (2002). Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure. *Fuzzy sets and Systems*, 130(3), 331-341.