



**HAL**  
open science

## Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues

Théo Dezert, S. Palma Lopes, Y. Fargier, Q. Forquenot de La Fortelle, P.  
Cote, R. Tourment

### ► To cite this version:

Théo Dezert, S. Palma Lopes, Y. Fargier, Q. Forquenot de La Fortelle, P. Cote, et al.. Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations - 3e colloque - Dignes 2019, Mar 2019, Aix-en-Provence, France. pp.10, 10.5281/zenodo.2530727 . hal-02609450

**HAL Id: hal-02609450**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02609450v1>**

Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Fusion d'informations géophysiques et géotechniques acquises sur banc d'essai pour application au diagnostic de digues

## *Merging geophysical and geotechnical data acquired on a test bed for levee diagnosis application*

T. Dezert<sup>1,2</sup>, S. Palma Lopes<sup>1</sup>, Y. Fargier<sup>2,3</sup>, Q. Forquenot de la Fortelle<sup>1</sup>, P. Côte<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>4</sup>

<sup>1</sup> IFSTTAR, GERS, GeoEND, F-44344 Bouguenais, theo.dezert@ifsttar.fr, sergio.lobes@ifsttar.fr, quiterie.forquenot-de-la-fortelle@ifsttar.fr, philippe.cote@ifsttar.fr

<sup>2</sup> Cerema Direction territoriale Normandie-Centre, F-41000 Blois

<sup>3</sup> Univ Lyon, IFSTTAR, GERS, RRO, F-69675 Bron, yannick.fargier@ifsttar.fr

<sup>4</sup> Irstea, Aix en Provence, remy.tourment@irstea.fr

### Résumé

Les digues de protection fluviales représentent des enjeux majeurs en matière de sécurité des personnes et des biens matériels [1]. Il s'agit de prévenir leur rupture, associée à des phénomènes d'érosion interne, externe ou d'instabilité, en apportant un meilleur diagnostic. La caractérisation des matériaux, ainsi que la détection d'interfaces et d'anomalies éventuelles sont déterminantes [2]. Lors de campagnes de reconnaissance, des méthodes complémentaires, géophysiques et géotechniques, sont utilisées. Les informations acquises par ces deux ensembles de méthodes s'expriment à des échelles spatiales différentes, avec différents niveaux d'incomplétudes et avec des ordres de grandeur d'incertitudes et d'imprécisions. Nous nous concentrons dans ce travail sur l'emploi de deux méthodes spécifiques. Il s'agit d'acquérir des données sur un banc d'essai parallélépipédique (plâtre + sable saturé) mis en place, afin de valider une approche de fusion d'informations basée sur la théorie de l'évidence [3] - [4] et sur l'utilisation des fonctions de croyance afin de caractériser au mieux le modèle investigué. Un mini-dispositif de tomographie de résistivité électrique est placé en surface de modèle afin d'acquérir une information physique spatialisée et un cône de pénétration de laboratoire est utilisé afin de caractériser la profondeur d'enfoncement de chaque matériau. L'algorithme de fusion d'informations développé permet de mettre en évidence la présence d'interfaces entre matériaux, la variation d'épaisseur au cœur du modèle, ainsi que de caractériser et distinguer les différents matériaux mis en place. Les résultats issus de la fusion permettraient lors d'une véritable campagne, d'optimiser le placement des sondages et leur nombre en fonction de la qualité de l'information géophysique obtenue, afin d'améliorer la connaissance de l'ouvrage à moindre coût.

### Mots Clés

Reconnaissance de digues, géophysique, géotechnique, banc

d'essai, fusion de données.

### Abstract

Fluvial levees are assets of major importance for protecting human lives and material goods [1]. It is an important matter to prevent their rupture, associated with phenomena of internal and external erosion or instability, in bringing a better diagnosis. The characterization of the constitutive materials, as well as the detection of possible interfaces and anomalies, are crucial [2]. During investigation campaigns, complementary geophysical and geotechnical methods are used. These two sets of methods allow the data acquisition with different spatial scales and orders of magnitude of incompleteness, uncertainty and inaccuracy. In this work, we focus on the use of two specific methods. We set up a parallelepiped test bed (plaster + saturated sands) and acquire geophysical and geotechnical data on it, in order to validate an information fusion approach based on the evidence theory [3] - [4] and the use of belief functions. The objective is to characterize as well as possible the investigated model. We position a mini-electrical resistivity tomography device on the model surface to acquire spatialized physical information and we use a laboratory penetration cone to characterize the depth of penetration of each material. The developed data fusion algorithm makes it possible to highlight the presence of interfaces between materials, the existing variation of thickness, as well as to characterize and distinguish the different set up materials. The merging results, for a real investigation campaign on-site, would allow the optimization of the boreholes positioning, their number and their spacing according to the quality of the acquired geophysical information, to improve the knowledge of the structure at lower costs.

### Key Words

Levee assessment, geophysics, geotechnical testing, test bed, data fusion.

## Introduction

Les digues de protection fluviales sont des structures anthropiques, construites pour la protection contre les inondations. Elles requièrent une surveillance particulière afin de prévenir du risque de rupture susceptible de mener à des conséquences catastrophiques telles que des pertes humaines, matérielles et désastres économiques. Il existe des méthodologies reconnues pour l'évaluation des digues qui incluent des méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques [5] – [6].

Les méthodes géophysiques sont non intrusives et fournissent une information physique sur d'importants volumes de sols avec de grands rendements mais avec de potentielles incertitudes significatives. Ces incertitudes sont notamment dues aux aspects intégrants et indirects des méthodes ainsi qu'à la résolution des problèmes inverses. De plus, la grandeur mesurée ne rentre pas dans les modèles de justification des ouvrages vis-à-vis des modes de rupture. Les méthodes de reconnaissance géotechnique sont intrusives et fournissent une information plus ponctuelle mais également plus précise et plus adaptée à l'analyse des modes de rupture. Un enjeu important pour l'évaluation des digues de protection fluviales est d'être capable de combiner les données géophysiques et géotechniques acquises, tout en prenant en considération leurs incertitudes, imprécisions et distributions spatiales respectives [6].

Nous proposons l'utilisation de la théorie de l'évidence [3] – [4] et de différentes règles de combinaison de l'information afin de combiner des données de nature géotechnique et géophysique. Nous testons cette approche à partir de données acquises sur banc d'essai. Dans ce travail, nous souhaitons démontrer le potentiel d'une telle méthodologie en utilisant des données de profondeur d'enfoncement de pointe, acquises par un cône de pénétration de laboratoire, et des données de résistivités électriques acquises par un mini-dispositif de tomographie de résistivité électrique (TRE). Les données de profondeur d'enfoncement correspondent à une information de nature géotechnique alors que les résistivités électriques correspondent à l'information de nature géophysique. Nous voulons mettre en évidence la capacité de notre algorithme de fusion de l'information à caractériser les interfaces entre matériaux et à discriminer trois types de matériaux distincts avec variation d'épaisseur de l'un d'entre eux. Nous souhaitons enfin présenter l'évolution des résultats en fonction du nombre et de la position des sondages simulés.

Cet article s'ouvrira sur une présentation des méthodes de reconnaissance employées dans le cadre de notre expérimentation (cône de pénétration de laboratoire et mini-dispositif de TRE) ainsi que sur les matériaux constitutifs du banc d'essai réalisé. Il se poursuivra sur une introduction à la théorie de l'évidence et aux méthodes de combinaisons utilisées ici. L'objectif étant de présenter le fonctionnement de

l'algorithme développé, ainsi que le processus de construction des résultats de fusion de données, acquises sur le banc d'essai. Ces résultats seront finalement discutés afin de comprendre les intérêts, limites et perspectives d'une telle méthodologie.

## Matériels

Afin de pouvoir tester la validité de l'algorithme de fusion développé, deux méthodes d'acquisition de données ont été retenues : (i) un mini-dispositif de TRE faisant office de méthode géophysique et (ii) un cône de pénétration de laboratoire faisant office de méthode géotechnique. Avant la mise en place du banc d'essai, il est nécessaire de procéder à une sélection de matériaux pouvant être mis en place au sein d'une cuve afin de pouvoir mener à bien notre étude. Cette sélection implique que les matériaux employés respectent plusieurs conditions afin de valider notre méthodologie : ils doivent avoir (i) des gammes de résistivités électriques distinctes, (ii) des gammes de profondeur d'enfoncement distinctes et (iii) une certaine homogénéité dans l'espace afin de limiter les valeurs anormales non contrôlées.

### Mini-dispositif de TRE

La méthode de tomographie de résistivité électrique consiste à injecter un courant électrique d'intensité connue au moyen de deux électrodes dites « de courant ». Des électrodes dites « de potentiel » sont utilisées pour mesurer des différences de potentiel, fonction des propriétés des matériaux et de leur distribution, permettant d'établir une valeur de résistivité apparente. La profondeur d'investigation est fonction de l'écartement des électrodes, de la configuration des électrodes et de la nature du sol [7]. En généralisant ce principe, une TRE consiste à aligner une série d'électrodes et à acquérir un grand nombre de mesures basées sur des configurations à 4 électrodes. La TRE est souvent employée pour la reconnaissance des digues [8] et la résolution de la méthode décroît avec la profondeur. Expressément pour les besoins de notre étude, nous avons réalisé un mini-dispositif de TRE (Figure 1.c). Ce dispositif est composé de 48 électrodes de 6 mm de long, disposées à intervalles réguliers d'un centimètre. Il peut être déplacé le long du banc d'essai afin de réaliser plusieurs acquisitions et de couvrir une section plus grande. Les données de résistivités apparentes acquises sont ensuite inversées à l'aide du logiciel Res2Dinv (ver 3.71.118) [9] afin d'obtenir une section complète de résistivités électriques.

Afin de tester électriquement et individuellement les différents matériaux qui pouvaient être mis en place au sein du banc d'essai, deux autres dispositifs d'électrodes, de plus petites dimensions, ont été employés. Un dispositif de 12 pointes de 5 mm de long, permettant de caractériser dans différentes directions de l'espace les matériaux pouvant être pénétrés (Figure 1.a), ainsi qu'un dispositif d'électrodes pourvues d'éponges humidifiées permettant de caractériser des matériaux plus cohésifs et ayant une trop grande résistance de contact (Figure 1.b).

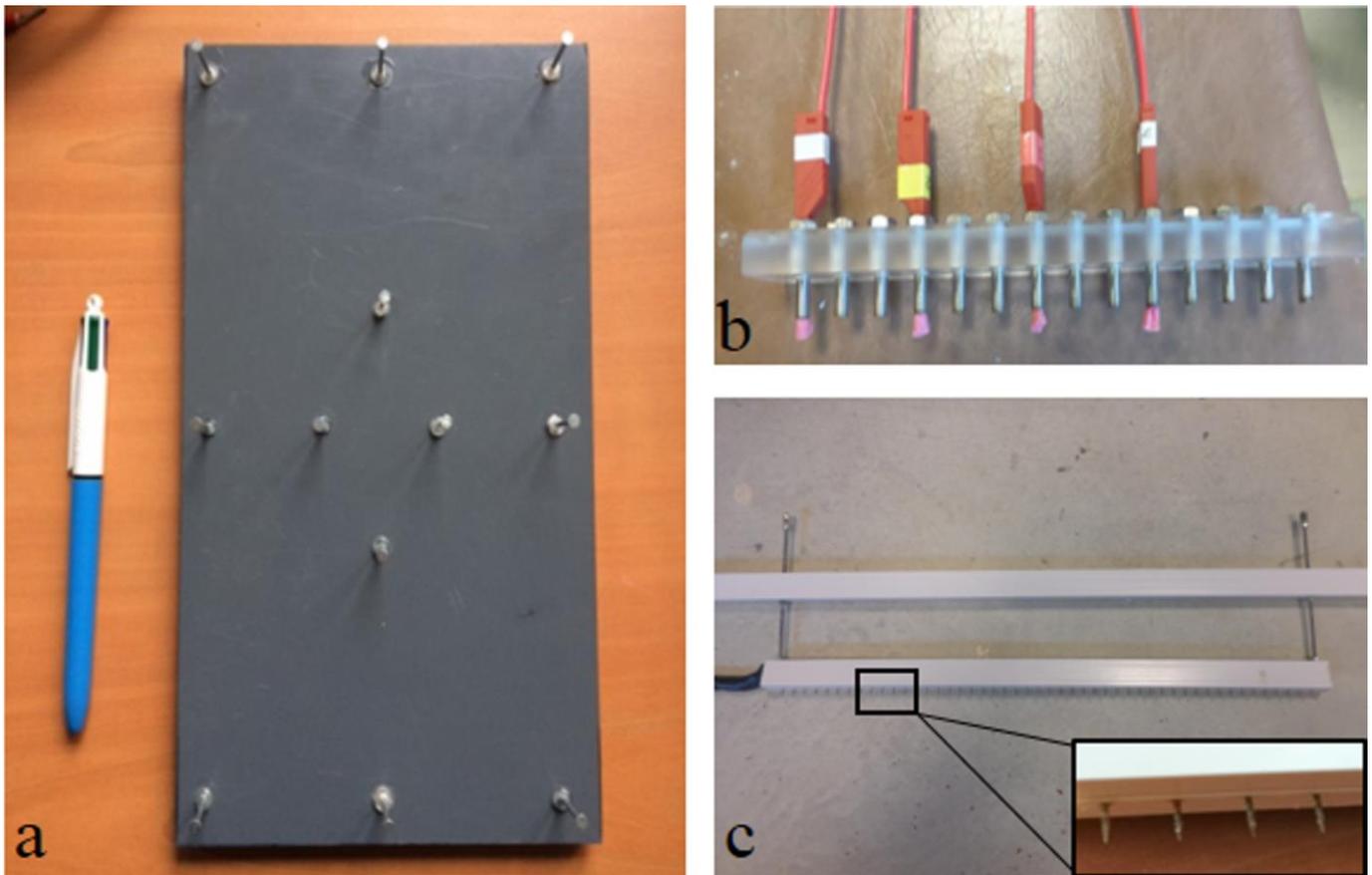


FIGURE 1: a) MINI DISPOSITIF DE POINTES POUR CARACTERISATION DE MATERIAUX NON COHESIFS. b) MINI-DISPOSITIF A 14 ELECTRODES ESPACEES DE 2 CM [10]. c) MINI-DISPOSITIF DE TRE A 48 ELECTRODES ESPACEES DE 1 CM, A HAUTEUR REGLABLE, UTILISE POUR L'ACQUISITION ELECTRIQUE SUR LE BANC D'ESSAI

### Cône de pénétration de laboratoire

La méthode du cône de pénétration de laboratoire est décrite dans la norme NF P 94-052-1 [11]. Elle consiste à mesurer une profondeur d'enfoncement d'un cône, en millimètres, soumis à son propre poids (Figure 2). Les matériaux sont testés individuellement, à plusieurs reprises, afin de déterminer une valeur moyenne et un écart-type de profondeur d'enfoncement pour chaque matériau. Ces valeurs pourront être reprises dans la suite de l'étude afin de simuler différentes positions de sondages au sein du banc d'essai.

### Présentation du banc d'essai et des matériaux

La conception de ce banc d'essai ne consiste pas à reproduire un ouvrage hydraulique en terre à échelle réduite. Une telle conception serait autrement plus complexe et le modèle réalisé serait physiquement moins contrôlé, allant à l'encontre du banc d'essai que nous souhaitons obtenir pour la validation de notre méthodologie de fusion de l'information. Nous avons retenu l'utilisation d'un plâtre naturel extra fin à prise rapide [12] ainsi que l'utilisation de sables fins d'Hostun [13]. Ces deux matériaux répondent aux trois conditions énumérées plus haut. Ils ont été mis en place dans une cuve PVC transparente de  $100 \times 30 \times 17 \text{ cm}^3$  tels que présentés Figure 3 avec une couche



FIGURE 2: CONE DE PENETRATION DE LABORATOIRE

sous-jacente de 5 cm de plâtre (temps de prise = 69 h) surmontée d'une couche de 2.5 cm de sable saturé en eau. Un coffrage a été réalisé lors de la mise en place du plâtre de sorte à ce qu'une anomalie soit présente au sein du modèle, sur 20 cm de longueur (longueur fixée arbitrairement). Le choix d'une telle anomalie a été motivé par notre désir de tester la capacité de notre méthodologie à caractériser des interfaces verticales, en plus des interfaces horizontales présentes entre les matériaux en place. Le plâtre y est absent et les sables saturés y sont donc d'une épaisseur de 7.5 cm. Le contact entre les matériaux et le fond de la cuve est à l'origine d'une interface qu'il sera intéressant de retrouver à l'aide de notre méthodologie.

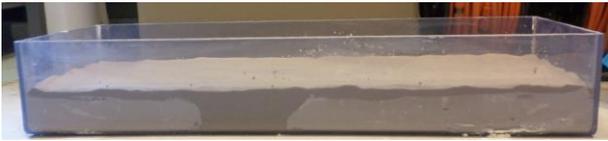


FIGURE 3: VUE EN TRANSPARENCE DU BANC D'ESSAI

16 kg de plâtre ont été mélangés à 8 kg d'eau afin d'obtenir le matériau finalement mis en place. La résistivité électrique du plâtre a été mesurée avant et après la mise en place des sables saturés afin de vérifier que la présence d'eau a bien un impact négligeable sur les propriétés électriques du plâtre. Concernant le sable d'Hostun, 15.82 kg ont été pluviés dans 5.8 kg d'eau, au-dessus du plâtre afin d'arriver à saturation. Des essais ont été réalisés au préalable afin de connaître les proportions d'eau et de sable requis pour arriver à un tel état ainsi que pour valider la répétabilité d'une telle mise en place par pluviation. Les valeurs de résistivités électriques et de profondeur d'enfoncement sont présentées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1: VALEURS DE RESISTIVITES ELECTRIQUES ET DE PROFONDEUR D'ENFONCEMENT DES MATERIAUX MIS EN PLACE AU SEIN DU BANC D'ESSAI

	Plâtre avant pluviation	Sables d'Hostun saturés
Résistivité électrique (Ω.m)		
Moyenne	31.28	78.15
Ecart-type	3.23	11.18
Nombre de mesures	12	52
Profondeur d'enfoncement (mm)		
Moyenne	0.11	17.31
Ecart-type	0.04	1.61
Nombre de mesures	8	10

### Méthodes de fusion

#### Fonctions de croyance et règles de combinaison : Smets, Dempster-Shafer et PCR5

La théorie des fonctions de croyance, ou théorie de l'évidence est une théorie proposée par Dempster [3] puis reprise par Shafer [4]. Cette théorie permet de calculer la probabilité d'occurrence d'un événement à partir de la fusion d'informations issues de plusieurs sources, représentant au mieux les connaissances disponibles. L'intérêt d'utiliser une telle théorie réside dans sa capacité à gérer des informations issues de différentes sources (ici géotechnique et géophysique), associées à des incertitudes et imprécisions variables, ainsi que dans sa capacité à évaluer le degré de conflit existant entre les sources. Cette théorie permet également la prise en compte de l'ignorance et de l'incomplétude de l'information. Pour le lecteur intéressé par plus de détails, la théorie est reprise et détaillée dans [14].

Afin d'utiliser la théorie de l'évidence, il est nécessaire (i) de fixer un cadre de discernement, (ii) d'attribuer des valeurs de masses de croyance aux décisions de ce cadre (Basic Belief Assignments – BBAs), (iii) de choisir une règle de combinaison de l'information et (iv) de représenter l'information issue de la fusion.

Le cadre de discernement  $\Theta$  (Frame of Discernment – FoD), regroupe l'ensemble des décisions possibles, ainsi pour  $n$  décisions :

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} \tag{1}$$

L'espace des fonctions de masse de croyance, noté  $2^\Theta$ , est fixé par toutes les disjonctions et par le conflit existant entre les sources d'informations (noté  $\emptyset$ ) tel que :

$$2^\Theta = \{\emptyset, \theta_1, \theta_2, \theta_n, \dots, \theta_1 \cup \theta_n, \dots\} \tag{2}$$

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

$$\sum_{A \in 2^\Theta} m(A) = 1 \tag{3}$$

Plus  $m(A)$  tend vers 1 et plus la confiance en  $A$  est importante. La grande différence avec la théorie probabiliste réside ici dans le fait que  $A$  peut représenter l'union de deux décisions  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . Il est donc possible de modéliser l'incertitude et le manque de connaissances. L'hypothèse de Smets [15] (dite méthode conjonctive) permet l'attribution d'une masse de croyance au conflit, en-dehors du FoD, tel que :

$$m_{12}(\emptyset) > 0 \tag{4}$$

Avec  $m_{12}$  la masse de croyance fusionnée à partir des informations issues des sources 1 et 2. Notre niveau d'ignorance de résolution du problème peut donc être quantifié par :

$$m_{12}(\emptyset) = \sum_{X_1, X_2 \subseteq \Theta | X_1 \cap X_2 = \emptyset} m_1(X_1)m_2(X_2) \quad (5)$$

Avec ici  $m_1(X_1)$  et  $m_2(X_2)$  les masses de croyance respectivement attribuées aux décisions  $X_1$  et  $X_2$  par les sources 1 et 2.

La combinaison selon Dempster-Shafer, à l'inverse de la règle de Smets, n'autorise pas l'attribution d'une masse de croyance au conflit, on a donc (hypothèse d'un monde fermé) :

$$m_{12}^{DS}(\emptyset) = 0 \quad (6)$$

Le conflit est dans ce cas redistribué par normalisation. La masse de croyance en A,  $m_{12}^{DS}(A)$ , issue de la fusion des informations issues des sources 1 et 2 s'écrit :

$$m_{12}^{DS}(A) = \frac{1}{1 - m_{12}(\emptyset)} \sum_{X_1, X_2 \subseteq \Theta | X_1 \cap X_2 = A} m_1(X_1)m_2(X_2) \quad (7)$$

L'inconvénient de cette méthode est que le conflit entre les sources n'est plus représenté et il est possible d'obtenir un résultat contre-intuitif si le conflit est important à cause de la normalisation choisie.

La combinaison de PCR5 (Proportional Conflict Redistribution no. 5) [16] permet en revanche la redistribution de tous les conflits partiels, proportionnellement aux masses concernées par ces conflits tel que  $m_{12}^{PCR5}(\emptyset) = 0$  et  $\forall X_i \in 2^{\Theta \setminus \{\emptyset\}}$  :

$$m_{PCR5}(X_1) = m_{12}(X_1) + \sum_{\substack{X_2 \in 2^{\Theta} \\ X_1 \cap X_2 = \emptyset}} \left[ \frac{m_1(X_1)^2 m_2(X_2)}{m_1(X_1) + m_2(X_2)} + \frac{m_2(X_1)^2 m_1(X_2)}{m_2(X_1) + m_1(X_2)} \right] \quad (8)$$

Dans notre étude, nous testerons les trois différentes méthodes de combinaisons présentées afin d'en discuter les résultats.

### Cadre de discernement (FoD)

Nous considérons un FoD constitué de 4 événements tel que :

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\} \quad (9)$$

Avec  $\theta_1$  l'événement correspondant au matériau plâtre ;  $\theta_2$  au sable saturé ;  $\theta_3$  au fond de cuve isolant simulant une interface vers un substratum électriquement très résistant et  $\theta_4$  correspondant à un matériau autre, étant l'union des intervalles de valeurs ne correspondant pas à ceux associés aux 3 matériaux précédemment décrits. Cet événement  $\theta_4$  permet donc, d'une certaine manière, de quantifier notre manque de connaissance du milieu, il recouvre les caractéristiques physiques non incluses dans les trois autres ensembles. La construction des BBAs consiste ensuite à associer les données des deux sources considérées aux événements du FoD. La

Figure 4 présente les matériaux sous forme d'événements constitutifs du FoD tels qu'ils ont été mis en place au sein du banc d'essai. Bien que la cuve utilisée fasse 1 m de long, l'acquisition électrique n'est réalisée que sur 83 cm, en centre de modèle, et nous permet d'imager jusqu'à 18 cm de profondeur.

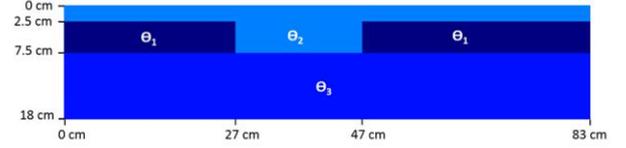


FIGURE 4: SCHEMA AVEC EXAGERATION VERTICALE, PRESENTANT LES EVENEMENTS CONSTITUTIFS DU FOD, ASSOCIES AUX MATERIAUX DU BANC D'ESSAI

### Construction de BBAs à partir des données géophysiques

L'acquisition électrique est réalisée sur 83 cm de long, en centre de modèle, avec une première acquisition sur 47 cm, puis déplacement du dispositif de 12 cm, à trois reprises. Les résultats issus de l'inversion des données acquises sont présentés Figure 5. Ces résultats permettent de mettre en évidence l'existence de 3 ensembles distincts, à des profondeurs relativement proches de la réalité du modèle (Figure 4) mais présentant des interfaces légèrement décalées verticalement, et graduelles plutôt que franches. De plus, la variation d'épaisseur de sable saturé est mal évaluée. En effet, la zone anomalique est reconnue mais associée ici, dans sa partie basse, à des valeurs de résistivités électriques beaucoup plus grandes que ce qu'elles ne sont en réalité.

Les valeurs proposées, bien qu'étant dans les mêmes ordres de grandeur, ne correspondent pas exactement aux gammes de valeurs mesurées sur les matériaux indépendamment (Tableau 1). Afin de caractériser les événements (matériaux) du FoD, nous utilisons donc une distribution en classes modales (Figure 6) pour visualiser le nombre de cellules, de la section discrétisée pour l'inversion 2D, associées à des gammes spécifiques de résistivités. Cette distribution permet de faire ressortir les 3 grands ensembles du modèle. Grâce à elle, les bornes des événements considérés peuvent ainsi être définies, en ohm.mètres, telles que présentées Eq. (10) :

$$\begin{aligned} \theta_1 &= [10; 35] \\ \theta_2 &= [40; 140] \\ \theta_3 &= [9\ 500; 33\ 250] \\ \theta_4 &= [2.85; 10[\cup]35; 40[\cup]140; 9\ 500[\cup]33\ 250; 116\ 375] \end{aligned} \quad (10)$$

Il s'agit ensuite d'associer des valeurs de masses de croyance  $m_1(\cdot)$  correspondant à chaque événement de  $2^{\Theta}$ , pour chaque cellule de la section inversée. Les masses sont obtenues à partir du calcul des distances de Wasserstein [17]. Ce calcul estime la distance entre deux intervalles en fonction de leur taille et de la distance espaçant ces-derniers.

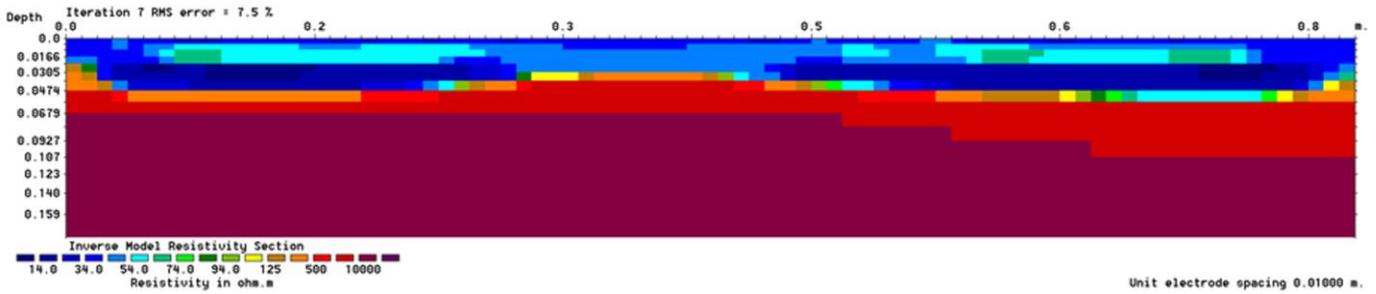


FIGURE 5: SECTION DE RESISTIVITES ELECTRIQUES, INVERSEES SOUS RES2DINV, OBTENUES PAR ACQUISITION SUR L'AXE CENTRAL DU MODELE APRES DEPLACEMENTS SUCCESSIF DU DISPOSITIF D'ELECTRODES

Les distances de Wasserstein sont calculées (en conservant l'échelle logarithmique) entre les valeurs de résistivités inversées  $\pm$  imprécisions estimées après calcul d'inversion, et les intervalles associés à chaque événement présentés Eq. (10). Chaque cellule est finalement associée à une BBA normalisée en respectant Eq. (3). Donc, plus la distance d'un intervalle de résistivité issu de l'inversion est « proche » d'un des 4 événements du FoD, plus la masse de croyance associée à l'événement concerné est importante, et réciproquement.

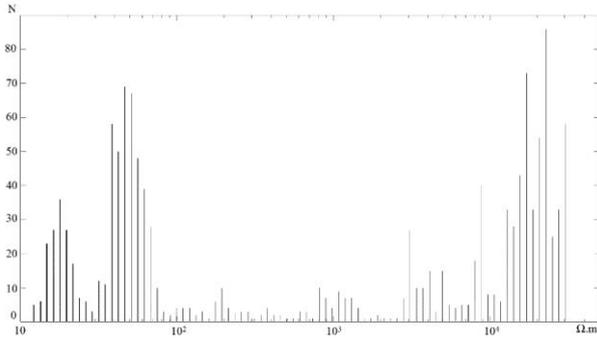


FIGURE 6: DISTRIBUTION EN CLASSES MODALES DU NOMBRE DE CELLULES N DE DISCRETISATION POUR INVERSION 2D DU MODELE DE RESISTIVITE (FIGURE 5), FONCTION DES VALEURS DE RESISTIVITES ELECTRIQUES

### Construction de BBAs à partir des données géotechniques

Contrairement aux informations issues de la source géophysique, les données géotechniques sont obtenues au préalable par essai au cône de pénétration de laboratoire, puis simulées numériquement avant fusion. Plusieurs simulations proposant diverses positions de points de sondage sont effectuées. Afin de simuler des points de sondages, les valeurs moyennes de profondeur d'enfoncement (mm) et écart-types associés (Tableau 1) sont reprises pour réaliser un tirage de valeurs, suivant une loi normale définie pour chaque événement. On retient une valeur moyenne de profondeur d'enfoncement de 0 mm pour  $\theta_3$  (fond de cuve) ainsi qu'un écart-type associé de 0.01 mm. Ces tirages aléatoires, suivant une loi normale, permettent de définir les bornes, en mm, des

intervalles associés aux événements du FoD telles que présentés Eq. (11) :

$$\begin{aligned}\theta_1 &= [0.04; 0.19] \\ \theta_2 &= [13; 21] \\ \theta_3 &= [-0.02; 0.02] \\ \theta_4 &= [-0.05; -0.02 \cup 0.02; 0.04 \cup 0.19; 13 \cup 21; 100]\end{aligned}\quad (11)$$

Nous simulons ainsi des sondages de 2 mm de largeur, descendant jusqu'à 15 cm et réalisant une acquisition tous les 5 mm avec une imprécision associée de 0.01 mm. Les valeurs de profondeurs d'enfoncement obtenues peuvent alors être associées aux différents matériaux du modèle. Des exemples de sondages sont présentés Figure 7. On distingue les sondages placés au niveau de l'absence de plâtre dans le banc d'essai (Figure 7.b), de ceux placés ailleurs (Figure 7.a).

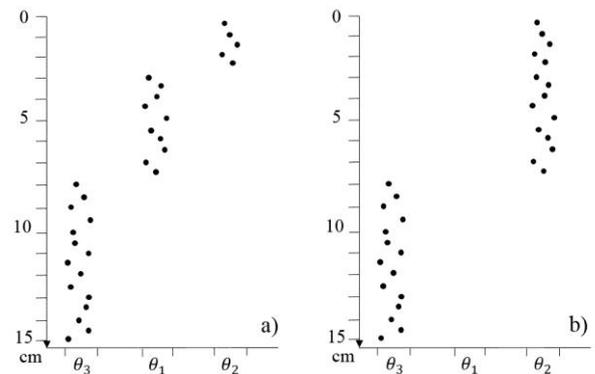


FIGURE 7: EXEMPLES DE PROFONDEURS D'ENFONCEMENT (MM) SIMULEES ET CORRESPONDANT AUX EVENEMENTS DU FOD POUR a) UN SONDRAGE PLACE EN PRESENCE DE PLATRE ET POUR b) UN SONDRAGE PLACE AU NIVEAU DE L'ABSENCE DE PLATRE

Une masse de croyance  $m_2(\cdot) = 1$  est attribuée, au niveau des points de sondages, aux événements correspondant aux profondeurs d'enfoncement mesurées. Afin de caractériser l'ensemble de la section du modèle, tel que le fait la TRE (Figure 5), nous imposons une décroissance latérale exponentielle de la masse de croyance à partir du point de sondage jusqu'au sondage le plus proche. Le taux de

décroissance est fonction des valeurs proposées par le sondage à proximité. En effet, pour 2 sondages consécutifs ayant des valeurs proches, à profondeur semblable, la décroissance de la confiance est moins rapide que pour 2 sondages consécutifs présentant des valeurs radicalement différentes. Cette décroissance de masse de croyance s'effectue vers la gauche et la droite, depuis chaque sondage. Si entre deux sondages, la masse de croyance associée à un événement A est inférieure à 1 ( $m_2(A) < 1$ ), alors le reste de masse à attribuer pour satisfaire l'Eq. (3), est reportée sur l'ensemble des possibles, tel que :

$$m_2(\theta_1 \cup \theta_2 \cup \theta_3 \cup \theta_4) = 1 - m_2(A) \quad (12)$$

Plusieurs points de sondages sont finalement simulés sur le modèle afin de comprendre l'incidence des différents positionnements sur les résultats de la fusion.

### Dimensionnement du maillage préalable à la fusion

Pour pouvoir fusionner les masses de croyance issues de la source d'information géophysique (source 1) et de la source géotechnique (source 2), il est nécessaire d'avoir un maillage commun contenant, pour chaque maille, les BBAs géophysiques et géotechniques. 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, représentant le banc d'essai mis en place.

## Résultats

Les résultats issus de la fusion d'informations géophysiques et géotechniques, représentant le banc d'essai mis en place, sont proposés Figure 8 et Figure 9. Les simulations ont été réalisées selon 4 configurations distinctes de positionnement de sondages verticaux, représentés en lignes pointillées sur les figures et placés à intervalles réguliers : i) 8 sondages inter-espacés de 10 cm (Figure 8) ( $x=10;20;30;40;50;60;70;80$  cm), ii) 5 sondages inter-espacés de 18 cm (Figure 9.a-d) ( $x=4;22;40;58;76$  cm), iii) 3 sondages inter-espacés de 25 cm (Figure 9.e-h) ( $x=15;40;65$  cm), iv) 2 sondages espacés de 50 cm (Figure 9.i-l) ( $x=15;65$  cm). Dans le cadre d'une simulation de 8 sondages, nous présentons les résultats issus d'une fusion réalisée en respectant i) l'hypothèse de Smets, Eq. (4), (Figure 8.a-b), ii) l'hypothèse d'un monde fermé avec règle de combinaison de Dempster-Shafer, Eq. (7), (Figure 8.c-d) et iii) avec règle de PCR5, Eq. (8), (Figure 8.e-f). Les résultats obtenus par la règle de Dempster-Shafer étant moins proches de la réalité que ceux proposés par PCR5, et par faute d'espace, nous avons fait le choix de ne pas présenter les résultats obtenus par cette méthode de combinaison pour les simulations à 5, 3 et 2 sondages.

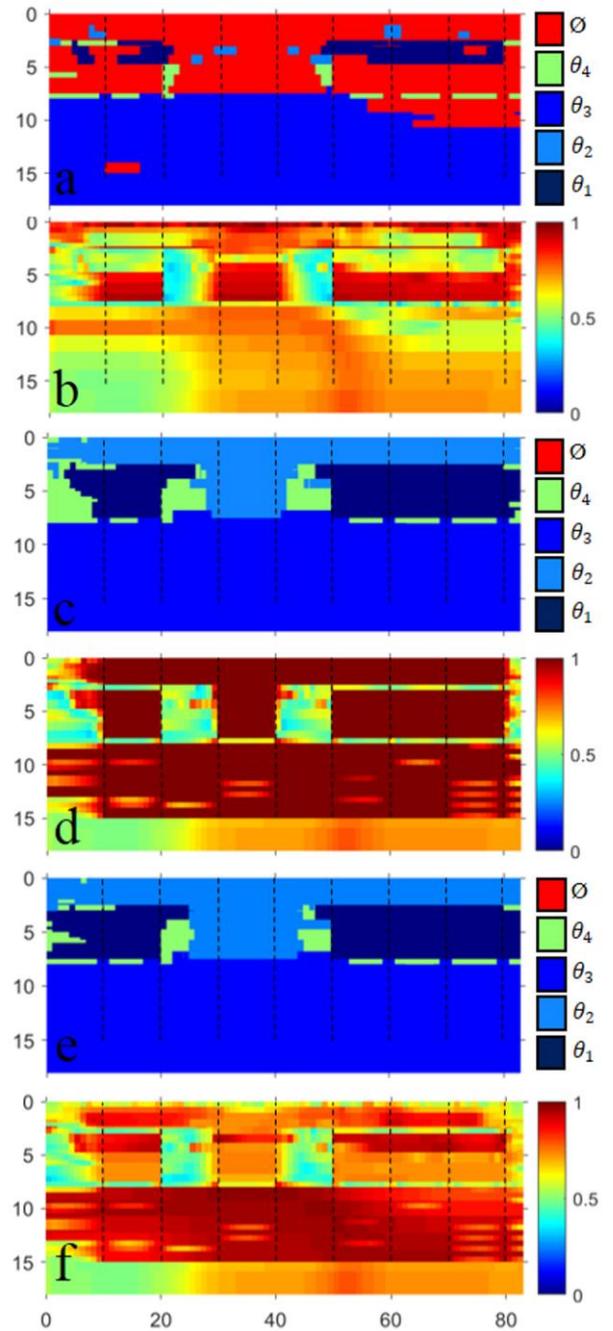


FIGURE 8: RESULTATS DE FUSION D'INFORMATIONS GEOPHYSIQUES ET GEOTECHNIQUES, CONSIDERANT 8 SONDAGES (POINTILLES), SELON L'HYPOTHESE DE SMETS (a, b), DEMPSTER-SHAFER (c, d) ET PCR5 (e, f). b, d) ET f) REPRESENTENT LES BBAS ASSOCIEES AUX EVENEMENTS AYANT LA PLUS GRANDE MASSE APRES FUSION, PRESENTES RESPECTIVEMENT EN a), c) ET e).

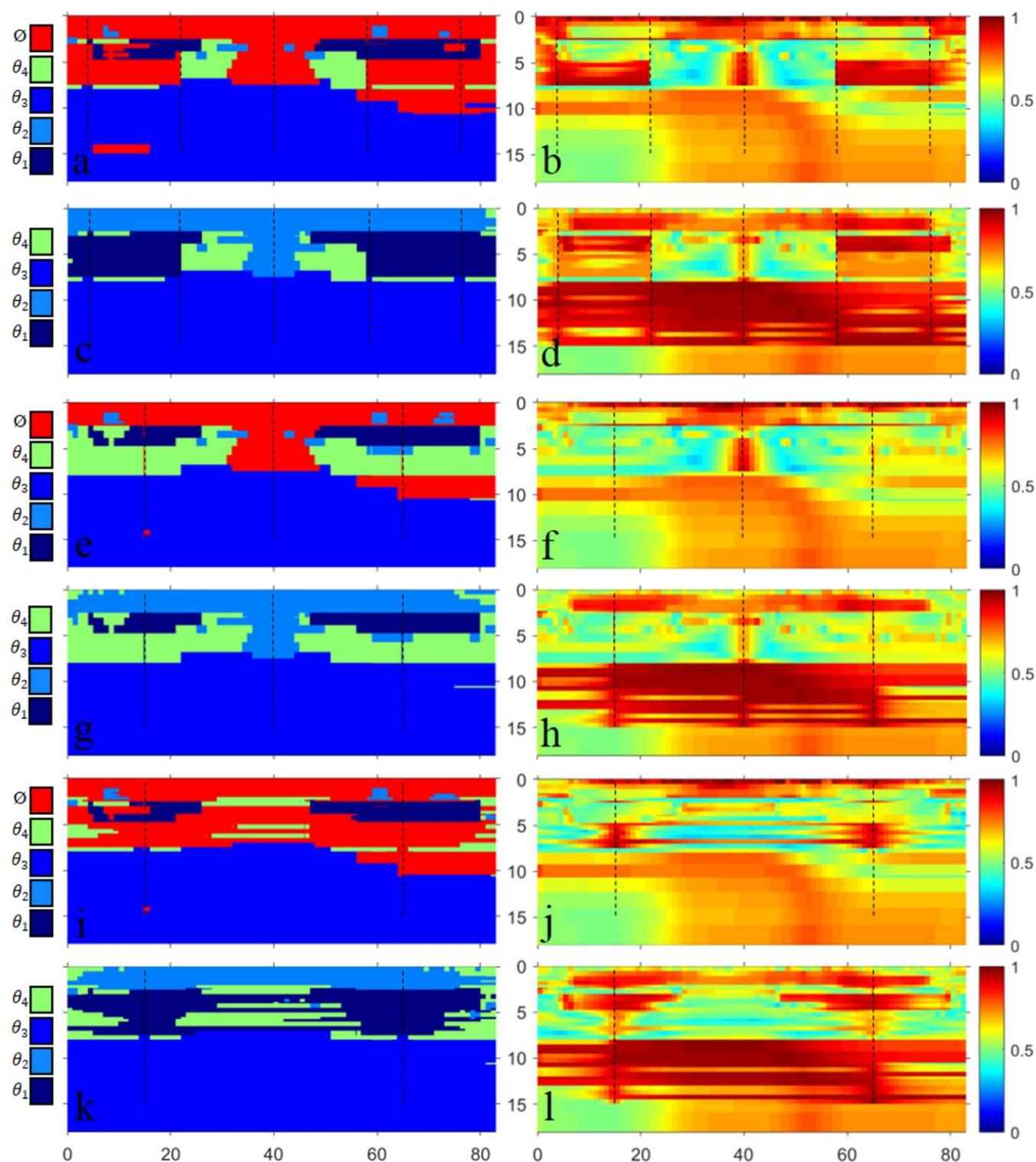


FIGURE 9: RESULTATS DE FUSION D'INFORMATIONS, CONSIDERANT 5 SONDAGES (a - d), 3 SONDAGES (e - h) ET 2 SONDAGES (i - l) (POINTILLES), SELON L'HYPOTHESE DE SMETS (a, b, e, f, i, j), ET PCR5 (c, d, g, h, k, l). b), d), f), h), j) ET l) REPRESENTENT LES BBAS ASSOCIEES AUX EVENEMENTS AYANT LA PLUS GRANDE MASSE, PRESENTES RESPECTIVEMENT EN a), c), e), g), i) ET k)

Les Figures 8.b, 8.d, 8.f, 9.b, 9.d, 9.f, 9.h, 9.k représentent les valeurs de masses de croyance associées aux événements ayant la plus grande masse, représentés respectivement dans les Figures 8.a, 8.c, 8.e, 9.a, 9.c, 9.e, 9.g, 9.i, et 9.k.

## Discussion

### Différentes règles de combinaisons

Discutons et comparons les résultats obtenus par les 3 différentes méthodes de combinaison employées, lors d'une simulation de 8 sondages (Figure 8). Dans le cadre d'un modèle aussi riche en informations géotechniques, la section proposée par la méthode de PCR5 (Figure 8.e) est très proche du modèle physique mis en place (Figure 4). Les 3 ensembles sont bien caractérisés et les interfaces à 2.5 cm (sables-plâtre) et à 7.5 cm (plâtre-cuve PVC et sables-cuve PVC) sont beaucoup mieux définies que par simple TRE (Figure 5). De plus, grâce cette information géotechnique, l'anomalie d'épaisseur de sables a pu être correctement caractérisée comme étant des sables saturés ( $\theta_2$ ) et non une anomalie plus résistante provenant d'en dessous, comme le suggéraient les résultats de l'inversion. L'extension latérale de cette anomalie est, par ailleurs, bien estimée (20 cm). La méthode de Dempster-Shafer, bien qu'accordant une plus grande confiance dans le choix des événements retenus (Figure 8.d) par rapport à la méthode de Smets (Figure 8.b) ou PCR5 (8.f), caractérise moins bien l'extension latérale de l'anomalie que cette dernière. La combinaison de Smets met quant à elle en évidence le conflit important existant entre les deux sources d'informations considérées (Figure 8.a)

Quelle que soit la méthode employée, la présence d'un événement  $\theta_4$ , est signalée au niveau des interfaces verticales et horizontales (Figures 8.a, 8.c, 8.e). Nous savons qu'il s'agit d'un événement ne correspondant à aucun matériau mis en place dans notre banc d'essai. Ces masses de croyance, attribuées à un tel événement, mettent en avant les zones de transition non franches, et non conformes à la réalité, proposées par l'inversion des données de résistivités électriques (Figure 5). En comparaison avec les masses de croyance associées aux différents événements du modèle, les masses de croyance associées à  $\theta_4$  sont les moins élevées (Figures 8.d et 8.f), montrant que la confiance accordée à un tel matériau reste toute relative. Une chute de confiance globale est également à observer à partir de 15 cm de profondeur. Celle-ci correspond à la profondeur maximale atteinte par les sondages simulés. L'extension de la confiance se faisant latéralement, les masses de croyance ne sont attribuées que par l'information géophysique à une telle profondeur et ne s'appuient donc que sur une seule source d'information.

### Influence du nombre et des positions de sondages

L'intuition première serait de supposer que plus le nombre de sondages décroît, plus la méthode devrait être mise en difficulté pour caractériser correctement la section du banc d'essai mis

en place. Bien que cela soit en partie vrai, la qualité des résultats ne repose pas tant sur le nombre que sur la position desdits sondages. En effet, l'anomalie de sables saturés contenus entre les deux bancs de plâtre (Figure 3) est aussi bien caractérisée en terme d'extension latérale que ce soit avec 3 ou 5 sondages (Figures 9.c et 9.g). Elle possède également une confiance associée équivalente (Figures 9.d et 9.h). Il se trouve que les masses de croyance associées à l'événement  $\theta_1$  (plâtre) sont même moindres lors d'une simulation de 3 sondages (Figure 9.h) que lors d'une simulation de 2 (Figure 9.l).

L'explication de tels résultats réside dans le fait qu'être en présence de sondages consécutifs, renseignant sur l'occurrence de matériaux différents, à une profondeur équivalente, induit une décroissance rapide de la confiance attribuée aux sondages. Par conséquent, plus de crédibilité est donnée à la source d'information géophysique, expliquant la présence plus importante de  $\theta_4$ , qui reflète les transitions graduelles de résistivités électriques. Les masses associées à cet événement demeurent cependant relativement faibles.

Le conflit présenté par combinaison de Smets (Figures 8.a, 9.a, 9.e et 9.i) n'est pas non plus fonction du nombre de sondages. Dans notre étude, les cas de fusions donnant le plus de conflits sont en effet les cas à 8 et 2 sondages. Il n'est pas non plus à confondre avec un manque de connaissance du milieu. Les zones de conflit permettent de mettre en évidence une information contradictoire entre les deux sources. Ces zones se trouvent en général entre deux sondages consécutifs fournissant la même information, mais allant à l'encontre de l'information géophysique à disposition. Il s'agit donc de zones potentiellement anomaliques où l'information géophysique doit être considérée prudemment, en particulier si la masse de croyance associée à l'événement retenu après normalisation (PCR5 ou Dempster-Shafer) est trop faible.

### Perspectives d'application

Un tel algorithme de fusion de l'information, dédié à la combinaison de données issues de sources géophysiques et géotechniques, pourrait trouver son utilité pour le traitement de données acquises sur des ouvrages hydrauliques telles que des digues de protection fluviale. Il est possible d'envisager son utilisation avec un plus grand nombre de matériaux, mais également, et surtout, avec un plus grand nombre de jeux de données et de méthodes géophysiques (sismique, radar) et géotechniques (cône de pénétration, carottages avec analyses de laboratoire, essais de perméabilité...) associées.

Dans le cadre d'une campagne de reconnaissance d'ouvrage, les zones conflictuelles, ou avec une faible confiance associée, permettraient de préciser les emplacements où l'investigation doit être renforcée. L'objectif final étant d'obtenir un diagnostic de l'ouvrage plus robuste et à moindre coût, car plus ciblé pour les reconnaissances géotechniques. Cet algorithme a particulièrement montré ici ses capacités à caractériser correctement des interfaces, où des phénomènes d'érosion

interne sont susceptibles de se développer. Les résultats issus d'un tel code pourraient, par exemple, venir alimenter des modèles d'aléas de rupture de digues (ex : CARDigues [18] – [19]).

## Conclusion

Afin de répondre à la problématique de combinaison d'informations acquises par méthodes géophysiques et géotechniques lors de campagnes de reconnaissance sur ouvrages hydrauliques, nous avons mis en place un banc d'essai constitué de plâtre et de sable saturé en eau. Les méthodes retenues pour la caractérisation d'un tel modèle physique sont la méthode de TRE (géophysique) et la méthode du cône de pénétration de laboratoire (géotechnique).

Afin de sélectionner les matériaux constitutifs du banc d'essai ainsi que pour les caractériser au mieux et obtenir un modèle contrôlé, les matériaux ont été caractérisés individuellement, en résistivité électrique et profondeur d'enfoncement, préalablement à leur mise en place. Une fois les données acquises par TRE en déplaçant le dispositif d'acquisition, à la surface et dans l'axe du modèle complet, des points de sondages ont été simulés en respectant les gammes de profondeur d'enfoncement établies préalablement.

Les deux jeux de données (géophysiques et géotechniques) ont ensuite pu être fusionnés par l'algorithme de combinaison de l'information développé. Nous proposons ainsi des résultats de fusion pour 3 méthodes de combinaison (Smets, Dempster-Shafer et PCR5) ainsi que pour 4 simulations distinctes de nombre et de positions de sondages. Les résultats mettent en évidence la capacité de notre approche de fusion à caractériser correctement les matériaux du banc d'essai ainsi qu'à préciser les positions des interfaces (verticales et horizontales) entre les matériaux. De plus, nous proposons pour chaque résultat, la confiance qui lui est associée.

Un tel travail pourrait être repris dans le cadre de campagnes de reconnaissance sur de véritables ouvrages hydrauliques afin d'en améliorer la connaissance et de renforcer leur diagnostic. Le niveau de confiance associé aux résultats proposés peut s'avérer très pertinent pour l'aide à la décision. Les résultats de fusion pourraient être utilisés pour alimenter des modèles d'aléas de rupture déjà en place (ex : CARDigues). Les résultats issus d'une telle méthodologie devraient permettre de proposer les positions de sondages les plus pertinentes, afin de rentabiliser la qualité de l'information à moindres coûts. Ce premier test concluant sur banc d'essai permet d'envisager les prochaines étapes de développement et validation de la méthode. En particulier, celle-ci devra être testée sur de véritables données d'ouvrages en place.

## Remerciements

Nous tenons à remercier la Région Pays de la Loire (co-

financement de thèse) ainsi que Gautier Gugole pour la réalisation du mini-dispositif de TRE.

## Références

- [1] van der Veen A., Steenge A.E., Bockarjova M., Logtmeijer C.J. (2003). *Structural economic effects of large scale inundation: a simulation of the Krimpen dike breakage*. DC1-233.12.
- [2] François D., Mériaux P., Monnet J. (2016). *Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*. Presses des Ponts : Publications IREX, Paris. OCLC: 966418274.
- [3] Dempster A. P. (1967). *Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping*. The annals of mathematical statistics, 325-339.
- [4] Shafer G. (1976). *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press.
- [5] Fauchard C., Mériaux P. (2007). *Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes: Guide for implementation and interpretation*. Quae.
- [6] Royet P., Palma Lopes S., Fauchard C., Mériaux P., Auriou L. (2013). *Rapid and cost-effective dike condition assessment methods: geophysics and remote sensing*. FloodProBE Project.
- [7] Kearey P., Brooks M., Hill I. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons.
- [8] Johansson S., Dahlin T. (1996). *Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements*. European Journal of Engineering and Geophysics, 1:229-247.
- [9] Loke M. H. (2011). *Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Technical report.
- [10] Du Plooy R., Lopes S. P., Villain G., Derobert X. (2013). *Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition*. NDT & E International, 54, 27-36
- [11] NF P (1995) *Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration*. NF P94-052-1
- [12] Fiche technique : <https://www.leroymerlin.fr/v3/p/produits/platre-fin-axton-5-kg-e120244>
- [13] Flavigny E., Desrués J., Palayer B. (1990). *Note technique: le sable d'Hostun «RF»*. Revue française de géotechnique, (53), 67-70.
- [14] Martin A. (2005). *La fusion d'informations*. Polycopié de cours ENSIETA-Réf, 1484, 117.
- [15] Smets P. (1990). *The combination of evidence in the transferable belief model*. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 12(5), 447-458.
- [16] Smarandache F., Dezert J. (2009). *Advances and applications of DSmt for information fusion - Collected works – ARP Volume 3*.
- [17] Irpino A., Verde R. (2008). *Dynamic clustering of interval data using a Wasserstein-based distance*. Pattern Recognition Letters, 29(11), 1648-1658.
- [18] 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.
- [19] CFBR. (2015). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*.