

Diagnostic d'ouvrages hydrauliques en terre en milieu maritime par contrôles non destructifs et fusion de données

Coastal earth fill dikes diagnosis by non-destructive methods and data fusion

S. Gendrey^{1,2}, V. Garnier², P. Azemard¹, C. Payan²

Cerema Direction Méditerranée, Laboratoire d'Aix-en-Provence, Aix-en-Provence, scarlett.gendrey@cerema.fr,

² Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, vincent.garnier@univ-amu.fr,

Résumé

Le projet DIGUE 2020 a pour but d'améliorer la compréhension des phénomènes qui surviennent sur les ouvrages hydrauliques en terre (OHT) maritime grâce à la construction d'une plateforme de recherche in situ à taille réelle, constituée de matériaux naturels et traités à la chaux. L'objectif de ces travaux est d'optimiser le diagnostic des OHT par l'analyse de méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) largement utilisées dans l'ingénierie d'auscultation des digues : résistivité électrique, radar géologique, sismique. En génie civil, la fusion de données issues de méthodes de CND donne des résultats prometteurs et nous proposons d'appliquer cette approche au diagnostic des OHT. Le diagnostic vise à détecter, caractériser et localiser deux types de défauts, connus pour être représentatifs des pathologies récurrentes aux OHT : les variations de densité et les singularités. Ces travaux ont pour but l'établissement et l'exploitation d'un catalogue de signatures représentatives des pathologies récurrentes aux OHT pouvant conduire à la rupture. Des traitements des signaux et la fusion de données seront associés et optimisés pour l'exploitation des mesures.

L'approche choisie s'appuie sur une étude en laboratoire dont l'objectif est la construction de modèle de conversion de paramètres observables (PO) en indicateurs. Les PO considérés sont la résistivité apparente, la vitesse des ondes de cisaillement, et la permittivité relative. Cette étude paramétrique permettra d'établir le catalogue en fonction des indicateurs que sont, la teneur en eau massique, la teneur en eau volumique, la masse volumique sèche apparente rapportée à la masse volumique sèche à l'Optimum Proctor normal, à teneurs en chaux et en sels fixées. Ces modèles sont déterminés sur un ensemble d'éprouvettes caractérisées par des valeurs d'indicateurs qui décrivent les variations usuelles du matériau sur site. La fusion de données permet d'associer les PO issus de chacune des méthodes de CND. Cette démarche calibrée en laboratoire, pour un matériau, est éprouvée sur une planche d'essais, à l'échelle intermédiaire, par l'introduction de singularités. Elle sera ensuite recalée in situ sur la plateforme de recherche expérimentale.

Mots Clés

Ouvrages hydrauliques en terre, Contrôles Non Destructifs, fusion de données, résistivité, radar géologique, sismique

Abstract

The DIGUE 2020 project intends to improve the understanding of long-term ageing phenomena on earth fill dikes (EFD) through the construction of a scale one research platform consisting of natural materials and lime treated materials. In Civil Engineering, data fusion of non-destructive methods shows promising results. This work aims to transfer these approaches to the diagnosis of coastal EFD using data combination. Diagnosis of coastal EFD aimed for tracking, characterising and locating two definite recurring defects: density variations (void areas, decompression, etc.); singularities (branches buried networks). More specifically, to characterise the pathology signatures using the combination of several non-destructive methods (resistivity measurements, ground-penetrating radar, seismic) and build a signature catalogue.

Our methodology is based on a laboratory study whose objective is to build conversion models of observable parameters to indicators. The observable parameters considered are the apparent resistivity, the shear wave velocity, and the relative permittivity. This parametric study establishes the catalogue depending on mass water content, volumetric water content, bulk dry density referenced to bulk dry density at normal Proctor Optimum at fixed lime and salt content. The data combination enables the association of different observable. Ranging from the laboratory to a scale one research platform, our methodology should ultimately rise to a better understanding of long-term ageing phenomena on EFD.

Key Words

Earth fill dikes, non-destructive methods, data combination, resistivity measurements, ground-penetrating radar, seismic

Introduction

En France métropolitaine, près de 9000 kilomètres d'ouvrages hydrauliques ont été construits au fil du temps dont 1210 kilomètres couvrent 17 % des côtes [1]. Avec une densité de population 2,5 fois plus élevée et une urbanisation 5 fois plus importante par rapport à la moyenne nationale, le littoral français, présente un enjeu considérable. Une part importante de ces ouvrages de protection contre la houle ou contre les submersions sont anciens (XIX^{ème} siècle voire plus). Ils sont souvent très hétérogènes par leur construction et leur histoire et nécessitent d'être contrôlés et parfois confortés.

Le projet Digue 2020 a pour objectif d'améliorer la compréhension des processus de dégradation des digues maritimes grâce à la construction d'une plateforme de recherche in situ à taille réelle en région PACA. Il est financé dans le cadre du contrat plan Etat-Région PACA 2015-2020 et par le FEDER. Il bénéficie du soutien de l'Europe, l'État, la Région PACA, et le Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône. Il réunit les partenaires publics suivants : l'Irstea (coordinateur), l'Ifsttar, le Cerema, le laboratoire ESPACE (CNRS/Aix Marseille Université) et le SYMADREM. Il viendra enrichir les différentes études entreprises pour améliorer le diagnostic par Contrôles Non Destructifs (CND) des ouvrages hydrauliques en terre (OHT) traitée ou non, telles que DiguExpERT, DigueELITE, DOFEAS, etc.

C'est dans ce cadre que s'inscrit mon projet de thèse dont l'objectif est l'optimisation du diagnostic des OHT maritimes, traités ou non, par la fusion de plusieurs méthodes de CND.

Les digues

« Une digue est un ouvrage linéaire surélevé par rapport au terrain naturel. Il constitue ou fait partie d'un système d'endiguement qui protège une zone exposée au risque d'inondation et de submersion. » [2]

D'après le projet national ERINOH [3] : « les mécanismes de dégradation des OHT peuvent être regroupés en deux familles : l'érosion externe et l'érosion interne. [...] La rupture d'un ouvrage est généralement liée à la combinaison de processus qu'ils soient liés à l'érosion interne et externe. »

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse particulièrement aux pathologies pouvant mener à de l'érosion interne et provoquer, dans un second temps, la rupture de l'ouvrage :

- les variations de densité (zones de vide, de décompression, défaut de compactage)
- les singularités (système racinaire, réseaux enterrés).

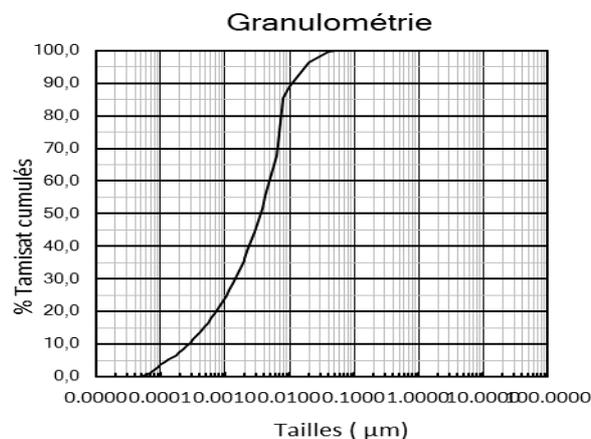


FIGURE 1 : GRANULOMETRIE SUR LA FRACTION 0/D DU MATERIAU (X11-667 ET NF P 94-056)

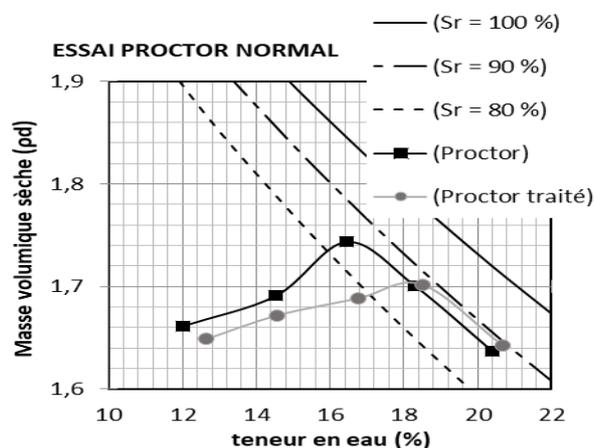


FIGURE 2 : ESSAI PROCTOR NORMAL SUR LE MATERIAU NATUREL ET LE MATERIAU TRAITE A 2 % DE CHAUX VIVE (NF P 94-093)

TABEAU 1 : PROPRIETES DU MATERIAU

Provenance	Salin-de-Giroux
Prélèvement	Tractopelle
Classification GTR	A1
% sable fin	60
% limon	29
% argile	8
% sable grossier	3
ρ_{dOPN} matériau naturel (Mg/m ³)	1,74
wOPN matériau naturel (%)	16,5
ρ_{dOPN} matériau traité à 2 % de CaO (Mg/m ³)	1,70
wOPN matériau traité à 2 % de CaO (%)	18,5
Limite de liquidité w _L (%)	30

Limite de plasticité I_p (%)	4,3
Valeur au bleu du sol (g/100 g de sol sec)	1,12

Caractérisation géotechnique en laboratoire

Ici, sont présentés, la sélection de méthodes d'essais de terrassements, standards et normalisés, qui ont permis de caractériser la nature (granulométrie et argilosité) et le comportement du matériau (référence de compactage).

Les essais d'identification permettent de rattacher le sol à une « famille » (classification) réputée de comportement proche. D'après le GTR [4], les analyses granulométriques par laser (X11-667) et par tamisage (NF P 94-056) permettent d'établir la répartition pondérale des éléments granulaires d'un matériau (Figure 1) ; les limites d'Atterberg (NF P 94-051) ainsi que la valeur au bleu d'un sol (NF P 94-068) permettent de caractériser « l'argilosité » d'un matériau ; l'essai Proctor Normal (NF P 94-093) permet de déterminer les références de compactage d'un matériau (Figure 2).

Le matériau utilisé pour cette étude est un sable limoneux avec un $D_{max} = 0,2$ mm. Le tableau 1 présente les propriétés du matériau issus de cette sélection d'essais.

Caractérisation Non Destructive en laboratoire

L'approche choisie s'appuie sur une étude en laboratoire dont l'objectif est la construction de modèles de conversion de paramètres observables en indicateurs. Les essais non destructifs sont réalisés sur l'ensemble des éprouvettes confectionnées (les éprouvettes confectionnées pour la caractérisation géotechnique du matériau, pour la calibration des protocoles, etc.) afin d'augmenter la quantité de données disponibles pour l'identification de ces modèles. Les « modèles de conversion » sont souvent qualifiés de modèles de calibration dans la littérature.

TABLEAU 2 : DETAILS DES EPROUVETTES POUR L'ETABLISSEMENT DES MODELES DE CONVERSION EN LABORATOIRE

% ρ_{dOPN}	Éprouvettes de matériau naturel	Éprouvettes de matériau traité à 2 % CaO
92	5	5
94	5	5
96	5	5
98	5	5

Les paramètres observables considérés sont la résistivité apparente, ρ_a , la vitesse des ondes de cisaillement, V_s , et la permittivité relative, ϵ_r . Ils sont mesurés en laboratoire à

l'aide de dispositifs adaptés à la taille des éprouvettes cylindriques de dimensions : 152x116 mm. Ces paramètres observables sont évalués en fonction d'indicateurs, que sont, la teneur en eau massique, w , la teneur en eau volumique, θ , la masse volumique apparente sèche, ρ_d , rapporté à la masse volumique apparente sèche à l'Optimum Proctor normal, ρ_{dOPN} , à teneurs en chaux et en sels fixées.

L'établissement de ces modèles permet de mesurer la sensibilité du paramètre observable à tout changement dans l'évolution de l'indicateur. Ils sont déterminés sur un ensemble d'éprouvettes caractérisées par des valeurs d'indicateurs qui décrivent les variations usuelles du matériau sur site. Les différents types d'éprouvettes confectionnées sont détaillés dans le Tableau 2. Les éprouvettes, confectionnées à différents taux de compactage, subissent un cycle d'imbibition et de séchage. Chaque paramètre observable sera déterminé pour différentes teneurs en eau de l'imbibition au séchage complet.

Les modèles de conversion sont spécifiques au sol étudié. L'identification de ces modèles de conversion permet :

- de relier les paramètres observables aux indicateurs ;
- leur exploitation afin d'évaluer les indicateurs à partir des mesures non destructives des paramètres observables ;
- d'estimer la précision de cette évaluation.

La qualité des modèles et donc la précision de l'estimation des indicateurs sont directement liées à certains facteurs. Ces facteurs sont :

- le plan d'expérimentation/échantillonnage : lié au nombre d'éprouvettes de laboratoire qui fournissent le jeu de données ;
- l'incertitude sur les mesures des paramètres observables ;
- les variations spatiales et temporelles des indicateurs pour le sol étudié ;
- les facteurs externes/environnementaux ;
- la méthodologie d'identification du modèle.

La fusion de données permettra d'associer les données issues de chacune des techniques CND.

Calibration du dispositif de mesure indirecte de la permittivité relative ϵ_r

La calibration du dispositif s'est fait sur un lot de 3x3 éprouvettes sur lesquels ont été effectués 10 mesures consécutives. Chaque mesure est effectuée en démontant puis en remontant le dispositif, sur :

- 3 échantillons issus de l'essai Proctor Normal sur matériau naturel confectionné à 14 % de teneur en eau ;
- 3 échantillons issus de l'essai Proctor Normal sur matériau naturel confectionné à 12 % de teneur en eau.

Le dispositif est composé :

- d'une unité de contrôle radar SIR3000
- d'une antenne GSSI 2 GHz Palm

- d'une antenne GSSI 2,6 GHz
- d'une éprouvette
- d'une plaque métallique placée sous l'éprouvette

La réflexion de l'onde électromagnétique (Figure 3) sur la plaque permet de remonter à la vitesse de propagation de l'onde dans l'éprouvette. Après correction du zéro, on remonte à la permittivité relative d'après la relation :

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{V}\right)^2 \quad (1)$$

avec c, la célérité dans le vide, et V, la vitesse de propagation de l'onde l'électromagnétique dans l'éprouvette.

Des essais comparatifs entre les antennes 2 GHz et 2,6 GHz ont été réalisés afin de choisir la plus adaptée à notre étude. D'après West (2003) [5], la permittivité relative d'un matériau possède une dépendance fréquentielle attribuée à l'eau contenue dans le sol, ce qui explique la différence entre les mesures de permittivité relative de l'antenne 2 GHz et de l'antenne 2,6 GHz. De façon générale, les coefficients de variation des mesures réalisées avec l'antenne 2,6 GHz sont plus élevés (Tableau 3 et Figure 4) et c'est ce qui a motivé le choix de poursuivre l'étude avec l'antenne 2 GHz.

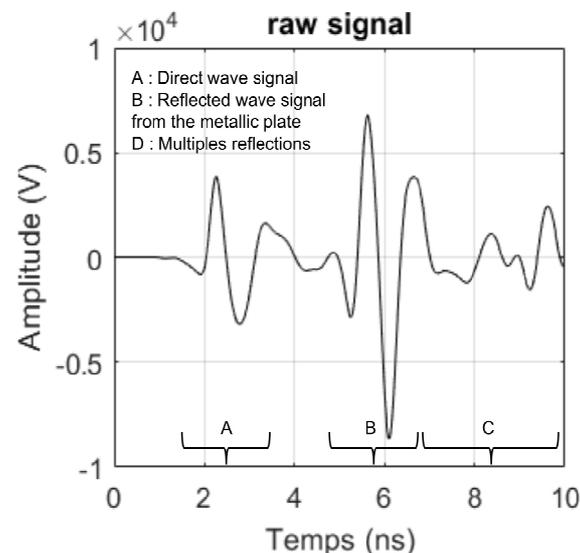


FIGURE 3 : SIGNAL ELECTROMAGNETIQUE BRUT, ANTENNE 2 GHz PALM

TABLEAU 3 : COMPARAISON ENTRE LES ANTENNES 2 GHz ET 2,6 GHz

	2 GHz		2,6 GHz	
Teneur en eau w (%)	12	14	12	14
Écart-type	0,17	0,18	0,64	0,39
Permittivité relative moyenne	33,03	33,42	35,94	35,58

Coefficient de variation (%)	0,50	0,49	1,38	1,33
------------------------------	------	------	------	------

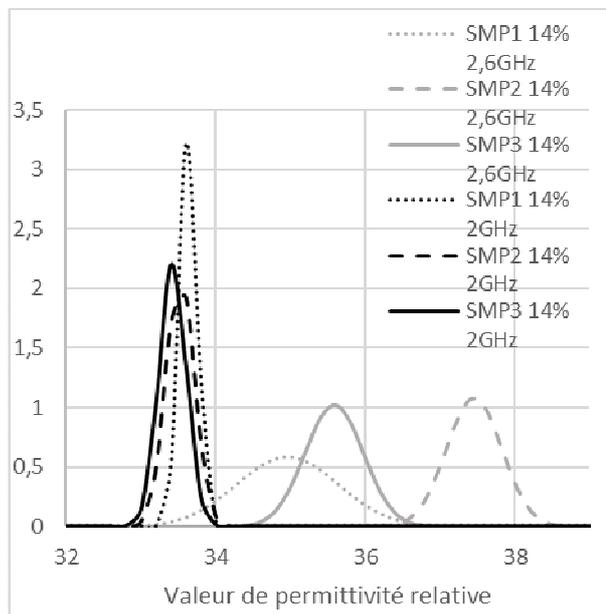


FIGURE 4 : DISTRIBUTION DES MESURES DE PERMITTIVITE RELATIVE POUR LES ANTENNES 2 GHz ET 2,6 GHz

Calibration du dispositif de mesure des vitesses de propagation Vp et Vs

Comme pour le dispositif précédent, la calibration s'est faite sur un lot de 3x3 éprouvettes et sur lesquels ont été effectué 10 mesures consécutives, en démontant et remontant le dispositif à chaque fois, sur :

- 3 échantillons issus de l'essai Proctor Normal sur matériau naturel confectionné à 14 % de teneur en eau
- 3 échantillons issus de l'essai Proctor Normal sur matériau naturel confectionné à 12 % de teneur en eau

Le dispositif est composé :

- d'un générateur HighVoltage
- d'un oscilloscope
- d'un transducteur ondes longitudinales 100 kHz
- d'un transducteur ondes transversales 100 kHz
- d'une presse d'atelier

L'utilisation d'une presse d'atelier permet d'optimiser le contact entre les capteurs et l'éprouvette. Les mesures sont effectuées en appliquant une force de 30 N. Cette force permet de ne pas endommager les capteurs et/ou les éprouvettes, mais plus particulièrement de ne pas créer un biais dans les mesures lié à la déformation de l'éprouvette. Les figures 5 et 6 montrent les signaux bruts obtenus.

Les temps de propagation des ondes P ou S sont directement pointés sur le graphique et les vitesses sont calculées d'après la relation :

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

avec d , la hauteur de l'éprouvette, et t , le temps de parcours de l'onde dans l'éprouvette.

TABLEAU 3 : REPETABILITE DES MESURES SISMIQUES

Teneur en eau w (%)	Vp		Vs	
	12	14	12	14
Écart-type	3,60	4,37	1,99	2,49
Vitesse moyenne (m.s ⁻¹)	477,3	468,9	292,9	258,7
Coefficient de variation (%)	0,75	0,93	0,67	0,96

Fusion de données

La combinaison de techniques CND (fusion de données) a été proposée depuis plusieurs années et a fait l'objet de nombreux travaux de recherche (ex. : projet ANR SENSO, projet ANR ENDE, etc.) notamment pour l'étude des bétons. L'intérêt de la combinaison de techniques CND repose sur le fait que les différentes méthodes non destructives considérées pour ces travaux fournissent des informations complémentaires et non redondantes sur le matériau [6]. Elles permettront d'améliorer l'évaluation des indicateurs et donc d'optimiser le diagnostic des OHT. Toutefois, la combinaison de données est contrainte par les limites individuelles des différentes techniques CND et sa validité est dépendante des facteurs cités ci-dessus.

Fusion de données : théorie des possibilités

«La fusion de données par la théorie des flous a été développée par Zadeh [7]. En logique classique, une condition est "vraie" ou "fausse". La logique floue permet à d'autres valeurs d'exister entre ces deux conditions. Par conséquent, le domaine peut se subdiviser en degrés de possibilités ou de vérité qui varient de 0 à 1.» [8].

La relation entre un paramètre observable et un indicateur peut être représentée par une forme trapézoïdale. La propagation de cette forme de distribution rend possible la construction des distributions de possibilités des indicateurs.

Ces distributions sont pondérées par un niveau de confiance associée à la qualité des modèles de conversion des paramètres observables en indicateurs, définie par le coefficient de détermination R^2 , mais aussi à la qualité intrinsèque des méthodes de CND. Les erreurs des modèles sont prises en compte dans ce niveau de confiance. La combinaison des distributions des possibilités est réalisée à l'aide de l'opérateur de Delmotte. L'opérateur est défini par la relation :

$$\pi_o(ind) = (1 - \alpha_f^2) \max_k(\pi_k(ind)) + \alpha_f^2 \min \left[\min_k(1 - t_k + t_k \pi_k(ind)), \max_k(\pi_k(ind)) \right] \quad (3)$$

avec $\pi_k(ind)$ la possibilité de l'indicateur issu du paramètre observable k , et $\pi_o(ind)$ la possibilité de l'indicateur recherché, t_k la fiabilité propre de chaque paramètre observable, α_f la fiabilité moyenne de tous les paramètres observables considérés par l'opération de fusion.

Pour un paramètre observable peu fiable, on favorisera la prise en compte des maximas pour les distributions des observables. Au contraire, pour un paramètre observable fiable, on favorisera la prise en compte des minimas.

La valeur de l'indicateur issu de la fusion des données correspond donc soit au maximum de la distribution des possibilités ou bien à l'intervalle des valeurs de l'indicateur qui dépassent un seuil donné de possibilité.

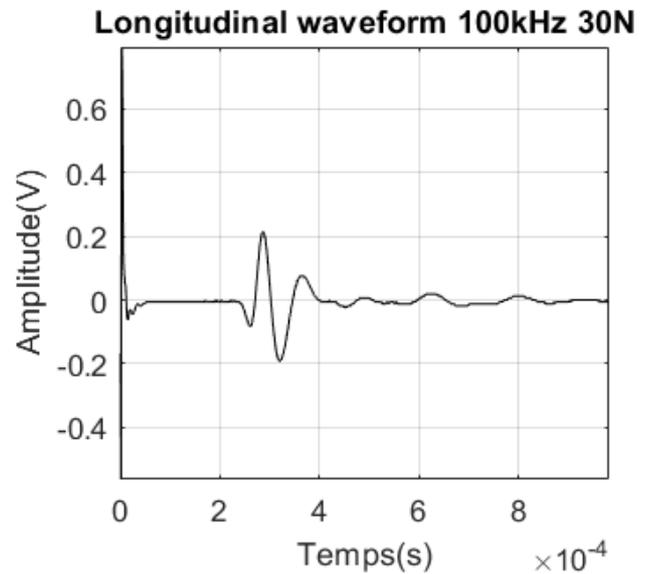


FIGURE 5 : ONDES LONGITUDINALES BRUTES OBTENUES SUR UNE EPROUVETTE DE MATERIAU NATUREL A 14 % DE TENEUR EN EAU

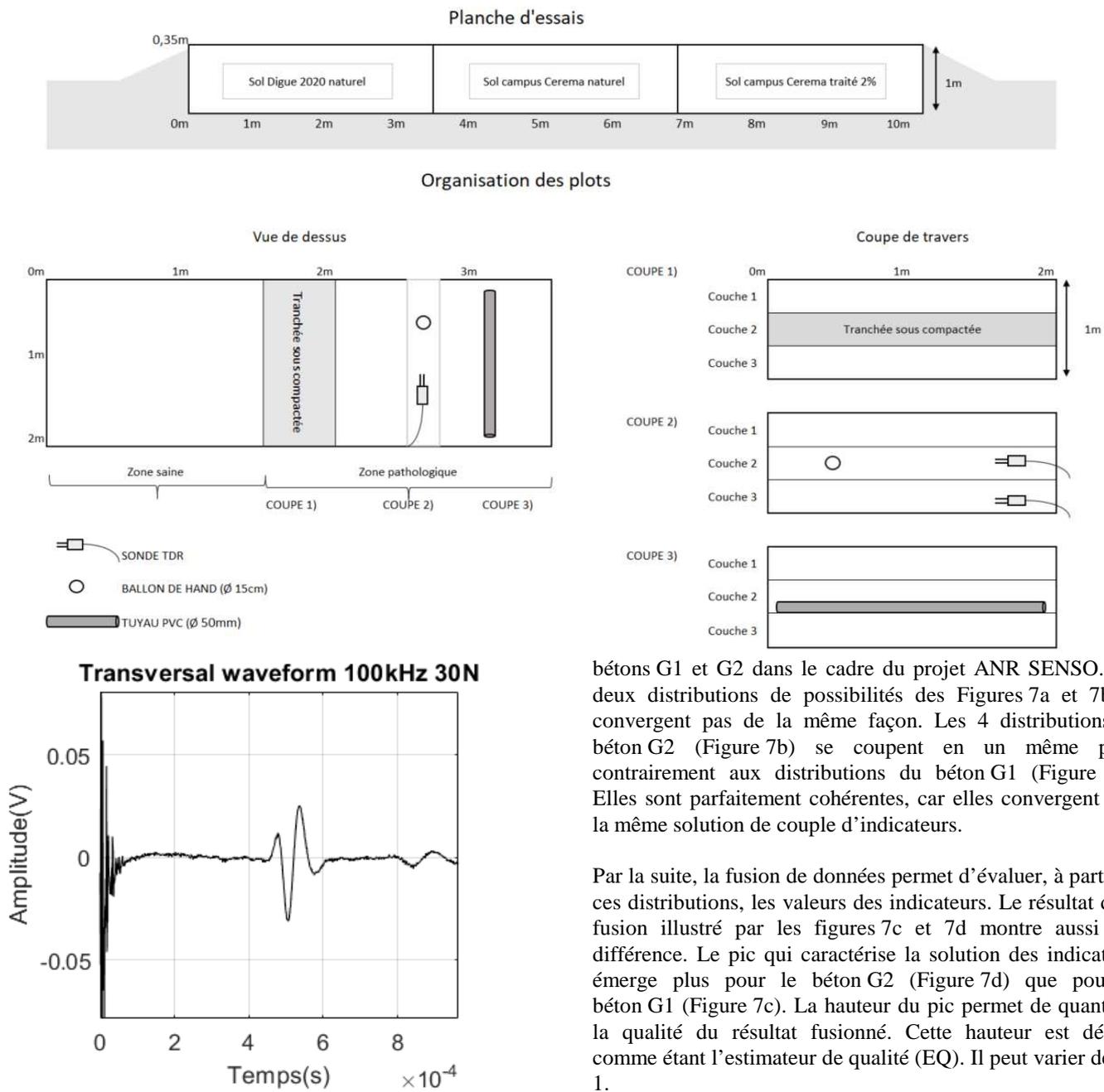


FIGURE 6 : ONDES TRANSVERSALES BRUTES OBTENUES SUR UNE EPROUVETTE DE MATERIAU NATUREL A 14 % DE TENEUR EN EAU

FIGURE 8 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PLANCHE D'ESSAIS

Le principe consiste à utiliser les relations entre les paramètres observables et les indicateurs estimés par des modèles de conversion multilinéaires. La projection de plusieurs paramètres observables permet d'obtenir plusieurs distributions de possibilité. Les Figures 7a et 7b représentent la projection dans l'espace « possibilité — indicateurs » de 4 paramètres observables en fonction de 2 indicateurs sur 2

bétons G1 et G2 dans le cadre du projet ANR SENSO. Les deux distributions de possibilité des Figures 7a et 7b ne convergent pas de la même façon. Les 4 distributions du béton G2 (Figure 7b) se coupent en un même point contrairement aux distributions du béton G1 (Figure 7a). Elles sont parfaitement cohérentes, car elles convergent vers la même solution de couple d'indicateurs.

Par la suite, la fusion de données permet d'évaluer, à partir de ces distributions, les valeurs des indicateurs. Le résultat de la fusion illustré par les figures 7c et 7d montre aussi une différence. Le pic qui caractérise la solution des indicateurs émerge plus pour le béton G2 (Figure 7d) que pour le béton G1 (Figure 7c). La hauteur du pic permet de quantifier la qualité du résultat fusionné. Cette hauteur est définie comme étant l'estimateur de qualité (EQ). Il peut varier de 0 à 1.

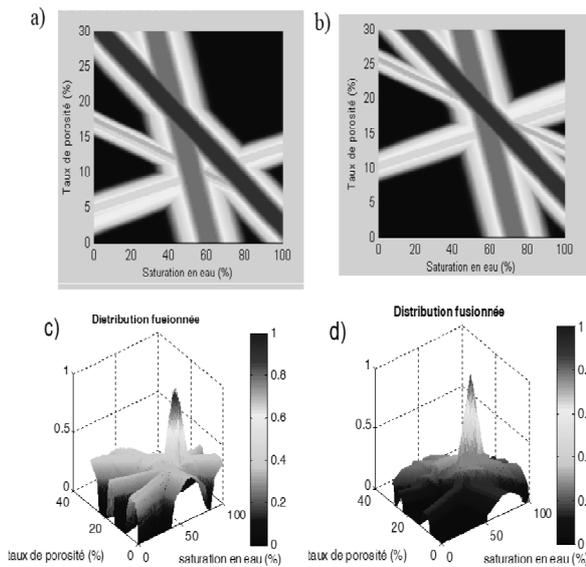


FIGURE 7 : EXTRAIT D'UNE ETUDE EN LABORATOIRE DANS LE CADRE DU PROJET ANR SENSO ; A) DISTRIBUTIONS DE 4 PARAMETRES OBSERVABLES EN FONCTION DE 2 INDICATEURS POUR LE BETON G1 B) DISTRIBUTIONS DE 4 OBSERVABLES EN FONCTION DE 2 INDICATEURS POUR LE BETON G2 C) DISTRIBUTION DES PARAMETRES OBSERVABLES APRES FUSION DU BETON G1 D) DISTRIBUTION DES PARAMETRES OBSERVABLES APRES FUSION DU BETON G2

Cette démarche calibrée sur éprouvettes sera ensuite validée/éprouvée sur une planche d'essais à échelle intermédiaire, par l'introduction de singularités. Puis, elle sera recalée in situ à l'aide de carottages afin d'adapter les modèles de conversion aux conditions environnementales de la plateforme de recherche in situ.

Planche d'essais

À l'issue de l'étude en laboratoire, une planche d'essais sera construite, en partie avec le sol étudié en laboratoire. Elle permettra de valider les modèles de conversion établis en laboratoire et d'introduire des pathologies.

Le diagnostic vise à détecter, caractériser et localiser des pathologies récurrentes aux OHT. On considère deux types de défauts distincts :

- les variations de densité, telles que des zones de vide, des défauts de compactage, des défauts de malaxage sol-liant, des chemins préférentiels d'écoulement de l'eau, etc. ;
- les singularités liées à la présence de réseaux enterrés et/ou d'un système racinaire dans l'ouvrage.

Les défauts seront introduits manuellement dans la planche d'essais lors de sa construction et simulés respectivement par :

- une tranchée sous compactité
- la mise en place d'un tuyau en PVC de petit diamètre ($\varnothing > 10$ mm) et d'un ballon de handball ($\varnothing 150$ mm).

La planche sera divisée en trois plots, qui auront une organisation similaire (Figure 8). Le plot avec le sol du projet Digue 2020 servira de référence pour le passage du laboratoire à l'in situ. La planche d'essai sera aussi instrumentée par des sondes TDR afin de suivre l'évolution de la teneur en eau volumique et de la température dans chaque plot et de pouvoir réaliser les corrections numériques nécessaires pour un suivi à plus ou moins long terme (environ 2 ans).

Plateforme de recherche expérimentale

La plateforme de recherche in situ, dans le cadre du projet Digue 2020, sera construite en région PACA et en milieu marin avec un sol représentatif de celui qui aura servi à l'étude en laboratoire et à la construction de la planche d'essai. Un travail collaboratif pour le choix du site, le dimensionnement et l'intégration de défauts, a été effectué par le consortium DIGUE 2020 et les acteurs locaux. Cette plateforme, dont le but est la recherche, ne sera pas à proximité immédiate d'un enjeu humain ou économique. Elle sera, cependant, suffisamment sollicitée afin que l'on puisse observer son vieillissement au cours des 2 prochaines années, dans le cadre du projet DIGUE 2020, et plus encore dans le cadre de projets ultérieurs.

Le linéaire expérimental devrait s'étendre sur plusieurs centaines de mètres et être composé de différents plots traités et non traités. Ces plots présenteront différents taux de compactage ainsi que des zones dédiées aux carottages. Dans ces plots seront placés des défauts représentatifs de ceux qui existent sur les OHT pour des reconnaissances non destructives de surface. Les dimensions de la plateforme permettront la mise en place de variations de densités et de singularités de l'ordre de la dizaine de centimètres au mètre.

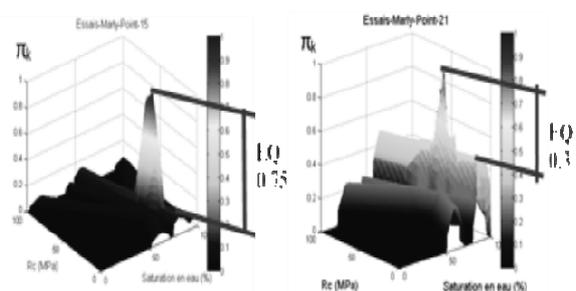


FIGURE 9 : EXTRAIT D'UNE ETUDE EN LABORATOIRE DANS LE CADRE DU PROJET ANR SENSO : EXEMPLE DE CARACTERISATION DE L'ESTIMATEUR DE QUALITE (EQ) POUR DES DISTRIBUTIONS DE PARAMETRES OBSERVABLES APRES FUSION

Conclusions

L'objectif de ces travaux est de fournir une nouvelle approche au diagnostic d'ouvrage hydraulique en terre, maritime ou non. La nouvelle méthodologie proposée donne une place centrale au CND et à la combinaison de ces différentes techniques. En échelonnant les investigations non destructives du laboratoire jusqu'à l'OHT, on s'assure une connaissance accrue du matériau. On s'assure aussi, par des investigations sur une planche d'essais à l'échelle intermédiaire, une meilleure gestion de l'influence des facteurs externes/environnement sur la mesure des paramètres observables.

L'objectif est d'optimiser le diagnostic dans un but préventif tout au long de la vie de l'ouvrage. Sans totalement bannir l'utilisation de méthodes géotechniques, dites destructives, le but est d'en limiter l'utilisation afin d'optimiser un contrôle assurant la pérennité de l'OHT. En effet, le CND, par opposition aux méthodes d'Évaluation Destructives, offre l'avantage de pouvoir être déployée sur l'intégralité de la surface de l'ouvrage sans nuire à son intégrité et, in fine, permet d'optimiser la représentativité de la mesure. Il permet aussi de revenir dans le temps afin de suivre l'évolution des pathologies, ce qui conduit à un suivi spatial et temporel qui autorise la conception de maintenances à la fois curative et préventive.

Remerciements

Cette étude s'inscrit dans le projet Digue 2020. Il réunit les partenaires publics suivants : l'Irstea (coordinateur), l'Ifsttar, le Cerema, le laboratoire ESPACE (CNRS/Aix Marseille Université) et le SYMADREM.

Références

- [1] *Digues, barrages : des risques et impacts gérés à l'échelle des territoires* [en ligne]. <http://www.irstea.fr/nos-editions/dossiers/digues-barrages>
- [2] MEDDE/DGRP/SRNH/STEEGBH. *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*. Guide coordonné par D.Poulain, 2015
- [3] Projet national ERINOH (ERosion INterne des Ouvrages Hydrauliques), *Érosion interne – Approches et besoins en matière d'ingénierie*, RGC&U (Réseau Génie Civil et Urbain)/IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil)
- [4] GTR: *Réalisation des remblais et des couches de forme*, SETRA/LCPC, 2000
- [5] West, L. J., K. Handley, Y. Huang, and M. Pokar, *Radar frequency dielectric dispersion in sandstone: Implications for determination of moisture and clay content*, Water Resour. Res., 39 (2), 1026, doi:10.1029/2001WR000923, 2003.
- [6] Garnier V., Martini D., et al. *Non Destructive Testing of concrete: transfer from laboratory to on-site measurement. Le Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs, Franck. EWESHM – 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Jul 2014, Nantes, France. 2014.*

- [7] Zadeh L.A., *Fuzzy sets*, Information and Control, vol 8, No. 3, pp. 338–353, 1965
- [8] Balayssac J-P., Garnier V., *Non destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures*, ISTE Press – Elsevier, 376p, Nov 2017

