

# DIAGNOSTIC D'OUVRAGES HYDRAULIQUES EN TERRE EN MILIEU MARITIME PAR CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET FUSION DES DONNÉES

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

Scarlett GENDREY<sup>1,2</sup>, Vincent Garnier<sup>2</sup>, Pierre Azemard<sup>1</sup>, Cédric Payan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cerema, Direction Méditerranée, Pôle d'activité – avenue Albert Einstein, – 13 593 F, Aix-en-Provence, France.

<sup>2</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France.

**RÉSUMÉ** – Par une approche empruntée au génie civil, ces travaux visent à optimiser le diagnostic des ouvrages hydrauliques maritimes en terre par la fusion de données de résistivité apparente,  $\rho_a$ , de vitesse des ondes de cisaillement,  $V_s$ , et de permittivité relative,  $\epsilon_r$ . Ils visent également à améliorer la compréhension des phénomènes de vieillissement par une méthode multiéchelle qui va du laboratoire à une plateforme de recherche in situ à taille réelle dans le cadre du projet DIGUE 2020.

**ABSTRACT** – In Civil Engineering, data fusion of non-destructive methods shows promising results. This work aims to transfer these approaches to the diagnosis of coastal earth fill dike using the combination of apparent resistivity,  $\rho_a$ , shear wave velocity,  $V_s$ , and relative permittivity,  $\epsilon_r$ . Our methodology, presented here, ranging from the laboratory to a scale one research platform within the framework of DIGUE 2020 project. Ultimately, this method should rise to a better understanding of long-term ageing phenomena earth fill dikes.

## 1. 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 [3]. 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<sup>e</sup> 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 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 : Irstea (coordinateur), Ifsttar, le Cerema, le laboratoire ESPACE (CNRS/Aix Marseille Université) et le SYMADREM. Il 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. Elle sera constituée de matériau naturel et de matériau traité à la chaux.

L'objectif de ces travaux est d'optimiser le diagnostic des ouvrages hydrauliques en terre (OHT) par l'analyse de méthodes de Contrôle Non Destructif (CND). En génie civil, la fusion de données issues de méthodes de CND donne des résultats prometteurs [5] et nous proposons d'appliquer cette approche au diagnostic des OHT.

Le diagnostic vise à détecter, caractériser et localiser des pathologies récurrentes aux OHT. Le diagnostic se scinde en deux catégories visant deux types de défauts distincts : la

caractérisation du matériau et le contrôle des défauts. La caractérisation du matériau consiste à évaluer des variations mécaniques du matériau lié à des zones de vide, des défauts de compactage, des défauts de mélange sol-liant, des chemins préférentiels d'écoulement, etc. Le contrôle des défauts consiste à déterminer des singularités liées à la présence de réseaux enterrés dans l'ouvrage, de système racinaire, etc.

La détection, la caractérisation et la localisation de ces pathologies sont les enjeux de ces travaux. Il s'agit, plus particulièrement, de spécifier les signatures de ces défauts à partir de données mesurées par CND et par leurs fusions selon la théorie des possibles. La finalité de ces travaux est l'établissement et l'exploitation d'un index de signatures représentatives de ces pathologies et du vieillissement de l'OHT qui peuvent conduire à la rupture dans le cas de matériau naturel et matériau traité à la chaux. Dans le cadre du projet DIGUE 2020, cet index de signature viendra enrichir les différentes études entreprises pour améliorer le diagnostic par CND des OHT traité ou non, telles que DiguExpERT, DigueELITE, DOFEAS, etc.

Le CND sera effectué, pour un même matériau, à différentes échelles : sur des éprouvettes de laboratoire, à l'échelle intermédiaire, sur une planche d'essais et in situ, sur la plateforme de recherche expérimentale.

## 2. Étude 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 fonction d'indicateurs. Les essais non destructifs sont réalisés sur l'ensemble des éprouvettes de laboratoire confectionnées afin d'augmenter la quantité de données disponibles pour l'identification de ces modèles de conversion. Les « modèles de conversion » sont souvent qualifiés de modèles de calibration dans la littérature.

Les paramètres observables considérés sont la résistivité apparente,  $\rho_a$ , la vitesse des ondes de cisaillement,  $V_s$ , et la permittivité relative,  $\epsilon_r$ . Ils sont mesurés en laboratoire à l'aide de dispositifs adaptés à la taille des éprouvettes cylindriques de dimension : 152x116mm. Ces paramètres observables sont évalués en fonction d'indicateurs, que sont, la teneur en eau massique,  $w$ , la teneur en eau volumique,  $\theta$ , la masse volumique sèche apparente,  $\rho_d$ , rapportée à la masse volumique sèche à l'Optimum Proctor normal,  $\rho_{dOPN}$ , à teneur 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 de 88 éprouvettes caractérisées par des valeurs d'indicateurs qui décrivent les variations usuelles du matériau sur site. 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.

### 3. 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. : ANR-SENSO, 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 [5]. Elles permettront d'améliorer l'évaluation des indicateurs et donc d'optimiser le diagnostic des OHT. Toutefois, une combinaison de données est contrainte par les limites individuelles des différentes techniques CND et sa validité est dépendante des facteurs cités ci-dessus (§2).

#### 3.1. 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 "vrai" ou "fausse". La logique floue permet à d'autres valeurs d'exister entre ces deux conditions. Par conséquent, le domaine peut se subdiviser en degré de possibilités ou de vérité qui varient de 0 à 1. » [2].

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

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 1a et 1b, représentent la projection dans l'espace « possibilité — indicateurs » de 4 paramètres observables en fonction de 2 indicateurs sur deux bétons G1 et G2 dans le cadre du Projet ANR-SENSO. Les deux distributions de possibilités des figures 1a et 1b ne convergent pas de la même façon. Les 4 distributions du béton G2 (figure 1b) se coupent en un même point contrairement aux distributions du béton G1 (figure 1a). Elles sont parfaitement cohérentes, car elles convergent vers la même solution de couple d'indicateurs.

Par la suite, la fusion des données permet d'évaluer à partir de ces distributions de possibilités les valeurs des indicateurs. Le résultat de la fusion illustré par les figures 1c et 1d montre aussi une différence. Le pic qui caractérise la solution des indicateurs émerge plus pour le béton G2 (figure 1d) que pour le béton G1 (figure 1c). 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.

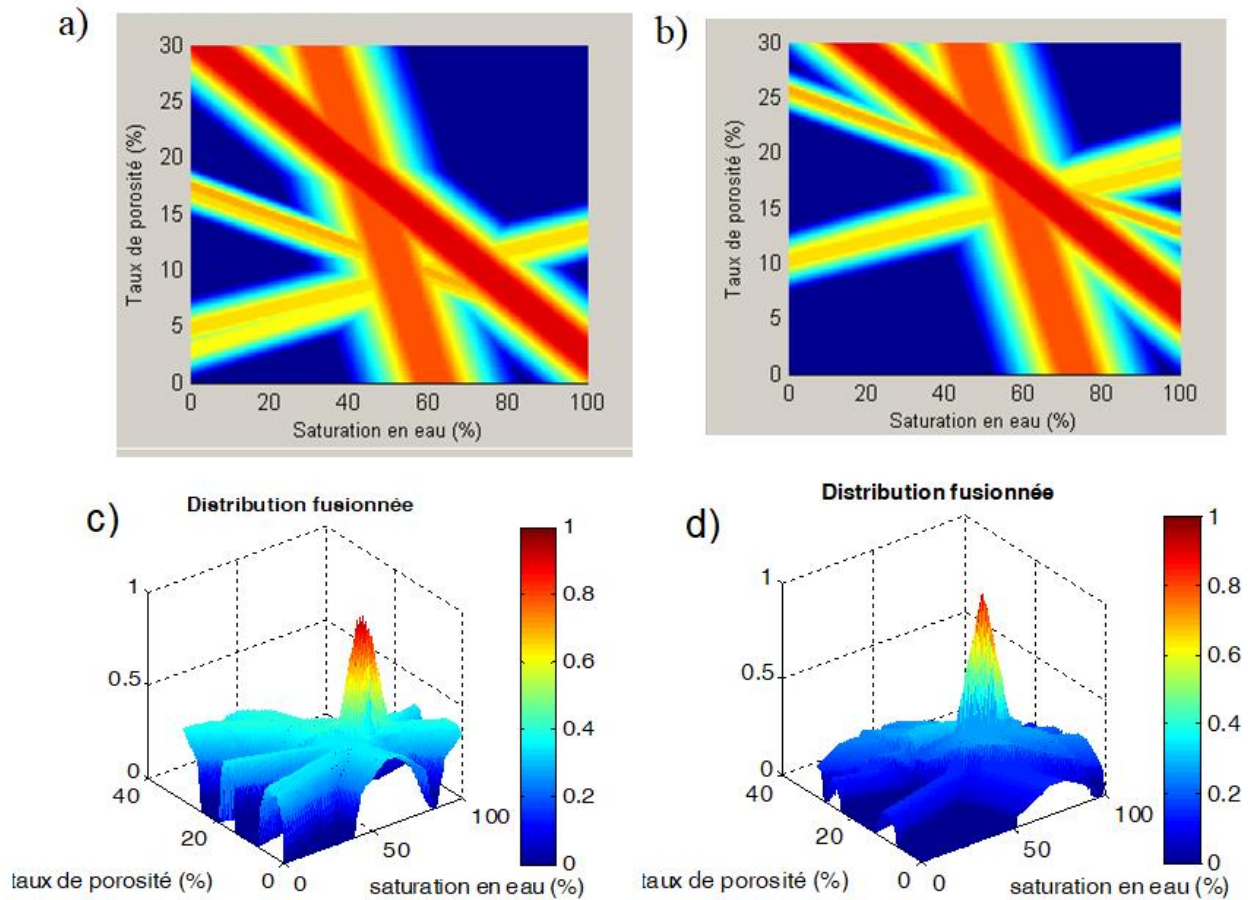


Figure 1 : Extrait d'une étude en laboratoire dans le cadre du projet ANR-SENSO ; a) Distributions de 4 paramètres observables en fonction de 2 indicateurs pour le béton G1 b) Distributions de 4 paramètres observables en fonction de 2 indicateurs pour le béton G2 c) Distribution des paramètres observables après fusion du béton G1 d) Distribution des paramètres observables après fusion du béton G2

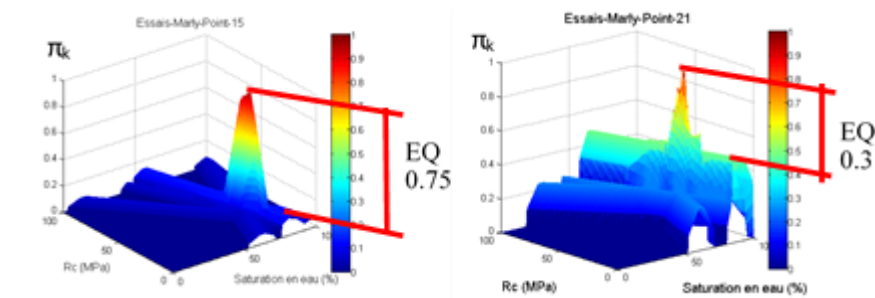


Figure 2 : Extrait d'une étude en laboratoire dans le cadre du projet ANR-SENSO : exemple de caractérisation de l'estimateur de qualité (EQ) pour des distributions de paramètres observables après fusion

Cette démarche calibrée sur 88 éprouvettes en laboratoire sera validée sur une planche d'essais à échelle intermédiaire puis 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.

#### 4. Planche d'essais

À l'issue de l'étude en laboratoire, une planche d'essais sera construite, avec le sol étudié en laboratoire afin de se rapprocher le plus possible des conditions in situ. Elle permettra de valider les modèles de conversion établis en laboratoire par l'introduction de défauts récurrents aux OHT.

Comme signifié précédemment (§2), le diagnostic vise à détecter, caractériser et localiser des pathologies récurrentes aux OHT. On considère de deux types de défauts distincts :

- les défauts liés à des variations mécaniques du matériau telles que des zones de vide, des défauts de compactage, des défauts de mélange sol-liant, des chemins préférentiels d'écoulement, etc. ;
- les défauts liés des singularités liées à la présence de réseaux enterrés dans l'ouvrage, de système racinaire, etc.

Les défauts seront introduits manuellement lors de la construction de la planche d'essai et simulés respectivement, par exemple :

- par une tranchée creusée sur une couche compactée puis remise en place et tasser avec les pieds, par une fuite d'eau, etc.
- par la mise en place d'un tube PVC de petit diamètre, etc.

La figure 3 présente schématiquement la géométrie de cette planche d'essais.

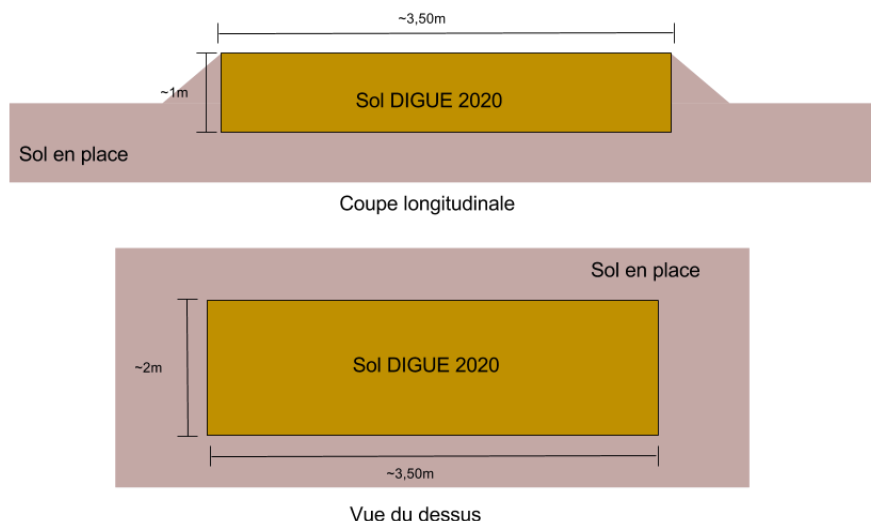


Figure 3 : schéma de la planche d'essais

#### 5. Plateforme de recherche in situ à taille réelle

La plateforme de recherche in situ sera construite en région PACA et en milieu marin avec un sol représentatif à celui qui aura servi à l'étude en laboratoire et à la construction de la planche d'essais. Un travail collaboratif pour le choix du site, le dimensionnement et l'intégration de défauts, est 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. On pourra observer son vieillissement au cours des 2 prochaines années (dans le cadre du projet DIGUE 2020) et plus encore dans le cadre de nouveaux projets.

Le linéaire expérimental devrait s'étendre sur plusieurs centaines de mètres. La plateforme de recherche expérimentale sera composée de différents plots traités et non traités. Ces plots présenteront différents taux de compactage et des zones de carottages,

plots dans lesquels 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 défauts ou de zones altérées de l'ordre de la dizaine de centimètres au mètre.

## 6. 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 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 non destructive de 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 sa pérennité. 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 de pathologies, ce qui conduit à un suivi spatial et temporel qui autorise la conception de maintenances à la fois curative et préventive.

## 7. Références bibliographiques

[1] : Beck Y.L. « *Évaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : application géotechnique* ». Thèse de Doctorat en génie civil, sous la direction de Philippe Côte. École centrale de Nantes, 2008.

[2] : Balayssac J-P., Garnier V., « *Non destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures* », ISTE Press – Elsevier, 376p, Nov 2017

[3] : Digues, barrages : des risques et impacts gérés à l'échelle des territoires [en ligne]. <http://www.irstea.fr/nos-editions/dossiers/digues-barrages>

[4] : Fargier Y. « *Développement de l'imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre* ». Thèse de Doctorat en génie civil, sous la direction de Philippe Côte. École Centrale de Nantes, 2011.

[5] : 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. EWSHM – 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Jul 2014, Nantes, France. 2014.

[6]: Nguyen N.T., « *Évaluation non destructive des structures en béton armé : étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques* ». Thèse de doctorat en mécanique, sous la direction de Frédéric Bos. Université de Bordeaux, 2014.

[7] : Zadeh L.A., « *Fuzzy sets* », Information and Control, vol 8, No. 3, pp. 338–353, 1965