

---

Laboratoire: **GERS/GeoEND**  
AXE: **2 – Améliorer l'efficacité et la résilience des infrastructures**  
Conseiller d'études Ifsttar:  
Directeur de thèse: **X. Dérobert (GERS/GeoEND)**,  
Co-directeur de thèse: **A. Ihamouten (DLRCangers - Cerema)**  
Ecole doctorale: **MathSTIC**  
Etablissement d'inscription: **Ecole Polytech' Nantes**  
Financement prévu: **Ifsttar (contrat doctoral)**  
Localisation: **Nantes**  
Spécialité de la thèse: **Electromagnétisme, Génie Civil**

---

**Titre du sujet: – Inversion des formes d'onde radar pour la cartographie hydrique 3D des ouvrages en béton**

**PhD title: – GPR full-wave form inversion for 3D hydric mapping of concrete structures**

**Contexte :**

La durée de vie d'un ouvrage en béton peut être limitée par la pénétration d'agents agressifs affectant ainsi le vieillissement naturel du béton. Un facteur commun à toutes ces pathologies est l'eau interstitielle du réseau poral du matériau. La quantification de cet indicateur de durabilité en termes de valeur moyenne ou de gradient de surface (les premiers centimètres de l'enrobage de la structure) est considérée comme une information indispensable pour le diagnostic des structures du génie civil en béton hydraulique.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs recherches menées au sein des équipes de l'IFSTTAR et du Cerema ont montré la capacité des méthodes d'auscultation non destructives GPR à caractériser de manière indirecte des paramètres de transfert hydrique dans les matériaux poreux de manière générale et dans le béton hydraulique de manière spécifique.

Ces recherches se sont focalisées sur l'estimation des observables non destructives (intrinsèquement liées à la teneur en eau volumique) en valeur moyenne en supposant que le milieu de propagation est homogène ou au mieux constitué d'un bi-couche (Thèses IFSTTAR - X. Xiao (2012-2015), R. du Plooy (2009-2012) et A. Ihamouten (2008-2011)). Bien que les résultats obtenus constituent une réelle avancée dans le domaine de la durabilité des infrastructures du génie civil, les méthodes de traitement et les outils d'auscultation développés dans ce cadre ne répondent que de manière partielle à la problématique relative à l'estimation de la variabilité spatiale de la teneur en eau volumique sur un ouvrage.

Nous proposons ainsi dans le cadre de cette thèse une double approche inverse innovante permettant in fine la réalisation de la cartographie 3D des enrobages en béton avec notamment une grande précision dans l'estimation des gradients physique et hydrique par des mesures radar in situ.

**Objectifs :**

Pour évaluer la variabilité spatiale d'un indicateur de durabilité telle que la teneur en eau volumique ou le taux de saturation d'un béton, nous nous focaliserons dans cette thèse sur le développement d'une double approche inverse exploitant les données de mesures non destructives et plus précisément celles issues de la technologie innovante du radar à sauts de fréquence (SFR).

La première approche inverse consistera à transformer la mesurande SFR brute en une observable non destructive physique à travers la méthode d'inversion de formes d'onde dans le domaine fréquentiel (FWFI). Celle-ci permettra en effet une estimation de la dépendance fréquentielle de la permittivité complexe d'une large gamme de matériaux dispersifs aux états homogène et avec gradient. Par ailleurs, la méthode FWFI (développée dans le cadre de la thèse IFSTTAR-Cerema de B. Guan / 2014-2017 pour des applications dans le domaine du bâti ancien) sera adaptée à la problématique en étant basée sur un modèle direct avec une formulation dans les conditions de champ proche des fonctions de Green dans le domaine spatial en termes d'intégrale de Sommerfeld pour une propagation d'ondes EM dans un milieu multi-couches. La prise en compte dans ce modèle analytique des effets de la dispersion de la permittivité complexe s'est faite à travers l'intégration de la variante 4p du modèle de Jonscher. En ce qui concerne le problème inverse, le choix et l'optimisation de la fonction objective et de l'algorithme de minimisation seront effectués. Cette

première approche inverse sera validée (en termes d'estimation de gradients de permittivité complexe) sur des données SFR synthétiques (logiciel HFSS) puis sur des données SFR expérimentales.

Quant à la seconde approche inverse, elle consiste à estimer les gradients de teneur en eau volumique (ou taux de saturation) à partir de l'estimation des permittivités diélectriques complexes issues de la première approche inverse. Pour se faire, nous optimiserons une méthode d'apprentissage supervisé (Support Vector Regression) pour l'estimation de l'indicateur de durabilité (via la mesure in situ SFR) à partir des courbes de calibration obtenues en laboratoire à partir d'une large gamme de matériaux conditionnés et contrôlés à différents états hydriques.

Enfin, cette thèse se conclura sur un point technologique avec la validation du robot cartographie 3D SFR sur un ouvrage réel avec des milieux à différents gradients hydriques.

### **Enjeux stratégiques :**

Cette thèse s'inscrit dans la poursuite des travaux engagés par l'opération de recherche ECODEM, avec un partenariat des départements GERS et MAST (corresp. : G. Villain) de l'Ifsttar et par la thèse de B. Guan (co-financement Ifsttar-Cerema), soutenue en janvier 2018.

Il est à noter également qu'elle s'effectuera en parallèle de travaux menés lors de thèses successives (du Plooy, 2013 ; Fares 2015, et Badr 2019, Alhadj 2020) sur le développement de méthodes non destructives électriques et EM basses fréquences pour l'évaluation du béton et l'obtention de gradients internes.

Au regard des différents indicateurs performentiels caractérisant les mélanges bétons, il est envisageable qu'à moyen terme (à l'issue de ces thèses) on fusionne ces mesures ND, tenant compte de gradients internes, pour les relier au indicateurs recherchés.

### **Contacts :**

[xavier.derobert@ifsttar.fr](mailto:xavier.derobert@ifsttar.fr) (Ifsttar)

[amine.ihamouten@cerema.fr](mailto:amine.ihamouten@cerema.fr) (DLRCAngers – Cerema Ouest)

### **Context:**

The service life of a concrete structures can be limited by the penetration of aggressive agents affecting the natural aging of the concrete. A factor common to all these pathologies is the interstitial water of the poral network of the material. The quantification of this sustainability indicator in terms of average value or surface gradient (the first centimeters of covering concrete of the structure) is considered as indispensable information for the diagnosis of hydraulic concrete civil engineering structures.

Over the past ten years, several studies carried out by the IFSTTAR and CEREMA teams have shown the ability of non-destructive GPR auscultation methods to indirectly characterize water transfer parameters in porous materials in general. and in concrete specifically.

This researches focused on the estimation of non-destructive observables (intrinsically related to the volumetric water content) in average value, assuming that the propagation medium is homogeneous or at best consists of a two-layer (IFSTTAR - X theses Xiao (2012-2015), R. du Plooy (2009-2012) and A. Ihamouten (2008-2011). Although the results obtained represent a real breakthrough in the field of the durability of civil engineering infrastructures, the treatment methods and the tools of auscultation developed in this framework answer only partially to the problematic relating to the estimation of the spatial variability of the volumetric water content on a structure.

In the framework of this thesis, we propose an innovative double inverse approach that ultimately enables the 3D mapping of concrete coatings to be carried out with particular precision in the estimation of physical and water gradients by in situ radar measurements.

### **Objectives :**

To evaluate the spatial variability of a sustainability indicator such as the volumetric water content or the saturation rate of a concrete, we will focus in this thesis on the development of a double inverse approach exploiting non-destructive measurement data and more specifically those derived from the innovative step-frequency radar technology (SFR).

The first inverse approach will be to transform the raw SFR measurand into a physical non-destructive observable through the frequency full-waveform inversion (FWFI) method. This will allow an estimation of the frequency dependence of the complex permittivity of a wide range of dispersive materials with homogeneous and gradient states. In addition, the FWFI method (developed in the framework of the IFSTTAR-Cerema thesis of B. Guan / 2014-2017 for applications in the field of old buildings) will be adapted to the problematic by being based on a direct model with a formulation in the near-field conditions of Green's functions in the spatial domain in terms of Sommerfeld integral for EM wave propagation in a multi-layer medium. In this analytical model, the effects of dispersion of the complex permittivity have been taken into account by integrating variant 4p of the Jonscher model. With regard to the inverse problem, the choice and optimization of the objective function and the minimization algorithm will be made. This first inverse

approach will be validated (in terms of estimation of complex permittivity gradients) on synthetic SFR data (HFSS software) then on experimental SFR data.

As for the second inverse approach, it consists of estimating the gradients of the volumetric water content (or saturation rate) from the estimation of the complex dielectric permittivities resulting from the first inverse approach. To do this, we will optimize a Supported Vector Regression method for estimating the sustainability indicator (via in situ SFR measurement) from calibration curves obtained from a large laboratory range of conditioned and controlled materials to different hydric states.

Finally, this thesis will conclude on a technological point with the validation of the 3D mapping robot SFR on a real work with media with different water gradients.

### **Strategic issues:**

This thesis is part of the ongoing work undertaken by the ECODEM research operation, with a partnership of the IFSTTAR's GERS and MAST (corresp. : G. Villain) departments and the thesis of B. Guan (co- Ifsttar-Cerema financing), supported in January 2018. It should also be noted that it will be carried out in parallel with work carried out during successive theses (Plooy, 2013, Fares 2015, and Badr 2019, Alhaji 2020) on the development of non-destructive electrical and low frequency EM methods for assessment of concrete and obtaining internal gradients. Given the different performance indicators characterizing concrete mixtures, it is conceivable that in the medium term (at the end of these theses) these ND measures, taking into account internal gradients, will be merged to link them to the desired indicators.

### **Contacts :**

[xavier.derobert@ifsttar.fr](mailto:xavier.derobert@ifsttar.fr) (Ifsttar)

[amine.ihamouten@cerema.fr](mailto:amine.ihamouten@cerema.fr)(DLRCAngers – Cerema Ouest)