

MÉMOIRE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénierie et des Systèmes
Spécialité : *Génie Civil*

Par

Wael KARAM

**Tomographie de résistivité électrique pour l'identification spatiale
des ions chlorure dans le béton armé en environnement marin.**

Thèse présentée et soutenue à Nantes Université, le 1 décembre 2025

Unité de recherche : Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique GeM, UMR 6183

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-François LATASTE Professeur, Université de Bordeaux
Fabrice DEBY Maître de Conférences – HDR, Université Paul Sabatier - Toulouse

Composition du Jury :

Président :

Examineurs : Cyrille FAUCHARD, Directeur de recherche, HDR, Cerema
 Géraldine VILLAIN, Ingénieure divisionnaire des TPE — HDR, Univ. Gustave Eiffel, Nantes

Directeur de thèse : Yann LECIEUX, Maître de conférences — HDR, Nantes Université

Co-encadrant de thèse : Franck SCHOEFS, Professeur, Nantes Université

Co-encadrante de thèse : Mathilde CHEVREUIL, Maître de conférences, Nantes Université

Titre : Tomographie de résistivité électrique pour l'identification spatiale des ions chlorure dans le béton armé en environnement marin.

Mot clés : TRE ; CND ; Béton armé ; Inversion ; Chlorures ; Cartographie 2D

Résumé : Cette thèse porte sur l'évaluation non destructive des structures maritimes en béton armé, où les chlorures issus de l'eau de mer provoquent la corrosion des armatures et la dégradation structurelle. L'objectif est de développer une méthodologie non destructive, pour localiser, quantifier et suivre les chlorures. Des mesures locales de résistivité électrique sont converties en cartes bidimensionnelles de résistivité puis de teneur en chlorures, dans des géométries finies en béton armé. Un métamodèle corrige les effets géométriques et la présence des armatures. Le problème inverse est formalisé et deux familles d'algorithmes sont évaluées sous différents niveaux de bruit sur des données synthétiques. Un banc d'es-

sai agar-eau, peu coûteux et reproductible, qualifie la chaîne capteur - inversion et quantifie la propagation des erreurs jusqu'aux interprétations physico-chimiques. Une campagne expérimentale a conduit à une loi de calibration reliant la résistivité, l'humidité et les chlorures via une surface jointe. Enfin, l'approche proposée est menée sur des dalles de béton armé instrumentées et exposées pendant 25 mois à des cycles de marnage accélérés, et les résultats sont validés par confrontation à des essais destructifs. De plus, l'approche est validée sur des ouvrages portuaires *in situ* à Saint-Nazaire, confirmant la fiabilité et la transférabilité de la méthode pour des applications *in situ*.

Title: Electrical resistivity tomography for the spatial identification of chloride ions in reinforced concrete in a marine environment

Keywords: ERT ; NDT ; Reinforced Concrete; Inversion; Chlorides; 2D Mapping;

Abstract: This thesis focuses on the non-destructive evaluation of reinforced-concrete maritime structures, where seawater chlorides drive reinforcement corrosion and subsequent structural damage. The goal is to develop a non-destructive methodology to locate, quantify, and monitor chlorides in concrete. Local electrical resistivity measurements are converted into two-dimensional maps of resistivity and, subsequently, to chloride content within finite reinforced concrete elements. A metamodel corrects geometric effects and the presence of rebars. The inverse problem is formalized, and two families of algorithms are benchmarked on synthetic data un-

der varying noise levels. A low-cost, reproducible agar-water experimental setup validates the sensing-inversion chain and quantifies error propagation to physicochemical interpretations. An experimental campaign yielded a calibration law linking resistivity, moisture, and chlorides via a joint response surface. Finally, the proposed approach was applied to instrumented reinforced-concrete slabs exposed for 25 months to accelerated tidal cycles, with results validated by destructive testing. The approach was also validated on port structures *in situ* in Saint-Nazaire, confirming the method's reliability and transferability for *in situ* applications.