

Proposition d'un contrat doctoral pour octobre 2025

Sujet :

Évaluation de la corrosion du béton armé en milieu marin ou atmosphérique par de nouvelles approches électrochimiques

Lieu de la thèse :

La Rochelle Université et l'Université Gustave Eiffel – Campus de Marne-la-Vallée

Contexte :

Le sujet de thèse proposé concerne la corrosion des armatures et la durabilité des structures en béton armé en façade littorale. Cette étude vise à étudier des nouvelles approches électrochimiques fiables pour évaluer l'avancement de la corrosion des armatures. Cela permettra de mieux appréhender les mécanismes de corrosion dans le béton armé et, par conséquent, de prolonger la durée de vie des structures, en plus de la réduction des coûts et de l'empreinte environnementale de la maintenance de ces structures. Par ailleurs, l'étude se fera sur des matériaux cimentaires contenant des additions minérales qui sont des sous-produits de l'industrie. Ces additions sont généralement utilisées comme substitution d'une partie du ciment dans le béton. Leur utilisation permettra d'une part, de valoriser ces déchets industriels, et d'autre part, de diminuer l'utilisation du ciment et contribuer à la réduction des émissions de CO₂ et de l'impact environnemental des structures en zones littorales.

Même si les enjeux concernés ici peuvent être considérés comme mondiaux, ils ont néanmoins une forte résonance locale. En effet, les ouvrages en béton armé sur le littoral de la Charente Maritime – citons le pont de l'île d'Oléron, le pont de Ré, les infrastructures portuaires rochelaises – commencent à être anciens et souffrent de dégradations liées aux phénomènes de corrosion. Avec ce travail de thèse, de nouvelles approches électrochimiques seront proposées pour évaluer plus efficacement la corrosion des armatures dans ces structures en béton armé. A terme, ces améliorations permettront d'appréhender le comportement des structures dans les zones maritimes (résistance à la corrosion), et par conséquent, d'allonger leur durée de vie en optimisant les décisions de maintenance/réparation.

Descriptif du sujet :

Les armatures du béton armé, généralement en acier carbone, se trouvent au sein d'un milieu solide poreux très alcalin. Dans ce milieu, l'acier est passivé et recouvert d'un film d'oxyde protecteur d'épaisseur nanométrique. Avec le temps, la corrosion des armatures peut survenir soit lorsque les ions chlorure auront atteint les armatures au-delà d'une certaine concentration soit lorsque le CO₂ de l'air ambiant aura carbonaté le béton d'enrobage engendrant une diminution de son pH. La corrosion de l'acier va conduire à une diminution du diamètre de l'armature, une fissuration du béton (les produits de corrosion du fer sont plus volumineux que le fer métal) et une diminution de l'adhérence acier/béton. La fissuration de l'enrobage béton va induire une accélération de l'arrivée des agents agressifs sur le métal. Tous ces phénomènes peuvent conduire à une diminution de sa capacité portante et donc fragiliser la structure [1].

Lors du projet National APPLÉT (2007-2010), une première étude de suivi de la corrosion de prismes en béton armé fabriqué avec du ciment CEM I) a été menée [2,3] et des résultats de simulation et de prédiction de la corrosion ont été proposés [3]. Le projet national PerfDuB (2015-2022), pour Approche **Performantielle** de la **Durabilité** des ouvrages en **Béton** [2], a initié en 2019 un vaste programme scientifique en considérant une analyse combinée de l'approche performantielle (étude des réactions de transfert dans le béton d'enrobage) et de l'approche de corrosion (étude de la résistance à la corrosion de l'armature en acier dans le béton). Ce programme, financé par l'IREX, impliquait plusieurs laboratoires : le Laboratoire Expérimentation et Modélisation pour le Génie Civil et Urbain (EMGCU) de l'Université Gustave Eiffel, le Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de La Rochelle Université, le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) et le Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton (CERIB). Plusieurs centaines d'éprouvettes en béton armé à l'échelle centimétrique, constituées de différentes armatures et avec différentes formulations de ciment (témoins, avec chlorure au gâchage ou après carbonatation pour accélérer la corrosion), ont été fabriquées et placées dans plusieurs conditions environnementales et climatiques.

- A La Rochelle, sur 2 sites : le port des Minimes (en immersion permanente dans l'eau de mer) et la plateforme au pied de la Tour St Nicolas (en zone de marnage),
- A l'Université Gustave Eiffel en fonction de binômes température et humidité relative (Température 20 ou 45°C, HR = 60%, 80% et 92%) et des conditions naturelles extérieures,
- Au CERIB, en fonction de binômes température et humidité relative (Température 20 ou 45°C, HR = 60%, 80% et 92%) et des conditions de cycles et des conditions naturelles extérieures.

Depuis le démarrage de ce programme, plusieurs campagnes expérimentales de mesures électrochimiques ont été menées sur des prismes en béton armé par les différents partenaires [4-7]. Les premiers résultats semblent montrer que les processus de corrosion ne sont pas encore à l'œuvre sur la plupart des éprouvettes, à part quelques une soumises à l'atmosphère naturelle et au binôme 45°C – 92% HR. En effet, le béton est encore trop « jeune » pour s'être carbonaté et ainsi réduire son alcalinité. Par ailleurs, les chlorures du milieu marin ne semblent pas encore avoir atteint l'armature pour les éprouvettes ne contenant pas de chlorure au gâchage. Toutefois, les mesures électrochimiques communément appliquées dans l'étude du béton armé (mesures à l'éponge ou immergés, mesures de potentiels en circuit ouvert – OCP, de résistance de polarisation- R_p et de Spectroscopie d'Impédances Electrochimiques – SIE) réalisées sur l'ensemble de ces prismes ne sont pas toujours cohérentes entre elles. Les processus électrochimiques mis en jeu sont beaucoup plus complexes qu'envisagé et nécessitent une approche plus fondamentale sur la compréhension des mécanismes et leurs réponses aux mesures électrochimiques.

L'objectif de ce travail de thèse est d'effectuer des campagnes de mesures électrochimiques, Non Destructives (ND), sur les différents prismes en béton armé en milieu chloruré (à La Rochelle et à l'Université Eiffel) et en milieu de carbonatation (au CERIB). Il s'agira de proposer une nouvelle méthode électrochimique robuste qui prenne en compte les conditions de mesures (immersion de l'éprouvette ou utilisation d'une éponge, caractérisations électrochimiques (CV ou EIS)) et les conditions de contamination (chlorure ou carbonatation) permettant d'évaluer les processus de corrosion à l'œuvre au sein des différents bétons. Les résultats seront analysés en fonction des conditions climatiques. Afin de valider les résultats ND, des essais destructifs seront conduits sur certains prismes pour permettre des caractérisations de l'état de surface des armatures de l'interface acier/béton, et identifier les produits de corrosion s'étant développés. Pour cela, les techniques de caractérisation disponibles au LaSIE, comme la micro-spectrométrie Raman, la Diffraction des Rayons X, la Tomographie X, seront employées. Les observations en Microscopie Electronique à Balayage et EDS seront réalisées au LRMH, partenaire du projet. En fonction des résultats obtenus, l'objectif *in-fine* sera de à simuler et à prédire la corrosion en fonction des conditions climatiques et des agressions.

Références :

- [1] R. Rodrigues, S. Gaboreau, J. Gance, I. Ignatiadis, S. Betelu, Reinforced concrete structures : a review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring, *Construction and Building Mat.*, 269 (2021) 121240
- [2] C. Cremona, L. Adélaïde, Y. Berthaud, V. Bouteiller, V. L'Hostis, S. Poyet, J.-M. Torrenti, Probabilistic and predictive performance-based approach for assessing reinforced concrete structures lifetime: The applet project, in: K.P. V.L'Hostis, R.Gens and C.Gallé (Eds.) (Ed.) AMP 2010 – International Workshop on Ageing Management of Nuclear Power Plants and Waste Disposal Structures (EFC Event 334), EPJ Web of Conferences, Toronto, Ontario, Canada, 2011, 10.1051/epjconf/20111201004
- [3] V. Bouteiller, E. Marie-Victoire, C. Cremona, Mathematical relation of steel thickness loss with time related to reinforced concrete contaminated by chlorides, *Construction and Building Materials*, 124 (2016) 764-775, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.078>.
- [4] PerfDuB, Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton - De la qualification en laboratoire au suivi d'exécution, 2023, Editions Eyrolles, ISBN 978-2-416-00870-2.
- [5] PERFR116-GT2- Étude de la vitesse de corrosion des armatures-LC169, rapport du PN PerfDuB.
- [6] PERFR119-GT2B- Étude de la vitesse de corrosion des armatures en fonction de la formulation du béton et de son environnement (classes XS2 et XS3)-LC170-220, rapport du PN PerfDuB.
- [7] PERF/R/116 Etude de la vitesse de corrosion des armatures en fonction de la formulation du béton et de son environnement en contamination de chlorures Bonnet A., Da Silva V., Bouteiller V.
- [8] PERF/R/122 Etude de la vitesse de corrosion des armatures en fonction de la formulation du béton et de son environnement (en ambiance chlorures) Bonnet A., Bouteiller V., Da Silva V.

[5] V. Bouteiller, P. Turcry, M. Jeannin, A. Bonnet et V. Da-Silva, Chloride induced corrosion of reinforced concrete as a function of the climatic conditions and the exposure classes, EUROCORR2024, Paris, France

Profil recherché:

Le-la doctorant-e pourrait être issu-e d'un Master Sciences et Génie des Matériaux ou d'autres formations nationales type ingénieur, notamment dans le domaine de l'électrochimie et des matériaux. Le candidat devra montrer un intérêt pour l'expérimentation et la gestion de jeux de données expérimentales. Il devra être mobile (la thèse se déroulant à La Rochelle et à Marne la Vallée), organisé, rigoureux et montrer des qualités orales et rédactionnelles en français et en anglais. **Le-la candidat-e devra impérativement avoir des connaissances en électrochimie.**

Direction de la thèse :

- Dr. Marc JEANNIN, Maître de Conférences – HDR au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de La Rochelle Université
- Dr. Véronique BOUTEILLER, directrice de recherche – HDR dans le laboratoire Expérimentation et Modélisation pour le Génie Civil et Urbain (EMGCU) de l'Université Gustave Eiffel – Campus de Marne-La-Vallée et directrice de la Chaire scientifique « DECISION » portée par la Fondation Université Gustave Eiffel.
- Dr. Philippe TURCRY, Maître de Conférences - HDR au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de La Rochelle Université

De plus, le doctorant sera entouré d'une équipe de chercheurs au LaSIE (4 MCF), au Laboratoire EMGCU (1 DR + 1AI), au CERIB (1 IR) et au LRMH (1 IR) sur laquelle il pourra s'appuyer et bénéficier des compétences de chacun.

Date Limite de candidature : 15 mai 2025

Proposal for a Doctoral Contract for October 2025

Subject:

Evaluation of the corrosion of reinforced concrete in marine or atmospheric environments through new electrochemical approaches.

Thesis Location:

La Rochelle University and Gustave Eiffel University – Marne-la-Vallée Campus.

Context:

The proposed thesis concerns the corrosion of reinforcement and the durability of reinforced concrete structures in coastal areas. The aim of this study is to investigate new, reliable electrochemical approaches for assessing the progress of reinforcement corrosion. This will provide a better understanding of corrosion mechanisms in reinforced concrete and, consequently, extend the service life of structures, in addition to reducing the cost and environmental footprint of maintaining these structures. In addition, the study will focus on cementitious materials containing mineral additives, which are by-products of the industry. These additives are generally used to replace part of the cement used in concrete. Their use will make it possible, on the one hand, to recover these industrial wastes, and on the other, to reduce the use of cement and contribute to the reduction of CO₂ emissions and the environmental impact of structures in coastal areas.

Although the issues at stake here may be considered global, they nevertheless have a strong local resonance. Reinforced concrete structures on the Charente Maritime coast - such as the Oléron bridge, the Ré bridge and port infrastructures in La Rochelle - are starting to look old and are suffering from corrosion-related degradation. With this thesis, new electrochemical approaches will be proposed to more effectively assess the corrosion of reinforcement in these reinforced concrete structures. Ultimately, these improvements will make it possible to understand the behavior of structures in maritime areas (corrosion resistance), and consequently extend their service life by optimizing maintenance/repair decisions.

Subject Description:

Reinforcing bars in reinforced concrete, generally made of carbon steel, are embedded in a highly alkaline, porous solid medium. In this environment, the steel is passivated and covered with a protective oxide film of nanometric thickness. Over time, reinforcement corrosion can occur either when chloride ions reach the reinforcement above a certain concentration, or when CO₂ from the ambient air carbonates the concrete coating, causing a drop in its pH. Steel corrosion will lead to a reduction in reinforcement diameter, cracking of the concrete (iron corrosion products are more voluminous than iron metal) and a reduction in steel/concrete adhesion. Cracking of the concrete coating will accelerate the arrival of aggressive agents on the metal. All these phenomena can lead to a reduction in its load-bearing capacity, thus weakening the structure [1].

The national project PerfDuB (2015-2022), for Performance-Based Approach to the Durability of Concrete Structures, initiated a large scientific program in 2019 considering a combined analysis of the performance-based approach (study of transfer reactions in the cover concrete) and the corrosion approach (study of the corrosion resistance of steel reinforcements in concrete). This program, funded by IREX, involved several laboratories: the Experimentation and Modeling Laboratory for Civil and Urban Engineering (EMGCU) at Gustave Eiffel University, the Engineering Sciences Laboratory for the Environment (LaSIE) at La Rochelle University, the Research Laboratory for Historical Monuments (LRMH), and the Center for Studies and Research in the Concrete Industry (CERIB). Several hundred centimeter-scale reinforced concrete specimens, made with different reinforcements and various cement formulations (controls, with chloride during mixing or after carbonation to accelerate corrosion), have been manufactured and placed in various environmental and climatic conditions.

During the National APPLÉT project (2007-2010), an initial corrosion monitoring study of reinforced concrete prisms manufactured with CEM I cement) was carried out [2,3] and corrosion simulation and prediction results were proposed [3]. The national PerfDuB project (2015-2022), for Approche Performantielle de la Durabilité des ouvrages en Béton [2], has initiated a wide-ranging scientific program in 2019, considering a combined analysis of the performantial approach (study of transfer reactions in embedding concrete) and the corrosion approach

(study of the corrosion resistance of steel reinforcement in concrete). This IREX-funded program involved several laboratories: the Laboratoire Expérimentation et Modélisation pour le Génie Civil et Urbain (EMGCU) at Gustave Eiffel University, the Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) at La Rochelle University, the Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) and the Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du béton (CERIB). Several hundred centimeter-scale reinforced concrete specimens, made of different reinforcement and with different cement formulations (control, with chloride in the mix or after carbonation to accelerate corrosion), were manufactured and placed in a variety of environmental and climatic conditions.

- In La Rochelle, at 2 sites: the Minimes port (permanently immersed in seawater) and the platform at the foot of the St. Nicolas Tower (in a tidal zone).

- At Gustave Eiffel University based on temperature and relative humidity pairs (Temperature 20 or 45°C, RH = 60%, 80%, and 92%) and natural outdoor conditions.

- At CERIB, based on temperature and relative humidity pairs (Temperature 20 or 45°C, RH = 60%, 80%, and 92%) and cycling conditions and natural outdoor conditions.

Since the start of this program, several experimental electrochemical measurement campaigns have been carried out on reinforced concrete prisms by the various partners [4-7]. Initial results suggest that corrosion processes are not yet at work on most of the specimens, with the exception of a few subjected to natural atmosphere and the 45°C - 92% RH binomial. In fact, the concrete is still too “young” to have carbonated and thus reduced its alkalinity. Moreover, chlorides from the marine environment do not yet appear to have reached the reinforcement in the case of specimens containing no chloride at the time of mixing. However, the electrochemical measurements commonly applied in the study of reinforced concrete (sponge or submerged measurements, Open Circuit Potential - OCP, Polarization Resistance - R_p and Electrochemical Impedance Spectroscopy - EIS) carried out on all these prisms are not always consistent with each other. The electrochemical processes involved are far more complex than envisaged, and require a more fundamental approach to understanding the mechanisms and their responses to electrochemical measurements.

The aim of this thesis work is to carry out non-destructive (ND) electrochemical measurement campaigns on various reinforced concrete prisms in a chloride environment (at La Rochelle and Eiffel University) and in a carbonation environment (at CERIB). The aim is to propose a new, robust electrochemical method that takes account of measurement conditions (immersion of the specimen or use of a sponge, electrochemical characterizations (CV or EIS)) and contamination conditions (chloride or carbonation), enabling us to assess the corrosion processes at work within the different concretes. Results will be analyzed according to climatic conditions. To validate the ND results, destructive tests will be carried out on selected prisms to characterize the surface condition of reinforcement at the steel/concrete interface and identify the corrosion products that have developed. To this end, the characterization techniques available at LaSIE, such as Raman micro-spectrometry, X-ray diffraction and X-ray tomography, will be employed. Observations using Scanning Electron Microscopy and EDS will be carried out at LRMH, a partner in the project. Based on the results obtained, the aim *in fine* will be to simulate and predict corrosion as a function of climatic conditions and aggression.

References:

- [1] R. Rodrigues, S. Gaboreau, J. Gance, I. Ignatiadis, S. Betelu, Reinforced concrete structures: a review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring, Construction and Building Mat., 269 (2021) 121240
- [2] PerfDuB, Performance-based approach to the durability of concrete structures - From laboratory qualification to execution monitoring, 2023, Eyrolles Editions, ISBN 978-2-416-00870-2.
- [3] PERFR116-GT2- Study of the corrosion rate of reinforcements-LC169, report of the PN PerfDuB.
- [4] PERFR119-GT2B- Study of the corrosion rate of reinforcements based on concrete formulation and its environment (classes XS2 and XS3)-LC170-220, report of the PN PerfDuB.
- [5] V. Bouteiller, P. Turcry, M. Jeannin, A. Bonnet, and V. Da-Silva, Chloride induced corrosion of reinforced concrete as a function of climatic conditions and exposure classes, EUROCORR2024, Paris, France.

Profile:

The PhD candidate could come from a Master's degree in Materials Science and Engineering or other national engineering training, particularly in the field of electrochemistry and materials. The candidate should show an interest in experimentation and the management of experimental data sets. He/she must be mobile (the thesis

will be carried out in La Rochelle and Marne la Vallée), organized, rigorous and have good oral and writing skills in French and English. **Knowledge of electrochemistry is essential.**

Thesis supervision:

- Dr. Marc JEANNIN, Senior Lecturer - HDR in the Engineering Sciences for the Environment Laboratory (LaSIE) at La Rochelle University
- Dr. Véronique BOUTEILLER, Director of Research - HDR in the Experimentation and Modeling for Civil and Urban Engineering Laboratory (EMGCU) at the Gustave Eiffel University - Marne-La-Vallée Campus and Director of the "DECISION" Scientific Chair supported by the Gustave Eiffel University Foundation.
- Dr. Philippe TURCRY, Senior Lecturer - HDR at the Laboratory of Engineering Sciences for the Environment (LaSIE), La Rochelle University.

Additionally, the doctoral student will be surrounded by a team of researchers at LaSIE (4 Associate Professors), at the EMGCU Laboratory (1 Research Director + 1 Assistant Researcher), at CERIB (1 Research Engineer), and at LRMH (1 Research Engineer), from whom they can rely on and benefit from each other's expertise.

Application deadline: May 15th 2025