

## PROPOSITION DE SUJET POUR UN CONTRAT DOCTORAL

<b><u>Laboratoire</u></b> Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE)
<b><u>Titre de la thèse</u></b> <b>Évaluation de la corrosion du béton armé en milieu marin ou atmosphérique par de nouvelles approches électrochimiques</b>
<b><u>Direction de la thèse</u></b> <i>directeur-trice-s (grade, HDR) et éventuels co-directeur-trice-s</i> Marc JEANNIN – MCF-HDR (50%) Véronique BOUTELLER – DR2 – HDR Université Gustave Eiffel (50%)
<b><u>Adéquation scientifique avec les priorités de l'établissement</u></b> <p>Le sujet de thèse proposé concerne la corrosion des armatures et la durabilité des structures en béton armé en façade littorale. Il s'inscrit parfaitement dans la politique de La Rochelle Université et de l'institut Littoral Urbain Durable Intelligent (LUDI). 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 environnement 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 CO<sub>2</sub> et de l'impact environnemental des structures en zones littorales.</p>
<b><u>Descriptif du sujet</u></b> <i>(enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...)</i> <p>Les armatures du béton armé, généralement en acier carbone, se trouvent au sein d'un milieu solide poreux très alcalin. Dans ces milieux, l'acier peut se passiver, c'est-à-dire se recouvrir d'un film d'oxyde protecteur d'épaisseur nanométrique. Avec le temps, cette alcalinité va diminuer du fait de la carbonatation naturelle du béton par le CO<sub>2</sub> de l'air ambiant et les sels marins tels que les chlorures peuvent atteindre l'armature et provoquer une corrosion de cette dernière. Les produits de corrosion de l'acier étant plus volumineux que l'acier, il en résulte une fissuration de la matrice cimentaire, accélérant l'arrivée des agents agressifs sur le métal et pouvant diminuer sa résilience à la contrainte mécanique et donc fragiliser la structure [1].</p> <p>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.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- 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),</li><li>- 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,</li></ul>

- 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 [3-5]. 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- Rp 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.

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] 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.
- [3] PERFR116-GT2- Étude de la vitesse de corrosion des armatures-LC169, rapport du PN PerfDuB.
- [4] 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.
- [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

**Contexte partenarial** (cotutelle internationale, EU-CONEXUS, partenariat avec un autre laboratoire, une entreprise...)

*Ce travail de thèse se fera en co-direction avec Mme Véronique Bouteiller, directrice de recherche à l'Université Gustave Eiffel – Campus de Marne-La-Vallée et directrice de la Chaire scientifique « DECISION » adossée à la Fondation de l'Université Gustave Eiffel. Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de l'action 1 « Déterminer la cinétique de la durabilité du béton armé avec le changement climatique » qui implique les laboratoires LaSIE, EMGCU, LRMH et CERIB. En dehors de la Chaire « DECISION », financeur pour partie de la thèse, le projet s'intégrera au Groupe d'Intérêt Scientifique (GIS) « DECADES » dont font partie ces laboratoires (la convention est en cours de finalisation).*

**Impacts** (scientifiques, technologiques, socio-économiques, environnementaux, sociétaux...)

L'impact attendu est scientifique, technico-économique et environnementaux. Les avancées scientifiques donneront lieu à une méthodologie de caractérisation de la corrosion plus en adéquation avec le domaine du béton armé avec des formulations de béton à plus faible impact environnemental ("bas carbone"). L'impact technico-économique

viendra de la comparaison du comportement, en termes de durabilité du béton d'enrobage et de résistance à la corrosion de l'acier, en fonction des compositions de bétons, de leur contamination (chlorure ou carbonatation) et du changement climatique. L'ensemble des résultats obtenus sur des durées de l'ordre de 5-7 ans permettra le suivi temporel de la corrosion du béton armé qui est une donnée rare dans la littérature et qui aidera à élaborer des modèles de prédictions.

#### **Programme de travail du doctorant** (tâches confiées au doctorant)

Les tâches confiées au doctorant seront diverses. Il s'agira tout d'abord de mieux cerner le sujet par des études bibliographiques. D'un point de vue expérimental, la première partie sera consacrée à une première campagne de mesures électrochimiques sur l'ensemble des éprouvettes situées sur les différents sites d'exposition. Différentes méthodes seront testées afin de comparer les résultats.

L'ensemble de l'étude comprendra un volet complet de caractérisation électrochimique, comprenant notamment la spectroscopie d'impédance électrochimique et la voltamétrie. Un important travail de caractérisation ex-situ viendra compléter ces analyses, visant à analyser les produits de corrosion voisines de la surface métallique ainsi que l'avancement du front des chlorures au sein de la matrice cimentaire. *In fine*, une méthode fiable permettant d'évaluer le degré d'avancement de la corrosion des armatures en fonction des différents bétons et des conditions climatiques sera proposée. Ce travail pourrait par la suite donner lieu à la réalisation d'une sonde spécifique qui pourrait être brevetée par suite.

#### **Calendrier de réalisation**

- 1ère année : prise en main du sujet (bibliographie) et réalisation de mesures électrochimiques sur les prismes en béton armé en milieu chloruré (LaSIE et EMGCU) et en milieu de carbonatation (CERIB). Comparaison des résultats entre les mesures en immergé et à l'éponge, en CV et en EIS.
- 2ème année : analyse des données, mise en place d'une nouvelle méthode électrochimique et comparaison des résultats avec les analyses réalisées sur les éprouvettes sacrificielles. Validation de la méthode et réflexion sur le développement d'une sonde.
- 3ème année : fin des expériences, interprétation des résultats, rédaction d'un brevet et/ou de publications, rédaction et soutenance de thèse

#### **Accompagnement du doctorant / Fonctionnement de la thèse** (accompagnement humain, matériel, financier, en particulier pour la prise en charge du fonctionnement de la thèse et des dépenses associées)

Outre les moyens octroyés par les laboratoires, des crédits spécifiques de l'équipe TDVM du LaSIE accompagnent chaque doctorant. De plus, un accompagnement spécifique dans le cadre du programme de recherche s'appuyant sur la Chaire DECISION est prévu. Concernant l'accompagnement humain, 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.