



**D R P I**  
Direction Recherche  
Partenariats Innovation

## PROPOSITION DE SUJET POUR UN CONTRAT DOCTORAL

<b>Laboratoire</b>  LaSIE UMR CNRS 7356 : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur et de l'Environnement	<b>École doctorale</b> <b>EUCLIDE</b>
<b>Sujet de thèse</b> <b>Intitulé scientifique</b>  Modélisation du couplage des transferts ioniques réactifs et initiation de la corrosion dans les matériaux cimentaires non saturés. Intégration de la lixiviation/précipitation des minéraux.  <b>Intitulé vulgarisé</b> ( <i>explicite pour un non spécialiste</i> ) : Prédiction de la dégradation des structures en béton armé en zones maritimes par l'initiation de la corrosion sous l'ensemble des interactions environnement – structure.	
<b>Direction de la thèse :</b>  <ul style="list-style-type: none"><li>- Directeur de thèse (50%) : Abdelkarim AÏT-MOKHTAR, Professeur, (contact : <a href="mailto:karim.ait-mokhtar@univ-lr.fr">karim.ait-mokhtar@univ-lr.fr</a>)</li><li>- Co-encadrant (50%) : Rachid CHERIF, Maître de Conférences Contractuel, (contact : <a href="mailto:rachid.cherif@univ-lr.fr">rachid.cherif@univ-lr.fr</a>)</li></ul>	
<b>Descriptif du sujet</b> <i>Éléments d'explication du sujet (enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...)</i>  Les matériaux à base de ciment, avec ou sans additions, sont généralement des matériaux poreux susceptibles d'être pénétrés par des ions ou molécules agressifs et provenant généralement du milieu extérieur. Ces derniers réduisent les performances mécaniques de ces matériaux, donc leur durabilité. Le principal agent agressif dans les zones littorales sont les ions chlorure. Ces chlorures pénètrent le béton d'enrobage de la structure avec une concentration dite « critique », déclenchent la corrosion dont les produits font fissurer le béton. Cela conduit à la dégradation partielle voire générale de la structure. Ces phénomènes de transfert d'agents agressifs ont été étudiés durant les dernières décennies vu l'enjeu économique qui y est lié [QIA 18, FRA 19].  Ainsi, plusieurs travaux sur le transfert des ions chlorure dans les matériaux cimentaires ont été développés au LaSIE [AMI 01a,b ; FRI 04 ; SLE 12 ; SAN 20] faisant de notre laboratoire une référence nationale et international sur ce thème. Des modèles de prédiction du transfert de cet ion, de l'amorçage de la corrosion des armatures ont été proposés [POU 04, AÏT 06, NGU 17]. D'autres travaux sur le couplage du transfert d'ions chlorure et des phénomènes de lixiviation / précipitation dans les matériaux saturés ont été récemment effectués [CHE 2020a]. Cependant, le transfert multi-espèces des ions contenus dans l'eau de mer jusqu'à l'initiation de la corrosion dans les matériaux cimentaires partiellement saturés n'a pas été abordé à ce jour. Dans les faits, l'ensemble des ions agressifs diffusent en parallèle dans le	

matériau (en fonction de son état de saturation) et engendre des interactions ion-ion en phase liquide et ion-solide aux interfaces conduisant à une modification de la microstructure du matériau. C'est pourquoi ces modèles de transfert d'agent isolé restent limités et décrivent mal le comportement du matériau ainsi que l'initiation de la corrosion de la structure.

L'objectif de ce travail de thèse est de développer un modèle physico-chimique permettant de simuler d'une façon réaliste les transferts couplés d'agents agressifs, de chaleur et d'humidité dans les structures en zone littorale. L'élaboration de ce modèle s'appuiera sur les travaux sus-cités de l'équipe TDVM du LaSIE. Etant donné que l'eau de mer est composée d'une multitude d'ions [REF 18], une modélisation multi-espèces des transferts réactifs de ces ions dans le matériau non saturé et de leurs conséquences sera effectuée en couplage avec le transfert de chaleur et d'humidité dans un premier temps. Dans un second temps, nous prédirons l'initiation à la corrosion dans ces matériaux non saturés en zones littorales. En parallèle, il est question d'enrichir le modèle physico-chimique proposé en termes de cinétiques de lixiviation/précipitation des minéraux dans la porosité. Ces phénomènes sont responsables du maintien de l'équilibre thermodynamique entre les hydrates et la solution poreuse lors du transfert de ces agents agressifs [QIA 18, CHE 20b]. Pour ce faire, une investigation fine de la précipitation des minéraux dans la porosité et de l'évolution de la microstructure des matériaux non saturés lors du transfert devra être effectuée. Pour cette étude, des matériaux à faible impact environnemental à base de ciment et d'additions seront utilisés (éco-matériaux).

Cette étude permettra de s'approcher davantage de la réalité des transferts couplés des agents agressifs et leur conséquence (l'initiation de la corrosion) dans les structures en béton armé partiellement saturé tenant compte des phénomènes de lixiviation/précipitation et des conditions environnantes. Ceci permettra d'améliorer les outils numériques utilisés dans la prédiction de la durée de vie des structures en zones littorales (bâtiments et ouvrages d'art).

### Références

- [AÏT 06] A. Aït-Mokhtar, O. Poupard, P. Dumargue, Relationship between the transfer properties of the coating and impedance spectroscopy in reinforced cement-based materials, *J. Mater. Sci.* 41 (2006) 6006–6014.
- [AMI 01a] O. Amiri, A. Aït-Mokhtar, P. Dumargue, G. Touchard, Electrochemical modelling of chlorides migration in cement-based materials. Part I: Theoretical basis at microscopic scale, *Elect. Acta*, 46 (9) (2001), 1267-1275.
- [AMI 01b] O. Amiri, A. Aït-Mokhtar, P. Dumargue, G. Touchard, Electrochemical modelling of chlorides migration in cement-based materials. Part II: Experimental study - Calculation of chlorides flux, *Elect. Acta*, 46 (23) (2001), 3589-3597.
- [CHE 20a] R. Cherif, A. Hamami, A. Aït-Mokhtar, Global quantitative monitoring of the ion exchange balance in a chloride migration test on cementitious materials with mineral additions, *Cem. Concr. Res.* 138 (2020) 106240.
- [CHE 20b] R. Cherif, A. Hamami, A. Aït-Mokhtar, Effects of leaching and chloride migration on the microstructure and pore solution of blended cement pastes during a migration test, *Constr. Build. Mater.* 240 (2020) 117934.
- [FRA 19] V.A. Franco-Luján, M.A. Maldonado-García, J.M. Mendoza-Rangel, P. Montes-García, Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash, *Constr. Build. Mater.* 198 (2019) 608–618.
- [FRI 04] H. Friedmann, O. Amiri, A. Aït-Mokhtar, P. Dumargue, A direct method for determining chloride diffusion coefficient by using migration test, *Cem. Concr. Res.*, 34 (11) (2004), 1967-1973.
- [NGU 17] P-T. Nguyen, O. Amiri, Study of the chloride transport in unsaturated concrete: Highlighting of electrical double layer, temperature and hysteresis effects, *Constr. Build. Mater.* 198 (2017) 608–618.
- [POU 04] O. Poupard, A. Aït-Mokhtar, P. Dumargue, Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy, *Cem. Concr. Res.*, 34 (6) (2004), 991-1000.
- [QIA 18] C. Qiao, P. Suraneni, J. Weiss, Damage in cement pastes exposed to NaCl solutions, *Constr. Build. Mater.* 171 (2018) 120-127.
- [REF 18] Ph. Refait, A.M. Grolleau, M. Jeannin, E. François, R. Sabot, Corrosion of mild steel at the seawater/sediments interface: Mechanisms and kinetics, *Corros. Sci.* 130 (2018) 76-84.

[SAN 20] T. Sanchez, P. Henocq, O. Millet, A. Aït-Mokhtar, Coupling PhreeqC with electrodiffusion tests for an accurate determination of the diffusion properties on cementitious materials, J. Electroanal. Chem., 858 (2020) 113791.

[SLE 12] H. Sleiman, A. Aït-Mokhtar, O. Amiri, J.M. Loche, Chloride transport through unsaturated concrete: Chloride profile simulations and experimental validation, Mag. Concr. Res., 64 (4) (2012), 351-359.

### **Travail demandé au doctorant**

*Préciser les tâches qui seront confiées au doctorant (programme de travail)*

Le (la) doctorant(e) sera affecté(e) à l'axe TDVM du LaSIE et sera amené(e) à accomplir les tâches suivantes :

- Étude bibliographique détaillée sur les modèles de transfert réactifs d'agents agressifs dans les matériaux cimentaires non saturés, transferts couplés de chaleur et d'humidité, corrosion des armatures dans le béton en zones littorales.
- Modélisation des transferts couplés d'agents agressifs, de chaleur et d'humidité en milieu partiellement saturé avec prise en compte des équilibres thermodynamiques qui traduisent les phénomènes de lixiviation/précipitation ainsi que l'initiation de la corrosion.
- Investigation expérimentale de l'évolution de la microstructure des bétons (cinétiques de lixiviation/précipitation) et de l'état de corrosion des armatures lors des transferts multi-espèces. Etude sur échantillons exposés aux cycles d'humidification/séchage en laboratoire ou sur site naturel (zone de marnage).

### **Profil recherché :**

La/Le candidat.e devra être titulaire d'un master ou d'un diplôme d'ingénieur en Génie Civil, Sciences des matériaux, Physique ou Mécanique. Elle / il devra être attiré.e à la fois par la modélisation numérique et les investigations expérimentales en laboratoire.

### **Modalités de candidature :**

Fournir les documents suivants :

- Le dossier de candidature complété (disponible sur le site de La Rochelle Université) ;
- Un CV détaillé, lettres de motivations et de recommandation, notes de L3, M1 et M2.

### **Contacts :**

M. Rachid CHERIF : [rachid.cherif@univ-lr.fr](mailto:rachid.cherif@univ-lr.fr)

M. Abdelkarim AÏT-MOKHTAR : [karim.ait-mokhtar@univ-lr.fr](mailto:karim.ait-mokhtar@univ-lr.fr)