

PROPOSITION DE SUJET POUR UN CONTRAT DOCTORAL

<p>Laboratoire LaSIE UMR CNRS 7356 : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur et de l'Environnement</p>
<p>Titre de la thèse Etude numérique et expérimentale du transfert réactif de chlorures dans le béton armé soumis à un chargement mécanique.</p>
<p>Direction de la thèse <i>directeur-trice-s (grade, HDR) et éventuels co-directeur-trice-s</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Directeur de thèse (100%) : Rachid CHERIF, Maître de Conférences.
<p>Adéquation scientifique avec les priorités de l'établissement</p> <p>Le sujet de thèse proposé concerne la durabilité des structures 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 modéliser expérimentalement et numériquement, le comportement en service de structures (bâtiments et ouvrages d'art) en béton armé en zones littorales afin d'optimiser les stratégies de maintenance et de réparation pour un allongement de leur durée de vie. La démarche que nous proposons vise à étudier à travers une approche globale des agents agressifs de l'eau de mer, des conditions environnantes (température et humidité) ainsi que le chargement mécanique appliqué à la structure afin de tenir compte de l'environnement réel dans lequel la structure évolue. La modélisation physico-chimique à développer, basée sur des équations de transfert et des lois d'action de masse (approche purement thermodynamique), tiendra compte du transfert ionique réactif au sein du matériau dans un milieu marin. La modélisation intégrera en parallèle le comportement mécanique du béton durant le transfert ionique par une approche multiphasique.</p>
<p>Descriptif du sujet <i>(enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...)</i></p> <p>La durabilité des structures de Génie Civil dans un environnement donné est affectée par le transfert d'humidité, de chaleur et d'espèces chimiques agressives à travers le réseau poreux contenu des matériaux de construction. Afin de prédire la durée de vie des structures, il est primordial de comprendre le comportement physico-chimique et mécanique des matériaux de construction vis-à-vis des sollicitations qu'ils subissent dans leurs environnements. Pour répondre en partie à cette problématique, plusieurs travaux de recherche en ce sens, ont été développés dans le monde et, en particulier, au LaSIE, vu l'enjeu économique et environnemental qui y est lié. Au LaSIE, des travaux de recherche ont été menés pour étudier l'influence des sollicitations physiques (hydriques et thermiques) ou chimiques (espèces agressives) sur l'évolution microstructurale des matériaux cimentaires ainsi que l'initiation de la corrosion [SLE 08, TAH 10, CHE 20 ; 23]. Par ailleurs, plusieurs études expérimentales sur le transfert des ions chlorure dans le béton soumis à des contraintes de compression ou de traction ont été développées [LIM 00, BAN 05]. Gowripalan et al., [GOW 00] ont étudié le transfert de chlorures dans un béton fissuré soumis à un chargement de flexion. Récemment, Meng et al., [MEN 22] et Liu et al., [LIU 22] ont proposé un modèle du transfert multi-espèces dans le béton fissuré, en tenant compte des interactions ion-ion et ion-solide. Une approche multiphasique a été utilisée pour bien saisir les schémas de distribution des fissures dans le béton sous chargement mécanique et leur impact sur le transfert de chlorures. Les processus temporels de propagation des fissures et du transfert de chlorures ont été couplés. A ce jour, les modèles du couplage transfert ionique – chargement mécanique utilisés dans la littérature dépendent (i) de l'ouverture de la fissure [DJE 07], (ii) de l'état de l'endommagement du béton [DU 13], ou (iii) du caractère multiphasique du béton [MEN 22].</p> <p>Malgré les résultats prometteurs obtenus dans le cadre de ces travaux de recherche, la prédiction de la durabilité des bétons sous sollicitations mécaniques reste loin d'être maîtrisée vu la complexité des mécanismes physico-chimiques et de</p>

l'endommagement dans le béton. Cette problématique nécessite des investigations expérimentales et des modélisations numériques approfondies : allant de la composition chimique du matériau à son comportement mécanique.

L'objectif de ce travail de thèse est de développer un modèle physico-chimique et mécanique permettant de simuler d'une façon réaliste, les transferts couplés d'agents agressifs dans les matériaux cimentaires soumis à un chargement par compression ou par traction. Le modèle du transfert ionique sera basé sur les travaux du LaSIE sus-cités, tandis que pour le couplage mécanique, un modèle d'endommagement continu du béton sous chargement sera utilisé [MAT 10, RIC 10], avec la prise en compte de la nature multiphasique du béton. Le modèle numérique sera appliqué sur des bétons à base de granulats recyclés. Ces bétons sont connus par leur microstructure complexe due à la présence de plusieurs phases solides de différentes porosités : granulats naturels, ancien mortier, nouveau mortier, etc, d'où la nécessité du développement d'une approche multiphasique. Dans un premier temps, un couplage du transfert ionique dans les bétons saturés sous chargement mécanique sera proposé. Dans un deuxième temps, nous amélioreront le modèle pour des applications sur des bétons partiellement saturés sous sollicitation mécanique, avec la prise en compte des transferts couplés d'humidité et de chaleur.

En parallèle, il est question de développer un protocole expérimental au laboratoire qui permettra de suivre le transfert de chlorures dans un béton sous chargement externe. A titre d'exemple, une exposition aux cycles d'humidification/séchage des éprouvettes cylindriques creuses en béton, à l'échelle décimétrique, soumises à des contraintes de traction au niveau du creux dans le banc de marnage du LaSIE sera envisageable. Les analyses expérimentales sur les profils ioniques dans le béton et les changements de la microstructure permettront de confronter les résultats expérimentaux avec les simulations numériques.

A terme, ces études permettront : (i) d'appréhender les processus réactionnels dans le béton et l'évolution de sa microstructure (fissuration, endommagement) lors des sollicitations, et (ii) de mieux prédire le comportement mécanique et la durabilité des structures en béton armé.

Références

- [SLE 08] H. Sleiman, Etude du transport des chlorures dans les matériaux cimentaires non saturés : Validation expérimentale sur bétons en situation de marnage, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle (2008).
- [TAH 10] M. Tahlaiti, Etude de la pénétration des chlorures et de l'amorçage de la corrosion en zone saturée et en zone de marnage, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France, 2010.
- [CHE 20] 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 23] R. Cherif, C. Andrade, A. Aït-Mokhtar, A.E.A. Hamami, On the calculation of chloride diffusion coefficient from the multispecies transference numbers in the standard migration test, *Cem. Concr. Res.* 167 (2023) 107133.
- [LIM 00] C.C. Lim, N. Gowripalan, V. Sirivivatnanon, Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 353–360.
- [BAN 23] N. Banthia, A. Biparva, S. Mindess, Permeability of concrete under stress, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1651–1655.
- [GOW 00] N. Gowripalan, V. Sirivivatnanon, C. C. Lim, Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 725-730.
- [MEN 22] Z. Meng et al., Mechanical–transport–chemical modeling of electrochemical repair methods for corrosion-induced cracking in marine concrete, *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 37 (2022) 1854-1874.
- [LIU 22] Q. Liu et al., Numerical study on cracking and its effect on chloride transport in concrete subjected to external load,” *Constr. Build. Mater.* 325, (2022) 126797.
- [DJE 07] A. Djerbi, S. Bonnet, A. Khelidj, V. Baroghel-bouny, “Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete,” *Cem. Concr. Res.* 38 (2007) 877–883.
- [DU 13] Y. Du, M. Cullen, and C. Li, Structural effects of simultaneous loading and reinforcement corrosion on performance of concrete beams,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 148–152, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.006.
- [MAT 10] M. Matallah, C. La Borderie, Inelasticity–damage-based model for numerical modeling of concrete cracking, *Eng. Fract. Mech.* 76 (2009) 1087–1108.
- [RIC 10] B. Richard, F. Ragueneau, C. Cremona, L. Adelaide, Isotropic continuum damage mechanics for concrete under cyclic loading: Stiffness recovery, inelastic strains and frictional sliding, *Eng. Fract. Mech.* 77 (2010) 1203–1223.

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

Une collaboration avec la Prof. Carmen ANDRADE de International Center of Numerical Methods in Engineering (CIMNE)-UPC, Madrid 28010, Espagne, est prévue.

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

Scientifiques et technologiques :

L'équipe « Matériaux du génie-civil » de l'axe E3 du LaSIE a une expérience qui date de la création de l'université sur cette thématique (transferts ioniques réactifs, amorçage de la corrosion appliqués à la durabilité des structures en béton armé) sur laquelle elle est reconnue nationalement et internationalement. Ce travail renforcera son positionnement et celui de La Rochelle Université sur ce thème de la durabilité des bâtiments et des ouvrages d'art en milieu littoral. Aussi, le modèle qui sera développé dans le cadre de cette thèse permettrait aux ingénieurs d'estimer de façon plus précise la durée de vie et le suivi en termes de maintenance des structures en BA dans les zones littorales.

Socio-économiques, environnementaux, sociétaux

Comme mentionné ci-dessus, l'amélioration des modèles de prédiction de la durée de vie des ouvrages en BA dans les zones maritimes diminuera le coût de maintenance et de réparation de ces ouvrages. Par ailleurs, Le matériau à étudier dans le cadre de cette thèse présente un fort intérêt exprimé par les industriels et notamment les entreprises du génie civil qui est l'augmentation du taux d'incorporation des déchets du BTP de la région dans les matériaux de construction, où l'incorporation est encore limitée par la réglementation. Cela permettra de réduire : (i) le transport de ces matériaux ; (ii) leur coût et celui de la construction en général avec un meilleur bilan environnemental.

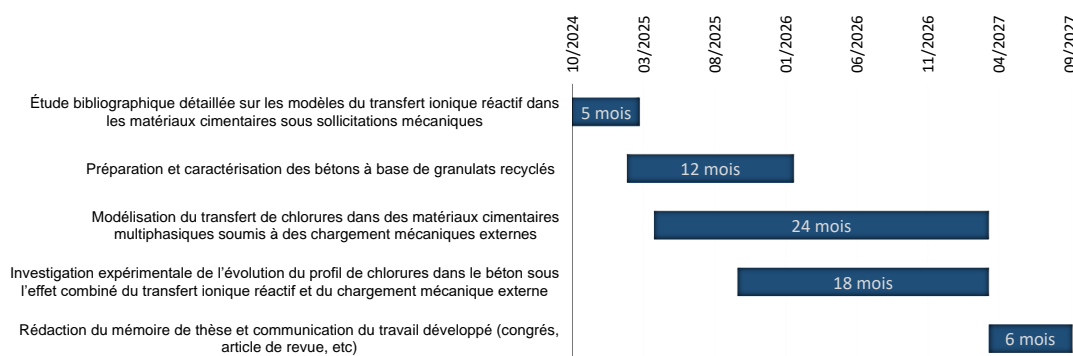
Le développement de l'économie circulaire dans la construction doit intégrer des performances de la construction y compris en zones maritimes. Nous devons élargir les voies de valorisation des déchets du bâtiment dans la construction, notamment en déployant davantage le recyclage des bétons issus de la démolition dans de nouveaux bétons soumis à des environnements particulièrement agressifs.

Programme de travail du doctorant (tâches confiées au doctorant)

Le (la) doctorant(e) sera affecté(e) à l'équipe 3 TDVM du LaSIE et sera amené(e) à accomplir les tâches suivantes :

- Étude bibliographique détaillée sur les modèles du transfert ionique réactif dans les matériaux cimentaires sous sollicitations mécaniques.
- Modélisation du transfert de chlorures dans des matériaux cimentaires multiphasiques soumis à des chargement mécaniques externes.
- Investigation expérimentale de l'évolution du profil de chlorures dans le béton sous l'effet combiné du transfert ionique réactif et du chargement mécanique externe (compression ou traction).

Calendrier de réalisation



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)

- **Humain** : encadrants, personnels technique et administratif du LaSIE
- **Matériel** : Solvants et codes commerciaux disponible au LaSIE, équipements de l'équipe génie civil (cellules de migration des chlorures et sulfates, chromatographie ionique, porosimétrie à l'eau et l'azote, Zeta-mètre, RMN...), Microscopie.
- **Financier** : Projets de l'équipe, soutien de l'équipe TDVM à la participation des doctorants aux congrès internationaux, prestations...