

Proposition de thèse de doctorat

Début : Octobre 2024

Titre de la thèse : Durabilité des bétons bas carbone à travers une approche couplée expérimentation - modélisation avec prise en compte de la fissuration interfaciales au sein du matériau.

Laboratoires :

- Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) UMR-CNRS 6183
- CEREMA

Localisation de la thèse : Ecole Centrale de Nantes

Encadrement : Syed Yasir Alam Maitre de conférences (HDR), Ecole Centrale Nantes Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) UMR-CNRS 6183	Sonia Boudache Chercheure Contractuelle Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) UMR-CNRS 6183
--	---

Description du sujet

INTRODUCTION

Pour tous les bétons, la durabilité est caractérisée au niveau normatif par leur exposition à différents environnements : carbonatation, sulfates, chlorures, gel-dégel, etc. Le critère commun dans l'analyse de la durabilité pour toutes ces classes d'exposition est leur résistance mécanique après exposition. Dans la littérature, très peu d'informations sur l'effet des substitutions par les matériaux cimentaires alternatifs sur les propriétés de rupture et de durabilité de béton bas carbone est disponible. Des travaux récents mais rares sont disponibles ou sont en cours sur les propriétés à la rupture de béton contenant les matériaux cimentaires alternatifs dans un milieu agressif. Le travail à mener est donc important et fastidieux si l'on conserve les mêmes méthodologies de « décarbonatation » dans l'industrie du ciment. La combinaison avec des solutions numériques basées sur la physique et la chimie peut apporter une analyse optimisée du comportement des bétons contenant des additions minérales soumis à toutes les classes d'exposition de la norme.

La durabilité des structures en béton dépend fortement des effets de l'environnement auquel les structures sont exposées, de la formulation des matériaux et du dimensionnement de la structure. Parmi celles-ci figurent les structures souterraines et offshore, qui peuvent être en contact avec de l'eau contenant des sulfates et des chlorures et affectant la durabilité des matériaux utilisés dans ces structures. Certains mécanismes de dégradation restent flous et controversés malgré de nombreuses études et expertises. C'est le cas par exemple du couplage entre l'attaque des sulfates, la lixiviation et les chlorures. Ces phénomènes sont les événements d'accompagnement communs avec l'attaque sulfatique externe (ESA) dans les ouvrages d'art en contact avec l'eau de mer, les eaux souterraines et les sols salins. Dans la plupart des cas, l'interaction entre les ions sulfates et chlorures est réciproque. La capacité de liaison aux ions chlorures de la matrice est généralement signalée comme étant réduite lors d'une exposition combinée chlorures-sulfates et d'une progression plus faible des ions sulfates et chlorures en raison du changement de la microstructure résultant de la précipitation de l'Aft et du sel de Friedel. Par l'attaque combinée des sulfates et des chlorures, les structures en béton devraient avoir des durées de vie plus longues. En effet, la progression de la fissuration causée par la pénétration des sulfates et l'initiation de la corrosion causée par l'accumulation des chlorures sont toutes deux considérablement ralenties. Parmi d'autres phénomènes, l'effet de la lixiviation joue un rôle important et peut modifier la porosité du matériau et peut modifier à la fois les concentrations des chlorures et des sulfates, notamment à proximité de la surface du matériau.

L'amélioration de la durabilité et du vieillissement maîtrisé du béton est naturellement associée à la prédiction de la dégradation des propriétés mécaniques des bétons, dont notamment l'altération des propriétés des interfaces aux plusieurs échelles de matériau. Les pores et les interfaces entre les composants de pâte de ciment et les interfaces entre la pâte et les granulats semblent être des zones privilégiées à la précipitation des cristaux due à la perturbation de l'équilibre thermochimique en modifiant la distribution des produits d'hydratation et engendrant des pressions internes qui induisent à leur tour des gonflements et des fissurations dans le béton. Dès lors, une bonne connaissance du comportement multi-physique du béton aux différentes échelles ainsi que de sa fissuration est un préalable au développement d'outils de prédiction en vue d'anticiper la dégradation progressive, voire l'endommagement, de ce matériau. L'acquisition de cette connaissance passe par une phase expérimentale, en particulier pour les prédictions de fissuration aux

échelles micromécaniques, avec la tenue des interfaces pâte-pâte et pâte-granulat dans les bétons qui est encore mal connue.

OBJECTIF

Compte tenu de l'ambiguïté des mécanismes couplés sulfates-chlorures et le manque de données sur le rôle de fissuration notamment dans les zones interfaciales, l'étude des mécanismes de dégradation du béton bas carbone sous couplage chlorures-sulfates est d'une grande importance. En effet, il permettra à la fois d'évaluer finement la durabilité et prédire la durée de vie des ouvrages en béton en milieu marin et d'examiner l'influence réciproque des processus couplés sur la détérioration du béton et la corrosion de l'acier.

L'objectif de cette thèse est donc d'étudier la détérioration des structures en béton et plus spécifiquement dans les zones d'exposition combinées chlorures-sulfates. On ambitionne une meilleure compréhension des couplages entre les paramètres de dégradation, l'épaisseur de l'enrobage vis-à-vis des conditions environnementales modérées à sévères. La présente recherche vise à fournir une approche globale pouvant aboutir à de nouveaux outils de prédiction prenant en compte à la fois la fissuration, les conditions d'exposition et la nature minéralogique des constituants du béton, mais aussi les mécanismes multi-physiques dans les zones interfaciales.

Les travaux de recherche consistent en une étude expérimentale et une modélisation numérique afin de comprendre les couplages entre transport et processus de fissuration des structures en béton. Un programme expérimental original sera développé pour étudier la fissuration des interfaces pâte-pâte et pâte-granulat. Des méthodes expérimentales multi-échelle et des techniques basées sur des méthodes destructives et non destructives seront appliquées pour caractériser plusieurs paramètres internes liés aux mécanismes d'endommagement à l'interfaces pâte-pâte et pâte-granulat, à l'auto-cicatrisation et les mécanismes chimiques liés au couplage chlorure et sulfate.

Une approche numérique multi-échelle, basée sur les développements récents des laboratoires GeM et Cerema, sera améliorée en prenant compte la conception des mélanges de béton bas carbone et des phénomènes à l'interface pâte-pâte et pâte-granulat. Les principaux objectifs de cette étude sont la compréhension de la perte mécanique due à la réactivité chimique et la modification du phénomène de transport due à la fissuration. Les phénomènes chimiques seront modélisés par un modèle de transport réactif prenant en compte les cinétiques de précipitation/dissolution et la complexation de surface afin de simuler la pénétration des ions dans les matériaux cimentaires. Ce modèle sera couplé avec le modèle d'endommagement mécanique basé sur la méthode des éléments de particules discrètes multi-échelles (DPEM). La méthode des éléments des particules discrètes s'est avérée être une approche efficace et ingénieuse prenant en compte l'évolution complexe des microstructures, des pressions internes et des mécanismes de fissuration à l'échelle d'interfaces pâte-pâte et pâte-granulat.

Bibliography:

- [1] Relevance of displacement softening model in discrete element method to investigate structural and grain size scaling effect. R Zhu, SY Alam, A Loukili. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 123 (2023) 103706.
- [2] External sulfate attack of cementitious materials: New insights gained through numerical modeling including dissolution/precipitation kinetics and surface complexation. A Soive, VQ Tran. Cement and Concrete Composites 83 (2017) 263-272.
- [3] Modelling chemo-mechanical degradation due to external sulphate attack in cementitious materials. SY Alam, S Berrebah, A Soive, A Loukili. 42èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, du 28 au 30 Mai 2024, Le Havre, France.

Compétences requises

- Durabilité des matériaux cimentaires
- Intérêt pour les travaux expérimentaux et la modélisation numérique