

## Proposition de thèse de doctorat

**Début : 2017-2018**

Titre de la thèse : Modélisation multi-échelle et étude expérimentale de l'attaque sulfatique interne dans les matériaux cimentaires : Application aux bétons ordinaires et recyclés.

Laboratoire : GeM, UMR CNRS 6183 Institut de recherche en Génie civil Et Mécanique

Equipe : Interaction Eau Géomateriaux (IEG)

Localisation de la thèse : Saint-Nazaire (44600)

### **Personne à contacter :**

#### **Directeur de Thèse**

**Ouali AMIRI**

[Ouali.amiri@univ-nantes.fr](mailto:Ouali.amiri@univ-nantes.fr)

Tel : 02 40 90 50 90 ou 02 40 17 81 91

#### **Co-Encadrants**

**Nordine LEKLOU**

nordine.leklou@univ-nantes.fr

**François Bignonnet**

francois.bignonnet@univ-nantes.fr,

### **Description du sujet**

La réaction sulfatique interne (RSI) est une réaction endogène durant laquelle de l'ettringite expansive tardive va se former sans apport extérieur de sulfates, ce qui la différencie radicalement de l'attaque sulfatique externe largement étudiée depuis plus d'un siècle. Les conséquences sont par contre assez comparables et se caractérisent par un gonflement différé s'accompagnant d'une fissuration du béton. Cette pathologie se produit notamment dans les structures massives : barrages, tabliers de ponts... et aussi lors de la réalisation d'éléments préfabriqués en béton.

Cette pathologie qui est relativement récente n'a suscité que très peu d'études dans les bétons ordinaires. Pour les bétons à base de granulats recyclés (GBR), aucune étude n'a été faite à notre connaissance. Ces derniers ont une particularité par leur apport d'ions sulfates supplémentaires qui peuvent accélérer le phénomène de la RSI.

Sur le plan scientifique, contrairement aux mécanismes qui provoquent la corrosion des aciers à savoir la diffusion des chlorures et la carbonatation, ceux qui sont à l'origine de la pathologie « Réaction Sulfatique Interne RSI » ou « Delayed Etringite Formation DEF » sont très peu abordés dans la littérature. Des verrous scientifiques existent encore, il s'agit par exemple de quantifier l'évolution de la dissolution ou la précipitation des hydrates en prenant en compte l'effet de la fissuration du matériau sur le lessivage des alcalins et la température pour mettre en évidence la formation de l'ettringite secondaire (hautes températures) et la thaumasite (basses températures).

Le travail proposé s'appuie sur trois aspects complémentaires. Il s'agit tout d'abord d'établir un modèle macroscopique de transport multi-physique pour prédire l'évolution des hydrates lors de la RSI et la concentration des ions de la solution interstitielle. Plus particulièrement, l'effet d'ions sulfates initialement présents dans le cas des GBR, sera étudié.

Dans le cas bétons avec additions minérales (filler, métakaolin, pouzzolane) déjà étudiés au laboratoire d'un point de vue expérimental, le modèle macroscopique devrait aussi prédire les nouvelles phases hydratées.

Le modèle macroscopique alimentera et s'appuiera sur une démarche multi-échelle pour la modélisation explicite de l'endommagement dû à la RSI. L'endommagement sera pris en compte sous forme de décollement partiel de l'ITZ et/ou apparition de micro-fissuration diffuse sous l'effet des pressions de cristallisation d'ettringite dans les zones les plus poreuses comme l'ITZ. L'échelle microscopique pertinente est ici l'échelle où l'on distingue les granulats, leur ITZ partiellement décollée et les micro-fissures. Lors de l'homogénéisation des propriétés mécaniques, la densité de micro-fissuration et le taux de décollement des ITZ apparaissent alors comme des variables d'endommagement naturelles. Un autre avantage est que la même description morphologique de la microstructure et de son état d'endommagement est utilisée pour les propriétés mécaniques (élasticité, résistance) comme pour les propriétés de transfert (diffusion, perméation). Une prise en compte par le modèle macroscopique multi-physique de la rétroaction de l'endommagement par RSI sur la modification des propriétés de transport devient alors envisageable.

Pour alimenter et valider les modélisations mentionnées précédemment, une étude expérimentale sera réalisée sur l'état de fissuration des différents bétons atteint par la RSI. Il s'agit de caractériser l'état de gonflement (variation dimensionnelle) et de rigidité (module de Young) ainsi que d'identifier la répartition des fissures autour des granulats par des analyses MEB. L'étude expérimentale permettra également d'aborder le problème de l'hétérogénéité des granulats recyclés (nature et origine souvent inconnues) et ses conséquences sur la RSI. Pour tenter de répondre à cette problématique, nous caractériserons non seulement une ITZ classique mais plusieurs ITZs afin de comprendre l'effet des agrégats recyclés sur la matrice poreuse. Les caractéristiques de ces zones seront déterminées via le gradient de porosité et le décollement entre les différentes zones de l'ITZ mais également moyennant des essais de nano indentation sous MEB dans l'ITZ pour évaluer ses propriétés. Une caractérisation complémentaire de type Infrarouge (IR) ou résonance magnétique nucléaire (RMN) pourrait être également envisagée en collaboration avec l'Université de Sherbrooke (CANADA) afin de mesurer la distribution porale et la distribution des éléments chimiques (sulfates, alcalins, ..) autour de l'ITZ.

### **Eléments bibliographiques**

Barbudo A., Galvín A.P., Agrela F., Ayuso J., Jiménez J.R., "Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes", *Waste Management*, Vol. 32 (6), 2012, pp. 1229–1235

Tovar-Rodríguez G., Barra M., Pialarissi S., Aponte D., Vázquez E., "Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 38, 2013, pp. 1211–1220.

Salgues Marie, Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : Application aux barrages en béton, Thèse de l'Université de Toulouse , 2013.

Nguyễn Van Huong, « Effets d'additions minérales et organiques sur l'apparition de la RSI : étude paramétrique et développement et optimisation de méthodes accélérées », Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2013.

Amine Yasser, « Béton soumis aux réactions sulfatiques internes : Etude de l'optimisation de l'effet des additions et comportement mécanique », Thèse de doctorat de l'Université de Nantes

V. Pensée, D. Kondo, L. Dormieux, « Micromechanical Analysis of Anisotropic Damage in Brittle Materials ». *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, Issue 8 (2002)

Luc Dormieux, Djimedo Kondo, « Approche micromécanique du couplage perméabilité–endommagement », *C. R. Mécanique* 332 (2004) 135-140

--

Compétences requises
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Connaissances dans les matériaux du génie civil et leur durabilité.</li> <li>- Connaissances en mécanique théorique, programmation</li> <li>- Connaissance du MEB serait un plus</li> <li>- Goût pour l'expérimentation.</li> </ul>

Commentaires Supplémentaires
<p>Etude en relation</p> <p>Financement prévu : Indemnité : Oui (pour les étudiants non déjà boursiers)</p> <p>Montant net mensuel envisagé : 1400 euros avec possibilité de cumuler avec un post de moniteur à Polytech Nantes (300 euros supplémentaires)</p>