

Proposition de thèse de doctorat

Début : 2024

Titre de la thèse : Contribution des interfaces pâte-granulat sur l'évaluation de l'étanchéité des bétons géopolymères

Laboratoire : **GeM** - UMR CNRS 6183 - Institut de recherche en **G**énie civil et **M**écanique
UTR (Unité Thématique de Recherche) : DURPRO - Procédés et durabilité des matériaux et des structures



Localisation de la thèse : Saint-Nazaire - Nantes

Directrice de thèse :

Nom et prénom :
CHOINSKA COLOMBEL Marta

Tél : 0674012060

Mail :
marta.choinska@univ-nantes.fr

Co-Encadrants :

1. Nom et prénom : HILLOULIN Benoit
Mail : benoit.hilloulin@ec-nantes.fr

2. Nom et prénom : RANAIVOMANANA Harifidy
Mail : harifidy.ranaivomanana@univ-nantes.fr

Description du sujet

Contexte et objectif

L'étude de l'interface pâte-granulat, et en particulier de la zone de transition interfaciale (ITZ), a intéressé de nombreux chercheurs, tant pour des matériaux à liants hydrauliques, que plus récemment pour des matériaux à liants géopolymères. Les résultats obtenus pour les bétons géopolymères sont très prometteurs et encourageants quant à la valorisation de ces matériaux de construction alternatifs, à base de déchets industriels (locaux) [Duzy et al., 2022 ; Duzy et al., 2021], donc plus respectueux de l'environnement et ainsi moins carbonés que certains bétons hydrauliques.

Les résultats trouvés dans la littérature montrent que l'emploi d'un liant géopolymère dans un béton peut améliorer les propriétés d'adhérence des granulats, conduisant à une zone de transition interfaciale (ITZ) sensiblement plus résistante [Shi et Xie, 1998 ; Luo et al., 2021]. De plus, les liants géopolymères sont à priori des matériaux acceptables à utiliser dans des bétons de granulats recyclés, permettant ainsi d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques qui sont souvent inférieures aux bétons de granulats naturels [Gopalakrishna et Dinakar, 2023].

Les granulats recyclés mentionnés ici résultent de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés dans la construction. La plupart des granulats recyclés sont constitués de deux phases qui proviennent d'une part du squelette granulaire de l'ancien béton et de sa matrice cimentaire [PN RECYBETON 2011 ; Yammine et al., 2020]. Dans un souci d'économie des ressources naturelles, de la gestion des déchets et de l'économie circulaire, la nouvelle édition de la norme des bétons hydrauliques [NF EN 206+A2/CN], parue en novembre 2022, autorise l'emploi des

graviers recyclés en quantité pratiquement deux fois plus grande que dans l'édition précédente (en fonction de la classe d'exposition, etc), mais autorise également l'emploi des sables recyclés. Si l'on souhaite faire rentrer en usage des bétons géopolymères, l'incorporation des granulats recyclés est ainsi un sujet important de point de vue écologique et probablement aussi économique pour le futur.

En effet, une étude récente [Skariah Thomas et al., 2022] a rapporté que dans le cas des granulats recyclés, où l'ancienne pâte cimentaire attachée au granulats naturels d'origine serait extrêmement poreuse, cette pâte pourrait absorber la solution alcaline, entraînant ainsi une géopolymérisation de la nouvelle ITZ, ce qui améliorerait les propriétés mécaniques d'un tel béton géopolymère. En conséquence, le béton géopolymère présente un potentiel important en tant que matériau vert de BTP.

Cependant, les propriétés de l'interface ITZ n'ont été identifiées dans la littérature que pour très peu de natures de liants géopolymères et très peu de natures de granulats.

L'objectif de ces travaux de thèse serait ainsi de caractériser les interfaces pâte-grulats (granulats naturels et recyclés) des bétons géopolymères, à l'état initial, mais également à l'état endommagé, puis d'identifier l'impact de ces interfaces sur l'amorçage-propagation de l'endommagement/de la fissuration et sur l'étanchéité des bétons géopolymères.

Méthodologie

Approche expérimentale

Dans cette thèse nous proposons de mener une étude expérimentale permettant dans un premier temps de caractériser les propriétés de l'ITZ des bétons géopolymères, avec des granulats naturels et des granulats recyclés. Les méthodes mises en œuvre pour la caractérisation de l'ITZ aux échelles fines pourront être la microscopie électronique à balayage MEB associée à l'analyse EDS (energy dispersive spectroscopy) et la nanoindentation instrumentée. Avec cette dernière méthode, nous pourrions déduire une distribution spatiale des propriétés micromécaniques au niveau du granulats, de la pâte et de l'interface, tel que le module micro-élastique, la microdureté ou encore l'énergie de fissuration associée à cette échelle. Pour l'interface, cela représente des données attendues pour alimenter les paramètres d'entrée des modèles mésoscopiques, comme par exemple celui employé dans les travaux de Hayder Al-Khazraji [Al-Khazraji, 2017]. En effet, le point faible de la description du modèle était, entre autres, le manque de données sur l'interface pâte – granulats et ainsi l'attribution à cette zone des propriétés de la pâte, avec une largeur quasi-nulle.

Un autre aspect de cette étude concerne le couplage des propriétés de l'ITZ avec la fissuration, due à des sollicitations mécaniques. Parmi les caractéristiques de la fissuration, nous entendons l'amorçage, la propagation, l'ouverture de fissure, l'énergie de fissuration et le mode de rupture.

En ce qui concerne les sollicitations mécaniques, nous souhaiterions mettre en évidence l'effet des chargements statique et dynamique cyclique. Un chargement dynamique cyclique peut être, d'une part, représentatif pour des structures sollicitées par un trafic ou, d'autre part, représentatif pour simuler des effets sismiques, naturels ou induits par activité humaine liée par exemple au stockage souterrain de fluides sous pression.

Sous chargement statique, la mécanique de la rupture prédit une croissance des plus gros défauts. Ainsi, la microfissuration doit se propager à partir des plus gros pores ou à partir d'une faible interface. Sous chargement dynamique, on peut s'attendre à une croissance privilégiée de certaines tailles de pores suivant le contenu fréquentiel du signal appliqué [Maurel et al., 2010] mais cela reste à confirmer expérimentalement. Des essais mécaniques seront effectués sur des éprouvettes cylindriques des matériaux sollicités en traction indirecte par fendage à l'aide d'un dispositif développé et présent au laboratoire, pouvant par exemple être associé à l'émission acoustique. Cela permettra de détecter l'amorçage et la propagation de la fissuration en approche statique ou dynamique et d'évaluer la perméabilité au gaz (indicateur de l'étanchéité) en fonction de l'état de contrainte.

Dans le cadre de cette étude, on caractérisera ainsi l'évolution de la perméabilité à l'échelle macroscopique des bétons géopolymères sous différents types de chargement, statique ou dynamique, mais en parallèle de cela, nous utiliserons une technique de visualisation microscopique par tomographie RX pour faire le lien entre l'évolution des interfaces (endommagées) et la (micro)fissuration, voire également la connectivité du réseau. Ces mesures seront complétées par des distributions de tailles de pores (issues de la porosimétrie au mercure MIP), réalisées à différents niveaux d'endommagement.

Contribution à la modélisation

Les distributions de tailles de pores à différents niveaux d'endommagement serviront à investiguer un outil de prévision de la perméabilité « random hierarchical bundle model », basé sur le modèle de [Garcia-Bengochea, 1979 ; Khaddour et al., 2018]. Dans le cadre de travaux de cette thèse, nous souhaiterions pouvoir enrichir ce modèle par la prise en compte des propriétés d'écoulement au niveau des interfaces (endommagées), en s'appuyant sur les résultats de tomographie RX. Par ailleurs, en employant une analyse différentielle entre la distribution de tailles de pores dans un béton puis dans une pâte, nous pourrions accéder à la distribution de tailles de pores au niveau des interfaces, puis au niveau des fissures et des interfaces endommagés pour différents niveaux d'endommagement. Ainsi, nous pourrions obtenir une représentation multimodale pour l'ensemble de phases à l'échelle de la MIP, que nous pourrions ensuite transposer à une échelle macroscopique et comparer avec des résultats expérimentaux sur une éprouvette cylindrique de matériau.

Références bibliographiques

Duzy P., Choinska M., Hager I., Amiri O., Claverie J., Mechanical Strength and Chloride Ions' Penetration of Alkali-Activated Concretes (AAC) with Blended Precursor. *Materials* (Basel). 2022 Jun 24;15(13):4475. doi: 10.3390/ma15134475.

Duzy, P., Sitarz, M., Adamczyk, M., Choińska, M., Hager, I., Chloride ions' penetration of fly ash and ground granulated blast furnace slags-based alkali-activated mortars, *Materials*, 2021, 14(21), 6583.

Shi C., Xie P., Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 887–896.

Luo Z., Wengui Li, Kejin Wang, Arnaud Castel, Surendra P. Shah, Comparison on the properties of ITZs in fly ash-based geopolymer and Portland cement concretes with

equivalent flowability, Cement and Concrete Research, Volume 143, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106392>.

Gopalakrishna B., Pasla Dinakar, Mix design development of fly ash-GGBS based recycled aggregate geopolymer concrete, Journal of Building Engineering, Volume 63, Part A, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105551>.

PN RECYBETON, 2011, «RECYclage complet des BETONS, Étude de faisabilité», Projet National, IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil).

Yamine A., Leklou N., Choinska M., Bignonnet F., Mechling J.-M., DEF damage in heat cured mortars made of recycled concrete sand aggregate, Construction and Building Materials 252 (2020) (10.1016/j.conbuildmat.2020.119059)

NF EN 206+A2/CN, 2022, Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206+A2, Normes nationales et documents normatifs nationaux.

Skariah Thomas B., Yang J., A. Bahurudeen, S.N. Chinnu, Jamal A. Abdalla, Rami A. Hawileh, Hussein M. Hamada, Geopolymer concrete incorporating recycled ggregates: A comprehensive review, Cleaner Materials, Volume 3, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100056>.

Al-Khazraji H., 2017, « Étude du couplage fissuration/perméabilité dans l'essai de fendage Brésilien », Thèse de l'Université de Nantes, Directeur de thèse : Pr. A. Khelidj, Co-encadrement : M. Choinska et N. Benkemoun.

Maurel, O., Reess, T., Matallah, M., De Ferron, A., Chen, W., La Borderie, C., Pijaudier-Cabot, G., Jacques, A., Rey-Bethbeder, F., Dec. 2010. Electrohydraulic shock wave generation as a means to increase intrinsic permeability of mortar. Cement and Concrete Research 40 (12), 1631–1638.

Garcia-Bengochea I., A.G. Altschaeffl, C.W. Lovell, Pore distribution and permeability of silty clays, J. Geotech. Eng. Div. 105 (1979) 839–856.

Khaddour F., D. Grégoire, G. Pijaudier-Cabot, A hierarchical model for the computation of permeation properties of porous materials and their enhancement due to microcracks, J. Eng. Mech. 144 (2018) 04017160, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001392](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001392)

Compétences requises

Connaissances des matériaux, Gout pour l'expérimentation, Capacité d'adaptation et de travail en équipe, Autonomie, Sens de l'organisation.

Commentaires Supplémentaires

Financement prévu : Contrat Doctoral Établissement (bourse "CDE", demande en cours)

Documents à joindre à votre candidature :

Lettre de motivation

CV

Diplômes et relevés de notes

Lettre(s) de recommandation