

Modélisation numérique du comportement des matériaux cimentaires depuis le jeune-âge jusqu'à l'état durci : application au contrôle de l'impression 3D du béton

Siavash Ghabezloo, Patrick Dangla, Jean-François Caron^{*}, Matthieu Vandamme

Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech

**jean-francois.caron@enpc.fr*

Mots clés : Béton, Impression 3D, Construction robotisée, Elasto-plasticité, Loi de comportement, Modélisation, Identification expérimentale

Contexte et objectifs :

L'impression 3D béton et la construction robotisée sont actuellement en plein développement avec une perspective de transformation de notre manière de construire dans un avenir proche. Le laboratoire Navier en s'appuyant sur la plateforme technologique Build'In de l'Ecole des Ponts, a démarré de nombreuses recherches sur cette thématique, concernant les matériaux d'impression, les stratégies constructives adaptées et le process en lui-même. L'optimisation de ce procédé de construction en temps réel, ainsi que l'analyse de la sureté et les performances des structures fabriquées à l'aide de cette technique reste un enjeu majeur et un sujet très actuel de recherche. Ceci nécessite une boucle numérique efficace, fiable, et prédictive, intégrant simulation numérique et métrologie afin de permettre la maîtrise du comportement du matériau lors de son pompage, de son extrusion et sa mise en forme en couches successives, soumis alors aux contraintes de gravité et aux conditions environnementales.. Le présent travail s'intéresse à cette dernière étape, à savoir l'évolution du comportement du matériau à partir du moment où le matériau accéléré par des additifs au niveau de la buse d'impression est déposé jusqu'à son durcissement complet au sein de la structure imprimée. Ceci nécessite une prise en compte de différents phénomènes physico-chimiques tels que le durcissement progressif du matériau dû à l'avancement des réactions et son effet sur les propriétés mécaniques du matériau, séchage progressif dû à la consommation d'eau et aux conditions environnementales et les déformations qui en résultent, i.e. retrait endogène et retrait de séchage, déformations du matériau soumis aux contraintes externes

Depuis une dizaine d'année, le laboratoire Navier travaille sur le développement d'une loi de comportement pour les matériaux cimentaires depuis le jeune-âge jusqu'à l'état durci, avec la prise en compte des réactions chimiques de l'hydratation et le durcissement progressif du matériau, des déformations élasto-plastiques et visco-élastiques et les couplages entre phénomènes mécaniques, hydriques, thermiques et chimiques. Ce travail est réalisé en associant différentes approches : une étude expérimentale avancée en laboratoire sur les matériaux cimentaires au jeune-âge et à l'état durci, une caractérisation des propriétés physiques et chimiques de la microstructure, des méthodes d'homogénéisation multi-échelle et des simulations numériques. Pour que la prédiction des performances des structures en matériaux cimentaires puisse être appliquée, cette loi de comportement doit être implémentée dans un outil de modélisation numérique. En effet depuis de nombreux années le code de calcul aux éléments finis Bil est développé au Laboratoire Navier comme une licence gratuite et en accès libre. Il s'agit d'un outil numérique puissant adapté aux problèmes traitant les couplages thermo-hydro-chemo-mécaniques. L'implémentation de la loi de

comportement développé pour les matériaux cimentaires dans Bil permettra de créer un outil de modélisation très puissant qui pourra être appliqué aux différents problèmes de structures et notamment l'impression 3D du béton.

En parallèle, le laboratoire Navier et Build'In ont donc développé un environnement complet permettant l'impression de différentes formulations, et le contrôle des objets imprimés. Une caractérisation du seuil de cisaillement à l'instant de la dépose par une mesure instrumentée de la masse des gouttes de matériau (slug test) ou par une mesure du chargement exercé sur le boudin précédent, permet une bonne connaissance du matériau à t_0 . Un programme commun avec l'ESIEE dans le cadre du projet DiXite de l'I-site Future, s'intéresse également à la surveillance par imagerie et réseau de neurones de la qualité de l'objet imprimé, afin de relier certains indicateurs, épaisseur des couches, tassement, imperfections, aux propriétés de matériau, raideur, seuil plastique, et aux consignes du process, débit, vitesse de parcours, taux d'additifs par exemple. En parallèle, un suivi classique par imagerie des déformations du béton lors de l'impression, soumis aux sollicitations des couches successives et aux conditions environnementales sera réalisé. Les profils de déplacement obtenus seront utilisés ensuite dans une procédure d'analyse inverse afin de compléter l'identification des paramètres du modèle et vérifier ses capacités de prédiction de la réponse du matériau. Enfin un contrôle de la géométrie globale est également possible afin de la comparer à la géométrie programmée et d'identifier ainsi le comportement du matériau.

La calibration de la loi de comportement pour le matériau utilisé lors de l'impression 3D sera réalisée par une combinaison de deux approches complémentaires : celles décrites plus haut, à l'échelle de l'impression, mais également à celle de l'éprouvette. Les essais de chargement mécanique de type triaxiaux ou oedométriques peuvent également être réalisés afin d'explorer le comportement mécanique du matériau et évaluer ses paramètres. Ces essais peuvent être réalisés sur le matériau durci ou en cours d'hydratation. La cinétique de durcissement initial et d'hydratation peut être explorée en réalisant des essais calorimétriques. L'ensemble de ces résultats expérimentaux seront utilisés dans un modèle d'homogénéisation multi-échelle afin d'évaluer les variations des propriétés mécaniques au cours du durcissement, ainsi qu'avec les variations de la formulation du béton.

Verrous scientifiques :

Implémenter une loi de comportement relativement complexe dans un code de calcul existant, valider le développement numérique et réaliser les calculs numériques à l'échelle de structure. La réaction d'hydratation du ciment implique des couplages forts entre les phénomènes chimiques (consommation de l'eau et la production de nouvelle phase solide), hydriques (variations de la pression interstitielle) et mécaniques (déformations du matériau et variations de la contrainte). La partie élasto-plastique comprend une surface de charge qui s'écroute avec le degré d'avancement de la réaction d'hydratation, ainsi qu'avec les déformations plastiques. Les propriétés élastiques et visco-élastiques évoluent avec l'hydratation et sont évaluées à l'aide d'une modélisation multi-échelle. L'ensemble de ces mécanismes rendent la tâche de l'implémentation numérique un défi qui doit être relevé dans cette étude.

-Mettre en place une stratégie de mesure afin de permettre, l'identification des paramètres matériaux nécessaires à la simulation, et la boucle d'asservissement du process d'impression.

Plusieurs échelles de temps et d'espace doivent être prises en compte, essais in situ et en laboratoire, phénomènes de durcissement rapides et hydratation plus conventionnelle, tout en garantissant la cohérence d'ensemble des mesures et identifications.

Caractère innovant

Actuellement, il existe peu d'outil numérique permettant la simulation numérique des matériaux cimentaires pendant leur durée de vie. Le développement de cet outil permettra de réaliser les simulations numériques uniques dans leur genre. L'outil numérique permettra de prédire les contraintes induites par l'hétérogénéité du degré d'hydratation aux interfaces entre les couches de béton. Il n'existe pas à notre connaissance de boucle de contrôle d'impression aussi ambitieuse, et devant regrouper une expertise aussi large que celle proposée ici, matériau, métrologie et process.

Programme

-

- Prise en main des outils numériques développés dans Navier
- Prise en main des outils expérimentaux disponibles permettant la mesure des caractéristiques du béton à ces différents âges
- Développement de la loi de comportement et implémentation dans BIL.
- Campagne d'essais sur une formulation modèle, in-situ et sur éprouvettes.
- Validation de la simulation d'une impression instrumentée.
- Proposition d'une stratégie de contrôle du process

Résultats attendus et valorisation

Le résultat final sera un outil de contrôle intégrant la simulation numérique des structures en matériaux cimentaires dans leur environnement. Les résultats de cette étude seront publiés dans les revues internationales de haut niveau (e.g. Cement and Concrete Research, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics) et présentés dans les conférences internationales (Biot conference in poromechanics, Concreep, ...).

Discipline de la thèse : Génie civil

L'équipe d'encadrement

La thèse sera dirigée par Siavash Ghabezloo (Chargé de recherche, HDR) et co-encadrée par Patrick Dangla (Ingénieur divisionnaire des travaux publics de l'état, HDR), Jean-François Caron (Directeur de recherche) et Matthieu Vandamme (Ingénieur en chef des Ponts, Eaux et Forêts).

Profil du candidat

Formation : Diplôme d'ingénieur ou Master en Génie civil, Mécanique, Matériaux
Connaissances spécifiques : Bon niveau de programmation informatique, mécanique des matériaux, lois de comportement, matériaux cimentaires