

Sujet de thèse Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Navier



Plateforme Build'In de l'ENPC

Expérimentations échelle:1 et simulations du concept d'impression 3D fibre longue Flow-Based Pultrusion.

Contexte et problématique scientifique:

Après avoir radicalement transformé les univers de la conception et de la fabrication dans des secteurs comme l'automobile et l'aéronautique, le numérique et la 3D entrent en force dans le secteur de la construction. De prestigieuses universités étrangères (TPFL, ETZH, Princeton, MIT...), des écoles d'architectures et/ou des instituts de technologie défrichent, proposent des « objets concepts », expérimentent, communiquent, et questionnent ces nouvelles technologies pour l'avenir de l'industrie du bâtiment, impacts économiques, sociaux et environnementaux. Le laboratoire Navier, s'est déjà largement investis sur cette problématique innovante, et une plateforme technologique Build'In soutenue par un projet Sesame Ile de France est en place. Cette plateforme, équipée de 3 robots de grandes dimensions est dédiée aux questions du numérique dans la construction et dans le génie civil, notamment aux problématiques des matériaux, des structures et des procédés constructifs, en lien avec l'architecture et plus largement avec la construction durable. Le laboratoire Navier développe des recherches sur ces aspects dont 3 thèses sur l'impression 3D béton, aspects Structure-matériau-innovation. Le sujet de recherche proposé ici se concentre sur l'impression 3D de béton à fibres longues. On rappelle l'intérêt d'une telle recherche, les bétons fibrés existent certes, mais pas (si on excepte le mariage avec des tissus, travaux de l'université d'Aachen par exemple) les composites bétons-fibres longues, homologues minéraux des FRP ou Fibre Reinforced Plastics. On qualifiera ici de bétons anisotropes de tels matériaux pour les différencier des bétons fibrés traditionnels, pouvant être considérés comme isotropes car obtenus par malaxage. L'impression 3D et les robots changent aujourd'hui radicalement la donne, et on se propose de produire des bétons avec un taux de fibre bien plus important que dans les bétons fibrés actuels, qui n'intègrent que 3 ou 4% (maximum 10%) de fibres, assurant surtout le comportement ultime et une ductilité en traction. L'objectif est ici d'obtenir des bétons structurels dont la résistance et la raideur sont fortement impactées par le fibrage.

La thèse de Nicolas Ducoulombier soutenue cette année (2020) et de celle de Léo Demont qui termine en oct 2022 ont permis de bien commencer à défricher cette piste. La première thèse a conduit aux premières expérimentations sur la cellule robotique Build'In du laboratoire, au dépôt d'un brevet procédé, et a proposé de nouveaux outils pour la mesure des propriétés rhéologiques du mortier frais (slug test [1]), et des recommandations pour permettre une bonne imprégnation des fibres [2]. Au niveau

du matériau durci « béton anisotrope », des expérimentations et une modélisation micromécanique a permis de mieux définir les propriétés mécaniques interfaciales fibres-matrice [3] des matériaux obtenus. La thèse de Léo Demont a pris le relais et a permis de développer la technologie. Aujourd'hui, un satellite de 10 bobines en couronne autour de la tête d'impression prototype permet déjà un renforcement et un fibrage de boudin sans motorisation extérieure, car c'est le flot du mortier frais qui entraîne les fibres (Flow-Based Pultrusion [2]). Le travail se poursuit sur la maîtrise des paramètres de process en lien avec la physique des phénomènes [4] et sur la caractérisation mécanique du boudin et d'éléments de structures ainsi obtenus, performances, modes de dégradations, étude des joints froids, fissurations etc...

Mettre au point et optimiser le process nécessite maintenant une collaboration industrielle et elle est effective ici avec XtreeE qui vient de recruter N. Ducoulombier et qui maîtrise la technologie utilisée par Navier. Leur nouvelle tête d'extrusion vient d'être acquise par l'ENPC. Dans ce contexte, il reste encore de nombreuses recherches à effectuer concernant ce procédé, et c'est l'objet de cette nouvelle proposition de thèse. Un modèle mécanique de l'entraînement des fibres au niveau de la tête est à développer et à valider. Des expérimentations sur la micromécanique de fibres en traction dans du mortier frais doivent ainsi être mises en place et instrumentées. De même on a pu constater le grand intérêt de fibrer le mortier frais pour faciliter sa manipulation lors de l'impression et permettre le dépôt dans des situations bien plus complexes que ce qu'il se fait aujourd'hui, c'est-à-dire sur des pentes, des portes à faux etc... Une modélisation devra également aider à la compréhension de ce comportement et en permettre la simulation. Des outils tels que StarCCM+ pourront être utilisés. L'échelle de la structure doit finalement être abordée, avec son lot de nouvelles problématiques, retrait, fissuration, fluage empêché. De nombreuses expérimentations d'impression et de tests de chargement échelle :1 seront réalisés, notamment dans le cadre du projet de passerelle précontrainte de Freyssinet à laquelle l'Ecole est associée.

Encadrement: Jean-François Caron, Romain Mesnil

Contact : jean-françois.Caron@enpc.fr

[1] N. Nicolas Ducoulombier et al. "The Slug test": Rheology and homogeneity assessment for Robotic Extrusion of Yield Stress Fluid", in Digital Concrete 2020

[2] N. Ducoulombier, L. Demont, C. Chateau, M. Bornert, J. Caron, Additivemanufacturing of anisotropic concrete – a flow-based pultrusion of continuous fibers in a cementitious matrix., Procedia Manufacturing 47 (2020)1070–1077, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.117>

[3] N. Ducoulombier, C. Chateau, M. Bornert, J.-F. Caron, P. Aimedieu, 620T. Weitkamp, J. Perrin, A. King, M. Scheel, X-ray tomographic observations of microcracking patterns in fibre-reinforced mortar during tensionstiffening tests, Strain (2020) e12347doi:10.1111/str.12347

[4] L. Demont, N. Ducoulombier, R. Mesnil, J.-F. Caron, Flow-Based Pultrusion of continuous fibers reinforcement-based composite material and additivemanufacturing: rheological and technological requirements, à paraître dans Composite Structures