

# Conception, optimisation mécanique et fabrication numérique de poutres en béton armé

## Thèse Cifre Vinci-ISC/Ecole des Ponts ParisTech

### Contexte :

La construction en béton armé est parfois comparée à de l'artisanat au sens où de nombreuses tâches restent essentiellement manuelles. Les activités de chantier, lourdes et chronophages ont un impact direct sur la conception des éléments, le surdimensionnement et le risque d'erreur de fabrication. Il est clair que le béton armé restera cependant d'usage dans les années à venir. Minimiser l'impact environnemental des structures construites avec ce matériau, revient à minimiser les quantités, à optimiser son usage mais certainement aussi à avoir une vision plus ambitieuse, prendre en compte la réversibilité de nos actions, par exemple la démontabilité et la réutilisation possible.

Plusieurs travaux vont dans ce sens dans le laboratoire Navier et en relation avec la plateforme de construction digitale Build'In de l'Ecole des Ponts cofinancée par la région Ile de France. Car de tels enjeux sont liés au développement du numérique dans la construction. On peut citer par exemple la thèse de Ingrid Bertin « Construire, déconstruire, anticiper le réemploi des matériaux : une possible réversibilité des bâtiments » en collaboration avec SETEC TPI, les thèses en cours de Tristan Gobin (HAL Robotics), de Pierre Gilibert (DiXite) et Julien Glath (I-Site Future) sur les assemblages complexes et Robot Oriented Designed pour une construction démontable, ou encore celle de Vianney Loing sur la manipulation robotisée d'objets via apprentissage supervisé.

La thèse de Sébastien Maitenaz, quant à elle, en collaboration avec ISC-Vinci, développe une méthode d'optimisation pour éléments en béton armé conforme à l'Eurocode 2 ainsi qu'une méthode de fabrication numérique donc automatisable, associée. Cette méthode est basée sur l'impression 3D de coffrages recyclables. La méthode de calcul consiste en une optimisation de poutres à sections rectangulaires vis-à-vis de l'effort tranchant. Un workflow numérique allant du calcul des éléments à la génération des parcours robots pour l'impression des coffrages a été réalisé et les premiers essais en cours. 8 prototypes ont été fabriqués dans le but de réaliser une campagne d'essai en flexion quatre points qui permettra de comparer entre autres les charges à rupture ainsi que la raideur de ces poutres optimisées avec des poutres pleines équivalentes. Enfin, les premiers résultats de l'analyse de cycle de vie menée, comparant le procédé développé avec une méthode de préfabrication foraine de poutres pleines, montrent une réduction potentielle de l'impact carbone pouvant aller jusqu'à 30%. Ce premier travail, mêlant conception et calcul d'éléments en béton armé, fabrication digitale, essais expérimentaux et analyse de cycle de vie, montre qu'il est possible de minimiser l'impact carbone des structures en béton armé grâce à une utilisation raisonnée des technologies de l'industrie 4.0.

### Objectifs de la thèse

Le travail de thèse s'inscrit dans la suite de ce premier travail, en y associant d'autres réflexions et résultats qui ont été développés au laboratoire. En particulier il s'agit de :

- Continuer à réfléchir avec cette vision digitale à ce que pourrait être la préfabrication paramétrique dans la construction en béton armé. De nouvelles techniques, la robotique et des développements logiciels doivent être en mesure de proposer de vrais progrès, pour le renforcement et les ferraillements, assemblages, manipulation, mass-customisation, traçage et contrôle qualité, ayant un impact fort sur la performance, le bilan environnemental et même sur l'organisation du travail. Ce premier brainstorming (6mois) dégagera les priorités qui seront développées durant la thèse. On pourrait s'intéresser par exemple en particulier au développement d'un ferraillement repensé et assisté robotiquement pour sa mise en forme et son positionnement. Un brevet ENPC/VINCI a été déposé dans ce sens cette année. Ou encore d'un

concept d'assemblage poteau-poutre simple technologiquement mais lié aux développements théoriques de Navier, efficace mécaniquement et avec une mise en œuvre compatible avec le chantier. De nouveaux matériaux tels que les géopolymères pourraient également être testés s'ils s'imposent pour cette digitalisation massive. Un équipement spécifique est en cours d'acquisition par l'Ecole.

- En parallèle il s'agit également de poursuivre les développements concernant les méthodes d'optimisation mécanique originales (thèse de Leila Rostom) car basées sur le comportement à l'état ultime et pas à l'état de service. La plupart des optimisations dite topologiques optimisent la raideur qui n'est pas le paramètre le plus important pour le GC. Ici, grâce à des approches utilisant Analyse limite et Calcul à la rupture, c'est bien via la modélisation des mécanismes de ruine et la capacité portante, que l'on souhaite optimiser. La prise en compte de deux matériaux, acier/béton, et du comportement différent en traction et compression du béton, rend de plus les problèmes non-linéaires.

Le livrable principal de la thèse devrait être un démonstrateur du concept qui aura été étudié, et un cahier des charges d'une potentielle industrialisation.

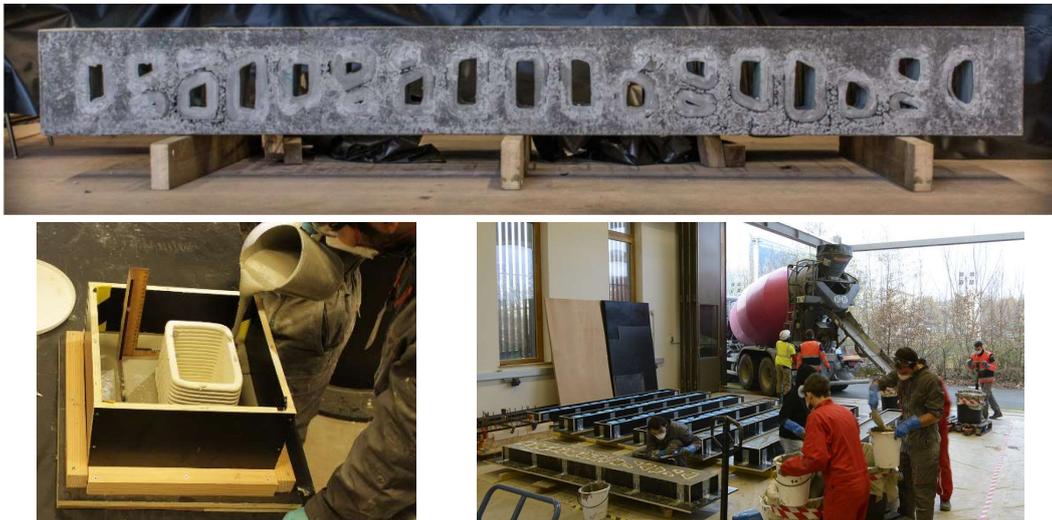


Figure 1 – (a) Prototype de poutre optimisée réalisée à partir d'impression de coffrages en béton. (b) Test de résistance à la pression du béton d'un coffrage imprimé en argile. (c) Fabrication de sept prototypes d'essais mécanique et d'un prototype démonstratif (thèse S.Maitenaz-2018-2021).

### **Encadrement :**

J-F Caron et R.Mesnil, Ecole des Ponts ParisTech, Navier, Build'In

N.Metge, ISC-Vinci