

I.1. Contexte du livre

La possibilité de générer un objet tridimensionnel depuis une simple image relève du rêve et de la science-fiction. Pourtant, depuis le milieu des années 1980 et les premiers brevets sur la fabrication additive et l'impression 3D, cette possibilité est devenue une réalité. Initialement réservée aux polymères, la fabrication additive s'ouvre aujourd'hui à toujours plus de matériaux [JEA 84, HUL 86]. Dans les années 2000, le développement du *Fuse Deposition Modeling*, ou prototypage rapide par dépôt de fil polymère, a permis une démocratisation rapide du procédé et a laissé entrevoir au grand public les larges possibilités de l'impression 3D en termes de développement économique et industriel. De plus, cette technologie est en parfaite adéquation avec les problématiques environnementales sociétales actuelles dans la mesure où elle permet d'une part une économie de matière pour la fabrication de pièces de géométrie complexe, et d'autre part d'envisager la fabrication « à la demande » de pièces de rechange.

C'est donc naturellement que la possibilité de transférer ces technologies à la construction, et donc au béton, a été étudiée initialement par Pegna en 1997 [PEG 97] puis par le Pr B. Khoshevnis de l'université de Californie du Sud dans la première moitié des années 2000 [KHO 04]. Parallèlement, la conception assistée par ordinateur des constructions a connu de grosses avancées, avec la mise en place de premières maquettes numériques (BIM : *Building Informative Modeling*) [HEG 01].

Ainsi, aujourd'hui, les méthodes de construction traditionnelles peuvent se trouver bouleversées par la 3^e révolution industrielle et l'introduction du numérique et du digital. Dans ce cadre, la conception et le suivi de réalisations ont déjà été impactés par l'utilisation du BIM : la réalisation de maquettes numériques complètes de bâtiments a permis d'aller plus loin dans l'anticipation de la réalisation d'un projet et permet d'aller vers une optimisation des méthodes de réalisation et vers une qualité de construction optimale (*lean building*).

Cependant, l'utilisation du digital pour les méthodes de réalisation en est encore à ses balbutiements (prototypes, faisabilité et fiabilisation en laboratoire). Pourtant, l'opportunité de profiter de la numérisation complète des projets de construction dès leur conception permet d'envisager l'automatisation des méthodes de construction et permet de se rapprocher encore plus des objectifs du *lean building*.

Ainsi, la transposition au béton des méthodes de fabrication additive initialement développées pour les matières plastiques fait aujourd'hui l'objet de nombreuses études académiques et d'initiatives privées à travers le monde. Ainsi, le nombre d'initiatives et de projets liés à l'impression 3D du béton connaît une évolution exponentielle depuis 2015. À titre d'illustration, la figure I.1 montre l'évolution du nombre des publications sur la thématique de la fabrication additive béton dans les dix revues scientifiques les plus impactantes référencées en génie civil (source : Google scholar, au 1^{er} juillet 2018). La fin des années 2000 et le début des années 2010 ont vu la publication de travaux pionniers du Pr Khoshnevis de l'université de Californie du Sud et de l'équipe du Pr Buswell de l'université de Loughborough en Angleterre [KHO 04, KHO 06, BUS 07, LE 12, LEA 12]. Depuis 2016, on assiste à une explosion du nombre des publications qui montrent le caractère actuel de cette thématique de recherche et le besoin en connaissances liées à la thématique de l'impression 3D béton des constructions. Ainsi, pour 4 publications en 2016, il y en a eu 16 en 2017 et 33 pour les six premiers mois de l'année 2018.

Ces études sont motivées par :

- l'avantage économique offert par l'impression 3D, qui permettrait de s'affranchir de l'utilisation de coffrages, qui peuvent représenter jusqu'à 50 % du coût d'un béton coffré ;

- une liberté de forme inédite donnée aux architectes ;

- une réduction des impacts environnementaux – possibilité de mettre la matière seulement là où il y en a besoin (concept d’optimisation topologique) ;
- des améliorations des conditions de travail – suppression de tâches de manutentions lourdes et de vibration du béton.

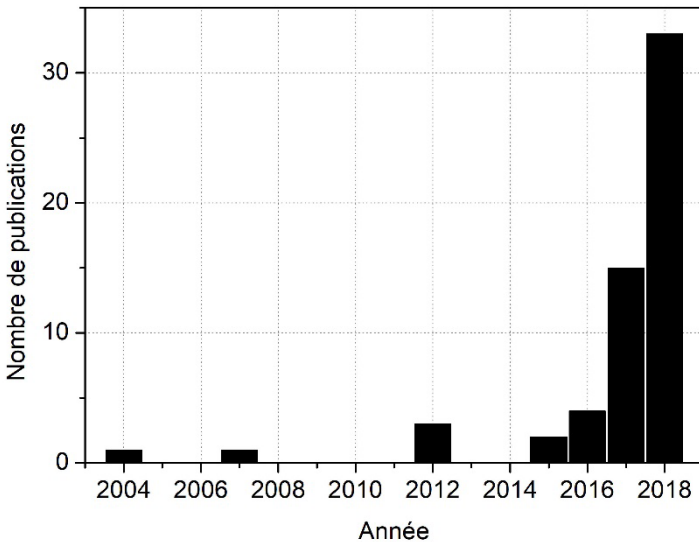


Figure I.1. Nombre de publications dans les 10 journaux scientifiques de thématique génie civil les plus impactants au cours des 15 dernières années (Source : Google scholar au 1^{er} juillet 2018)

Ces premiers travaux ont permis de valider la faisabilité technique du procédé d’impression 3D du béton et des démonstrateurs de taille réduite ont pu être réalisés à travers le monde (maisons individuelles, passerelles). Le marché du béton imprimé représente aujourd’hui près de 30 millions d’euros et progresse actuellement de 15 % par an. L’évolution exponentielle du nombre de projets permet d’envisager une augmentation extrêmement rapide du chiffre d’affaires de ce marché.

Ainsi, l’application de béton imprimé en matériau structural ne semble plus une utopie et il est aujourd’hui important de poser les bases de ces nouvelles techniques de fabrication en faisant une revue exhaustive des savoirs et technologies développés dans le domaine.

I.2. Thèmes de recherche actuels et verrous scientifiques

Actuellement, les thèmes de recherche en lien avec l'impression 3D sont les suivants :

– vers une industrie de la construction 100 % numérique : la conception d'un projet de construction passe aujourd'hui par la réalisation d'une maquette numérique qui permet à la fois d'anticiper les problèmes de réalisation et d'optimiser les interactions entre les différents corps de métiers et étapes de construction. Cet outil d'anticipation permet d'améliorer la qualité des constructions et d'optimiser les méthodes de réalisation.

Aussi, ces maquettes numériques fournissent une matière première pouvant être implémentée sur des robots et des automatismes permettant une réalisation des constructions plus rapide, plus précise et plus fiable. La réalisation de structures en béton par impression 3D entre totalement dans ce cadre. Il est attendu de pouvoir assurer une interface de transfert efficace entre la maquette numérique et la trajectoire du robot déposant le béton tout en tenant compte de la configuration du chantier et de ses contraintes ;

– procédés : optimisation et maîtrise de la rhéologie du béton en vue de son impression : pour pouvoir être imprimé, le béton doit être suffisamment fluide pour être acheminé (béton pompable), mais aussi suffisamment rigide pour tenir sous son poids propre une fois extrudé sans se déformer. De même, il va devoir « rapidement » supporter le poids des couches placées au-dessus de lui. La compétition entre la vitesse de structuration mécanique et celle de l'élévation de la structure imprimée est donc un paramètre critique à contrôler afin d'assurer le bon déroulement du procédé. Il faut ainsi maîtriser à la fois le comportement du béton à l'état frais et son évolution temporelle. Il convient aussi de bien maîtriser l'adjuvantation permettant une prise « à la demande » du matériau (de nombreux procédés présentent un ajout d'accélérateur au niveau de la buse de l'imprimante). Des travaux sur le comportement mécanique du béton au très jeune âge sont nécessaires pour décrire le comportement du matériau jusqu'à la fin de prise et permettre ainsi de faire la transition avec le comportement rhéologique initial. Il est aussi important de travailler sur des moyens expérimentaux permettant de décrire de manière simple et fiable l'évolution du comportement rhéologique (seuil de cisaillement) du béton au cours du temps afin de pouvoir contrôler et suivre le procédé en ligne.

Il convient aussi de noter que d'autres procédés innovants de type projection sur un support, injection dans des lits de granulats ou au travers de maillages ou structures poreuses, coffrage glissant « intelligent », sont autant d'autres technologies philosophiquement proches qu'il conviendra d'étudier ;

– conception structurelle des structures imprimées :

- qualifier et renforcer un matériau anisotrope : le béton imprimé déposé en couches peut présenter un comportement anisotrope, induit par sa structure stratifiée, qu'il conviendra de qualifier. L'interface entre couches reste, en fonction des procédés, une zone sensible pouvant représenter les points mécaniquement faibles de la structure. Il sera donc nécessaire de mettre en place une méthodologie d'études permettant de caractériser le comportement complexe et anisotrope de ce type de matériaux.

Aussi, le béton imprimé, comme le béton coulé, présente une faiblesse en traction qu'il faudra compenser par l'ajout de renforts métalliques, à l'image des armatures utilisées traditionnellement pour le béton coulé.

Plusieurs pistes sont actuellement testées : ajout de fibres au sein des couches, coulage de barres d'acier dans des espaces réservées, ajout d'un fil métallique inséré dans le béton déposé. L'efficacité de ces méthodes de renfort reste à évaluer et des stratégies de dimensionnement sont à développer en conséquence ;

- optimisation topologique : ces technologies de fabrication additive permettent d'envisager une nouvelle liberté dans la conception structurelle s'inspirant de la nature (biomimétisme) qui optimise la gestion des ressources en utilisant la matière seulement là où elle est mécaniquement nécessaire. S'ensuit la possibilité de fabriquer des structures allégées et mécaniquement optimisées qui sortent des codes de dimensionnement des structures béton traditionnelles. Il convient ainsi de fournir un cadre normatif de dimensionnement de structures en béton imprimé ;

– durabilité et bénéfices environnementaux : il sera dans un premier temps important d'évaluer l'impact sur la durabilité du béton imprimé de la stratification induite par la mise en œuvre par impression. Ensuite, le recours à l'impression 3D permet d'envisager une économie de matière (et de transports de matériaux) par l'utilisation de l'optimisation topologique. En revanche, les propriétés rhéologiques requises pour le procédé nécessitent l'emploi d'une adjuvantation importante. Une analyse comparative des impacts environnementaux des deux modes de mise en œuvre devra permettre de mesurer les

bénéfices environnementaux induits par l'emploi de l'impression 3D qui permet d'imprimer une structure aux volumes optimisés par rapport à une structure coulée.

I.3. Plan de l'ouvrage

Afin d'aider les lecteurs à se faire une idée de l'état de l'art en ce qui concerne la fabrication digitale béton et de se positionner vis-à-vis des problématiques actuelles, listées ci-avant, nous proposons d'organiser l'ouvrage d'après le plan suivant : après cette introduction, seront présentées d'abord l'ensemble des solutions techniques actuelles, suivi des grandes familles d'imprimantes béton et des machines les plus représentatives pour chacune des catégories, puis un principe de classification des systèmes d'impression issu de la littérature.

Ensuite, les aspects procédés liés aux matériaux seront présentés en abordant dans un premier temps ceux liés à la technique d'impression par extrusion/dépôts successifs de couches de matériaux. Cette technique s'inspire directement de la technique fusion/dépôt utilisée par les imprimantes 3D polymères qui se démocratisent aujourd'hui. Dans un second temps, les contraintes liées au matériau lors du procédé d'impression 3D par voie sèche, c'est-à-dire par injection dans un lit de particules, seront abordées.

Le comportement mécanique des mortiers et bétons imprimés sera ensuite traité, en mettant l'accent sur les particularités de ces matériaux en comparaison avec des bétons moulés classiques.

Pour conclure, les impacts potentiels des méthodes de fabrication digitale du béton sur la conception des structures, sur l'économie de la construction et sur l'impact environnemental du secteur seront abordés. Dans ce chapitre, les systèmes de renforts à mettre en place pour assurer des caractéristiques mécaniques équivalentes seront décrits afin de présenter les stratégies de conception et de dimensionnement de structures béton imprimées.

Cette construction d'ouvrage scientifique permettra de faire un état des lieux des techniques de la fabrication additive appliquées aux matériaux à base cimentaire en appréhendant à la fois les aspects scientifiques et technologiques.

I.4. Bibliographie

- [AND 84] ANDRE J.-C., LE MEHAUTE A., DE WITTE O., “Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle”, *FR Patent* 2,567,668, 1984.
- [BUS 07] BUSWELL R.A., SOAR R.C., GIBB A.G. *et al.*, “Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction”, *Automation in Construction*, vol. 16, no. 2, pp. 224–231, 2007.
- [HEG 01] HEGAZY T., ZANELDIN E., GRIERSON D., “Improving design coordination for building projects. I: Information model”, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 127, no. 4, pp. 322–329, 2001.
- [HUL 86] HULL C.W., “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography”, *Google Patents*, 1986.
- [KHO 04] KHOSHNEVIS B., “Automated construction by contour crafting–related robotics and information technologies”, *Best ISARC 2002*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, January 2004.
- [KHO 06] KHOSHNEVIS B., HWANG D., YAO K.-T. *et al.*, “Mega-scale fabrication by contour crafting”, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 301–320, 2006.
- [LE 12] LE T.T., AUSTIN S.A., LIM S. *et al.*, “Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete”, *Materials and Structures*, vol. 45, no. 8, pp. 1221–1232, 2012.
- [LEA 12] LEACH N., CARLSON A., KHOSHNEVIS B. *et al.*, “Robotic construction by contour crafting: The case of lunar construction”, *International Journal of Architectural Computing*, vol. 10, no. 3, pp. 423–438, 2012.
- [PEG 97] PEGNA J., “Exploratory investigation of solid freeform construction”, *Automation in Construction*, vol. 5, no. 5, pp. 427–437, 1997.