

La robotique au service de la construction par impression 3D

Benoit FURET, Sébastien GARNIER, Elodie PAQUET, Kévin SUBRIN

Laboratoire IRCCyN, Université de Nantes, AIP Priméca Pays de la Loire

2 Avenue du professeur Jean-Rouxel

44475 Carquefou Cedex

Mail :

Benoit.Furet@univ-nantes.fr, Sebastien.Garnier@univ-nantes.fr, Elodie.Paquet@univ-nantes.fr, Kevin.Subrin@univ-nantes.fr

Résumé :

A l'heure actuelle, la plupart des opérations liées à la construction des bâtiments sont encore peu mécanisées et requièrent la mise en œuvre manuelle de matériaux par les opérateurs travaillant dans des conditions difficiles. Pour gagner en compétitivité, le bâtiment doit entrer dans l'ère du numérique pour développer une offre de logements de meilleure qualité et à moindre coût.

Les deux laboratoires IRCCyN et GeM de l'Université de Nantes et la SATT Ouest Valorisation ont breveté un ensemble constitué d'un système et d'un procédé de réalisation de murs ou d'éléments structurants de construction par fabrication additive automatisée et robotisée à triples parois isolantes et structurantes.

Cette nouvelle solution se présente comme un nouveau procédé de fabrication de murs et d'habitations dans le domaine de la construction par procédé de fabrication additive robotisée.

En effet, ce procédé d'impression 3D permettra de révolutionner le secteur de la construction en diminuant très significativement la pénibilité du travail, les coûts et le temps de réalisation tout en fabricant directement sur site des structures sur mesure et adaptées aux besoins individuels.

Ce nouveau procédé constructif innovant est mise en œuvre à travers le projet « Batiprint 3D » qui vise, par une approche rationnelle et transdisciplinaire, à développer un démonstrateur technologique pour la fabrication additive robotisée d'un habitat social à échelle une pour septembre 2017. Ce projet vise également à favoriser l'émergence de nouvelles problématiques de recherche, tant en ingénierie des matériaux, qu'en robotique mais également pour le domaine architecturale où les formes architecturales les plus complexes sont, via cette technique, accessibles à des coûts très raisonnables.

Mots-clés—Fabrication additive, Procédé de construction innovant, Construction automatisée, Impression 3D, Procédé robotisé

I. INTRODUCTION

Actuellement, les acteurs de la construction de bâtiments commencent à envisager sérieusement l'utilisation de l'impression 3D pour la construction des bâtiments. Malgré les réticences d'ordres techniques (accroissement des compétences techniques, réinvention des démarches de construction, phasage des travaux...) et sociales (diminution du nombre d'ouvriers, remplacement de l'humain par la machine...) de nombreuses solutions techniques se développent à vitesse croissante et de plus en plus d'acteurs de la construction (architectes, constructeurs, maîtres d'ouvrage...) s'y intéressent. De plus, le secteur de la construction utilise depuis toujours la fabrication additive (parpaing, brique, béton, pierre, bauge...) et l'impression 3D des bâtiments ne représente donc qu'une évolution ou une modernisation de techniques traditionnelles éprouvées.

D'un point de vue des besoins et d'un point de vue économique, nous assistons à des coûts de construction qui augmentent (nouvelles normes de construction...) avec des risques professionnels importants. Selon l'INRS [1], en 2013, le BTP occupe 8.5% des salariés et recense 16.3% des accidents avec arrêt et 26.8% des décès accidentels. L'activité, par ses pratiques locales est à moderniser et il existe des besoins énormes et urgents dans de nombreux pays qui lancent des programmes de construction massive.

II. EVOLUTION DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION AU COURS DU TEMPS

A. Evolution des technologies

La Conception Assistée par Ordinateur comme la robotique montrent l'évolution des mutations technologiques. En effet, les Sciences du numérique ont permis via des phases de modélisation, de caractérisation puis de simulation, ont permis de faciliter la transition entre l'idée et la réalisation. Des sauts technologiques ont permis de faciliter cette transition. En effet, le PLM a permis d'intégrer au mieux le cycle de vie des

systèmes via la mise en œuvre de version. La chaîne numérique arrive à grand pas via le BIM (Building Information Management) [2].

B. Projet de fabrication additive bâtiment dans le monde

On assiste aujourd’hui à l’émergence de nombreux acteurs visant une construction du bâtiment via des procédés automatisés. Les architectures employées pour la dépose de matériau sont généralement cartésiennes (Figure 1a) (Contourcrafting [3], Win Sun [4],...), sérielles où un bras téléscopiques posé sur un rail permet la dépose de matériau (Contourcrafting [3]), (Figure 1b) ou mobile avec bras télescopique (Fastbrick Robotic Construction available at <http://fbr.com.au/>) (Figure 1c).

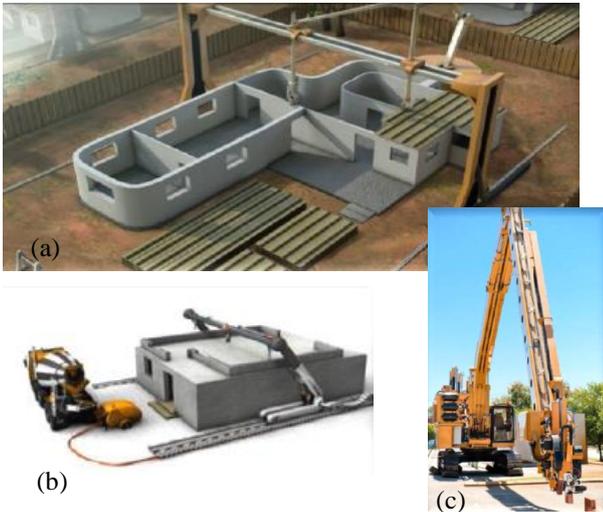


Figure 1. FABRICATION ADDITIVE DANS LE MONDE : CONTOURCRAFTING (A,B) , FASTBRICK ROBOTIC (C)

D’autres approches sont actuellement menées via des robots industriels qui à l’aide d’une tête d’impression permettant le dépôt de fil par fusion [5] ou via des procédés dérivés de la soudure comme de l’apport de métal par fusion [6]. Cette dernière approche, menée par la firme MX3D s’est fait connaître par la fabrication d’un pont à l’aide de deux robots qui se déplacent sur ceux qu’ils ont construit –Figure 2). D’autres travaux illustrent par la complexité des formes produites et par la particularité des matériaux utilisés par impression 3D comme du béton haute performance par le Loughborough University [7] ou une base de polymère par 3D print canal house (<http://3dprintcanalhouse.com/>)



Figure 2. FABRICATION D’UN PONT PAR LA FIRME MX3D



Figure 3. REVOLUTIONNER L’INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION PAR LA COMPLEXITE DES FORMES (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY) [7]

L’ensemble de ces solutions montrent le potentiel qu’offrent ces solutions en construction. En effet, le temps de construction est diminué via une meilleure gestion du procédé de fabrication. De plus, l’activité étant dévolue pour partie aux moyens automatisés ou robotisés, la pénibilité de l’activité est fortement réduite. De plus, cette activité étant digitalisée, il est possible alors d’améliorer le flux de construction des bâtiments. Cependant, l’émergence de ces nouveaux moyens met en avant des difficultés concernant la mise en œuvre de ces procédés sur chantier, sur l’investissement des moyens d’impressions avec la formation associée.

Cependant, la mise en œuvre de ces nouveaux procédés ambitionne une refonte des principes de construction où le principe, la morphologie et la cinématique du moyen robotisé employés, les procédés utilisés permettent de remettre à plat les savoir-faire de construction et l’imagination que l’on peut avoir en termes de conception architecturale. Par exemple, en 2015, la société WinSun en Chine a réussi à construire des maisons individuelles et des bâtiments grâce à une imprimante de 12m de long de type portique cartésien où chaque module est réalisé en 24h. Ces modules sont ensuite transportés et assemblés sur le chantier.

Le développement du moyen de réalisation engendre donc une logistique particulière de l’ensemble du chantier, de l’aménagement des matériaux aux finitions de la réalisation.

III. LA TECHNOLOGIE FAM (FOAM ADDITIVE MANUFACTURING)

La technologie FAM ou Foam Additive Manufacturing est un mariage entre la fabrication additive à base de mousse et l’optimisation topologique pour la réalisation en impression 3D de pièces de grandes dimensions. Dans ce cadre du développement de cette pratique de fabrication additive pour les grandes dimensions, l’Université de Nantes a mené différents développements qui se sont matérialisés par un démonstrateur appelé INNOPRINT3D. Ce dernier a permis de réaliser l’impression 3D robotisée d’un habitat d’urgence en mousse polyuréthane (1.75mx1.75mx2.5m) construit en 30min seulement. Un robot industriel vient déposer une mousse qui au contact de l’air est expansée de 30 à 45 fois son volume. Une gestion des trajectoires associée à la cinétique de dépose du cordon, et prenant en compte les caractéristiques intrinsèques de la mousse utilisée ont permis la réalisation des parois mais aussi du toit sans support (Figure 4).



Figure 4. HABITAT D'URGENCE VIA INNOPRINT 3D

A. Un nouveau principe constructif

Après l'analyse de ces premiers résultats et de la synthèse des travaux antérieurs au niveau international, nous avons développé et breveté un nouveau principe constructif. Ce nouveau principe constructif est basé sur le principe suivant : « Système et procédé de réalisation de murs ou d'éléments structurants de construction par fabrication additive automatisée à triples parois dont les deux couches intérieures et extérieures sont isolantes et servent durant la construction au moulage de la couche intérieure ». Ce principe permet ainsi d'imprimer rapidement tous les types de parois de construction à géométries planes voire complexes.

Ces travaux ont donné naissance au projet Batiprint3D, porté par l'Université de Nantes et la SATT Ouest Valorisation et accompagnés de plusieurs industriels. Il porte sur le développement de ce principe constructif par fabrication additive robotisée pour la réalisation dans un premier temps d'une maison individuelle de type « habitat social ». Puis dans un deuxième temps, nous développons une solution d'impression 3D des bâtiments de type maison individuelle en créant un moyen exploitable directement sur chantier. Pour ce faire, nous avons décomposé notre développement en trois axes de recherche : Procédé, Formulation, Caractérisation.

L'utilisation d'un moyen robotisé permet de repenser le moyen de construction et dans ce cadre, une solution originale de dépôt de matières permet la dépose coordonnée de bétons pour la solidité et de mousse expansée pour l'isolation. [Brevet 1653966].



Figure 5. DEPOSE CONJOINTE DU BETON ET DE LA MOUSSE POLYURETHANE

La problématique principale de notre projet est l'association d'un outil (robot mobile et articulé) avec un matériau (gâche) permettant la réalisation in situ de l'ossature d'un habitat individuel ou collectif. Pour ce faire, l'outil se doit d'être transportable, adapté aux contraintes environnementales extérieures du site de construction, stable afin de permettre une injection du matériau sans tolérance d'exécution importante.

A partir du maquette numérique de habitat, les trajectoires des robots (polyarticulé et mobiles) sont générés. Une fois que la dalle est utilisable, notre solution robotisée vient directement imprimer sur le chantier le gros-œuvre (structure et isolation), puis une fois l'élévation des murs terminée, le robot mobile ressort par un ouvrant.



Figure 6. LES DIFFERENTES ETAPES DE NOTRE PROCEDE INNOVANT DE CONSTRUCTION.

Notre solution robotisée se compose d'un robot industriel posé sur un AGV (Automated Guided Vehicle). L'AGV est guidé via un capteur laser qui mesure autour de lui son positionnement dans son environnement. Cette solution est très modulaire permettant au robot d'intervenir sur toute la hauteur de la maison après respect d'un dimensionnement conséquence de l'AGV et de l'espace de travail du robot. Nous positionnons cette solution comme très innovante vis-à-vis de la littérature s'il on compare les solutions présentées en terme de réalisation, mise en œuvre, investissement, modularité, accès au forme complexe (Tableau 1).

	USA : Contourcrafting	Chine : Win Sun Décoration	Italie : D Shape
Réalisation sur site	Ebauche en CAO	NON	NON
Mise en œuvre sur chantier	Difficile : Structure complexe à transporter et mettre en œuvre	Difficile : Transport de la structure	Difficile Très petite structure uniquement
Investissement	Important structure cartésienne de très grande dimension	Important Fabrication en usine	Modéré Structure cartésienne pour petite pièce
Modularité	Forte	Faible > Usine	Faible > Petite taille
Forme complexe	OUI	OUI	NON
Isolation comprise	NON	NON	NON

	France : XTREE	Slovénie : BetAbram	BATIRPINT 3D
Réalisation sur site	NON	NON	OUI
Mise en œuvre sur chantier	Difficile : Mise en œuvre uniquement en usine	Difficile : Très petite structure uniquement	Simplicité Transport AGV+ Robot
Investissement	Important Fabrication en usine	Modéré Structure cartésienne que pour petite pièce	Modéré AGV+Robot
Modularité	Faible > Usine	Faible > petite taille	Forte
Forme complexe	OUI	NON	OUI
Isolation comprise	NON	NON	OUI

Tableau 1. COMPARAISON DE LA SOLUTION BATIPRINT 3D PAR RAPPORT AUX AUTRES PROJETS : USA CONTOURCRAFTING [2], WIN SUN [4], ITALIE : D-SHAPE [8], SUEDE-UK : SKANSKA [9] ; FRANCE : XTREE [10] ; SLOVENIE : BETABRAM [11]

B. Des opportunités financières

Au-delà de l'attrait innovant du principe constructif, une étude technico-économique des solutions traditionnelles de construction et de notre processus de fabrication additive a montré des résultats encourageants sur cette nouvelle solution.

En effet, parmi les 3 principes constructifs (Méthode classique : parpaings, ossature bois et par fabrication additive) à iso finitions des parois, ce principe constructif est moins cher.

	BATIPRINT	Maison à ossature bois	Parpaing
Sans bardage	50€/m ²	100€/m ²	75€/m ²
Avec bardage	120€/m ²	180€/m ²	150€/m ²

Tableau 2. DONNEES ISSUES DE LA COMPARAISON DE L'ETUDE TECHNICO ECONOMIQUE DES 3 SOLUTIONS

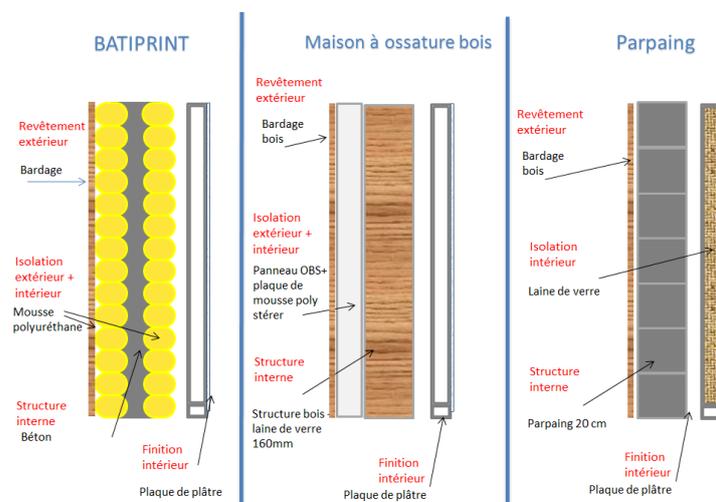


Figure 7. ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DE 3 SOLUTIONS DE CONSTRUCTION

C. Un consortium d'acteurs majeurs du bâtiment

La maturation de ce nouveau principe constructif de bâtiment passe par la réalisation d'un prototype à l'échelle 1 pour Nantes Métropole et Nantes Métropole Habitat prévu pour septembre 2017.

Ce démonstrateur à l'échelle 1 sera le premier habitat construit en France par cette technologie d'impression 3D. Autour d'acteurs majeurs du domaine de la construction et de la gestion des habitats, la solution proposée devrait permettre de construire un logement d'une surface de 95m² comprenant des murs arrondis, des coins, des portes fenêtres, fenêtres,

portes : un ensemble de formes pour valider l'ensemble des principes de construction. Des formes architecturales complexes seront réalisées par ce procédé, à des coûts optimisés.

A cela, s'ajoute-la mise au point des matériaux pour optimiser les performances de mise en œuvre ainsi que les performances mécaniques. La logistique de construction est aussi un véritable enjeu. En effet, plusieurs principes peuvent être retenus. Le robot peut être positionné par l'AGV, synchronisé avec l'AGV. La trajectoire du robot associé au temps de séchage du béton et à la caractéristique intrinsèque liée à l'expansion de la mousse isolante font partie des savoir-faire qui doivent être testés et qui devront être capitalisés. La construction réservée à ce procédé devrait selon les premières estimations être réalisées en moins de 30h d'utilisation du robot (3jours de travail).

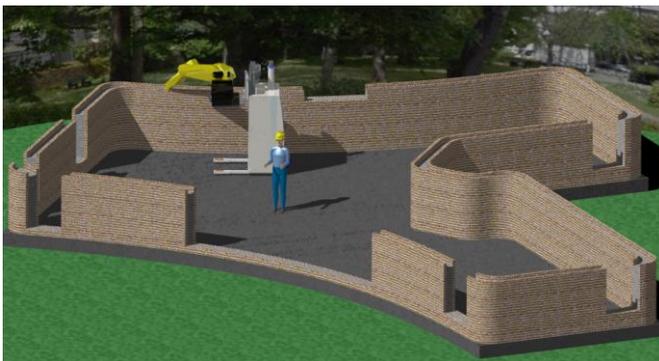


Figure 8. MAQUETTE NUMERIQUE DE LA MAISON PROTOTYPE QUI REALISE A NANTES EN SEPTEMBRE 2017.

IV. CONCLUSION

Ce nouveau principe de construction se veut très innovant dans le domaine de l'habitat.

En effet notre procédé constructif basé sur l'impression 3D du gros-œuvre directement sur le chantier, intégré à une démarche de maquette numérique, permet de bouleverser les modes constructifs et la manière de concevoir, en réduisant considérablement les temps et les coûts de constructions et en poussant encore plus loin la logique d'industrialisation des process.

Les autres impacts socio-économiques de notre procédé sont :

- Une répétabilité du procédé de construction : diminution de l'aléa de construction, moindre risque de malfaçon, standardisation de la construction, meilleure gestion des interfaces... ;
- De plus grande facilité de mise en œuvre : plus faible pénibilité, main d'œuvre réduite ;
- Une possibilité de construire des bâtiments avec des formes complexes
 - Une limitation des déchets de chantier
 - Une facilité et rapidité de déploiement

- Impression simultanée des éléments porteurs et de l'isolation

Cette révolution technique est à la fois source d'innovation, de gain en qualité et de réduction des coûts pour les habitations de demain.

Cependant, il reste encore de nombreux verrous techniques et technologiques à résoudre avant d'obtenir un procédé mature et diffusable à plus grande échelle.

V. REMERCIMENTS

A nos collègues enseignants chercheurs Nordine LEKLOU, et Philippe POULLAIN du Laboratoire GeM de l'Université de Nantes.

A Laurence GUIHENEUF et Guillaume GALLOT ingénieurs à CAPACITES SA, l'entreprise de Valorisation de l'Université de Nantes.

A Nicolas HOUSSAIS, Thomas BRESSAC et Romain PONSON, ingénieurs de recherche à la SATT Ouest Valorisation.

VI. REFERENCES

- [1] INRS - <http://www.inrs.fr/actualites/statistiques-BTP-2014.html>
- [2] SUCCAR, Bilal. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in construction*, 2009, vol. 18, no 3, p. 357-375.
- [3] KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in construction*, 2004, vol. 13, no 1, p. 5-19.
- [4] WinSun Decoration Design Engineering Co. disponible à <http://www.yhbm.com/index.php?siteid=3>
- [5] JOKIC, Sasa, NOVIKOV, Petr, MAGGS, Stuart, et al. Robotic positioning device for three-dimensional printing. arXiv preprint arXiv:1406.3400, 2014.
- [6] MX3D Metal. online available at <http://mx3d.com/projects/metal/>
- [7] LUKIĆ, Maria, CLARKE, Jane, TUCK, Christopher, et al. Printability of elastomer latex for additive manufacturing or 3D printing. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, vol. 133, no 4.
- [8] <http://d-shape.com/>
- [9] <http://group.skanska.com/media/articles/integrating-robots-into-construction/>
- [10] <http://www.xtreee.eu/>
- [11] <http://betabram.com/>
- [12] Nathalie LABONNOTE, Anders RONNQUIST, Bendik MANUM, Petra RÜHER: Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in construction*, 2016