Fabrication additive de franchissements - de la maçonnerie à l'impression 3d en béton

Paul Carneau, Romain Mesnil, Nicolas Roussel, Olivier Baverel

▶ **To cite this version:**

Paul Carneau, Romain Mesnil, Nicolas Roussel, Olivier Baverel. Fabrication additive de franchissements - de la maçonnerie à l'impression 3d en béton. DiXite3dPrint : Fabrication Additive pour la Construction. Quelle Actualité Nationale ?, École des Ponts ParisTech, Jan 2019, Champs-sur-Marne, France. hal-02119312

HAL Id: hal-02119312

https://enpc.hal.science/hal-02119312

Submitted on 3 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DiXite3dPrint – École des Ponts ParisTech – 17 - 18 janvier 2019

Fabrication additive de franchissements - de la maçonnerie à l'impression 3d en béton

Additive manufacturing of cantilever - from masonry to concrete 3d printing

Paul Carneau [1], Romain Mesnil [1], Nicolas Roussel [1] Olivier Baverel [1]

1 : Laboratoire Navier, UMR 8205
École des Ponts, IFSTTAR, CNRS, UPE
Champs-sur-Marne, France
e-mail : paul.carneau@enpc.fr

L'éclosion de l'impression 3d en béton se reflète aujourd'hui dans la recherche académique où des sujets comme la rhéologie du matériau extrudé, la cohésion entre couches ou encore les stratégies de renforcement sont largement étudiés [1]. Peu de publications en revanche traitent de la recherche de forme pour des structures obtenues grâce à ce nouveau procédé (tel que [2] ou [3]). Les caractéristiques du matériau frais venant d'être imprimé (ne reprenant pas ou très peu de traction), la maîtrise de sa rhéologie ou encore la barrière technologique (difficulté de définitir des trajectoires complexes des robots) peuvent être des facteurs limitant aujourd'hui presque essentiellement l'impression 3d à la réalisation de murs verticaux.
Pour essayer d'élargir le champs des géométries imprimables, l'approche proposée est de s'intéresser à une autre technique de fabrication additive bien plus ancienne : la maçonnerie. La maçonnerie comme l'impression 3d en béton consiste à empiler des couches successives d'un matériau présentant une très faible résistance en traction en cherchant à obtenir une structure finale travaillant principalement en compression (la recherche sur l'impression de structures armées n'étant qu'à ses débuts). Le rapprochement semble donc naturel et il a d'ailleurs été évoqué dès les débuts de l'impression 3d en béton par Pegna dans [4] en 1997.
La comparaison entre les deux procédés peut être poussée jusque dans leurs éléments constitutifs propres : brique et cordon, appareillage et parcours d'outil (trajectoire du robot), maçon et robot.

Nous nous intéressons en particulier aux stratégies utilisées en maçonnerie pour réaliser des franchissements (voûtes ou dômes) sans l'aide de support temporaire (cintre ou coffrage). Selon la complexité de la voûte à réaliser, la conception, la mise en oeuvre, le coûts de ces supports sont autant d'arguments justifiant le fait d'essayer de s'en passer. Ce sont également souvent des structures complexes, uniques et non recyclables. Il semble alors pertinent d'essayer de s'inspirer de la maçonnerie pour imprimer des franchissements en béton directement.
Les méthodes rencontrées pour réaliser des porte-à-faux par fabrication additive (dont la plupart sont fidèlement décrites par Auguste Choisy dans [5]) ont été développées à l'origine pour répondre à un manque de bois ou de savoir sur les chantier pour réaliser les cintres, ou par nécessité économique mais ont quasiment disparues aujourd'hui :

- encorbellement en plan ou dans l'espace (pour un dôme) réalisé en ajoutant un contre-poids simultanément à chaque brique en porte-à-faux ou en calculant le porte-à-faux de chaque couche garantissant l'équilibre global de la structure [6] ;
- technique de la voûte nubienne (translation d'un arc horizontalement) pour la réalisation de voûtes en berceau ;
- inclinaison des assises de lit pour créer des anneaux de compression auto-stables pendant la réalisation de dôme ;

— formation de trompes, pendentifs, nervures ou appareillages spéciaux pour raidir la structure en cours de construction ;
— technique de la voûte catalane, construction de coques funiculaire en tuiles fines et plates.

La démarche présentée consiste à analyser en détail les différents aspects de la fabrication additive en béton que sont la rhéologie du matériau et sa mise oeuvre, la trajectoire d'impression en fonction des degrés de liberté du robot, le procédé d'impression utilisé et la forme de la structure finale que l'on cherche à atteindre et d'établir dès que possible un parallèle avec la maçonnerie pour mettre en place des méthodes de conception et de fabrication qui serviront à élargir le champs des géométrie imprimables en béton.

Fig. 1.*: Évolution d'impression d'une ouverture dans une paroi*

Afin d'illustrer la démarche qui vient d'être décrite, une étude de cas concrète est présentée ensuite, concernant la réalisation en laboratoire d'une ouverture dans une paroi, prenant la forme d'une arche et élevée sans l'aide de support temporaire ou cintrage (Fig. 1). L'approche pour générer cette structure est expliquée de la phase de conception jusqu'à l'impression de l'objet final, en passant par la programmation du parcours d'outil et de l'analyse structurelle en cours de réalisation. L'objectif étant d'appliquer directement certaines des stratégies développées ci-avant (encorbellement, inclinaison des assises des cordons, contrôle précis des paramètres d'impression, etc.) pour valider la pertinence de la démarche.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier leurs partenaires XtreeE, expert dans l'impression 3d à grande échelle pour partager avec l'école sa technologie, et HALRobotics pour son aide sur la prise en main des robots pour la fabrication numérique.
Ce travail de recherche est financé par Build'in, la plate-forme de construction numérique de l'École des Ponts ParisTech.

Références

[1] T. Wangler, R. J. Flatt (Eds.), First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018, RILEM Bookseries, Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-99518-2, 2019.
[2] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, P. Morel « Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders », *Materials & Design* Vol. 100, pp. 102–109, 2016, ISSN 02641275.
[3] S. Bhooshan, J. Ladinig, T. Van Mele, P. Block « Function representation for robotic 3D printed concrete », in : ROBARCH 2018 - Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018, Springer, Zurich, , pp. 98–109, 2018.
[4] J. Pegna « Exploratory investigation of solid freeform construction », *Automation in construction* Vol. 5 n° 5, pp. 427–437, 1997.
[5] A. Choisy, L'art de bâtir chez les Byzantins, 1883.
[6] J. F. Hall « Fun with stacking blocks », *American Journal of Physics* Vol. 73 n° 12, pp. 1107–1116, 2005, ISSN 0002-9505, 1943-2909.