

Coques cimentaire imprimées en 3D et renforcées par fibres longues

3D-printed, long-fiber-reinforced cement shells

Victor de Bono^{1,3}, Nicolas Ducoulombier³, Léo Demont², Romain Mesnil^{1,2}, Jean-Francois Caron¹

1 : Laboratoire Navier

École Nationale des Ponts et chaussées, Univ. Gustave Eiffel, CNRS,

6-8 Ave Blaise Pascal 77455 Champs sur Marne

e-mail : jean-francois.caron@enpc.fr

2 : Build'in, Co-Innovation Lab

École des Ponts ParisTech

6-8 Ave Blaise Pascal 77455 Champs sur Marne

3 : XtreeE, 18 Rue du Jura, 94150 Rungis

Résumé

Le béton 3D a connu un développement important au cours des dernières décennies mais il n'est que très peu utilisé pour des applications structurelles, car il n'existe pas encore de solutions abouties/commerciales standard pour le renforcement des éléments porteurs imprimés en 3D. Le concept proposé ici s'inspire de l'industrie des composites et fait écho au ferrociment du siècle dernier de Pier Luigi Nervi. On utilise l'impression 3D de béton (3DCP) et une technologie brevetée appelée FBP pour *Flow-Based Pultrusion*. Le renforcement est assuré par de longues fibres alignées et produit un mortier composite isotrope transverse. Les premières expériences ont déjà démontré une augmentation de la résistance à la traction et de la ductilité, et un prototype industriel, en collaboration avec la société XtreeE, est actuellement en cours de développement. La faisabilité est démontrée ici via un démonstrateur de coque mince optimisée, testée mécaniquement.

Abstract

3D concrete has undergone significant development over the last few decades but is only rarely used for structural applications, as there are as yet no standard commercial solutions for reinforcing 3D-printed load-bearing elements. The proposed concept is inspired by the composites industry and echoes Pier Luigi Nervi's ferrocement of the last century. It uses 3D concrete printing (3DCP) and a patented technology called FBP for *Flow-Based Pultrusion*. Reinforcement is provided by long, aligned fibers, producing a transverse isotropic composite mortar. Initial experiments have demonstrated increased tensile strength and ductility, and an industrial prototype, in collaboration with XtreeE, is currently under development. Feasibility is demonstrated here with an optimized and tested thin shell demonstrator.

Mots Clés : Composite à matrice cimentaire, impression 3D, fibres longues

Keywords : Cementitious composite ; 3D printing ; Long fibers

1. introduction

Les composants imprimés, non renforcés, ne sont généralement pas conformes aux normes de construction ou aux règlements en place, et ne sont donc pas utilisés comme composants porteurs. En effet avec une résistance en traction de quelques MPa et un comportement fragile, les mortiers cimentaires ne peuvent réglementairement être utilisés non renforcés dans des configurations tendues. Ce comportement provient de la présence de microfissures naturelles qui se propagent jusqu'à la localisation menant rapidement à la rupture. La solution est donc de "coudre" ces fissures par un renforcement adapté permettant la décharge locale du matériau en faveur du système de renforcement.

Le fait de passer d'un procédé de coulage/pompage à un procédé d'impression/extrusion ne change pas radicalement les problèmes ni les solutions de renforcement. On retrouvera l'essentiel de ce qui est connu, les aciers ou cages de renforcement, les inserts, la précontrainte, les fibres courtes ou longues...

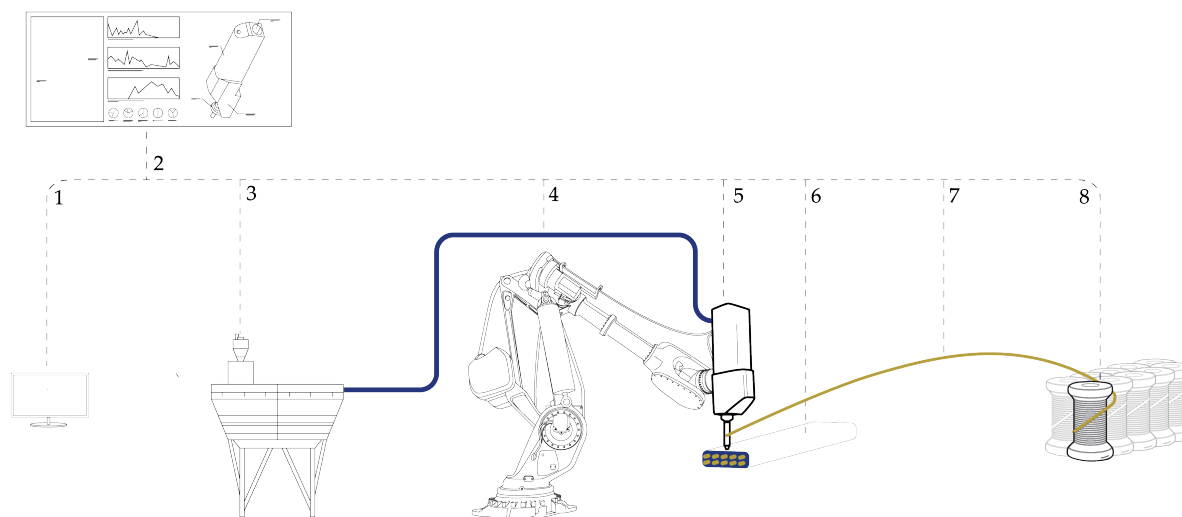


Fig. 1. – Impression 3D renforcée avec le procédé FBP - 1 : Modèle numérique, 2 : Création d'un parcours d'outils, 3 : Système de mélange du mortier, 4 : Pompage du mortier, 5 : Tête d'impression bi-composant. Insertion de fibres dans la buse, 6 : Élément imprimé et renforcé, 7 : Fibres longues, 8 : Bobines

De nombreuses approches sont proposées dans la littérature, bien qu'il n'y ait pas encore de solution de référence. Ces propositions sont listées dans [1, 2, 3] par exemple. Pour certaines d'entre elles, le renforcement est appliqué a posteriori, en s'inspirant des méthodes traditionnelles de renforcement, pour d'autres, il est intégré directement dans le batch initial de matériau (fibres courtes), et pour les dernières, le renforcement est appliqué simultanément à l'impression en ligne, à proximité immédiate de la buse d'impression. Cette solution est plus en phase avec l'utilisation de la robotique et de la technologie numérique, c'est pourquoi nous avons axé nos recherches dans cette direction. Nous présentons ici nos derniers développements.

2. Renforcement d'impression 3D cimentaire avec le procédé Flow-Based Pultrusion

2.1. principe

Pour pouvoir renforcer pendant le processus d'impression, nous utilisons le procédé Flow-Based Pultrusion (FBP) [2, 4] développé à l'Ecole des Ponts, un procédé original pour la fabrication additive par extrusion de matériaux renforcés en continu. Très similaire aux procédés de pultrusion existants, il consiste à imprégner en continu des fibres longues dans une buse d'extrusion avec une matrice, initialement très fluide pour favoriser l'imprégnation (figure 1).

La principale différence est que la traction n'est pas due à un mécanisme externe mais aux propriétés rhéologiques du mortier extrudé qui évoluent, augmentant la consistance rapidement ce qui permet le tirage des fibres. Comme dans les procédés de fabrication additive par extrusion existants, le matériau extrudé fibré est ensuite déposé par un bras robotisé pour façonner l'objet souhaité, comme l'explique la figure 1. Dans cet article, nous utiliserons de la fibre de carbone pour le renforcement et plus particulièrement la Tenax HTS40 800 Tex de Teijin. Les figures 2 et 3 illustrent les directions d'impression, et un exemple de boudin fibré.

2.2. Validation expérimentale

De premiers essais ont été réalisés en traction et flexion dans [5] qui ont pu démontrer l'efficacité du procédé et l'apport du fibrage pour augmenter résistance et ductilité. Des essais en traction pure ont mis en évidence une microfissuration progressive de la matrice fragile. Ici on mesure cette résistance

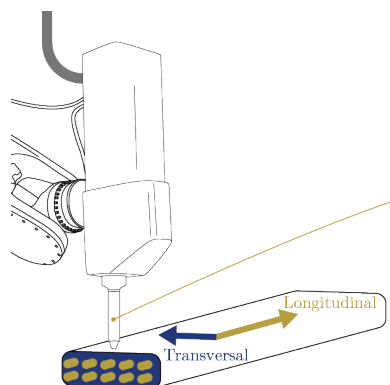


FIG. 2. – En bleu, la direction transversale, où les caractéristiques mécaniques sont déterminées uniquement par le mortier. En jaune, la direction longitudinale, où la résistance à la traction est induite par les fibres et la résistance à la compression est induite par le mortier.



FIG. 3. – Deux couches imprimées. A gauche sans fibre, à droite avec 4 fibres par couche.

à la traction, à travers de plusieurs tests de flexion à 4 points, en faisant varier la teneur en fibres. Une petite section a été imprimée et des échantillons ont été prélevés après durcissement. Ces échantillons, mesurant 160 mm de long, 25 mm de large et 20 mm de haut, ont subi des essais de flexion 4 points (avec 100 mm entre les supports et 80 mm entre les deux charges) comme le montre la figure 4 révélant des résultats remarquables déjà montrés dans [5] : avec une faible teneur en fibres, le matériau présente une réponse non fragile sous charge. Lorsque le nombre de fibres atteint 5 (environ 0,7 % en volume), nous commençons à observer un comportement ductile et de l'écrasement. Cette transition indique que les fibres renforcent la matrice, ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la traction et permet au matériau de subir davantage de déformations avant la rupture, améliorant ainsi sa résistance à la fissuration et à éviter une rupture brutale. Quelques résultats figure 5.

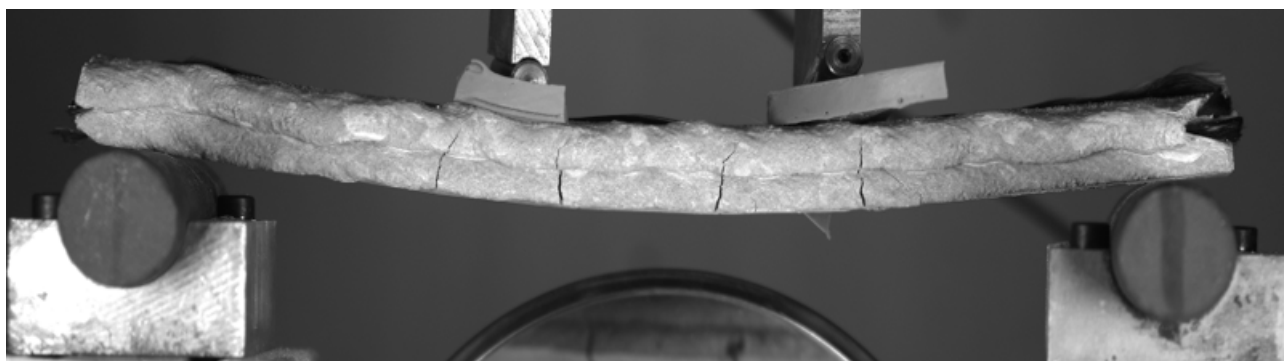


FIG. 4. – essai de flexion en 4 points réalisé sur un échantillon imprimé en 3D et renforcé par des fibres de carbone continues

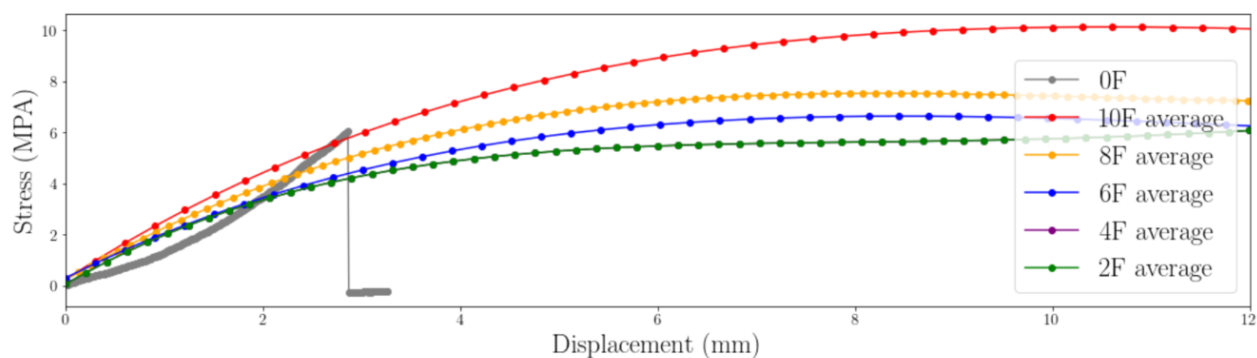


FIG. 5. – Courbes contrainte maximum de traction/flèche pour des renforcements de 2 à 10 fibres de carbone par boudin.

3. Design d'une coque imprimée en FBP - méthodologie

L'élément étudié est une coque mince soumise à des charges verticales, engendrant des efforts de membrane, de flexion et de cisaillement transversal.

3.1. Description mécanique du matériau renforcé

Du fait au processus PFB, les fibres sont orientées dans une direction spécifique. La résistance de ce matériau isotrope transverse se caractérise par cinq propriétés essentielles :

- Résistance à la traction longitudinale (direction des fibres)
- Résistance à la traction transversale
- Résistance au cisaillement
- Résistance à la compression longitudinale
- Résistance à la compression transversale

Actuellement, les résistances à la compression longitudinale et transversale sont supposées identiques (dans l'hypothèse où les fibres n'interagissent pas sous l'effet de la compression, bien que cela nécessite une vérification plus approfondie).

Ces propriétés ont été obtenus à partir d'essais de matériaux, et nous avons converti les valeurs brutes en résistances de calcul (intégrant variabilité et sécurité) selon les procédures décrites dans l'Eurocode (Tab.1).

Unités		Mpa	Mpa
Résistance à la compression longitudinale,	X_1^C	50	30
Résistance à la compression transversale	X_2^C	30	30
Résistance à la traction longitudinale	X_1^T	6	5
Résistance à la traction transversale	X_2^T	6	1
Résistance au cisaillement	T_{12}	N/A	1
Module d'élasticité	E	35000	35000

TAB. 1. – Caractéristiques mécaniques utilisées pour l'optimisation d'un mortier imprimé et renforcé par du FBP avec 5 fibres de carbone par couche.

Nous proposons un critère de rupture de type Tsai-WU pour la conception avec ce type de matériau.

$$\mathcal{D} : [F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2] = 1 \quad (\text{Eq. 1})$$

avec :

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C} \right), F_2 = \left(\frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C} \right), F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_1^T X_1^C} * \frac{1}{X_2^T X_2^C}}, F_{11} = \frac{1}{X_1^T X_1^C}, F_{12} = \frac{1}{X_2^T X_2^C}, F_{66} = \frac{1}{T_{12}}.$$

et :

$X_1^T, X_2^T, X_1^C, X_2^C, T_{12}$ respectivement la résistance à la traction dans le sens longitudinal et transversal, la résistance à la compression dans le sens longitudinal et transversal, la résistance en cisaillement, telles que définies dans le tableau 1.

3.2. Design de la coque

Dans cette étude, la coque a une base rectangulaire mesurant 4 mètres de long et 1,6 mètre de large, comme le montre la figure 6.

3.2.1. Paramètres, cas de charge

La coque est modélisée sur le logiciel Rhinoceros 3D et l'outil paramétrique Grasshopper. La coque est paramétrée avec 5 points de contrôle nommés A,B,C,D et E (Figure 6). Pour le point A, seule la distance dans la direction x est variable, pour les points B, C, D et E, seule la distance dans la direction z est variable. Pour le processus d'optimisation, toutes les valeurs sont fixées à 0 pour les états initiaux (un rectangle plat), et tous les points ne peuvent se déplacer que sur un axe mais dans deux directions. La coque est encadrée à ses deux extrémités par deux supports fixes et trois cas de charge différents sont envisagés, charges concentrées (centrée et excentrée) et charge réparties.

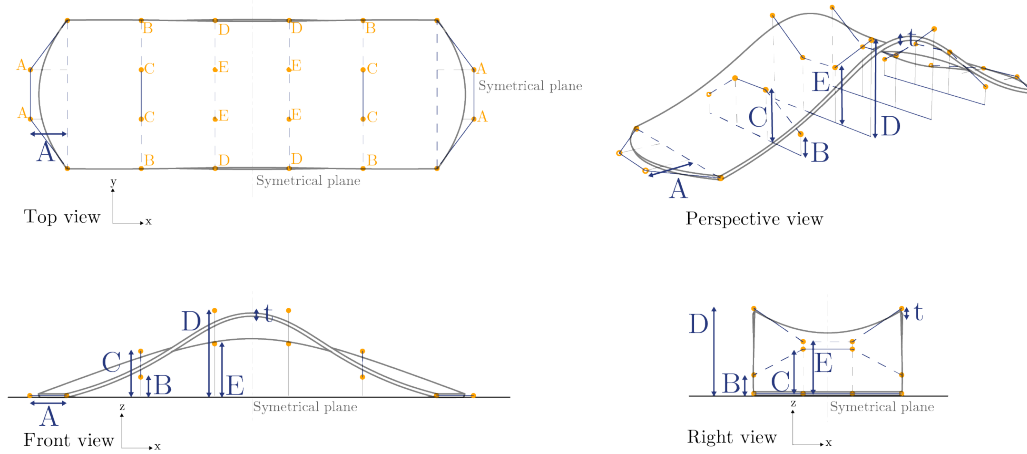


Fig. 6. – Les cinq points de contrôle variables de la coque paramétrée NURBS. L'épaisseur de la coque est également une variable

3.2.2. Calculs et optimisation

Le problème d'optimisation consiste à minimiser la masse m de la structure, en vérifiant le critère de résistance Eq. 1, ce qui s'exprime par l'équation Eq. 2 suivante :

$$\begin{cases} \min & m(\mathbf{X}) \\ \mathbf{K}\mathbf{u}_i = \mathbf{F}_i \\ \sigma_i \in \mathcal{D} \\ \lambda_i > \lambda_d \\ \alpha < \alpha_d \end{cases} \quad (\text{Eq. 2})$$

Les deux inégalités sont relatives à deux autres critères concernant le flambement élastique (épaisseur de la coque) et un paramètre (angle du nez robot) d'imprimabilité mais ne sont pas détaillés ici.

L'analyse par éléments finis est effectuée avec Le logiciel Karamba 3d, et le plugin Goat pour le processus d'optimisation. La figure 7 montre cinq coques optimisées différentes. Toutes les coques

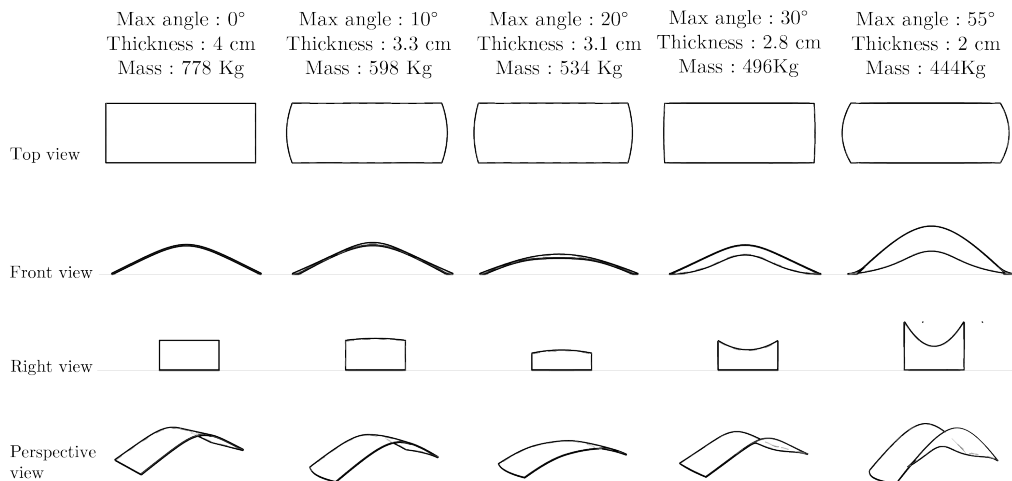


FIG. 7. – Cinq coques optimisées différentes, obtenues avec des angles maximaux différents.

générées présentées dans la figure 7 respectent les critères de Tsai-Wu, de flambage et d'angle. Nous choisissons pour la fabrication la coque du milieu de 534 kg, mais à l'échelle 1/2, soit de 2m de portée 150kg, épaisseur 3cm (fig.8). Les essais mécaniques seront réalisés prochainement.

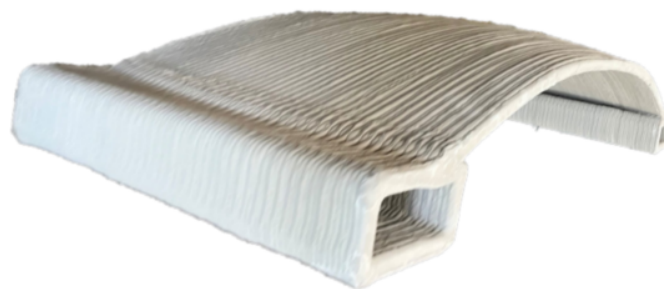


FIG. 8. – Prototype coque renforcée et optimisée de 2m de portée, 150kg, épaisseur 3cm.

4. conclusion

Cette application structurelle du principe d'impression fibrée FBP fait suite à une précédente réalisation concernant une poutre [5]. Ici les enjeux sont plus complexes puisqu'il s'agit de dimensionner une structure 2D avec un matériau anisotrope transverse renforcé dans une seule direction. Le concept est d'utiliser alors la forme pour pallier à cette difficulté en minimisant les moments de flexion dans la direction non renforcée. La structure fibrée, optimisée, à double courbure permet du fait de ses élancements importants (faible épaisseur) des performances mécaniques spécifiques intéressantes, ce qui ouvre la voie à de multiples applications, et à ré-interpréter grâce au numérique, des concepts développés durant les siècles derniers par de grands architectes/ingénieurs comme Pier Luigi Nervi (fig.9) ou Felix Candela et rendus impossible à mener à bien aujourd'hui avec les savoir-faire et budgets disponibles.

Références

- [1] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, V. Mercuri « 3D printing of reinforced concrete elements : Technology and design approach », *Construction and Building Materials* Vol. 165, pp. 218–231, 2018, ISSN 0950-0618.



FIG. 9. – Aéroport Orbetello en Italie, Pier Luigi Nervi, 1940 (Credits : Hulton Getty).

- [2] J.-F. Caron, L. Demont, N. Ducoulombier, R. Mesnil « 3D printing of mortar with continuous fibres : Principle, properties and potential for application », *Automation in Construction* Vol. 129, pp. 103806, 2021, ISSN 0926-5805.
- [3] H. Kloft, B. Sawicki, F. Bos, R. Dörrie, N. Freund, S. Gantner, L. Gebhard, N. Hack, E. Ivaniuk, J. Kruger, W. Kaufmann, J. Mata-Falcón, V. Mechtcherine, A. Mirjan, R. Wolfs, D. Lowke « Interaction of reinforcement, process, and form in Digital Fabrication with Concrete », *Cement and Concrete Research* Vol. 186, pp. 107640, 2024, ISSN 0008-8846.
- [4] L. Demont, N. Ducoulombier, R. Mesnil, J.-F. Caron « Flow-based pultrusion of continuous fibers for cement-based composite material and additive manufacturing : rheological and technological requirements », *Composite Structures* Vol. 262, pp. 113564, 2021, ISSN 0263-8223.
- [5] L. Demont, M. Charrier, P. Margerit, N. Ducoulombier, R. Mesnil, J.-F. Caron « Flow-Based Pultrusion of Anisotropic Concrete : Mechanical Properties at Hardened State », in : R. Buswell, A. Blanco, S. Cavalaro, P. Kinnell (Eds.), *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, RILEM Bookseries, Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-031-06116-5, , pp. 385–390, 2022.