

---

# Défis à relever en termes de rhéologie des matériaux cimentaires pour une impression 3D par extrusion/dépôt

Perrot Arnaud <sup>1\*</sup>, Rangeard Damien <sup>2</sup>, Amziane Sofiane<sup>3</sup> et Sonebi Mohamed<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Bretagne Sud, Lorient, France, [arnaud.perrot@univ-ubs.fr](mailto:arnaud.perrot@univ-ubs.fr)

<sup>2</sup> INSA de Rennes, Rennes, France

<sup>3</sup> Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France

<sup>4</sup> Queen's University, Belfast, UK

---

**RÉSUMÉ.** L'impression 3D du béton par extrusion/dépôt est un processus complexe en plusieurs étapes qui doit être bien décrit et optimisé. Les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais (et leurs évolutions) doivent être optimisées aussi bien pour l'extrusion que pour les procédés d'impression 3D. Par conséquent, les matériaux doivent présenter des propriétés spécifiques telles que la stabilité pendant l'extrusion, la stabilité de la forme lorsque le matériau coule de l'extrudeuse, le jointoiment entre les couches et un raidissement rapide afin de supporter le poids des couches subséquentes. Ces propriétés spécifiques du procédé doivent être décrites en termes de propriétés intrinsèques des matériaux telles que la perméabilité, la viscosité, la contrainte seuil et la vitesse de structuration afin de saisir la physique sous-jacente. Par exemple, la vitesse de structuration sera utile afin de minimiser l'intervalle de temps entre deux placements superposés consécutifs. Ce travail vise à décrire le lien entre les caractéristiques intrinsèques des matériaux et la technique d'impression 3D par extrusion afin d'optimiser la méthode de traitement.

**ABSTRACT.** Extrusion 3D printing of concrete is a complex multistep process that needs to be well described and optimized. The fresh properties of cement-based materials have to be optimized for both the extrusion and the additive manufacturing 3D printing processes. Therefore, the materials have to exhibit some specific properties such as stability during extrusion, shape stability when concrete flows from the orifice extruder, jointing between layers and quick stiffening in order to sustain the weight of the subsequent layers. Those specific process properties must be described in terms of intrinsic materials properties such as permeability, viscosity, yield stress and structural build-up rate in order to capture the underlying physics. For example, the structural build-up rate will be helpful in order to minimize the time step between two consecutive superposed placements. This work aims to describe the link between the intrinsic material characteristics and the extrusion 3D printing technique in order to optimize the processing method.

**MOTS-CLÉS :** Rhéologie, impression 3D, matériaux cimentaires, seuil de cisaillement, thixotropie

**KEY WORDS:** Rheology, 3D Printing, cement-based materials, yield stress, thixotropy

---

## 1. Introduction

Aujourd'hui, les méthodes de construction traditionnelle peuvent se trouver bouleverser par la 3ème révolution industrielle et l'introduction du numérique et du digitale dans l'industrie du BTP. La conception et le suivi de réalisation ont déjà été impactés par l'utilisation du BIM. La réalisation de maquettes numériques complètes de bâtiments ont permis d'aller plus loin dans l'anticipation de la réalisation d'un projet et permettent d'aller vers une optimisation des méthodes de réalisation et vers une qualité de construction optimale (lean building). Même si l'effort d'introduction du digital dans l'acte de construire est manifeste chez l'ensemble des acteurs majeurs de la construction, son utilisation dans les méthodes de réalisation en est encore à ses balbutiements. Pourtant, il apparaît désormais réaliste et accessible de bénéficier de la numérisation complète des projets de construction pour automatiser les méthodes de construction et ainsi de se rapprocher des objectifs de lean building.

Toutefois, la transposition directe aux matériaux cimentaires des méthodes de fabrication additive, initialement développées pour les matières plastiques, n'est pas triviale. En effet, l'adaptation des procédés additifs doivent prendre en compte les caractères spécifiques de ces matériaux divisés que sont les bétons. Actuellement, les études académiques et d'initiatives privées fleurissent à travers le monde pour permettre

l'adaptation des méthodes de fabrication additive aux matériaux 'béton'. Ainsi le nombre d'initiatives et de projets liés à l'impression 3D du béton connaît une croissance exponentielle. Ces études sont motivées par les avantages multiples que donneraient l'utilisation de cette technique. L'avantage économique : ces techniques permettraient de se passer des coffrages, qui peuvent représenter jusqu'à 70% du coût d'un béton coffré ; Avantage architecturale : l'impression additive rompt les barrières géométriques imposées par les procédés de construction traditionnels. Une liberté de forme inédite est donnée aux architectes. Une optimisation des dépenses en matériaux, et ainsi une réduction des impacts environnementaux : en effet, les procédés robotisés permettent de maîtriser les dépôts de matières (possibilité de mettre la matière seulement là où il y en a besoin, concept d'optimisation topologique). Avantage social : dans le domaine du BTP, la fabrication additive d'éléments béton impact directement les conditions de travail en supprimant—les tâches de manutentions lourdes et de vibration du béton, par exemple.

Ces études ont d'ors et déjà permis de valider la faisabilité technique du procédé d'impression 3D du béton et des démonstrateurs de taille réduite ont pu être réalisés (maisons individuelles, passerelles) à travers le monde.

Ainsi, l'application de béton imprimé en matériau structural n'apparaît désormais plus comme une utopie, mais comme une réalité à venir. Nous sommes à l'étape où la fédération des savoir faire devient nécessaire afin de tendre vers une normalisation des matériaux, procédures et méthodes de dimensionnement des structures imprimées en béton.

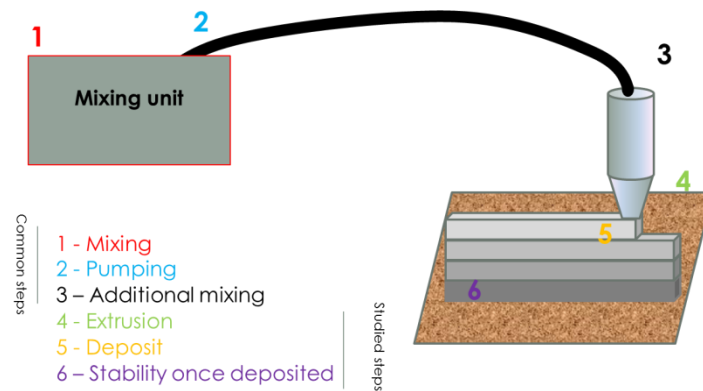
L'impression 3D par extrusion/dépôt est aujourd'hui le procédé le plus utilisé dans le domaine de la construction digitale [WAN 16]. Ce procédé de construction automatisé est un processus complexe qui peut se décomposer en plusieurs étapes : acheminement par pompage, extrusion, puis dépôt. Pour chaque étape de l'impression, les matériaux cimentaires à l'état frais doivent présenter des propriétés maîtrisées garantissant d'une part l'écoulement du matériau pendant la phase initiale du procédé, et d'autre part sa stabilité après dépôt. Plus précisément, il apparaît que le matériau doit présenter à la fois une fluidité suffisante pour être pompable, et être assez ferme pour permettre une stabilité de forme une fois déposé. Ces qualités contraires nécessitent de déterminer des fenêtres de propriétés de comportement rhéologique resserrées afin de pouvoir assurer la bonne marche du procédé d'impression.

Une autre solution, que nous n'étudierons pas dans ce document, consiste à ajouter des accélérateurs de prise juste avant le dépôt par l'intercalation d'un système de mélange en ligne juste en amont de la filière de sortie. Cette stratégie permet de rentrer dans une stratégie de structuration à la demande du matériau cimentaire, et permet d'obtenir un béton très fluide lors du pompage et rapidement ferme une fois déposé.

Dans notre étude, nous nous intéresserons aux contraintes sur le comportement rhéologique induites par chacune des étapes du processus d'impression par extrusion/dépôt. Dans un premier temps nous présenterons brièvement le procédé, puis nous nous intéresserons à l'étape de transport/extrusion du matériau. Ensuite, notre attention se focalisera sur la stabilité d'une couche une fois déposée puis sur la stabilité globale et la maîtrise de la forme une fois imprimée.

## **2. Procédé d'impression par extrusion/dépôt**

Le procédé d'impression par extrusion/dépôt consiste à acheminer par pompage un béton possédant une rhéologie appropriée puis à le déposer par extrusion, couche par couche, afin de construire une structure. Le procédé nécessite à la fois un modèle numérique et un système automatisé. Comme le montre la Figure 1, le procédé peut se décomposer en six étapes : la fabrication du béton, son transport, une étape optionnelle de malaxage additionnel si il est choisi d'utiliser un accélérateur de prise, l'extrusion, le dépôt d'une couche élémentaire et enfin la fabrication d'une structure dont il faut veiller à la stabilité tout au long de l'impression.



**Figure 1.** Décomposition en étapes élémentaires de l'impression 3D de matériau cimentaire par extrusion.

Cette décomposition permet de mettre en évidence les multiples propriétés rhéologiques que devra avoir le matériau cimentaire selon l'étape considérée. Celui-ci devra pouvoir à la fois s'écouler tout en restant homogène lors des opérations de transport et d'extrusion. Par ailleurs, les déformations d'une couche lors du dépôt devront être maîtrisées ainsi que la qualité de l'interface entre couches pour éviter la formation de faiblesses structurales (communément appelé joints froids [WAN 16]). Enfin, l'étude de la stabilité de la structure imprimée devra prendre en compte le gradient de résistance sur la hauteur de la structure. Ce gradient est induit par des temps de structuration au repos du matériau différents après dépôts de chacune des couches. De plus, ce gradient de résistance relativement aux couches initiales les plus basses qui sont plus résistantes et plus rigides est symbolisé par les nuances de gris sur la figure 1, soulignant ainsi l'importance de la cinétique de structuration du matériau au repos.

### 3. Comportement à l'état frais et étape d'impression

#### 3.1. Rhéologie des matériaux à base cimentaire

Les matériaux à base cimentaires présentent un comportement de type viscoplastique : Ils s'écoulent seulement si on leur applique une contrainte supérieure à une valeur critique appelée seuil d'écoulement. Ce seuil est observé pour une déformation critique appelée  $\varepsilon_c$  en compression ou  $\gamma_c$  en cisaillement. Ce seuil de plasticité s'appelle  $\tau_0$  pour une sollicitation de cisaillement et  $\sigma_0$  pour un écoulement élongationnel. Pour des sollicitations complexes, avant la prise de la pâte ou mortier de ciment, un critère de plasticité de Von Mises peut être utilisé [MET 16]. Au-delà de la contrainte seuil, les matériaux cimentaires s'écoulent comme un fluide visqueux quasiment Newtonien (viscosité  $\eta$ ). De ce fait dans la plus part des cas (vitesses de déformation n'entraînant pas de perte d'homogénéité), la modélisation du comportement à l'état frais des matériaux cimentaires peut être correctement approximé par un modèle de Bingham.

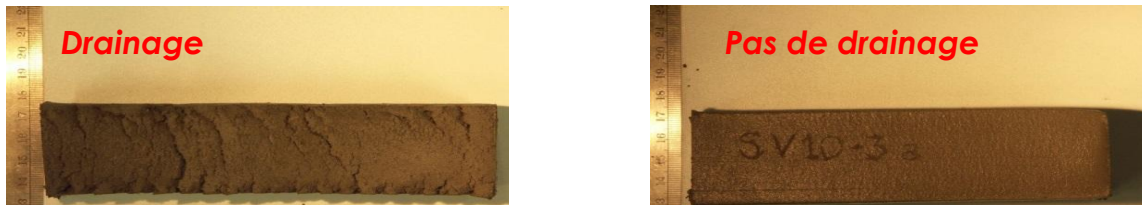
En dessous de la contrainte seuil (vitesse de déformation quasi statique), les matériaux cimentaires se comportent comme des solides élastiques présentant un module élastique  $E$  en compression et  $G$  en cisaillement. Ce comportement élastique est important pour estimer les déformations des structures imprimées sous leur poids propre.

Il est important de noter que tous ces paramètres de comportement sont sujets à une cinétique d'évolution dans le temps et au repos après leur dépôt en couche. En effet, une fois au repos, la rigidité et le seuil d'écoulement augmentent avec le temps. Simultanément, la déformation critique diminue légèrement. L'augmentation du seuil d'écoulement avec le temps est souvent considérée comme linéaire et permet de définir une vitesse de structuration  $A_{thix}$  en  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$  [ROU 05]. Il est à noter que certaines formulations peuvent présenter une cinétique exponentielle de structuration [PER 16].

#### 3.2. Pompage et extrusion

Lors du pompage de matériaux cimentaires, l'écoulement est assuré par une couche limite lubrifiante constituée de pâte de ciment où le cisaillement est concentré. Ce type d'écoulement génère un écoulement dit bouchon pour lequel le matériau n'est pas cisailé à l'interface. Certaines études suggèrent que la pression de mise en écoulement est liée au seuil de cisaillement du matériau [PER 12]. Dans tous les cas, pour une bonne pompabilité, il faut permettre la formation de la couche lubrifiante et ne pas utiliser un matériau avec une trop grosse fraction volumique granulaire (inférieure à 80% de la fraction volumique de packing aléatoire) évitant ainsi la mise en place d'un écoulement frottant pression-dépendant. Ainsi, même des formulations présentant des

seuils de cisaillement importants (supérieurs à 1000 Pa par exemple) ont pu être imprimées. Pour l'étape d'extrusion, les contraintes sont du même ordre. Il est tout de même conseillé de vérifier que la perte de charge liée à la contraction de l'écoulement n'entraîne pas un drainage du fluide interstitiel et une consolidation du matériau dans les conduites et la filière. En effet, lors de l'extrusion de matériau à base cimentaire, il y a une compétition entre la cinétique de drainage et la cinétique de l'extrusion elle-même [PER 14]. Si le drainage se produit, le matériau peut devenir frottant et la surface des couches va présenter de plus en plus de défaut au fur et à mesure de la montée en pression de la pompe. Ceci est illustré par la Figure 2 qui montre l'aspect d'extrudât en cas de drainage et en cas d'écoulement non-drainé (ce résultat est obtenu simplement en réduisant la vitesse d'écoulement).



**Figure 2.** Visualisation de la surface de matériaux cimentaires en cas d'extrusion drainée ou non drainée.

Ainsi, les formulations de mortiers pour impression 3D contiennent souvent un agent viscosant permettant de s'affranchir de ces problèmes de drainage.

### 3.3. Stabilité d'une couche

La déformation d'une couche élémentaire après son extrusion dépend du procédé d'impression utilisé. Ainsi à Loughborough University [LE 12], des petits filaments millimétriques sont extrudés et se déforment sous leur poids propre. La déformation de ces cylindres permet de combler les vides créés entre filaments et ainsi de créer une structure compacte. En revanche, dans les procédés type Contour Crafting ou ConPrint3D, les couches présentent une section qui se veut être celle de la filière. Dans le premier cas, la hauteur finale du matériau est dictée par son seuil de cisaillement qui doit pouvoir résister à l'effet de la gravité et sera donc de l'ordre de grandeur de la contrainte  $\rho g \Delta h$  avec  $\rho$  la masse volumique du matériau et  $\Delta h$  la hauteur d'une couche élémentaire. Dans le second cas, le seuil de cisaillement devra être supérieur à la contrainte générée par la gravité.

Dans le cas d'impression de structure en porte-à-faux, il conviendra de vérifier que la déformation reste élastique pour la partie dans le vide. Un calcul de vérification avec une hypothèse de poutre console pourra être effectuée. Si l'hypothèse n'est pas vérifiée, une impression à l'envers ou sur un support temporaire est préconisée.

Il est aussi intéressant de réfléchir à l'impact de l'épaisseur d'une couche élémentaire sur la stabilité globale de la structure. Cette réflexion doit prendre en compte les considérations abordées dans le paragraphe suivant.

### 3.4. Stabilité globale

Comme démontré par Perrot et al. [PER 16], une instabilité de la structure se produit si la résistance du matériau  $\tau_0(t)$  devient inférieure à la charge agissant sur la première couche et qui dépend de la hauteur  $h(t)$  de la structure en cours d'impression et qui est de l'ordre de  $\rho g h(t)$ . La description précise de la structuration du matériau avec le temps pour quantifier  $\tau_0(t)$ . Dans une première approche, il est possible d'utiliser une vitesse de structuration constante  $A_{thix}$ , comme initialement proposé par Roussel et al. [ROU 05]. Dans ce cas, la stabilité de la structure est pilotée par le rapport  $A_{thix}/h$ .

Une autre cause rapportée de rupture d'une structure en cours d'impression est liée au flambement des structures. Dans ce cas, en plus de la précision de pose des couches qui entraîne nécessairement des excentricités dont la conséquence sera l'instabilité de flambement, c'est l'évolution du module élastique avec la durée de repos qui va piloter l'instabilité sous poids propre de la structure en cours d'impression [WOL 18]. Il est à noter que dans ce cas, pour un élément strictement vertical, la hauteur limite de flambement évolue avec la racine cubique de la hauteur imprimée.

Dans le cas où la poutre reste stable, il faudra également prédire les déformations de chaque couche sous chargement (chaque couche ayant sa propre rigidité à un instant donné car ayant eu des temps de repos différents). Ainsi, la prédiction de la déformation élastique s'avère nécessaire pour connaître le nombre exact de couches pour construire une structure de hauteur donnée

### 3.5. Collage entre couches

Enfin, il est nécessaire que le procédé d'impression permette d'assurer un bon collage entre les couches et confère une bonne résistance au matériau une fois durci. Plusieurs solutions sont proposées dans la littérature : forcer un re-mélange, essayer de déstructurer le matériau de la couche sous-jacente en se basant sur les travaux sur le coulage multicouche rencontré pour les bétons autoplaçants [ROU 11]. Dans tous les cas, il est nécessaire d'éviter le séchage de la couche déjà déposée. Ainsi, l'emploi de polymères superabsorbants [NER 17] et d'agents viscosants est conseillé pour limiter la perméabilité et/ou la susceptibilité au séchage.

### 4. Conclusions

Dans cet article, nous avons listé les multiples propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais qui sont mises en jeux lors d'un procédé d'impression 3D. Ainsi, si le comportement rhéologique intervient lors du transport et de la mise en forme, la cinétique de son évolution va gouverner la vitesse du procédé. Aussi, la précision de mise en place et le module élastique du matériau intervient dans la stabilité au flambement et la possibilité d'imprimer en porte-à-faux. Enfin, les paramètres hydromécaniques sont aussi mis en jeu pour empêcher le drainage pendant l'extrusion et limiter le séchage après le dépôt.

- [LE 12] Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Gibb, A.G.F., Thorpe, T., 2012. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Mater. Struct.* 45, 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [MET 12] Mettler, L.K., Wittel, F.K., Flatt, R.J., Herrmann, H.J., 2016. Evolution of strength and failure of SCC during early hydration. *Cem. Concr. Res.* 89, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.004>
- [NER 17] Nerella, V.N., Schroefl, C., Yazdi, M.A., Alghazali, A., Secrieru, E., Shyshko, S., Liebscher, M., Heravi, A.A., Dudziak, L., Beigh, M.A.B., 2017. MICRO-AND MACROSCOPIC INVESTIGATIONS ON THE INTERFACE BETWEEN LAYERS OF 3D-PRINTED CEMENTITIOUS ELEMENTS. *J. Mater. Civ. Eng.* 29.
- [PER 12] Perrot, A., Mélinge, Y., Rangeard, D., Micaelli, F., Estellé, P., Lanos, C., 2012. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate. *Rheol. Acta* 51, 743–754.
- [PER 15] Perrot, A., Pierre, A., Vitaloni, S., Picandet, V., 2015. Prediction of lateral form pressure exerted by concrete at low casting rates. *Mater. Struct.* 48, 2315–2322. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0313-8>
- [PER 14] Perrot, A., Rangeard, D., Mélinge, Y., 2014. Prediction of the ram extrusion force of cement-based materials. *Appl. Rheol.* 24, 53320.
- [PER 16] Perrot, A., Rangeard, D., Pierre, A., 2016. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Mater. Struct.* 49, 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- [ROU 05] Roussel, N., 2005. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 35, 1656–1664. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.001>
- [ROU 08] Roussel, N., Cussigh, F., 2008. Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy. *Cem. Concr. Res.* 38, 624–632. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.023>
- [WAN 16] Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., Flatt, R., 2016. Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Tech. Lett.* Vol 1 2016DO - 1021809rilemtechlett201616.
- [WOL 18] Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M., 2018. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cem. Concr. Res.* 106, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>