

380.E - AOÛT 2017

# VEILLE TECHNO- LOGIQUE

IMPRESSION 3D

FABRICATION ADDITIVE

EN BÉTON

KAÏS MEHIRI

**CERIB**  
Expertise concrète



# Impression 3D Fabrication additive en béton

## Rapport de veille

380.E

par  
Kais MEHIRI

© 2017 CERIB – CS 10010 – 28233 Epernon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857552765

380.E – août 2017

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction  
par tous procédés réservés pour tous pays.

*Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).*

*Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.*

# Sommaire

---

<b>Préambule</b>	<b>5</b>
<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1. Présentation de l'impression 3D</b>	<b>7</b>
1.1. Les procédés	7
1.1.1. Dépôt de matière en couches successives	7
1.1.2. Formage en couches successives	8
1.1.3. Les méthodes dérivées et les acronymes	9
1.2. Les logiciels	11
1.2.1. La modélisation 3D	11
1.3. Les matériaux	12
1.3.1. Les matériaux plastiques	12
1.3.2. Les métaux	13
1.3.3. Les matériaux d'origine minérale	14
1.3.4. Les matériaux organiques	14
<b>2. Impression 3D en béton</b>	<b>15</b>
2.1. Les projets	15
2.1.1. Bigdelta	15
2.1.2. Poutre imprimée en béton	15
2.1.3. Democrite	16
2.1.4. Projet Impression Concrete	16
2.1.5. Process Contour Crafting	17
2.1.6. 3D Concrete Printing Project (3DCP)	17
2.1.7. Projet TailorCrete	18
2.1.8. Shanghai WinSun Decoration Engineering Co	18
2.1.9. Projet Constructions 3D	19
2.1.10. Conclusion	19
2.2. Intérêt de l'impression 3D en béton	20
2.3. Les procédés d'impression 3D du béton	23
2.3.1. Procédés d'impression 3D « direct » du béton	23
2.3.2. Difficultés de procédés d'impression 3D du béton	34
2.3.3. Procédés d'impression indirectes	39
<b>Conclusion</b>	<b>41</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>43</b>



## Préambule

---

La technologie de fabrication additive (impression 3D) a été identifiée comme l'une des innovations majeures, liées au numérique, susceptible de révolutionner notre mode de fabrication (*Barack OBAMA : « l'impression 3D a le pouvoir de révolutionner la façon dont nous fabriquons presque tout » Février 2013*) [1].

Bien que le principe de fabrication par dépôt de couches existe depuis trois décennies, c'est seulement ces dernières années que l'on pressent réellement le potentiel de cette technologie. L'étendue des matériaux et l'accroissement des applications concrètes et possibles ont attiré l'attention de l'industrie mondiale.

L'industrie du bâtiment est aussi concernée par ce nouveau mode de fabrication. Plusieurs exemples de construction font aujourd'hui l'objet d'un retentissement médiatique mondial. Depuis plus de cinq ans, on voit naître une foultitude de projets autour de l'impression 3D du béton. L'ensemble des tentatives et des solutions adoptées dans les différents travaux ont permis de percevoir les difficultés de cette technologie et d'en évaluer le potentiel pour le matériau béton.

La présente étude de veille technologique est essentiellement concentrée sur la fabrication (d'objets, produits ou bâtiments) par la méthode de dépôt de béton par couches successives. Les difficultés et les points d'intérêt de cette technologie y sont exposés.

## Introduction

---

La médiatisation excessive de l'impression 3D complique la recherche bibliographique autour du sujet. Le nombre de documents sur la toile se compte en millions avec la publication d'une dizaine d'articles presse par heure. De l'historique de l'impression 3D aux études statistiques en passant par les articles scientifiques, les études stratégiques et les brevets ; les informations inondent la toile.

Afin de répondre au mieux aux besoins d'information de l'industrie du béton, la présente étude de veille s'est focalisée autour de trois grands axes : le matériau, le matériel (ou la machinerie utilisée) et enfin le produit final.

On essaye de répondre par cette organisation à trois questions fondamentales autour de l'impression 3D :

- Comment fabrique-t-on un produit en béton par l'impression 3D ?
- Quel type de béton est compatible avec l'impression 3D ?
- Quels sont les enjeux et l'intérêt de cette technologie pour l'industrie du béton préfabriqué ?



# 1. Présentation de l'impression 3D

Avant d'aborder le sujet de l'impression des bétons, il est nécessaire d'acquérir une vision globale des procédés et des matériaux déjà utilisés.

## 1.1. Les procédés

« Fabrication additive » ou « impression 3D » ? ces deux expressions synonymes qualifient l'ensemble des techniques de fabrication couche par couche. La dénomination « fabrication additive » (Additive Manufacturing ou AM), utilisée par les grands noms historiques du secteur, est aujourd'hui principalement associée au monde industriel. Elle désigne l'ensemble des procédés de fabrication par ajout de matière, qui trivialement peuvent être scindés en deux familles :

- dépôt de matière en couches successives ;
- formage en couches successives par solidification ou « liage » de la matière.

Des méthodes hybrides ou dérivées de ces deux grands principes existent et sont présentées dans la suite.

### 1.1.1. Dépôt de matière en couches successives

L'idée maitresse est le dépôt de matière en strates. Les technologies diffèrent en fonction des caractéristiques des matériaux. La plus couramment répandue étant la FDM (Fused Deposition Modeling). La FDM étant une marque déposée, d'autres appellations sont utilisées, par exemple la FFF (Fused Filament Fabrication), utilisée sous licence libre (figure 1).

Il s'agit du procédé utilisé par une écrasante majorité d'imprimantes 3D personnelles. Son principe de fonctionnement est simple : un matériau, souvent présenté sous forme de bobine, passe à travers une buse d'extrusion chauffée entre 170 et 260°C. Il fond et se dépose sur un support par couches dont la finesse varie en fonction du matériel et des réglages (0,02 mm en moyenne). Une fois la première couche terminée, le plateau d'impression descend (ou la buse remonte) pour fabriquer la seconde et ainsi de suite.

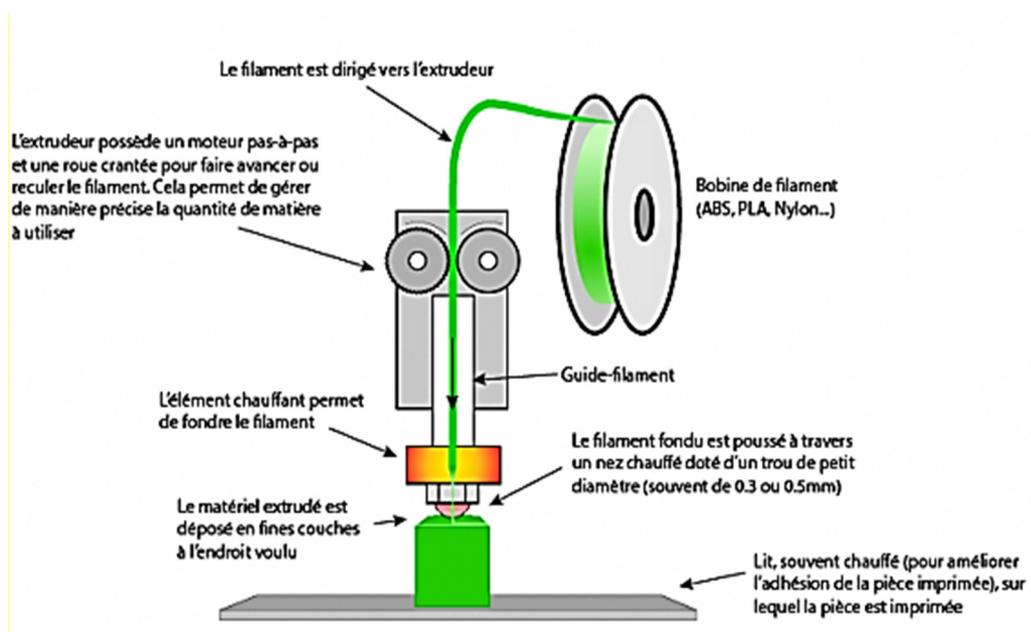


Figure 1 : Principe de fonctionnement de l'impression par la technique Fused Filament Fabrication [2]

## 1.1.2. Formage en couches successives

### 1.1.2.1. Formage en couches successives par solidification

Le principe général dans ce cas est l'utilisation de la capacité du matériau à se solidifier face à une source extérieure orientée : source lumineuse, laser ou autre ...

Dans le cas des polymères, on parle de photopolymérisation (solidification par la lumière). De cette idée est né le premier procédé d'impression connu sous le nom de stéréolithographie SLA (StereoLithograph Apparatus).

La stéréolithographie :

Dans un bain de polymère liquide, la source lumineuse solidifie la matière (selon la géométrie voulue) sur une strate. Le support (figure 2) descend et une deuxième strate est solidifiée. Le processus continue jusqu'à la formation d'une pièce complète.

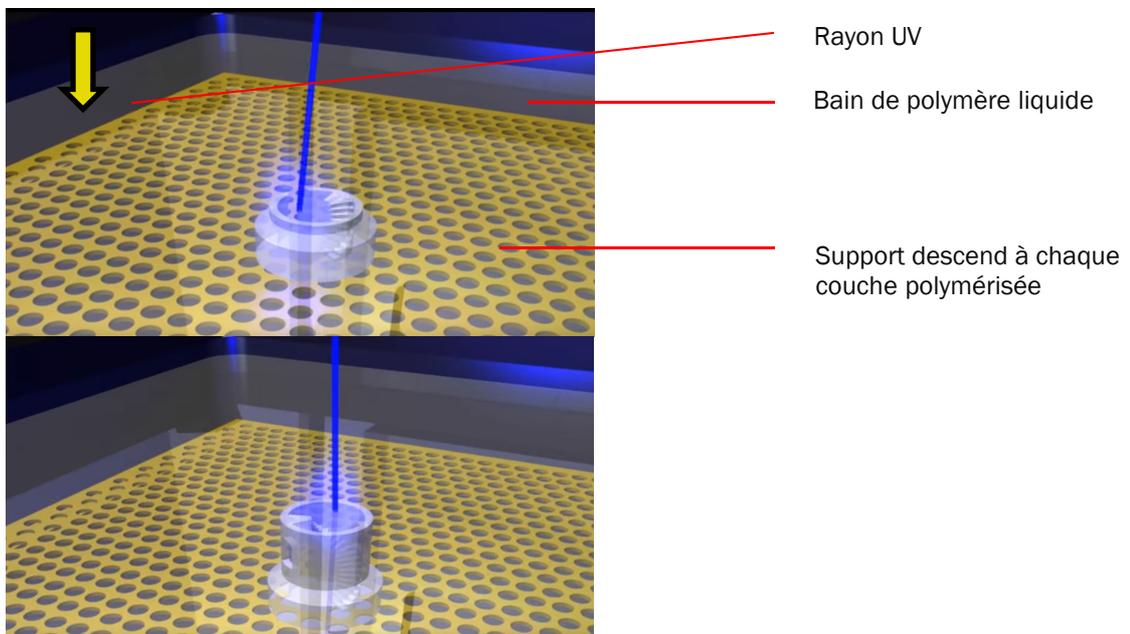


Figure 2 : Principe de fonctionnement de la stéréolithographie [3]

### 1.1.2.2. Formage en couches successives par liage

Dans ce mode de fabrication, on parle de liage de matière(s), généralement de la poudre, par fusion ou par d'autres techniques.

Le frittage laser de poudre ou SLS (Selective Laser Sintering) permet de fabriquer des pièces à partir de poudres constituées principalement de matériaux d'origine polymère. À l'intérieur de l'imprimante à frittage laser, un bras métallique coulissant étale de la poudre sur la plateforme d'impression (figure 3). Le laser chauffe et solidifie la poudre aux endroits définis par le fichier du modèle 3D. Lorsque le laser chauffe la poudre, la température atteint le seuil de fusion et permet ainsi de lier les particules de poudre entre elles. Le laser « dessine » ainsi des tranches de l'objet.

Une fois la poudre durcie, la plateforme d'impression s'abaisse d'une épaisseur de couche, le bras mécanique replace de la matière sur la plateforme et le laser passe à la couche suivante.

Ce processus est répété autant de fois qu'il y a de couches à produire (ce qui dépend de la taille de l'objet et de la résolution de l'imprimante).

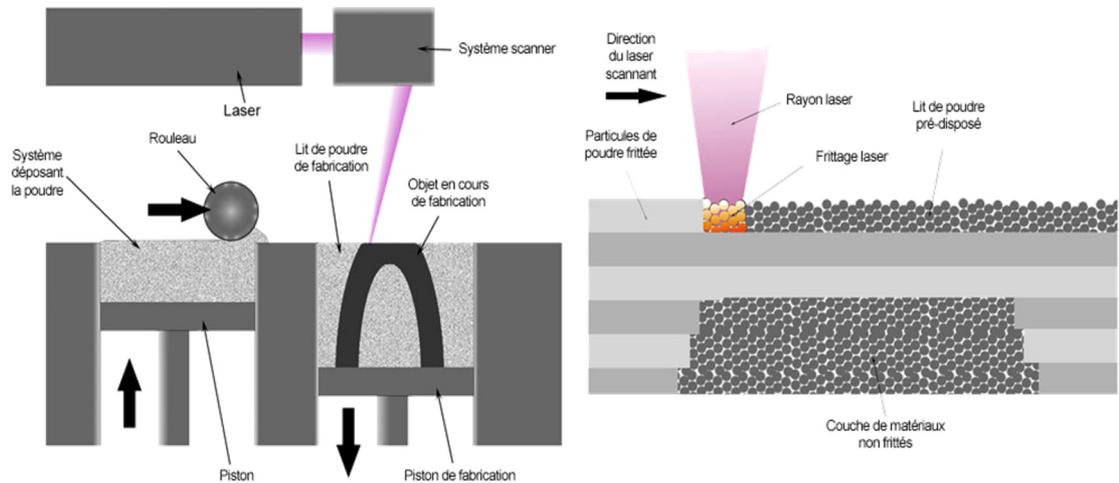


Figure 3 : Processus de frittage d'une poudre polyamide [4]

La résolution des pièces (l'épaisseur des couches solides) varie de 50 à 150 microns, en fonction de la précision de la machine utilisée.

Le frittage de poudre permet de produire des pièces dans une grande variété de matériaux.

En réalité, ce sont des technologies légèrement différentes (le SLS ne concerne que le frittage de poudre polyamide) mais dont le fonctionnement est très proche. On peut par exemple effectuer du frittage de poudre métallique - ou frittage métal - grâce à la technologie « Direct Metal laser Sintering » ou encore produire des pièces en céramique. [8]

### 1.1.3. Les méthodes dérivées et les acronymes

Partant de ces deux grands principes, les dérivés de procédés s'adaptent avec les matériaux utilisés, les précisions d'impression, les échelles de fabrication des produits et enfin la combinaison de matériaux.

Les acronymes et les dénominations anglophones de procédés sont multiples. Le tableau ci-dessous permet d'expliquer les différentes appellations.

		Désignation anglophone	Traduction et Principe	Matériaux
Formage par solidification de la matière	SLA	StereoLithograph Apparatus	Stéréolithographie (polymérisation avec une source uv)	Résines acryliques et époxy, ABS...
	DLP	Digital Light Processing	Polymérisation avec une source lumineuse	
	Polyjet [6]		Jet multimatériaux	
	2PP	Two Photon Polymerization	Procédé lithographique à 2 photons [7]	Même matériau mais à l'échelle nanoscopique
Formage par frittage de la matière	SLS	Selective Laser Sintering	Frittage sélectif par laser [8]	Polymères, métaux, composites...
	DMLS	Direct Metal laser Sintering	Frittage laser direct de métal [9]	Métaux
	EBM	Electric Beam Melting	Fusion de faisceau d'électrons [10]	Tout matériau conducteur
	3DP & 3DPM	Three-Dimensional Printing (Modeling)	Impression à jet de liant [11] : la matière qui vient encoller le matériau en poudre permet des impressions en couleur	Poudre fine recouverte de liant à base de cyanoacrylate
	MJM	Multi-Jet Modeling	Moulage à jet multiple [12]	Plastique [13]
Dépôt de couches successives	FDM	Fused Deposition Modeling	Dépôt de matière fusionnée	Polymères thermoplastiques (ABS, Polycarbonate, PPSF pour polyphenylsulfone, et ULTEM) [14]
	FFF	Fused Filament Fabrication	Fabrication par filament en fusion	Polymères [15]
	MPD	Molten Polymer Deposition [16]	Dépôt de matière fondue [17]	Polymères et métaux

Tableau 1 : Index des dénominations des techniques de l'impression 3D

## 1.2. Les logiciels

Outre le fonctionnement de l'imprimante 3D en elle-même et des différentes techniques [17] existantes, il est important d'assimiler et de bien comprendre les différentes étapes de préparation qui précèdent la phase d'impression. En effet, l'impression 3D commence par un fichier numérique ou un modèle virtuel 3D. Ce dernier est ensuite converti en un format STL (Standard Tessellation Language – tessellation/pavage) qui lui-même peut être transformé par « tranchage » en une superposition de surface.

Les surfaces définissant les couches successives établies, il suffit alors de programmer les vitesses d'avance, proposées par l'imprimante, lors de la phase de dépôt et/ou de frittage pour fabriquer la pièce.

### 1.2.1. La modélisation 3D

Il est possible de récupérer un modèle 3D (figure 4) par modélisation, par scan ou en le téléchargeant directement le fichier de données sur une plateforme.



Figure 4 : Modélisation d'une structure [18]

La première méthode est la modélisation. Il existe un large éventail de logiciels que l'on peut répartir en trois grands groupes [18] :

- les modeleurs volumiques (types Solid Edge, CATIA et Solidworks) ;
- les modeleurs surfaciques (Autodesk Inventor) ;
- les modeleurs paramétriques (OpenSCAD et Rhinocéros).

Quel que soit le modeleur, outre le fait de pouvoir travailler des formes géométriques complexes, il est également possible de jouer sur les couleurs, les textures, la luminosité... . Le choix du modeleur se fera en fonction de la nature de l'objet, de son utilisation (sculpture, pièce mécanique, architecturale...) mais aussi du budget.

La deuxième méthode consiste à scanner l'objet que l'on souhaite imprimer avec un scanner 3D. On distingue quatre grandes familles de scanner :

- les scanners à lumière structurée ;
- les scanners laser ;
- les scanners stéréoscopiques fonctionnant avec deux systèmes de caméras vidéo ;
- la kinect : il s'agit d'une petite caméra qui détecte les mouvements et les images.

La troisième méthode, la plus simple, est de récupérer directement le fichier sur une plateforme de partage. Il existe une multitude de sites web proposant gratuitement ou pas ce genre de modèles. On peut déjà citer parmi les sites français, Sketchfab, Sculpteo. Du côté des sites étrangers le choix est bien plus vaste... On retrouve Thingiverse, la librairie en ligne

de l'américain Makerbot., 3D Warehouse la fameuse banque d'images de Sketchup Google, Shapeway, Cubify créée par le fabricant 3D Systems.

Le fichier modèle est ensuite converti au format STL (inventé par 3D Systems) qui permet de transmettre la géométrie de surface de l'objet. Le modèle est découpé en plusieurs tranches (tranchage/slicing). L'épaisseur de chaque couche définit ainsi la résolution de l'objet final. En général, chaque imprimante dispose déjà de son propre logiciel de tranchage intégré, parmi les plus courants, on retrouve Cura, Markerware, KiSSlicer, Slic3r, ReplicatorG... Le fichier tranché se fera exclusivement dans le format G-code qui est un langage de commande presque universel pour les machines d'usinage à commande numérique.

Dans le cas de l'impression par FDM, l'ajout d'une grille de fabrication ou d'un échafaudage (figure 5) est préconisé afin de soutenir l'objet si nécessaire. Les logiciels de tranchage déterminent l'emplacement de ces supports et la quantité de matière à déposer selon une trame bien précise pour pouvoir l'enlever facilement.



Figure 5 : Exemple de renfort imprimé [19]

## 1.3. Les matériaux

Aujourd'hui, il est possible de réaliser des objets par fabrication additive avec différents matériaux. Les procédés précédemment présentés sont déclinés en fonction d'une ou de plusieurs matières ; l'impression multi-matériaux étant aussi devenue accessible.

### 1.3.1. Les matériaux plastiques

En tête d'utilisation des matériaux plastiques, on retrouve deux thermoplastiques : l'acide polylactide et l'acrylonitrile-butadiène-styrène utilisés sous forme de bobines dans l'impression par dépôt de couches FDM. Dans les matériaux plastiques « originaux », on retrouve aussi le nylon.

Les acétates de polyvinyle et les polystyrène à haute résistance aux chocs présentent un bon compromis entre coût et rapidité d'impression pour créer des structures de support.



Figure 6 : Exemple de bobines de matériaux thermoplastiques [19]

Les poudres polyamides (figure 7) et alumides sont utilisées dans le process d'impression par frittage laser Selective Laser Sintering (SLS).



Figure 7 : Exemple de structure en polyamide [19]

Enfin, on retrouve les polymères liquides (figure 8) photosensibles, auxquels s'applique la méthode SLA (tableau 1).



Figure 8 : Exemple de polymère liquide [19]

### 1.3.2. Les métaux

L'acier a été le premier métal utilisé en impression 3D. La société française Phoenix, récemment rachetée par le leader 3D System, avait développé les premiers brevets sur l'acier. Les procédés tels que le frittage sélectif laser (SLS), le frittage laser direct de métal (DMLS) ou encore le E-Beam (EBM) sont les process les plus communément appliqués aux métaux (tableau 1). Néanmoins, il subsiste quelques exceptions, à titre d'exemple, le gallium allié à l'indium permet une impression par FDM (dépôt de bulle de matière) de par sa caractéristique « thermodurcissable » et sa basse température de fusion (30 °C).

À l'état poudre et fabriqué via le process du frittage laser SLS, on retrouve plusieurs métaux : les alliages d'aluminium tels que l'AlSi10Mg ou les aciers inoxydables tels que le MS1, le PH1 ou encore le StainlessSteel GP1. Les alliages de titane, de cobalt, de chrome et même de métaux précieux sont aussi utilisés.



Figure 9 : Poudre de fer et d'aluminium et structure métallique imprimée [19]

La société allemande EOS est le premier fournisseur mondial d'équipements, de matériaux et de solutions dans le domaine de la technologie de frittage laser.

### 1.3.3. Les matériaux d'origine minérale

#### Les céramiques

Les céramiques adoptent deux principes de fabrication : la SLS et la FDM. Les produits nécessitent après impression un émaillage (à 1 000 °C).

Dans le cas de l'utilisation de la technique de frittage laser SLS, on utilise un sable de silicate et d'aluminium ou bien du quartz enduit d'une résine (phénolique).

Pour la technique par FDM, c'est l'argile qui est utilisée.

#### Le sable

Le sable est utilisé principalement pour la fabrication des moules de fonderie. Ce matériau a été imprimé pour la première fois en 1999 par l'entreprise ExOne qui propose, aujourd'hui, la plus grande imprimante de sable du marché, la S-Max, capable d'imprimer des pièces d'une taille maximum de 1,8 x 1 x 0,7 m. Les recherches universitaires se multiplient sur ce sujet. Une des plus innovantes est la machine réalisée par l'Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) – projet Stone Spray - qui imprime un produit avec du sable de plage mélangé à un liant, en utilisant le soleil comme source d'énergie.

#### Le marbre

Les fines issues de la découpe de cette pierre noble ont été utilisées pour l'impression 3D pour la première fois en 2013 par la société MarbleEcodesign. Le prototype de la machine (technique formage de couches successives par liage) a été fabriqué par impression 3D. Des résultats convaincants n'ont pas encore fait leur apparition sur le marché.

#### Le bois et la pierre

Conçus afin d'être utilisés avec des imprimantes 3D qui fonctionnent sur le principe de dépôt de matière fondue (FDM), ces matériaux sont disponibles sous forme de filaments. Celui du bois (LayWood) est composé de bois recyclé et d'un liant à base de polymères. Le filament de pierre (LayBrick) est composé de minéraux ressemblant à la poudre de craie. Mais le plus innovant réside dans le fait que les objets ont l'aspect (avec différents effets) et l'odeur du bois et, dans le cas de la pierre, on peut obtenir aussi bien des surfaces lisses que rugueuses, en faisant varier la température d'extrusion.



Céramique



Sable



Argile

Tableau 2 : Exemples de réalisations en matière minérale [19]

### 1.3.4. Les matériaux organiques

#### Cire, tissus biologiques, matières alimentaires

Dans la case « matériaux biologiques » on retrouve les cires fabriquées principalement par la méthode multi ou polyjet. Pour les matériaux alimentaires, on retrouve en tête de liste les chocolats et les pâtes à crêpes. Beaucoup d'autres possibilités sont aujourd'hui accessibles.

Enfin, il est désormais possible de parler d'impression 3D de tissus humains fabriqués à partir d'une structure en gel sur laquelle les cellules vivantes sont injectées pour commencer la construction du tissu biologique. La limite de cette technique est l'alimentation constante en sang pour permettre aux cellules de rester vivantes lors de l'impression. C'est un domaine de recherches en plein développement.

## 2. Impression 3D en béton

---

L'impression 3D gagne le terrain du bâtiment de jour en jour. Le nombre de projets et de réalisations ne cesse d'augmenter. Le chapitre suivant récence quelques réalisations et projets pertinents pour l'industrie du béton.

### 2.1. Les projets

#### 2.1.1. Bigdelta

À l'initiative de la société italienne WASP, le projet Bigdelta consiste à monter la plus grande imprimante 3D, permettant de fabriquer une maison sommaire en une semaine à partir d'argile et de la terre disponible sur place, de quoi abriter des populations sinistrées.



Figure 10 : Imprimante 3D géante (Bigdelta) [20]

#### 2.1.2. Poutre imprimée en béton

Toujours dans des perspectives humanitaires, un deuxième projet est initié par la même société WASP, l'objectif étant de fabriquer des poutres modulaires.



Figure 11 : Poutre imprimée en béton

### 2.1.3. Democrite

À l'initiative de la société XtreeE, l'objectif du projet est de fabriquer des murs structurels en béton haute performance BHP voir fibré (BFUP) via l'impression 3D.



Figure 12 : Mur imprimé en BHP [21]

### 2.1.4. Projet Impression Concrete

Premier projet d'impression 3D de béton OpenSource : la machine, les dessins d'exécution, les schémas de montage, et les logiciels utilisés pour son fonctionnement sont accessibles à tous et libres d'usage.



Figure 13 : Prototype de la futur imprimante [22]

Il s'agit d'une imprimante 3D, la RePlex 3D, fonctionnant par dépôt de matière (ciment, béton, plâtre, argile) et permettant d'imprimer des pièces de 6 m<sup>3</sup>. Afin de favoriser le développement de techniques de fabrication numérique, cette machine est conçue pour être montée et assemblée à partir de matériaux peu onéreux, permettant une reproductibilité à faible coût.

### 2.1.5. Process Contour Crafting

Ce projet [23-29] toujours au stade de développement consiste à fabriquer une imprimante 3D de grande taille, capable de construire une maison de 230 mètres carrés en moins de 24 heures.

Cette imprimante se compose de deux rails le long desquels circule une grue-portique. Cette dernière est équipée d'un bec qui déverse du béton par couche. L'idée est de rendre possible la réhabilitation rapide de quartiers ravagés par des catastrophes naturelles, ou tout du moins la construction en urgence de logements provisoires.



Figure 14 : Imprimante destinée à fabriquer des maisons

### 2.1.6. 3D Concrete Printing Project (3DCP)

Innovative Manufacturing and Construction Research Center développe des process [30-34] permettant de mettre en œuvre des éléments de construction complexes de manière automatisée. L'imprimante mise au point à l'université de Loughborough permet de fabriquer des éléments de construction (incluant même les fourreaux pour les différents réseaux (figure 21)), destinés à être assemblés. La résistance des produits annoncée est équivalente à 95 % de celle d'un béton banché. Le cabinet d'architectes Norman Foster Partners, avant-gardiste de la conception 3D dans l'architecture, participe à ces développements (figure 15).



Figure 15 : Réalisation d'une structure imprimée par l'université de Loughborough

### 2.1.7. Projet TailorCrete

Dirigé par l'institut danois de la technologie, le consortium se compose de Bekaert, Chalmers University of Technology, l'Université technique tchèque, DesignToProduction, Dragados, ETH Zürich, Gibotech, Grace, MT Højgaard, Pascal, Superpool, Unicon, Syddansk Universitet. TailorCrete [35] est un projet de recherche sur quatre ans mené dans le cadre du FP7 (Seventh Framework Program) de l'EU (European Commission Scientific Officer) avec en tout quatorze partenaires, dont les architectes de Superpool qui participent à la recherche en intégrant la robotique et l'automatisation des processus de construction en béton. Le but est de développer de nouvelles technologies industrielles pour réaliser des structures en béton complexes (figure 16) à moindre coût.



Figure 16 : Réalisations du projet [35-37]

### 2.1.8. Shanghai WinSun Decoration Engineering Co

L'imprimante utilisée par la société Shanghai WinSun (figure 17) mesure 32 mètres de long et 10 mètres de large pour 6,6 mètres de haut.



Figure 17 : Réalisation de maison en éléments préfabriqués imprimés en 3D

La machine réalise des éléments préfabriqués à base d'un béton composé d'agrégats récupérés sur les chantiers et recyclés [38].

### 2.1.9. Projet Constructions 3D

Constructions-3D [39] est un projet à impact social et collaboratif visant à fédérer les acteurs autour de la recherche d'un habitat nouveau pour l'humanité.

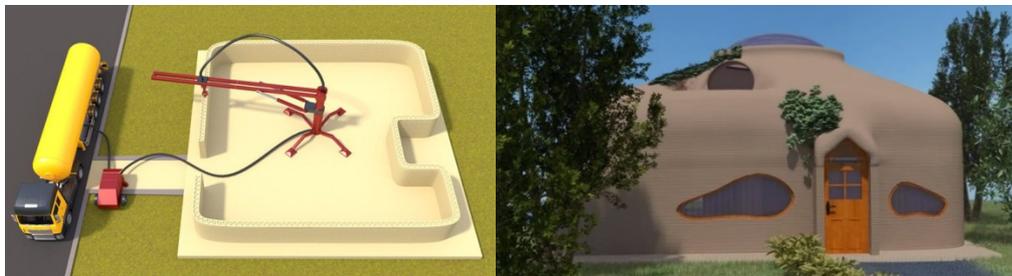


Figure 18 : Projet de construction 3D

Les associés espèrent monter leur premier prototype de « grue béton » d'ici un an et imprimer une première maison (figure 18).

### 2.1.10. Conclusion

Les différents projets visent à ce jour et pour la plupart, la construction de structures éphémères. Pour l'instant, la durabilité de ce type de construction n'a pas encore été évoquée. Néanmoins, l'objectif structurel durable n'est pas utopique. Des projets commencent à apparaître.

Le dernier exemple concret étant le Lewis Grand Hotel, situé aux Philippines (figure 19). L'entrepreneur Andrey Rudenko a utilisé l'impression 3D béton pour construire une extension mesurant près de 10,5 mètres de large par 12,5 mètres de long pour une hauteur de 3 mètres.

À la différence des constructions déjà réalisées par impression 3D, comme celles du chinois Winsun Decoration, l'extension du Lewis Grand Hotel constitue la première habitation ayant réellement vocation à recevoir des occupants [40-41].



Figure 19 : Photos de l'extension de l'hôtel Lewis Grand

## 2.2. Intérêt de l'impression 3D en béton

D'après la courbe (figure 20) des innovations technologiques émergentes définie par le cabinet Gartner en août 2013, l'impression 3D serait aujourd'hui dans la pente « d'illumination » et devrait accéder au plateau de productivité.

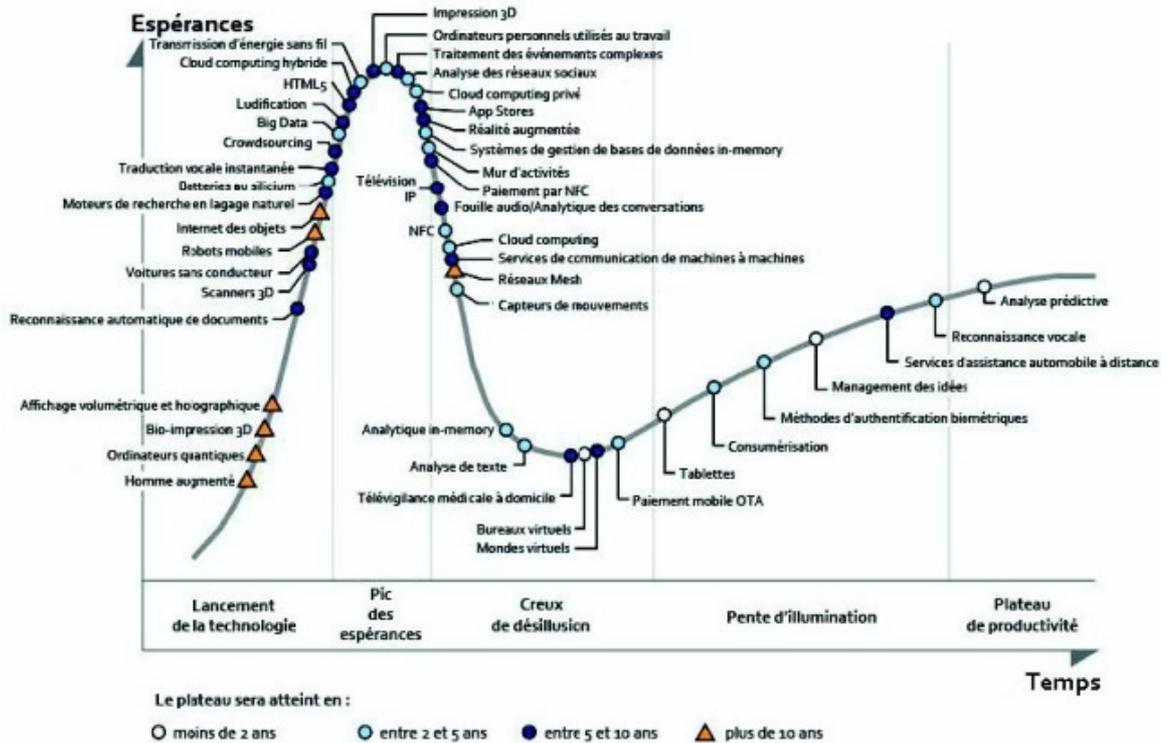


Figure 20 : L'impression 3D est tout en haut de la courbe des tendances, selon le cabinet d'études Gartner [41]

L'engouement pour l'impression 3D est alors justifié. En effet, les critères de viabilité se dessinent, la pertinence de l'innovation devient de plus en plus convaincante et la rentabilité financière est perceptible. Mais qu'en est-il du secteur du BTP ?

Il est clair qu'aujourd'hui les réglementations sismiques, thermiques, sécuritaires... européennes en vigueur constituent de réels challenges pour le développement de structures « résidentielles » entièrement imprimées en béton via la technique 3D.

Les architectes voient le problème autrement. Certains considèrent que l'impression 3D rendra l'industrie de la préfabrication et l'utilisation des moules obsolètes.

En effet, quelques architectes s'accordent sur l'idée que les produits classiques du bâtiment sont généralement rectangulaires (ou de formes simples) et ne sont pas conçus de manière optimale, autrement dit, il y a plus de matières qu'il n'en faut pour résister aux charges structurelles définies. Aussi, ils voient dans la technologie de l'impression un gain financier car l'ensemble « des pertes de matières », des coûts de transports et aussi des coûts imputés aux moules utilisés seront réduits. Enfin, la liberté architecturale et la « customisation » des ouvrages leur apparaît comme un plus non négligeable. Certains anticipent même une fabrication entièrement imprimable, avec l'incorporation du réseau de câblage électrique et d'autres composants du bâtiment (figure 21).



Figure 21 : Exemple de produit imprimé [30] avec des réservations

À plus long terme, ils voient l'arrivée de nouveaux matériaux « imprimables » destinés au bâtiment. À ce propos, on attire l'attention sur le fait que des matériaux à base polymère sont entrain de spolier des parts de marché du BTP.

Le dernier exemple étant les façades du pavillon temporaire de l'Europe Building au Marineterrein d'Amsterdam [43] où le bâtiment est fabriqué en bioplastique entièrement recyclable.



Figure 22 : Photo de la façade du pavillon temporaire de l'Europe Building au Marineterrein d'Amsterdam

Les experts du bâtiment font preuves de pessimisme. Ils signalent quelques déficiences de cette technique liées à la création de points de faiblesse entre les couches déposées, à la durabilité des constructions et indéniablement au coût de mise en œuvre (matériau, matériel, installation...).

Les produits classiquement utilisés comme les poutres, les chapes, les dalles... sont plutôt perçus comme des produits simples à fabriquer, donc abordables (en usines ou coulés sur place) et ne nécessitent pas l'utilisation de l'impression 3D. Pour cette raison quelques connaisseurs du bâtiment (exemple : Mr, Wolfram Schmidt-Dr Ing Bam-Federal institue for materials, research and testing, Germany) considèrent que l'impression 3D en béton restera sur un marché de niche.

Finalement, l'ensemble des avis convergent sur l'apport architectural qu'offre cette technologie. L'impression 3D, dans le secteur du bâtiment, est encore en phase d'évolution, mais elle ne peut en aucun cas être sous-estimée (Journal italien In concreto).

D'ailleurs, les grands du BTP s'y intéressent de près. La stratégie de l'innovation par l'impression 3D permet de se distinguer et d'asseoir une certaine notoriété technologique.

La course au leadership dans le domaine de la construction a déjà commencé. Même si la communication autour du sujet est timide et chez certain interdite, voici quelques extraits intéressants :

[44] : « Bouygues Construction, à travers sa filiale Norpac, a démarré en début d'année 2015 un partenariat avec l'école Centrale de Lille. Son objectif : travailler les applications possibles de ces technologies sur nos chantiers. Les premiers tests sont attendus début 2016 (pas encore de retour). L'ambition étant d'être en mesure de construire un premier ouvrage en site occupé dans les cinq ans ».

[45] : « À LafargeHolcim, nous savons que l'innovation est permanente et rapide. Par exemple, les technologies numériques et l'impression 3D pourraient révolutionner l'industrie de la construction et de nos marchés dans les années à venir. Pour vous assurer que LafargeHolcim reste en tête du peloton, nous avons des ressources et des capacités dédiées au suivi des dernières innovations » (voir aussi le partenariat avec XtreeE).

[46] : Extrait de l'interview de Mr Bourdon (Directeur général adjoint Vicat France) « .... Un autre thème qui nous intéresse beaucoup, nous connaissons l'exemple de l'aéronautique qui a réussi à réduire significativement la masse de ces avions grâce à l'impression 3D, nous avons les ingrédients pour faire une encre qui soit compatible avec l'impression 3D, la seule chose qui nous manque se sont les bonnes idées pour réduire la masse de béton pour les objets ; que ce soit des objets d'art ou des objets structurels... ».

[47] : « Tel un mélange pour mortier : Sika a aidé l'UT de Graz pour l'installation du système de pompage MiniShot (figure 23), les premiers essais en laboratoire, les tests de diagnostic des pannes pour la détection des problèmes les plus courants liés au pompage, la résolution des problèmes par conférence téléphonique et l'ajout d'une buse spéciale pour l'accélérateur Sigunit® (un produit chimique visant à réduire le temps de prise du mortier afin d'obtenir une résistance à la compression précoce plus élevée). La conception du mélange était un volet crucial de l'assistance technique, car il devait permettre le pompage du matériau extrudé au travers d'une petite buse. Le mélange était ainsi composé de ciment, d'un superplastifiant (Sika® ViscoCrete®), de filler thixotropique (SikaThixo-14 VP), de sable de 0-1 mm et d'eau. Il pouvait être qualifié de mélange de mortier étant donné la petite taille des agrégats utilisés ... ».

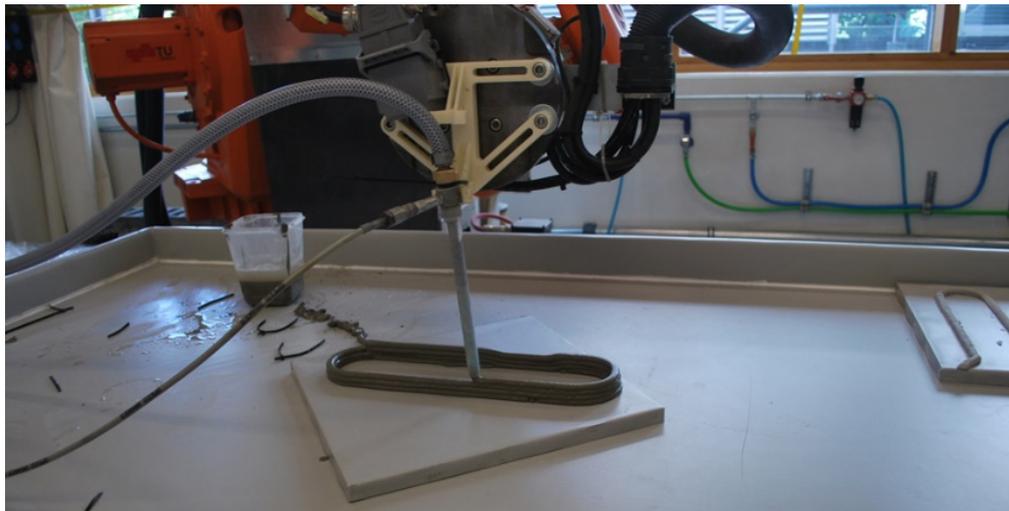


Figure 23 : Photo d'essai d'impression avec le système de pompage MiniShot issue de la collaboration entre Sika et l'UT de Graz [47]

## 2.3. Les procédés d'impression 3D du béton

Les procédés d'impression 3D peuvent toucher directement, ou indirectement le matériau béton. En effet, outre les process destinés à imprimer des objets ou des structures en béton, il existe d'autres utilisations dites « indirectes » de l'impression 3D du béton ; à titre d'exemple, on peut citer l'utilisation de l'impression pour la fabrication des moules et des coffrages.

### 2.3.1. Procédés d'impression 3D « direct » du béton

Il existe deux techniques pour fabriquer des structures en béton.

La première, et la plus répandue, pour le matériau béton (tel qu'il est connu dans l'industrie du béton) est le dépôt de couches successives. Cette technique est aussi appliquée sur le béton composite (figure 24) (thématique non traitée dans ce rapport).



Figure 24 : Béton composite imprimé [48]

La deuxième technique, plus rare traite d'autres matériaux d'origine minérale qui s'apparentent de près (ou de loin) au béton. La technique utilisée est le dépôt de couches

successives par liage. Le liant permettant d'assembler la matière minérale est rarement issu d'une base cimentaire, il est généralement d'origine polymère.

Bien évidemment, des variantes ont déjà fait leur apparition sur le marché. Citons à titre d'exemple (figure 25) le dépôt par projection de couches successives d'un matériau dédié au bâtiment (composition non communiquée).



Figure 25 : Exemple de matériau composite déposé par projection [49]

#### 2.3.1.1. Dépôt de couches successives

Le dépôt de béton par couches successives est une technique fortement inspirée de l'extrusion telle qu'elle est connue par l'industrie de la préfabrication (figure 26) à la différence, que l'extrusion n'est pas uniquement linéaire.



Figure 26 : Exemples de procédé d'extrusion [50 et 51]

Dans le cas de l'impression par couches successives, le process (figure 27) nécessite :

- un robot permettant de guider le dépôt de couche ;
- un réceptacle pour la matière déposée (le réceptacle peut aussi être mobile) ;
- un logiciel permettant de piloter le robot et de synchroniser la vitesse d'extrusion à la vitesse d'avance ;
- une buse ;
- un dispositif d'extrusion ;
- un béton extrudable.

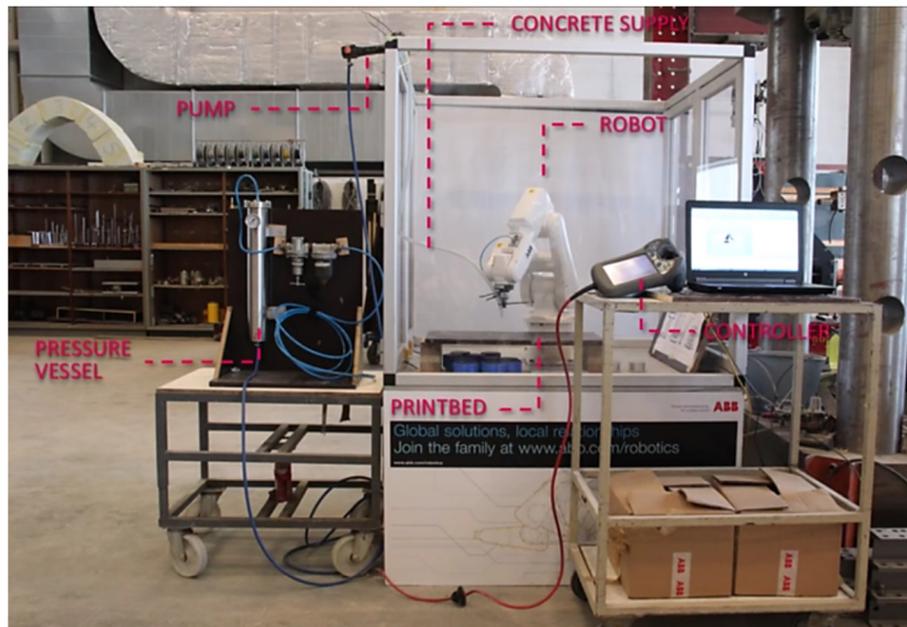


Figure 27 : Composants d'un moyen d'impression 3D de béton [52]

### Le robot

Lors d'un process d'impression, le robot a pour fonction de guider la buse selon la trajectoire et la vitesse définie avec la précision disponible.

Cet acteur du process ne présente plus aucun secret de nos jours, les robots sont largement utilisés dans différents domaines.

Pour les besoins du process d'impression, il est possible d'utiliser des robots dits cartésiens (translation suivant les trois axes de l'espace - figure 28) ou des robots cylindriques (1 degré de liberté en rotation en plus - figure 29) ou sphériques (2 degrés de liberté en rotation supplémentaires - figure 30).



Figure 28 : Exemples de robots cartésiens [54]

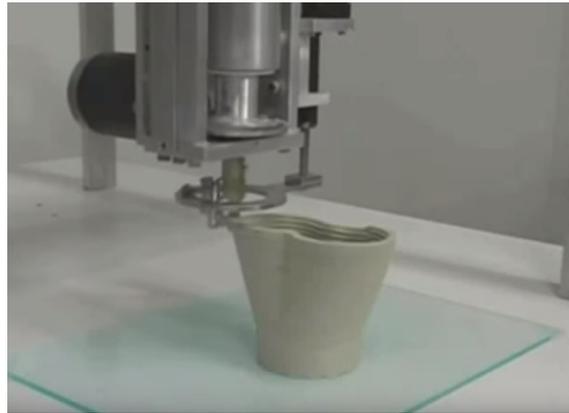
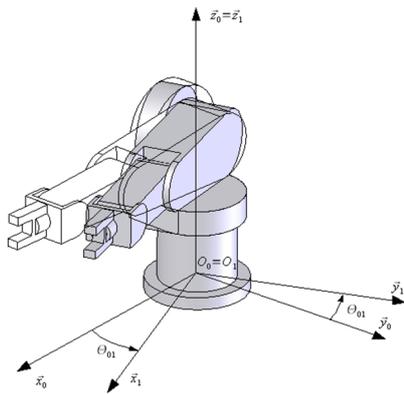


Figure 29 : Robot cylindrique [53]

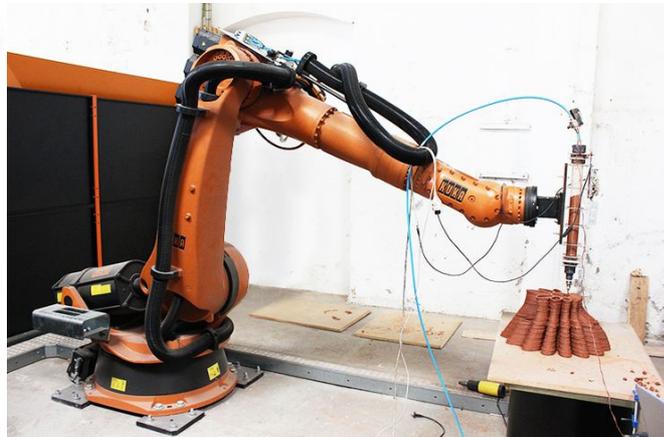


Figure 30 : Robot sphérique [55]

Aussi, les robots parallèles appelés hexapodes ou « delta » arrivent sur le marché de l'impression : pour exemple, le Bigdelta (figure 31) de la société italienne WASP. Ce moyen d'impression est constitué de trois bras articulés formant des parallélogrammes qui permettent de décrire la trajectoire dans l'espace du système d'apport du béton.



Figure 31 : Robot parallèle Delta de la société WASP [20]

Finalement, le choix du robot est défini par un couple prenant en compte la complexité des géométries à réaliser et le coût.

On rappelle que le robot applique les consignes définies dans le logiciel de pilotage.

### Le logiciel

Les logiciels permettant de passer d'une conception 3D à un programme pilotant le dépôt de couches existent et sont largement maîtrisés. Le codage est très similaire à celui utilisé pour les machines d'usinage à commande numérique (figure 32). La difficulté n'est pas d'ordre informatique mais plutôt du domaine de l'extrusion et du matériau béton. En effet, le point le plus important est la maîtrise de la vitesse d'avance de la buse avec la vitesse d'extrusion et les variations du béton, pour aboutir à une strate homogène (malgré la complexité de la géométrie). Le risque est d'avoir des zones de la strate insuffisamment remplies, à cause d'un angle pris à une forte vitesse d'avance, ou au contraire, des zones trop remplies à cause d'une élévation de strate prise à faible vitesse.

Aussi, la température du béton et son homogénéité peuvent lourdement modifier sa rhéologie et la qualité du produit. Les imprimantes, ou finalement les extrudeuses, deviennent de plus en plus équipées de capteurs (rhéologie, hygrométrie...) communiquant directement avec le logiciel (figure 32) et permettant d'ajuster en temps réel les différentes vitesses.

On rappelle que c'est toujours au programmeur de définir et de caler l'ensemble des paramètres.

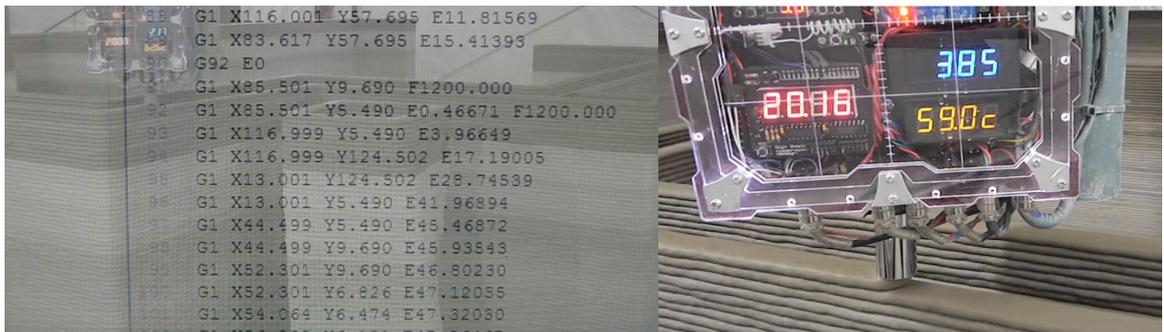


Figure 32 : À gauche le code définissant la trajectoire du robot (code identique à la CN d'usinage). À droite un exemple de données (température, pression...) pouvant être synchronisées avec le logiciel [56]

### Le réceptacle ou le plateau

La partie permettant de recevoir le béton constitue le repère plan et définit le point zéro du robot. Cette dernière doit être parfaitement horizontale au risque de dévier les repères du robot. Le réceptacle peut aussi être mobile (figure 33) ou même piloté par un robot. Ainsi, la buse de sortie du béton est fixe et la forme est décrite par le support mobile.

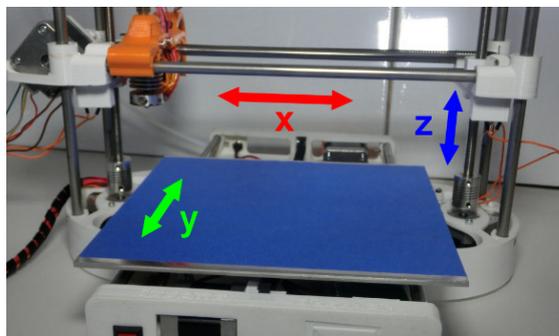


Figure 33 : Plateau mobile [57]

### La buse

La buse a un rôle primaire d'assurer la sortie du béton sans bouchon et sans porosité (figure 34). Le diamètre et la géométrie de la buse dépendent fortement des paramètres matériau.



Figure 34 : Exemple de buse d'extrusion [58-59] machine conçue par Andrey Rudenko



Figure 35 : Exemple de buse basique [60]

Sa deuxième fonction plutôt secondaire (pour le moment) est d'assurer un « micro talochage » en surface et parfois sur les côtés visibles de la pièce pour effacer au mieux l'effet de strates.

Plusieurs innovations (figures 36 et 38) voient le jour en ce moment concernant cette partie du système, on parle alors de contrôle de l'extrusion.

À noter que les buses à profil variable permettent plus aisément de réaliser des structures en dôme ou en cône (figure 37).

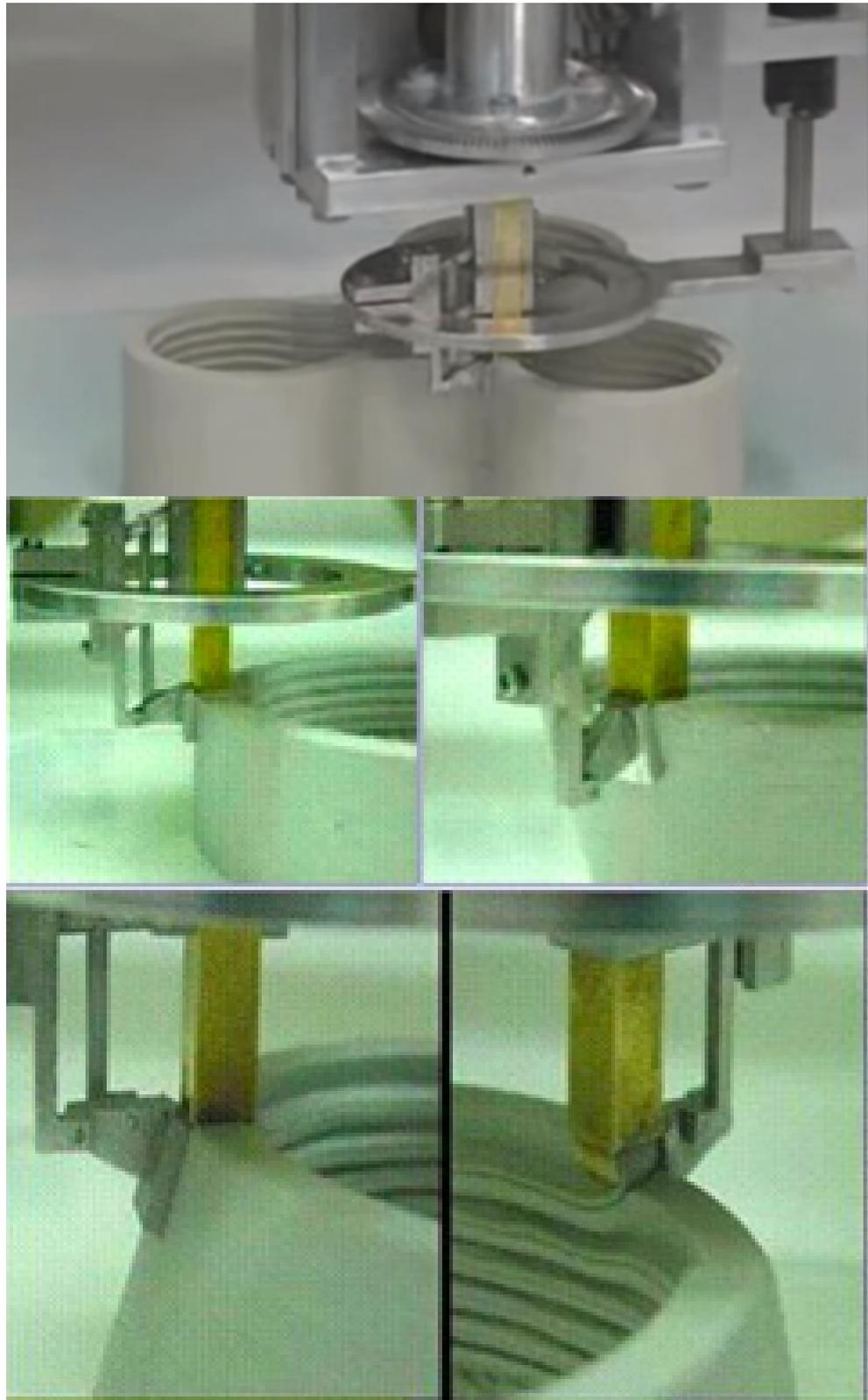


Figure 36 : Buse avec un profil en angle droit permettant de talocher les couches [53]

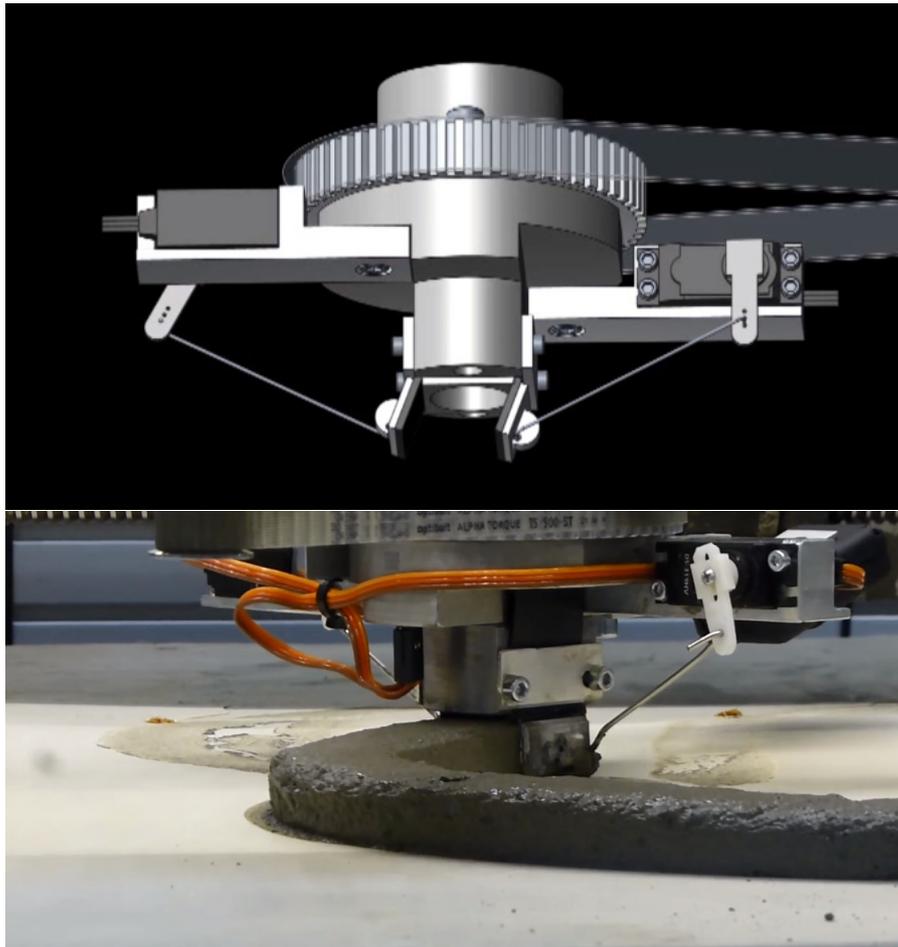


Figure 37 : Sortie de buse à profil variable [61]

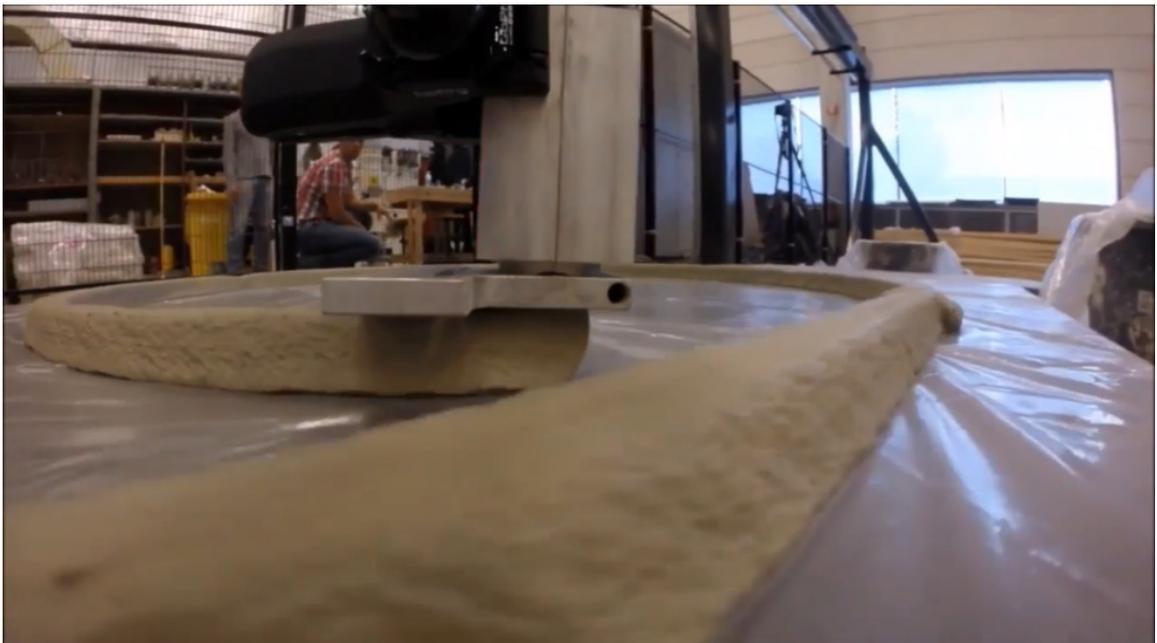


Figure 38 : Buse avec talochage de strate pour préparer l'arrivée de la couche supérieure [62]

### Le dispositif d'extrusion

L'impression du béton nécessite de préférence un apport continu en béton ; il est aussi possible de faire des arrêts d'extrusion, mais l'expérience montre qu'après un arrêt (d'un certain temps dépendant de l'évolution rhéologique du béton) le premier centimètre devient plus poreux que la suite de la matière extrudée. Aussi, le risque de création de point de faiblesse à la jonction (après arrêt) est plus important.

Pour pouvoir extruder en continu sans à-coups et sans arrêt, le meilleur outil et le plus utilisé est la vis sans fin (figures 40 et 41). En deuxième position, on retrouve les pompes et les systèmes discontinus à vérin. Les pompes peuvent être à air comprimé, péristaltique ou à rotor...

Pour décrire le process de fabrication et ses évolutions, on prend en exemple la machine Bigdelta de la société WASP (figure 39). On comprend rapidement le fonctionnement au vue des photos suivantes. Le système est composé de trois bras articulés qui guident le dépôt de béton, d'une trémie, et d'un axe central tournant.



Figure 39 : Exemple de moyen d'extrusion simple [63]

L'axe central est équipé d'une vis sans fin qui pousse le béton vers la buse. Suivant la taille de la trémie, l'axe peut être aussi équipé de pales pour maintenir la rhéologie du béton (figure 40). L'arrivée du béton peut aussi s'effectuer via une ouverture adjacente à la vis (figure 41).



Figure 40 : Zoom sur le système à vis sans fin [63]

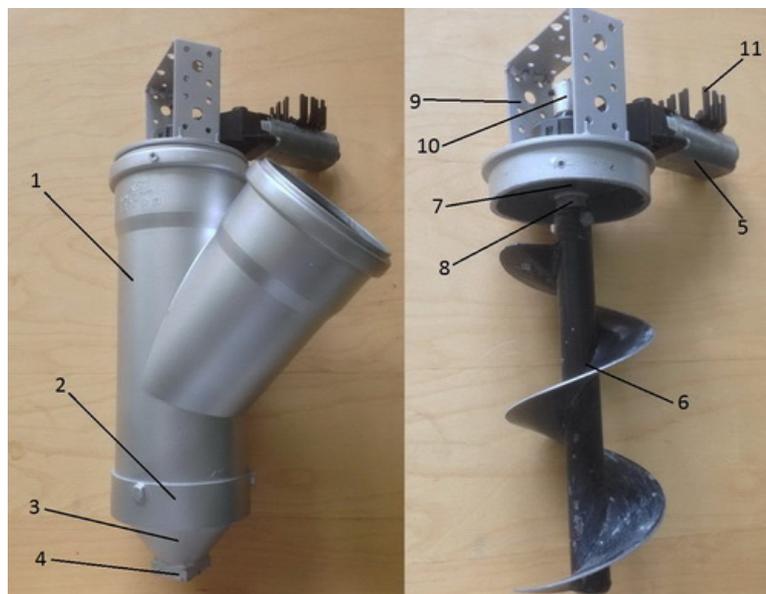


Figure 41 : Nomenclature d'une buse prototype « maison » équipée de vis sans fin [64] :  
 1 : PVC tuyau de Y de plomberie , 2 : Bouchon de tuyau PVC, 3 : Support de buse imprimé en 3D, 4 : Buse remplaçable, 5 : Moteur d'essuie-glace , 6 : Vis sans fin , 7 : Tuyau en PVC cap ,  
 8 : Couplage du moteur , 9 : Support de montage de la tête d'impression, 10 : Plat de montage du moteur

Dans le cas de l'utilisation de pompe, le tuyau est directement attaché au robot qui décrit les trajectoires. La pompe pilote alors la vitesse d'extrusion et est directement connectée au logiciel d'impression (figure 42).

Des systèmes combinés pompe/vis sans fin existent. La pompe peut être utilisée uniquement pour remplir une trémie et l'extrusion se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin, ou la pompe fournit une « pré-pression » d'extrusion qui est complétée par la vis sans fin en bout de buse.

Le dernier système étant assez complexe à piloter.



Figure 42 : Exemples de systèmes d'extrusion via une pompe [52, 62, 63]

### Un béton extrudable à prise rapide

Dans le cas des bétons utilisés pour l'impression 3D, les critères prédominants sont l'extrudabilité et les temps de prise. Les travaux [68-78] mettent en avant la difficulté de la maîtrise simultanée de la rhéologie, du temps de prise et des résistances lors de l'utilisation de béton ou de mortier sans composés polymères (type résine ou autre). Aussi, la combinaison des adjuvants (accélérateur, agent de viscosité, parfois même retardateur dans le cas d'utilisation de ciment à prise rapide) nécessite de s'affranchir des problématiques de compatibilité et de stabilité de la formule. Le facteur coût de ces micro-bétons fortement adjuvantés est encore un frein au développement de cette technique. Dans le cas où les « bétons » sont mixés à d'autres composés d'origine polymère ou organique, la difficulté n'est plus d'ordre financier mais traitera plutôt de la durabilité de ces matériaux et de leur résistances mécaniques.

Les matériaux qui paraissent les plus pertinents pour le moment pour la fabrication additive sont les micro bétons (fibrés ou non) à hautes voir très hautes performances. Les études antérieures du CERIB [65-66] autour du sujet ont montré la faisabilité en terme d'extrusion et de prise rapide. Le calcul de rentabilité est encore à affiner dans le cas de l'impression 3D en fonction de la quantité de matière et de la plus-value esthétique.

## 2.3.2. Difficultés de procédés d'impression 3D du béton

Les différents essais et prototypes réalisés dégagent quelques difficultés souvent omises par les médias. Les principales sont :

- la faiblesse des liaisons entre couches déposées ;
- les difficultés d'extrusion : problème de bouchon, de régularité des strates et de dépôt ;
- la complexité de la formulation, accélération de la prise et coût du matériau.

### 2.3.2.1. Faiblesses des liaisons entre couches

L'adhésion entre les différentes strates est indispensable pour la pérennité de la structure. La première difficulté rencontrée à ce niveau est l'emprisonnement de l'air entre deux couches.

La deuxième concerne le moment de dépôt de la couche supérieure. En effet, si le béton est encore frais il y a un risque d'affaissement et si au contraire il est pris il y a un fort risque de décohésion.

Ce qui est omis et parfois avoué dans les différentes communications est l'incorporation (manuelle) de renforts entre les couches (figure 43).



Figure 43 : Mise en place de renforts métalliques, manuellement, pour assurer la rigidité de la structure, dans le cas du château d'Andreu Rudenko [58]

À titre d'exemple dans le cas des maisons imprimées, en 24 heures par Shanghai Winsun décoration design Engineering Co., des renforts treillis ont été intégrés entre les couches (figure 44).



Figure 44 : Recours aux renforts treillis pour rigidifier la structure [38]

Enfin, la faiblesse structurelle n'est jamais clairement annoncée. La majorité des communications de résultats d'essais annoncent les propriétés en flexion et en compression perpendiculairement aux sens des dépôts des strates (figure 45) et rarement dans les autres directions.



Figure 45 : Essais de flexion dans le sens perpendiculaire des strates [79]

### 2.3.2.2. Difficultés de l'extrusion

Il est certain que l'extrusion est directement liée à la qualité et la régularité du béton [67]. Les changements de conditions hygrométriques et thermiques affectent sensiblement ce type de béton encore plus quand la prise est accélérée.

Le premier problème est le bouchon ; problématique classique du pompage et de l'extrusion (figure 46).



Figure 46 : Dégagement du bouchon de l'extrudeuse [64]

Le deuxième problème, lié à l'impression 3D, est la régularité des couches. Il existe toujours un risque d'affaissement de la matière (figures 47 et 48) ou de formation de zone de surimpression à la reprise (figure 49).



Figure 47 : Le béton est plus fluide que la strate inférieure et coule [62]



Figure 48 : Affaissement des strates et formations de boursouffures [62]



Figure 49 : Exemple de sur-remplissage lors de la reprise d'impression [47]

L'ensemble des problématiques liées à l'extrusion ont été constatées lors de l'étude réalisée sur la production industrialisée à cadence rapide (tableau 3).

Cylindres sans fissure ni affaissement	
Apparition de fissures sur le cylindre	
Apparition d'un faible affaissement et de fissures	
Apparition d'un affaissement prononcé	

Tableau 3 : Problématiques d'extrusion rencontrées

### 2.3.2.3. Complexité de la formulation et accélération de la prise

L'avantage de l'impression 3D est la rapidité d'exécution. Pour se conformer à ces attentes, il est essentiel d'accélérer la prise afin de déposer les couches sans affaisser la structure.

La maîtrise de la rhéologie d'un béton fortement accéléré et de sa DPU (DPU : Durée Pratique d'Utilisation) n'est pas aisée. Pour pouvoir fabriquer vite et grand, il faut alimenter constamment la trémie (multiplication des gâchées) de l'extrudeuse avec un béton reproduit à l'identique.

La deuxième option est d'introduire un accélérateur de prise en sortie de buse tout en assurant une homogénéité du mélange (méthode compliquée).

Aussi, formuler un micro-béton extrudable, avec une prise accélérée, satisfaisant des performances mécaniques honorables, à bas coût, est un défi technique.

À ce propos, la littérature sur la composition des bétons dédiés à l'impression 3D est très pauvre, car confidentielle.

### 2.3.2.4. Conclusion

La technologie de la fabrication additive de structure en béton est encore en évolution. Il reste des défis technologiques à relever pour en tirer le meilleur. Au vue de l'engouement mondial des centres de recherche et des entreprises du BTP, autour du sujet, les solutions ne tarderont pas à arriver.

### 2.3.3. Procédés d'impression indirectes

Les procédés d'impression 3D dits indirects constituent les techniques utilisant la fabrication additive comme support ou renfort à la réalisation de produit en béton. L'exemple le plus courant est la fabrication de moule pour le béton via l'impression 3D.

Le plastique est déjà utilisé pour les moules destinés aux moyens et aux petits produits (figure 50). Le gain financier, la flexibilité géométrique et la réactivité face à la demande sont les points forts de cette méthode.

Les moules sont fabriqués sur site à très faible coût. Selon les matériaux utilisés, ils peuvent même être recyclés.



Figure 50 : Exemple de moule de petite dimension imprimé [80]

Pour les grandes structures, la rigidité du plastique est insuffisante face aux contraintes imposées par le béton. D'autres solutions sont envisagées : par exemple la société XTreeE propose la fabrication de moule en argile (figure 51). Une fois le béton durci, l'argile se désintègre par lavage (haute pression) laissant apparaître le produit en béton.

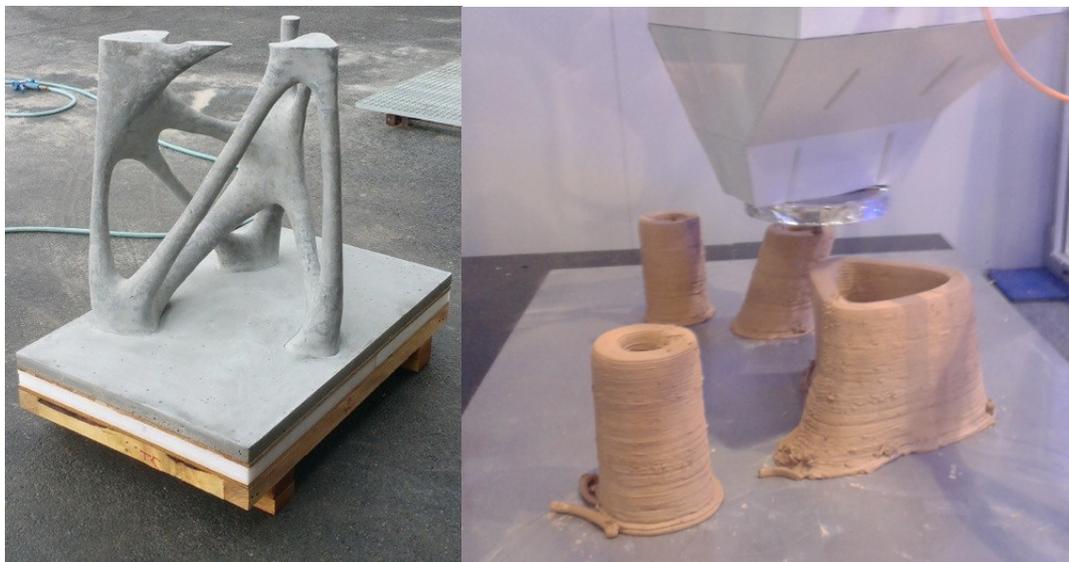


Figure 51 : Exemple de réalisation en béton avec des moules imprimés en argile

Les treillis qui jouent le rôle de renfort structurel sont des applications intelligentes pour le béton.



Figure 52 : Exemple de renfort imprimé [81]

## Conclusion

---

La courbe des tendances établie par le cabinet Gartner 2013 tient ses promesses vis-à-vis de la fabrication additive (en générale) qui est effectivement dans la « pente d'illumination » (figure 20). Néanmoins, l'impression 3D appliquée directement au matériau béton est un peu en retard par rapport à cette tendance. Plusieurs freins technologiques et réglementaires sont encore à dépasser avant de voir naître à plus grande échelle la fabrication de produit structurel en béton via cette technique.

Même s'il est encore tôt pour voir arriver des produits préfabriqués imprimés sur le marché, l'enjeu est de taille. Le marché de niche lié à cette technique est en pleine expansion. Les possibilités architecturales sont très attrayantes pour les architectes et les designers ce qui constitue un enjeu économique non négligeable. L'entreprise acquiert une certaine notoriété en terme d'innovation en développant des produits imprimés en 3D. Toutes les grandes sociétés du BTP (Bouygues, Vicat, LafargeHolcim,...) sont fortement impliquées. À court terme, l'application émergente et intéressante de la fabrication additive est une utilisation indirecte. Cette technique appliquée à la fabrication de moules, de renforts ou d'autres produits annexes au domaine de la préfabrication présente un intérêt fort pour notre industrie. Elle ouvre le champ à une production sur mesure avec des produits à géométrie complexe.



## Bibliographie

---

- [1] <http://www.lamelee.com/article/midenews/Eclairages/le-discours-d-investiture-de-barak-obama-a-lance-le-marche-de-l-impression-3d/>
- [2] <http://www.priximprimante3d.com/principe> adaptée de <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-technology/>)
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=eKk2vRysioE/>
- [4] <http://www.monunivers3d.com/1365>
- [5] [http://exposant.technotheque.fr/files/docs/technologie-impression-polyjet\\_1290785526.pdf/](http://exposant.technotheque.fr/files/docs/technologie-impression-polyjet_1290785526.pdf/)
- [6] <http://www.3dnatives.com/impression-en-3d-polyjet/>
- [7] <http://replica-3d.fr/impression-3d-a-lechelle-nanometrique/>
- [8] <http://www.3dnatives.com/technologie-dimpression-3d-sls-tombe-domaine-public/>
- [9] <http://www.3dnatives.com/frittage-laser-poudres-metalliques-on-vous-explique-tout/>
- [10] <http://www.3dnatives.com/impression-3d-faisceau-electrons/>
- [11] <http://www.a3dm-magazine.fr/limpression-3d-a-jet-de-liant-3dp-binder-jetting-ou-zprinting/>
- [12] <https://www.youtube.com/watch?v=R4sTyRlh1oI/>
- [13] <http://www.3davenir.fr/imprimante-3d-avenir/impression-3d/impression-modelage-a-jets-multiples-mjp/>
- [14] <http://www.3dnatives.com/depot-de-matiere-fondue-fdm/>
- [15] <http://www.3dnatives.com/fiddle-violon-minimaliste-imprimer/>
- [16] [https://idea.library.drexel.edu/islandora/object/idea%3A4478/datastream/OBJ/download/Head\\_Motion\\_Controls\\_for\\_3D\\_Head\\_Mounted\\_Display\\_Games.pdf/](https://idea.library.drexel.edu/islandora/object/idea%3A4478/datastream/OBJ/download/Head_Motion_Controls_for_3D_Head_Mounted_Display_Games.pdf/)
- [17] <http://www.primante3d.com/principe/>
- [18] <http://www.primante3d.com/modeliser/>
- [19] <http://www.priximprimante3d.com/materiaux/>
- [20] <http://www.wasproject.it/w/en/category/3d-printer-en/3d-big-delta-printer-en/>
- [21] <http://www.xtreee.eu/3d-printed-concrete-wall-1/>  
Clément Gosselin : Architectural diploma 2015 (ENSAPM-Digital Knowledge). En collaboration avec P.ROUX, R.DUBALLET, N. GAUDILLIERE. T/ Philippe MOREL & Jean Aimé SHU. Et en partenariat avec : Lafarge, Projet Démocrite, PIMM (CNAM), EZCT Architecture & Design Research, ENSAM, HAL
- [22] <http://impression-concrete.blogspot.fr> Concepteur : Olivier Grossat, prototypeur/

- [23] <http://www.contourcrafting.org/> Process Contour Crafting - University of Southern California (USA); Behrokh Khoshnevis
- [24] ZHANG Jing, KHOSHNEVIS Behrokh - Contour Crafting Process Planning and Optimization - Information and Computational Technology – 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2006)
- [25] KHOSHNEVIS Behrokh - Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies - Journal of Automation in Construction – Special Issue: The best of ISARC 2002, Vol 13, Issue 1, January 2004, p. 5-19. <http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/AIC2004-Paper1.pdf/>
- [26] KHOSHNEVIS Behrokh, Hwang Dooil, YAO Ke-Thia, YEH Zhenghao - Mega-scale fabrication by contour crafting - Int. J. Industrial and Systems Engineering, Vol. 1, n° 3, 2006, p. 301-320 <http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/mega1.pdf/>
- [27] KHOSHNEVIS Behrokh, Hwang Dooil - An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC) - 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction - ISARC 2005 - September 11-14, 2005, Ferrara (Italy) <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2005-03hwang.pdf/>
- [28] ZHANG Jing, KHOSHNEVIS Behrokh - Contour Crafting Process Plan Optimization - Part I: Single-Nozzle Case - ZHANG Jing Journal of Industrial and Systems Engineering, Spring 2010, vol. 4, n° 1, p. 33-46. [http://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J\\_pdf/111420100103.pdf/](http://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/111420100103.pdf/)
- [29] ZHANG Jing, KHOSHNEVIS Behrokh - Contour Crafting Process Plan Optimization - Part II: Multi-machine case - Journal of Industrial and Systems Engineering, Journal of Industrial and Systems Engineering, Summer 2010, Vol. 4, n° 2, p. 77-94. [http://www.sid.ir/En/VEWSSID/J\\_pdf/111420100201.pdf/](http://www.sid.ir/En/VEWSSID/J_pdf/111420100201.pdf/)
- [30] Innovative Manufacturing and Construction Research Center, Loughborough University, UK : <http://www.freeformconstruction.com/>  
Chercheurs : Richard Buswell et Simon Austin
- [31] LIM, S., LE, T., WEBSTER, J., BUSWELL, R., AUSTIN, A., GIBB, A., THORPE, T., "Fabricating construction components using layered manufacturing technology", Global Innovation in Construction Conference 2009 (GICC'09), Loughborough University, Leicestershire, UK, 13-16 September, 2009.
- [32] BUSWELL, R.A., THORPE, A., SOAR, R.C. and GIBB, A.G.F., "Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction", Automation in Construction, Vol. 17, Issue 8, pp. 923-929, 2008.
- [33] LIM, S., BUSWELL, R.A., LE, T.T., AUSTIN, S.A., GIBB, A.G.F. and THORPE, A., "Development in construction-scale additive manufacturing processes", Automation in Construction, Vol. 21, Issue 1, pp.262-268, 2012.
- [34] LIM Sungwoo, BUSWELL Richard, LE Thanh, WACKROW Rene, AUSTIN Simon Austin, GIBB Alistair, THORPE Tony - Development of a viable concrete printing process - 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2011), 29 June - 2 July 2011, Seoul, South Korea, p. 665–670.
- [35] <http://www.tailorcrete.com.>

- [36] WILLIAMS Nicholas, STEHLING Hanno, SCHEURER Fabian, OESTERLE Silvan, KOHLER Matthias, GRAMAZIO Fabio - A Case Study of a Collaborative Digital Workflow in the Design and Production of Formwork for 'Non-Standard' Concrete Structures - International Journal of Architectural Computing - Volume 9, Number 3/September 2011.
- [37] LLORET Ena, SHAHABB Amir R., LINUS Mettler, FLATT Robert J., GRAMAZIO Fabio, Kohlera Matthias, LANGENBERG Silke - Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication - Computer-Aided Design - Volume 60, March 2015, p. 40–49
- [38] <http://www.yhbm.com/index.php?siteid=3/>
- [39] <http://www.constructions-3d.com/> : Concepteurs : Gaël Collaro , designer 3D belge et Machines 3D
- [40] <http://www.3dnatives.com/>
- [41] <http://www.forbes.com/>
- [42] <http://www.gartner.com/newsroom/id/2825417/>
- [43] <http://www.batiactu.com/edito/un-batiment-bioplastique-recyclable-presidence-ue-43948.php/>
- [44] <http://blog.bouygues-construction.com/nos-innovations/limpression-3d-lavenir-construction/>
- [45] <http://www.lafargeholcim.com/rd-innovative-solutions/>
- [46] <http://www.innovandconnect.bnpparibas/>
- [47] [http://bel.sika.com/fr/group/Media/ambitions--revue-du-groupe-sika/ambitions18/concrete\\_team.html#sthash.k8cnxYKr.dpuf](http://bel.sika.com/fr/group/Media/ambitions--revue-du-groupe-sika/ambitions18/concrete_team.html#sthash.k8cnxYKr.dpuf)Source Sika Belgium
- [48] <https://www.youtube.com/watch?v=iKdYcLjNH2A/>
- [49] [https://www.youtube.com/watch?v=\\_YiPLjozLdU/](https://www.youtube.com/watch?v=_YiPLjozLdU/)
- [50] <http://portland.co.za/hollowcore/hollowcore-precaster-technology/>
- [51] <http://www.dowconstructionchemicals.com/>
- [52] [https://www.youtube.com/watch?v=snmXcBQv\\_kl/](https://www.youtube.com/watch?v=snmXcBQv_kl/)
- [53] [https://www.youtube.com/watch?v=JOIRI\\_Hm1Po/](https://www.youtube.com/watch?v=JOIRI_Hm1Po/)
- [54] <http://www.mse.umd.edu/sites/default/files/documents/undergrad/enma490/3D%20Cement%20Printing%20Final%20Presentation.pdf/>
- [55] <https://www.pinterest.com/pin/415879346816293844/>
- [56] <https://www.youtube.com/watch?v=zb3zuk1qNDk/>
- [57] <http://www.lesimprimantes3d.fr/test-dagoma-discovery-200-20150829/>
- [58] <https://www.youtube.com/watch?v=XX8JG1tqEM4/>

- [59] <http://3dprintingindustry.com/2014/08/27/finally-stands-andrey-rudenkos-3d-printed-concrete-castle/>
- [60] <https://www.youtube.com/watch?v=JF9-3ZgeZjU/>
- [61] [https://www.youtube.com/watch?v=1Pg4YVi\\_Q-M/](https://www.youtube.com/watch?v=1Pg4YVi_Q-M/)
- [62] <https://www.youtube.com/watch?v=DVLntKUamr0/>
- [63] <http://www.wasproject.it/w/en/concrete-beam-created-with-3d-printing/>
- [64] <http://3dprint.com/85754/diegel-3d-printed-furniture/>
- [65] J. Bresson, Faisabilité de l'extrusion pour la production des produits minces en micro-béton, Rapport CERIB (2006)
- [66] P. Rougeau, P. Francisco, Accélération du durcissement des BFUP – Exemples de produits réalisés en BFUP, Rapport CERIB (2005)
- [67] R. Alfani et G.L. Guerrini, Rheological test methods for the characterization of extrudable cement-based materials – A review, *Materials and Structures* (2005), 38, 239-247
- [68] K. De Weerd, D. Reynders, Combining plasticizers/retarders and accelerators, Katholieke universiteit Leuven et Norwegian University of Science and Technology (2006)
- [69] P. Ramge, H.-C. Kühne, Rheological Properties of Repair Mortars – Measurements with the Wuerpel-Device, 21th Conference « Rheology of Building Materials » (2012)
- [70] A. Kamen, Comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques, Thèse N° 3827 (2007)
- [71] M. Dierkens, Mesures rhéologiques et modélisation de matériaux en cours de prise, Thèse (2005)
- [72] S. Subasi, The effects of accelerator and retarder chemical admixtures on concrete setting time, *Technology* (2009), 12(1), 1-10
- [73] VALKENAERS Hans, JANSEN Dennie , VOET, André, VAN GYSEL Ann, FERRARIS Eleonora - Additive manufacturing for concrete: a 3D printing principle - Proceedings of the 14th euspen International Conference, june 2014, vol.1 p.139-142.
- [74] ZAK G., SELA M., PARK C. & BENHABIB B. - Layered-Manufacturing of Fiber-Reinforced Composites, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME*, Vol.121 (1999) p.448-455
- [75] LILLIMAN Mary, AUSTIN Simon, EDMONDSON Steve, CHRISTIE Steven - Rheological Control of Concrete for 3D Printing -
- [76] LE T.T., AUSTIN S.A., LIM S., BUSWELL R.A., LAW R., GIBB A.G.F., THORPE T. - Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete - *Materials and Structures*, 2012, vol. 45, n° 8, p. 1221–1232.
- [77] ZHOU X., LI Z., FAN M., CHEN H. - Rheology of semi-solid fresh cement pastes and mortars in orifice extrusion - *Cement and Concrete Composites* - Volume 37, March 2013, p. 304–311

- [78] LE T.T., AUSTIN S.A., LIM S., BUSWELL R.A., LAW R., GIBB A.G.F., THORPE T. - Hardened properties of high-performance printing concrete - Cement and Concrete Research, Volume 42, Issue 3, March 2012, p. 558–566.
- [79] <https://www.youtube.com/watch?v=Kj59D1nj1rg/>
- [80] <https://fr.pinterest.com/pin/411023903468094903/>
- [81] <http://www.3ders.org/articles/20151022-swiss-mesh-mould-3d-printing-and-in-situ-fabricator-for-construction-sites.html/>

RAPPORT DE VEILLE

## VEILLE TECHNO- LOGIQUE

KAÏS MEHIRI



/ Cerib - CS 10010  
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00  
cerib@cerib.com

### IMPRESSION 3D - FABRICATION ADDITIVE EN BÉTON

La fabrication additive est en pleine expansion dans différents secteurs industriels. Le procédé par impression 3D remplace déjà, dans certain cas, les fabrications classiques de produits via l'usinage ou le moulage. Se pose la question de l'impact de cette technologie sur les méthodes de fabrication traditionnelle des produits en béton. Ce travail, de veille technologique, vise à comprendre les points forts et les points faibles de cette technologie et d'apprécier son applicabilité et les enjeux dans le domaine du béton.

Après une introduction générale des principes d'impression 3D, le travail présenté se focalise sur la fabrication additive du béton. Des matériaux aux machines utilisés, une présentation et une analyse des différents procédés, des projets et des applications pertinentes sont proposées.

#### 3D ADDITIVE PRINTING IN CONCRETE

*Additive manufacturing is expanding in various industrial sectors. 3D printing process already replaces, in some cases, traditional manufacturing of products via machining or molding. The question arises of the impact of this technology on the traditional methods of manufacturing concrete products. The presented technological review aims to understand the strengths and weaknesses of this technology, to assess its applicability and challenges in concrete's field. After a general introduction to the principles of 3D printing, the presented work focuses on the additive manufacture of concrete. From materials to the used machines, a presentation and an analysis of the different processes, projects and relevant applications are proposed.*