

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : Généralités sur l'impression 3D et la fabrication additive.

1.1-Introduction	01
1.2-Définition	01
1.3-Historique	02
1.4-Domains d'application	03
1.4.1- Domaine d'architecture	03
1.4.2- Domaine de génie civil	04
1.4.3- Domaine de médecine	05
1.4.4- Domaine industriel	06
1.5- Avantages et inconvénients des techniques d'impression 3D	07
1.6- Les principaux concepts	07
1.7- Classifications des technologies d'impression	08
1.7.1- Extrusion de matériaux	08
1.7.2- Photopolymérisation (La stéréolithographie)	09
1.7.3- Fusion de poudres et application directe d'énergie	09
1.7.4- Injection de liant : Binder Jetting	10
1.7.5- Injection de matériau : Jetting	11
1.7.6- Lamination des feuilles	11
1.8- Vers l'impression 3D des matériaux à base cimentaire	12
1.8.1-La méthode extrusion/dépôt	13
1.8.2-Méthodes d'impression par injection dans un lit de particules	13
1.8.3-Méthodes d'impression alternatives	14
1.8.3.a) Coffrage glissant piloté : Smart Dynamic Casting	14
1.8.3.b) Injection imprimée Mesh Mould dans un grillage coffrage	14
1.8.3.c) Projection de béton sur un support mobile	15
1.9-Conclusion	16

CHAPITRE II : Les méthodes d'impression 3D en génie civil

2.1- Introduction	17
2.2- Méthodes d'impression par extrusion/dépôt	19
2.2.1- Procédé d'impression par extrusion/dépôt	20
2.2.2- Difficultés et limitations	21
2.3- Impression 3D par liaison sélective dans un lit de particules	22
2.3.1- Classification des procédés et stratégies d'impression sélective	23
2.3.1.a) Activation de ciment	23
2.3.1.b) Intrusion sélective	24
2.3.1.c) Injection de liant	25
2.3.2- Difficultés et limitations	26
2.4- Différents type robots	27
2.4.1- Big Delta, la plus grande imprimante 3D au monde	27
2.4.2- Les imprimantes 3D de bâtiments Contour Crafting	27
2.4.3- Apis Cor 3D printer	27
2.4.4- P1 BetAbram	28
2.4.5- BOD2 COBOD	29
2.4.6- MAXI PRINTER Constructions-3D	29
2.4.7- CyBe CyBe RC 3Dp	30
2.4.8- ICON Vulcan II	31
2.4.9- MudBots MudBots Concrete 3D Printer	32
2.4.10- Stroybot2	32
2.4.11- Batiprint3D 3D printer	33
2.4.12- XtreeE 3D printe	34
2.4.13- S-Squared ARCS VVS NEPTUN	35
2.5-Conclusion	37

CHAPITRE III : Les Béton imprimé et la conception des structures

3.1- Introduction	38
3.2- Compositions et propriétés des mortiers imprimables	38
3.3- Les caractéristiques du béton imprimé	39
3.4- Codes de dimensionnement	40
3.5- Stratégies de renforcement	41
3.5.1-L'utilisation de fibre	41
3.5.1.a) Impression 3D sur béton renforcé de fibres d'acier	42
3.5.1.b) Composite cimentaire à base de fibres PVA	43
3.5.2- Les renforts externes	44
3.5.3. Câble entraîné au sein du matériau extrudé	45
3.5.4-Les réservations	47
3.5.5. Envelopper des armatures préalablement mises en place	48
3.6. L'impression 3D et conception des structures	49
3.6.1- L'impression 3D béton : une aubaine pour les architectes	49
3.6.2- Vers des structures aux formes optimisées	51
3.6.3- Vers un passage du noir et blanc à la couleur pour les imprimantes 3D béton	53
3.7. Conclusion	53

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralités sur l'impression 3D et la fabrication additive

Figure 1.1	Modèles de construction (a) et de sculpture (b) réalisés par une imprimante 3D	03
Figure 1.2	Le musée Ordos et le Guangzhou dayi Village	04
Figure 1.3	Illustration des principales étapes du construction de bios	05
Figure 1.4	Exemple de prothèse	06
Figure 1.5	Fabrication des pièces avec impression 3D	06
Figure 1.6	Le processus d'impression 3D par dépôt de filament fondu	09
Figure 1.7	La technologie d'impression 3D Digital Light Processing	09
Figure 1.8	Le processus d'impression 3D par fusion directe de matière	10
Figure 1.9	Technologie d'impression 3D Binder Jetting (BJ) pulvérisation de liant	10
Figure 1.10	Technologie d'impression 3D Jetting (Injection de matériau)	11
Figure 1.11	Le processus d'impression 3D par lamination	12
Figure 1.12	Visualisation des différentes méthodes d'impression 3D	12
Figure 1.13	Dépôt de couches de mortier lors de l'impression par extrusion/dépôt	13
Figure 1.14	Séquence de réalisation de l'impression 3D par injection	13
Figure 1.15	Exemple de réalisations obtenues avec la technique du Smart Dynamic Casting	14
Figure 1.16	Réalisation du grillage coffrage par le robot soudeur	15
Figure 1.17	Structure obtenue après coulage du béton et étape de finition talochage	15

CHAPITRE II : Les méthodes d'impression 3D en génie civil

Figure 2.1	Un premier pont en béton imprimé en 3D aux Pays-Bas	18
Figure 2.2	Poteau 3D par Xtreee – Aix en Provence	18
Figure 2.3	Fosse d'inspection souterraine (XtreeE,2017)	19
Figure 2.4	Impression 3D de mortier par extrusion/dépôt réalisée en laboratoire	20
Figure 2.5	Décomposition en étapes élémentaires de l'impression 3D	21
Figure 2.6	Schématisation des techniques d'impression 3D par fabrication sélective	23
Figure 2.7	Schématisation de la méthode d'activation de ciment par élévation	24
Figure 2.8	L'imprimante 3D D-Shape utilisant la méthode d'activation de ciment	25
Figure 2.9	Schématisation de la méthode d'intrusion sélective	25
Figure 2.10	Éprouvettes imprimées par liaison sélective	26

Figure 2.11	Moule en sable réalisé par injection de liant par VoxelJet et pièce finale	26
Figure 2.12	Noyaux de moules de fonderie produits par fabrication additive	27
Figure 2.13	Imprimante 3D géante (Bigdelta)	28
Figure 2.14	Imprimantes 3D Contour Crafting	28
Figure 2.15	Apis Cor 3D printer	29
Figure 2.16	Schéma de la machine P1 BetAbram	30
Figure 2.17	P1 BetAbram	30
Figure 2.18	BOD2 COBOD	31
Figure 2.19	MAXI PRINTER Constructions-3D	31
Figure 2.20	CyBe CyBe RC 3DP	32
Figure 2.21	ICON Vulcan II	32
Figure 2.22	MudBots MudBots Concrete 3D Printer	33
Figure 2.23	Stroybot2	33
Figure 2.24	Batiprint3D 3D printer	34
Figure 2.25	XtreeE 3D printe	35
Figure 2.26	S-Squared ARCS VVS NEPTUN	35

CHAPITRE III : Les Béton imprimé et conception des structures

Figure 3.1	Pièce de rechange sciée, en béton renforcé de fibres et imprimé	42
Figure 3.2	Test CMOD (Crack Mouth Opening Displacement)	43
Figure 3.3	Impression avec composites cimentaires renforcés de fibre PVA	44
Figure 3.4	Eprouvettes PVA SHCC imprimées après essai	44
Figure 3.5	Exemple de renforts externes	45
Figure 3.6	Impression 3D du béton avec une cabine de renfort directement entraînée	46
Figure 3.7	Test de flexion sur poutre en béton imprimée en 3D avec armature de câble	47
Figure 3.8	Premier pont en béton imprimé MDM au monde pour vélos à Gemert	47
Figure 3.9	Passerelle réalisée en voussoirs imprimés	48
Figure 3.10	Exemple de renfort imprimé	49
Figure 3.11	Exemple de structures complexes réalisées par impression 3D béton	49
Figure 3.12	Réalisation d'une structure imprimée par l'université de Loughborough	50
Figure 3.13	La Dfab House	50
Figure 3.14	Réalisations du projet	51
Figure 3.15	Exemple d'application de l'optimisation topologique	51
Figure 3.16	Poteau support à structures poreuses réalisé par fabrication digitale	52
Figure 3.17	Structures réalisées en minimisant les efforts de traction dans le béton	52
Figure 3.18	Fabrication de murs en béton (blocs colorés) par la collaboration de deux robots	53

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II : Les méthodes d'impression 3D en génie civil

Tableau 2.1	Sélection d'imprimantes 3D de maisons	36
-------------	---------------------------------------	----

CHAPITRE III : Les Béton imprimé et conception des structures

Tableau 3.1	Caractéristiques des matériaux utilisés en impression 3D dans la littérature	39
-------------	--	----

LISTE DES ABREVIATIONS

CAO	: Conception Assisté par Ordinateur
FDM	: Fused Deposition Modeling
SLS	: frittage sélectif par laser
DLP	: laphoto polymérisation
Binder Jetting	: Projection de Liant
CMOD	: Crack Mouth Opening Didplacement
PVA	: alcool polyvinylique

La possibilité de générer un objet tridimensionnel depuis une simple image relève du rêve et de la science-fiction. Pourtant, depuis le milieu des années 1980 et les premiers brevets sur la fabrication additive et l'impression 3D, cette possibilité est devenue une réalité. Initialement réservée aux polymères, la fabrication additive aujourd'hui s'ouvre à plus de matériaux. Cette technologie est en parfaite adéquation avec les problématiques environnementales sociétales actuelles dans la mesure où elle permet d'une part une économie de matière pour la fabrication de pièces de géométrie complexe, et d'autre part d'envisager la fabrication « à la demande » de pièces de rechange.

Cette technologie, qui a été transférée par la suite à la construction, et donc au béton a connu de grosses avancées.

Ainsi, aujourd'hui, les méthodes de construction traditionnelles peuvent se trouver bouleversées par la 3^{ème} révolution industrielle et l'introduction de l'impression 3D.

En conséquence, la transposition au béton des méthodes de fabrication additive initialement développées pour les matières plastiques fait aujourd'hui l'objet de nombreuses études académiques et d'initiatives privées à travers le monde. Le nombre d'initiatives et de projets liés à l'impression 3D du béton connaît une évolution exponentielle depuis 2015.

L'objectif du présent travail est de découvrir cette nouvelle technologie d'impression en 3D et ses applications en génie civil. A cet effet une recherche bibliographique a été effectuée et synthétisée dans ce manuscrit.

Le document est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre concerne des généralités sur l'historique de l'impression 3D, ses domaines d'application et ses différentes techniques dans le domaine de la construction.
- Le deuxième chapitre présentera les méthodes d'impression dans le génie civil et les différents types de robots utilisés.
- Le troisième chapitre sera consacré aux bétons imprimés, ses caractéristiques et stratégies de renforcement ainsi qu'à la conception des structures par l'impression 3D.
- Nous clôturons ce travail par une conclusion générale.



CHAPITRE I

***Généralités Sur L'impression 3D et La
Fabrication Additive***

1.1- Introduction :

Depuis la révolution industrielle entreprise au 19^e siècle, la production de biens est synonyme d'industries lourdes, de machines-outils et de lignes de production. Il est donc inhabituel de songer à une production sans outils et sans lignes d'assemblage. C'est pourtant une tendance en plein essor au fur et à mesure que les techniques d'impression 3D sont développées et utilisées – dans des proportions distinctes et des contextes différents – tout à la fois par les particuliers, les PME-PMI (petite ou moyenne entreprise), les centres de recherche et les grands groupes industriels [1].

Il est aujourd'hui possible de fabriquer des équipements et des objets de toute sorte dans une grande variété de matériaux, directement depuis sa maison ou son lieu de travail. A partir de son ordinateur personnel, tout professionnel ou particulier initié peut créer une représentation digitale de ces objets. Puis, après avoir transmis ce fichier numérique à l'imprimante 3D l'objet « prend forme ». L'impression 3D n'est plus seulement un rêve de science-fiction ou une technologie de laboratoire, mais une réalité dont le développement s'accélère à mesure que de nouveaux marchés sont conquis [1].

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. Il a été reconnu que l'impression 3D a le pouvoir de révolutionner la façon dont nous fabriquons presque tout [2].

Les applications de l'impression 3D sont multiples : Aéronautique, aérospatial, automobile, médical, génie civil.... D'abord cantonnée au prototypage, et à la visualisation d'ergonomie pour l'architecture ou les études de design. Puis à l'appareillage et à la prothèse, elle gagne peu à peu des secteurs industriels qui vont de la production de pièces de voitures, d'avions, de bâtiments, de biens de consommation, etc. Le prix d'une imprimante 3D performante et la maîtrise technique nécessaire à sa mise en œuvre freinent son apparition comme appareil d'usage domestique

1.2- Définition :

De nombreuses définitions et terminologies sont utilisées ou associées pour décrire l'impression 3D, telles que la fabrication additive, la fabrication assistée par ordinateur, la fabrication digitale ou encore le prototypage rapide. D'une manière générale, nous pouvons le

définir comme « un processus d'assemblage de matériaux pour fabriquer des objets ou structures à partir d'un modèle de données 3D, généralement couche par couche [2].

L'impression 3D est une technologie qui est en plein essor et qui est largement considérée comme une révolution industrielle.

Les méthodes de conception à travers l'impression 3D permettent de raccourcir les temps de conception et de développement, d'améliorer la collaboration entre les différentes parties et de contribuer ainsi à résoudre les problèmes qui se posent entre le monde de l'ingénierie et celui du design. [3]

1.3- Historique :

En déposant en 1903 un brevet intitulé « Method of composition horseshoes » que l'américain G.J Peacock pose sans le savoir, les fondements de la fabrication additive. Il y décrit la fabrication d'un fer à cheval par empilement de couches de tissus. Ce n'est qu'un demi-siècle plus tard que les premières recherches sur les résines photopolymérisables voient le jour, avec les travaux de Wyn Kelly Swainson qui a déposé en 1968 un brevet intitulé « Method of producing a 3D figure by holography » dans lequel il décrit le durcissement d'une résine liquide sous l'action de deux lasers [3].

La communauté de l'impression 3D attribue la paternité de l'impression 3D à Charles Hull, qui, en août 1984, dépose un brevet intitulé « Apparatus for production of threedimensional by stereolithography », dans lequel il développe le principe de la stéréolithographie, dont la première machine industrielle (SLA-1) été commercialisée en 1987. Ce n'est que peu de temps après en 1989 que l'entreprise Stratasys dépose le premier brevet du FDM (fused depositing modeling), qui est aujourd'hui l'une des techniques d'impression les plus répandues, et commercialise en 1992 la première machine commerciale appelée le 3-D modeler [3].

La fabrication additive sert aux industriels à créer des objets pour tester rapidement leur design - prototypage rapide - avant de décider la production de pièces en série, via des méthodes de production plus conventionnelles en 1999 [3].

L'entrée dans le nouveau millénaire marque un véritable tournant dans l'impression 3D, que ce soit sur le plan technologique, organisationnel, économique ou encore sociétal [4].

Ce début du 21^e siècle est également le signe d'un véritable engouement économique et financier vis-à-vis de l'industrie de l'impression 3D, symbole de la révolution industrielle en cours.

Même si l'impression 3D ne remplace pas la production traditionnelle de pièces en série, qui reste plus intéressante en termes de coût, elle permet à de nombreuses entreprises et startup de reconsidérer leur place sur le marché, en leur permettant de diversifier leur production [4].

1.4- Domaines d'application :

En raison des avantages et des caractéristiques uniques des imprimantes 3D, plusieurs domaines d'application ont montré un intérêt pour la manipulation de ces technologies. On présente ci-après quelques domaines d'application de l'impression 3D :

1.4.1- Domaine d'architecture :

Dans ces domaines l'impression 3D touche la décoration, le design, et construction. En conséquence, un grand intérêt est observé dans la complexité des formes en plus du haut niveau de détails et de finition.

Un exemple de d'impression 3D est illustré par la figure 1.1, où il est présenté : a) modèle de construction / b) sculpture de personnages. [5]



Figure 1.1 : Modèles de construction (a) et de sculpture (b) réalisés par une imprimante 3D.

1.4.2- Domaine de génie civil :

On en entend parler de plus en plus dans beaucoup de secteurs dont le domaine médical, mais les imprimantes 3D se présentent également comme le futur du BTP. Beaucoup d'entreprises créent leurs imprimantes 3D pour construire leurs propres bâtiments. Les avantages sont nombreux, surtout au niveau de la rapidité et du prix. Les premiers bâtiments sont déjà sortis de terre à Dubaï et surtout en Chine.[6]

L'impression 3D est de plus en plus présente. Cette technologie qui nous paraît très accessible car l'impression fait déjà partie de notre quotidien depuis plus d'une vingtaine d'années.

Désormais, la technologie s'impose comme une évidence dans le secteur de la construction. Fini l'imprimante de salon, les professionnels voient grand, très grand même, la taille de leurs imprimantes fait la taille d'un bâtiment. Un exemple français avec XtreeE qui propose une impression en béton.

La Chine est en avance sur tout le monde dans ce secteur, déjà en 2008 les entreprises chinoises construisaient des maisons avec cette technique.

La société YingChuang est leader et c'est elle qui a imprimé le premier mur en béton en 2008. La rapidité d'impression est la véritable force de cette entreprise, elle met en effet moins de 24h à bâtir une maison. Elle travaille sur de nombreux projets colossaux comme le musée Ordos et le Guangzhou dayi Village (ci-dessous). [6]



Figure 1.2 : Le musée Ordos et le Guangzhou dayi Village [6]

1.4.3- Domaine de médecine :

Les docteurs utilisent cette technique pour développer le domaine médical et dentisterie qui peut servir aux personnes amputées grâce à des prothèses et aussi autre opération. L'un des principaux canaux de diffusion des imprimantes 3D est celui des soins de santé et des applications médicales. Cela se produit en raison de la complexité des problèmes et des avantages offerts par ces technologies.

Parmi les applications les plus courantes dans ce domaine figurent les modèles physiques de planification chirurgicale. Dans cette application, un modèle 3D virtuel est construit à partir d'images de tomodensitométrie (DICOM) et, par conséquent, utilisé pour fabriquer la réplique physique (modèle biologique) utilisée pour la planification chirurgicale.

La figure 1.3 illustre les principales étapes de ce processus [5]. Sur cette figure, on peut observer que les modèles 3D sont générés à partir d'images médicales, telles que la tomodensitométrie. Grâce à ce modèle 3D, des implants de reconstruction, des prothèses ou simplement la réplification d'organes pouvant aidés à la planification chirurgicale peuvent être conçus.

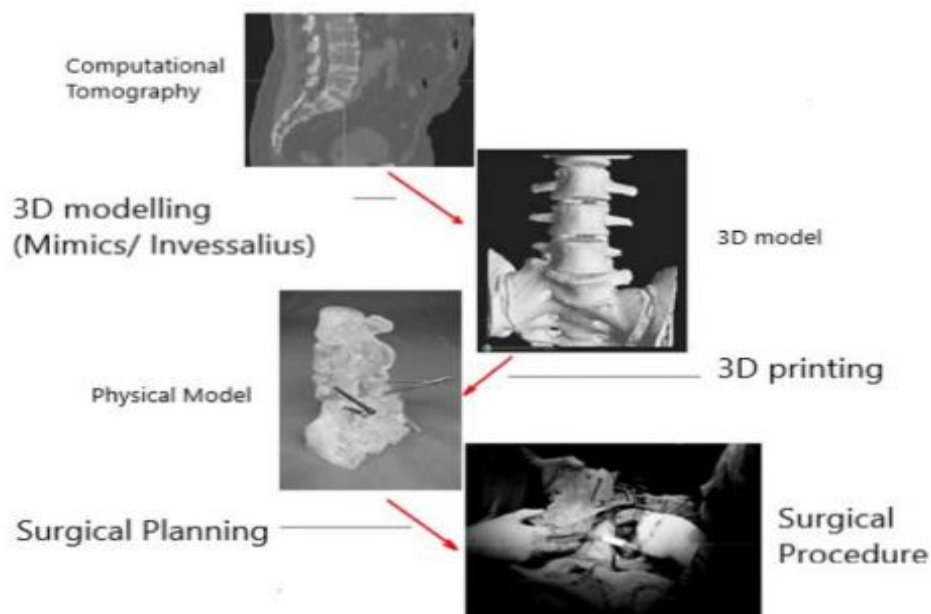


Figure 1.3 : Illustration des principales étapes du processus utilisé dans la construction de bios modèles pour la planification chirurgicale.

Après la définition de ce modèle 3D, des techniques de fabrication additive sont utilisées directement ou indirectement (moules) afin d'obtenir des modèles physiques qui déboucheront sur une planification chirurgicale, des prothèses et des implants (figure 1.4).

Il convient également de noter que l'utilisation de ces techniques se traduit par des procédures moins agressives pour les patients, en plus de réduire la survenue d'erreurs lors de la chirurgie.



Figure 1.4 : Exemple de prothèse

1.4.4- Domaine industriel :

L'utilisation de ce nouvel outil présente plusieurs intérêts. Même si une imprimante n'est pas polyvalente, il en existe aujourd'hui qui prennent en charge des matériaux de plus en plus variés : le plastique bien sûr, mais aussi le métal, la céramique, le verre, voire des matériaux alimentaires ou des tissus vivants [5].

En outre, une imprimante 3D en industrie permet d'économiser du temps et des moyens financiers puisqu'il n'y a plus d'étapes de pré-industrialisation, de création de moules ou de gabarits. Enfin, les réalisations des imprimantes 3D en industrie peuvent présenter des formes réellement complexes et entièrement personnalisées. La figure 1.5 présente quelques exemples.



Figure 1.5 : Fabrication des pièces avec impression 3D [6]

1.5- Avantages et inconvénients des techniques d'impression 3D :

La technique d'impression 3D présente plusieurs avantages on peut citer les suivantes :

- ✚ Forte personnalisation possible des biens et produits, à bas coût
- ✚ Design et production efficace (légèreté, résistance, complexité)
- ✚ Variété de production (capacité à produire des biens différents)
- ✚ Capacité de production d'objets très petits (échelles macro et nanoscopiques)
- ✚ Peu de déchets lors de la fabrication
- ✚ Production à la demande, en volumes réduits
- ✚ Production locale, proche des lieux de consommation
- ✚ Production accessible à tous, peu de barrières à l'entrée
- ✚ Fort potentiel d'innovation dans la distribution et la fourniture de services.

Malgré les multiples avantages que présente l'impression 3D elle possède certains inconvénients tels que :

- ✚ Production non compétitive de grands volumes de produits ;
- ✚ Variété encore limitée des matériaux utilisés pour les impressions ;
- ✚ Coût potentiellement élevé des matériaux de base utilisés comme intrants ;
- ✚ Difficulté de combiner plusieurs matériaux (notamment dans l'électronique) ;
- ✚ Impression complexe d'objets de grande taille ;
- ✚ Qualité et durabilité limitées des biens finaux.

1.6- Les principaux concepts :

Dans l'impression 3D il y a une série d'étapes à suivre dans la conception et dans le prototypage rapide qui composent un cycle spécifique.

Généralement, elles consistent dans le choix d'un matériau utilisé comme base pour la construction du modèle, ainsi que d'un système informatique sophistiqué qui contrôle les procédés d'ajout de matière tels que le dépôt, le frittage, l'injection, la fusion, etc.

Le processus commence donc par la création d'un modèle 3D de format CAO (conception assistée par ordinateur), qui doit être converti en format STL (stéréolithographie). Ce format est traité par un logiciel spécifique, typique de l'impression 3D, qui va créer un nouveau fichier contenant les informations de chaque couche de matériau déposé [7]

Ce cycle de conception peut se résumer de la manière suivante :

- Modélisation numérique : création d'un modèle 3D pour cela, un logiciel de CAO est utilisé. La fabrication additive est indissociable de la conception numérique des pièces et des structures.
- Exportation : génération d'un fichier au format dédié (STL) contenant toutes les informations géométriques nécessaires pour représenter le modèle numérique.
- Stratification : conversion du modèle numérique en une suite de commandes que l'imprimante 3D peut comprendre et exécuter.
- Connexion : établissement de la liste des instructions données à l'imprimante grâce à un partage de données.
- Impression : préparation de l'imprimante 3D et début de l'impression.
- Finition : étape finale consistant à l'extraction des parties temporaires et à l'ajout de pièces de finition non imprimables.

1.7- Classifications des technologies d'impression :

Il existe de nombreuses façons de classer les différentes technologies d'impression 3D existantes. En 2009, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) et la Society of Manufacturing Engineers (SME) ont créé le comité F42 for Additive Manufacturing Technology, une classification des activités ASTM rassemble ces technologies dans les 6 catégories suivantes [8] :

1.7.1- Extrusion de matériaux :

Le matériau est extrudé à travers une buse, pour former des modèles multicouches. La méthode est couramment utilisée pour les matériaux plastiques. C'est la technique d'impression par dépôt de matière fondue (**Figure 6**). C'est également la plus populaire et la moins chère parmi les imprimantes professionnelles de polymères.

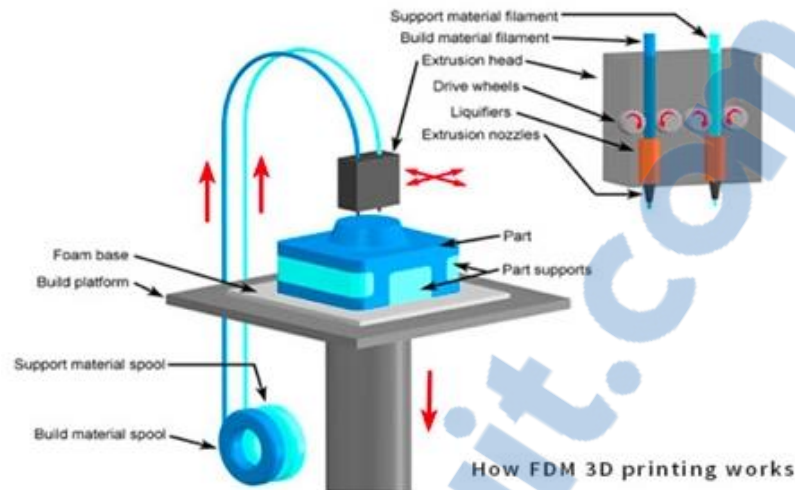


Figure 1.6 : Le processus d'impression 3D par dépôt de filament fondu [2]

1.7.2- Photopolymérisation (La stéréolithographie) :

Un dépôt liquide de résine photopolymère est durci par une exposition sélective à la lumière (via un laser ou un projecteur), qui initie la polymérisation et solidifie les zones exposées.[9]

C'est l'une des méthodes les plus utilisées dans la fabrication additive.

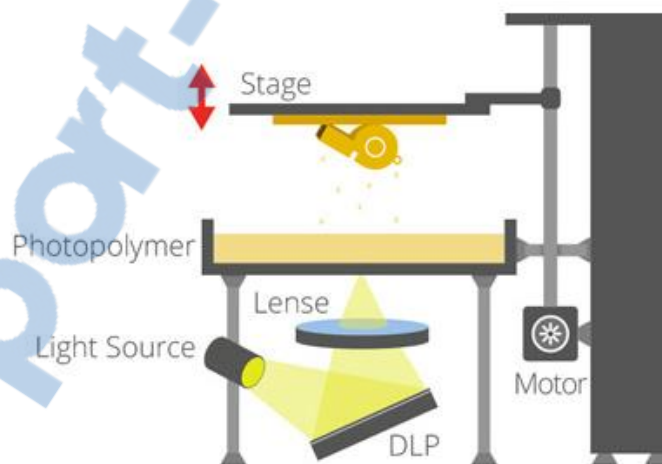


Figure 1.7 : La technologie d'impression 3D Digital Light Processing (Photopolymérisation) [9]

1.7.3- Fusion de poudres et application directe d'énergie :

Une couche de poudre est déposée. Ensuite, en fonction de la pièce à imprimer, une partie de la poudre est agglomérée en la faisant fondre grâce à une source de chaleur. L'opération utilise un outil tel qu'un laser ou un faisceau d'électrons. La poudre non fondue entourant la partie consolidée agit comme un matériau support.

La forme imprimée est obtenue en répétant cette opération de dépôts successifs de couches de poudre (appelées « lits de particules »). Il est possible d'utiliser cette méthode pour des plastiques ou des métaux.

C'est la technique dite d'application directe d'énergie.[10] (Figure 1.8)

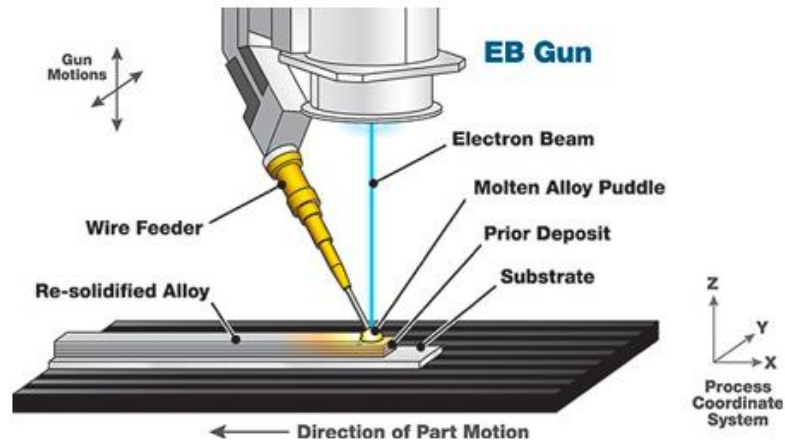


Figure 1.8 : Le processus d'impression 3D par fusion directe de matière [10]

1.7.4- Injection de liant : Binder Jetting :

Les liants liquides sont appliqués sur des couches de poudre matériau en grains pour construire les différentes pièces. Les liants peuvent être de nature organique et inorganique.

L'impression tridimensionnelle 3DP utilise ce processus, qui associe des granulats et des liants.

Ce procédé est utilisé pour fabriquer de nombreux composants métalliques, céramiques et polymères. (Figure 1.9)

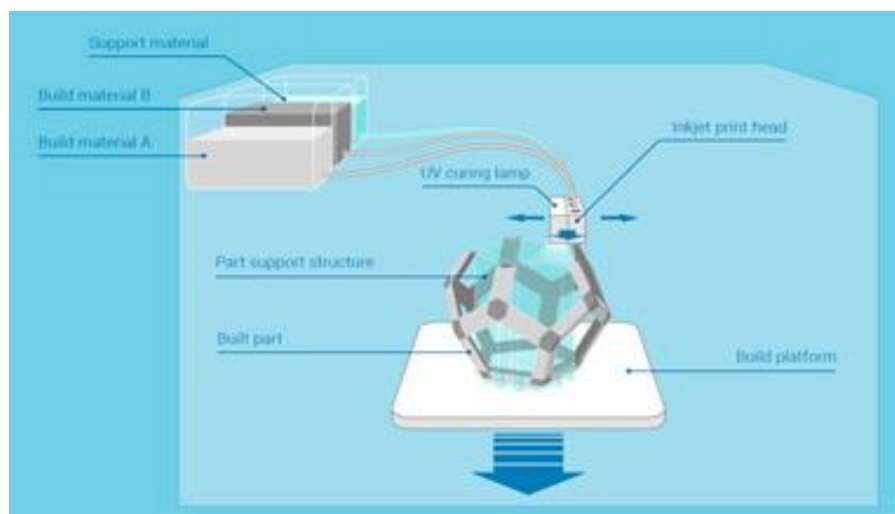


Figure 1.9 : Technologie d'impression 3D Binder Jetting (BJ) pulvérisation de liant (Source : Additively.)

1.7.5- Injection de matériau : Jetting :

C'est le cas de l'impression par mise en forme multi-jet qui dépose de petites gouttes de matériaux polymériques sur une plateforme en feuilles minces. Le matériau du modèle final est solidifié avec des lampes UV, tandis que le gel de support est enlevé avec des jets d'eau. Cette méthode permet la création de détails avec une finition de surface très précise [2] (Figure 1.10)

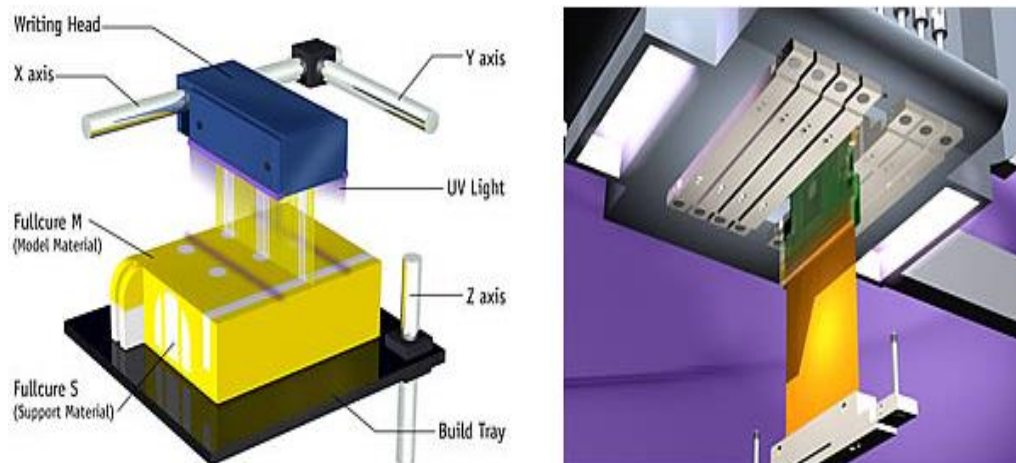


Figure 1.10 : Technologie d'impression 3D Jetting (Injection de matériau) [2]

1.7.6- Lamination des feuilles :

C'est une méthode par découpage et stratification. La fabrication de stratifié est un système dans lequel chaque partie est construite séquentiellement par des feuilles de matériau. Ce processus consiste en un collage thermique d'une série de pièces d'épaisseur uniforme de matériau réalisé avec découpe laser. Le système comprend une imprimante 2D située sur une table de travail qui se déplace sur l'axe vertical.

L'imprimante 2D crée des couches à partir d'une feuille de matériau, dont chacune se joint à la suivante avec des thermodhésifs situés sur l'une des faces des feuilles. Un outil colle les feuilles en appliquant une force et de la chaleur à chacune des couches.

Les couches sont finalement superposées et la définition géométrique de l'objet sera définie par l'épaisseur de celui-ci. (Figure 1.11)



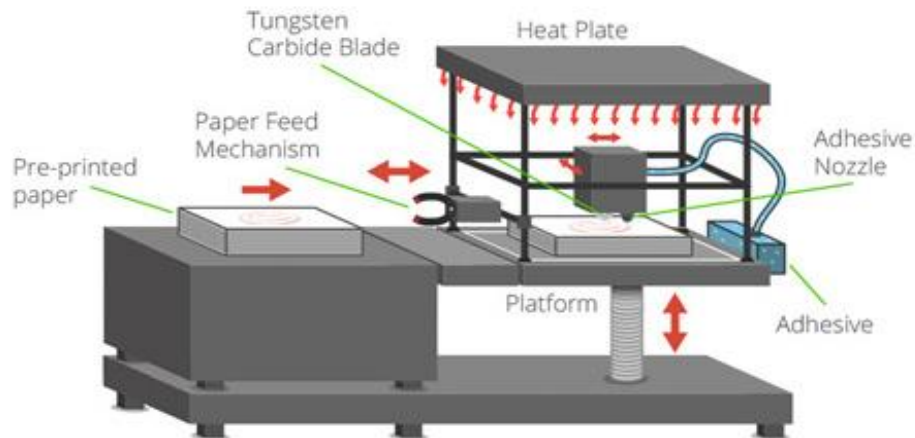


Figure 1.11 : Le processus d'impression 3D par lamination
(Source : 3DPrintingIndustry.com)

La figure suivante synthétise les différentes techniques d'impression 3D.

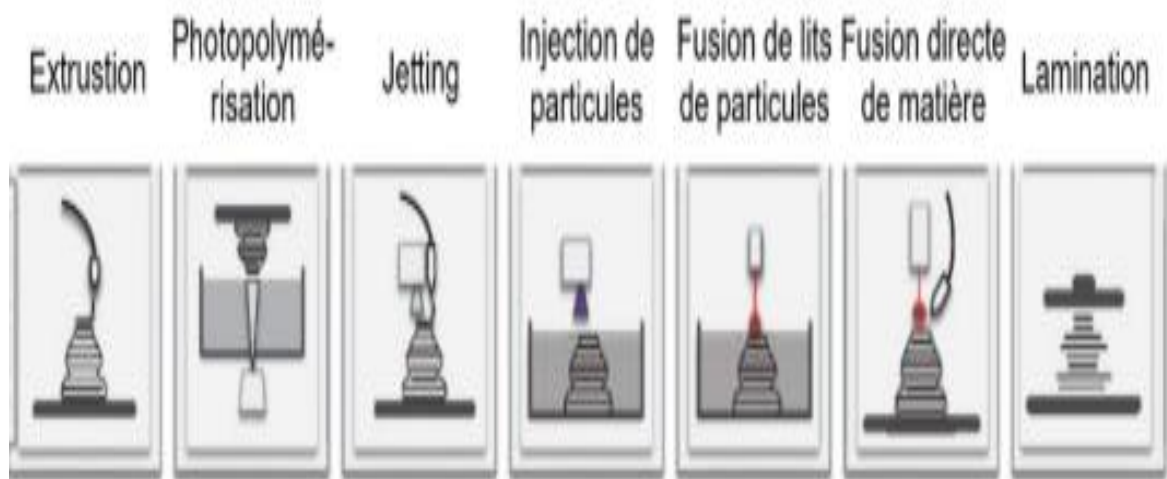


Figure 1.12 : Visualisation des différentes méthodes d'impression 3D [2]

1.8- Vers l'impression 3D des matériaux à base cimentaire :

Pour les matériaux cimentaires, ces techniques ne sont pas applicables et il n'est pas possible d'obtenir une rigidification du matériau uniquement en comptant dans un premier temps sur la structuration du ciment pendant la période dormante (comportement dit thixotrope). Puis sur le phénomène d'hydratation du ciment. [11]

Nous listerons par la suite l'ensemble des familles de méthodes employées dans l'impression 3D des matériaux à base cimentaire

1.8.1-La méthode extrusion/dépôt :

La philosophie de l'impression par extrusion/dépôt s'inspire de la méthode de l'impression 3D polymère par dépôt de matière fondue (FDM). Elle consiste à déposer successivement par extrusion des couches de matériau cimentaire pour réaliser une pièce ou une structure en suivant la maquette numérique construite sur un logiciel de conception (Figure 1.13).

Contrairement aux polymères, le comportement du béton n'est que très peu sensible à la température et il convient de régler la vitesse et la géométrie d'impression sur la vitesse de solidification du matériau cimentaire pilotée par la prise du ciment [12].



Figure 1.13 : Dépôt de couches de mortier lors de l'impression par extrusion/dépôt [12]

1.8.2-Méthodes d'impression par injection dans un lit de particules :

La méthode d'impression par injection de fluide dans un lit de particules est une méthode d'impression s'inspirant de celles développées pour les polymères et les métaux. Il s'agit ici d'étaler une couche de particules d'épaisseur donnée, puis d'injecter aux endroits dictés par la maquette numérique un fluide permettant d'agglomérer les grains (Figure 1.14).

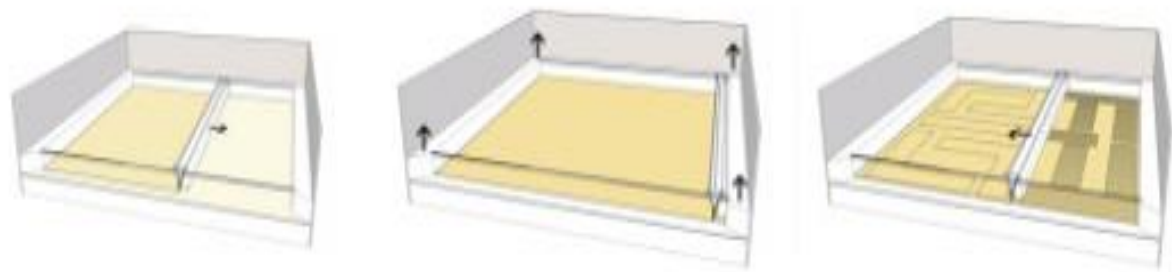


Figure 1.14 : Séquence de réalisation de l'impression 3D par injection Dans un lit de particules : étalement d'une couche de particules, abaissement du plateau, injection localisée du fluide [13]

1.8.3-Méthodes d'impression alternatives :

Plusieurs méthodes originales, prenant en compte les spécificités des matériaux cimentaires à l'état frais, ont aussi été récemment imaginées et testées à l'échelle du laboratoire. Les principales méthodes originales créées pour le béton sont listées ci-après.

1.8.3.a) Coffrage glissant piloté : Smart Dynamic Casting :

Le Smart Dynamic Casting permet de produire des structures verticales de béton géométriquement complexes sans avoir besoin de coffrage fixe sur mesure. Pour ce faire, il utilise un coffrage muni d'une buse de sortie flexible ou rigide (possibilité d'avoir une section variable), fixée à un bras robotisé 6 axes qui forme le béton au moment de sa sortie. Le bras robotique permet un coffrage dynamique du béton voire un exemple sur [la figure 1.15](#) [14]

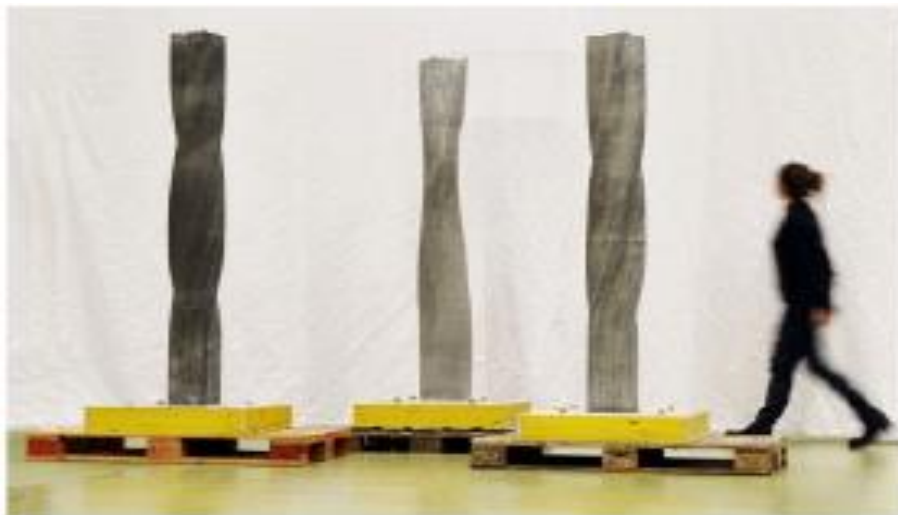


Figure 1.15 : Exemple de réalisations obtenues avec la technique du Smart Dynamic Casting [14]

1.8.3.b) Injection imprimée Mesh Mould dans un grillage coffrage :

Cette technique est intéressante, car elle permet de fabriquer des éléments ferrailés présentant un comportement proche de celui du béton armé conventionnel

Cette technique, développée Zurich en Suisse, consiste à fabriquer avec un robot soudeur (bras articulé monté sur chenille) un grillage en acier servant de coffrage perméable à un béton coulé ultérieurement [15]. La taille des mailles du coffrage doit être fixée en accord avec la rhéologie du matériau pour que le béton coule suffisamment pour enrober le grillage, mais pas trop pour pouvoir tenir la forme définie par le grillage ([Figure 1.16](#)). Une fois le béton coulé, il est nécessaire de finir la surface par une étape de talochage qui peut être également robotisée ([Figure 1.17](#)).

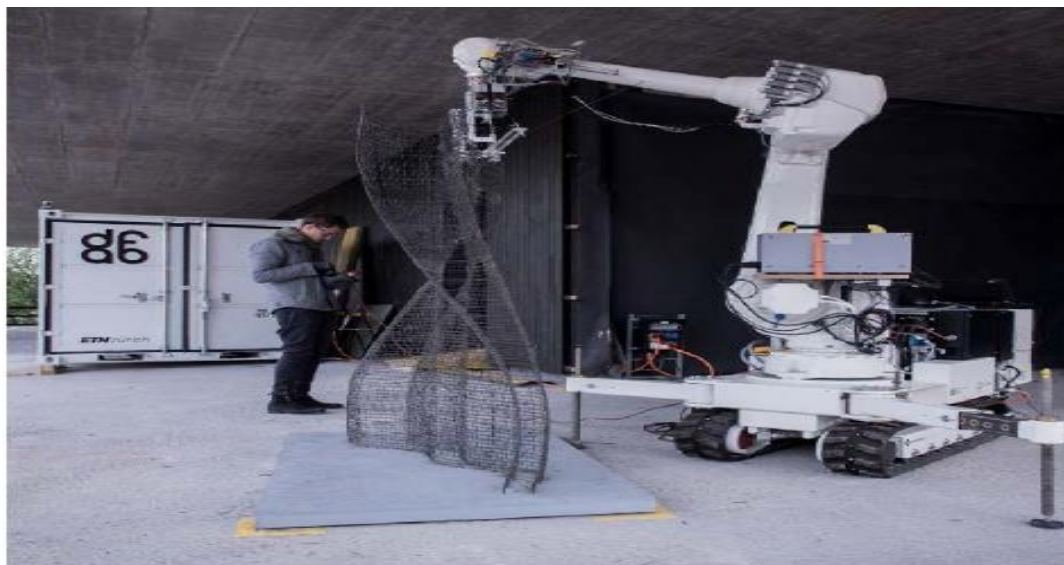


Figure 1.16 : Réalisation du grillage coffrage par le robot soudeur [16]



Figure 1.17 : Structure obtenue après coulage du béton et étape de finition talochage [16]

1.8.3.c) Projection de béton sur un support mobile :

La méthode par projection sur un support mobile [17] s'inspire des méthodes robotisées de projection de béton en tunnel ou sur une surface verticale.

La projection du béton pourrait se faire directement ou sur un support mobile venant soutenir temporairement le béton pendant sa fabrication. L'avantage est que les technologies de transport et d'accélération de prise pour les bétons projetés sont bien connues et pourraient améliorer les cadences de production. [18].

Cette méthode pourrait aussi faciliter la transition entre une structure horizontale et une structure verticale grâce à la fermeté des mélanges projetés.

1.9-Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, on a défini l'impression 3D en donnant un aperçu sur son historique et sur les domaines dont elle est utilisée. Ensuite, on a présenté les techniques existantes en mettant en avant leurs divergences et leurs domaines d'application.

Dans la deuxième partie, on a présenté les différentes techniques de l'utilisation de l'impression 3D dans le domaine de la construction tout en se focalisant sur les deux principales technologies dont l'impression par dépôt et l'impression par injection dans un lit de particules avec tous les détails et les caractéristiques.

CHAPITRE II

Les Méthodes D'impression 3D

En Génie Civil

2.1- Introduction :

L'industrie de la construction rassemble certains des plus grands défis de notre siècle. La croissance démographique à l'échelle de la planète dans un avenir proche soulève d'énormes besoins en logements abordables ainsi qu'en infrastructures. Contrairement à d'autres domaines industriels, la construction n'a pas connu de formidable productivité au cours des dernières décennies [1]. Cependant, la consommation mondiale de béton et de ciment a bondi, principalement en raison des pays émergents [2].

Aujourd'hui, le béton est le matériau synthétique le plus utilisé sur terre. La consommation totale de béton représente plus du double du total des autres matériaux de construction, à savoir le bois, l'acier, le plastique et l'aluminium. Tout cela rend la construction responsable de 23% des émissions mondiales de dioxyde de carbone [3]

Si les mortiers et les bétons sont si largement choisis comme matériaux de construction, cela est lié à leur coût relativement bas, leur bonne durabilité et leur grande polyvalence [4]

Après avoir agi directement sur la composition des matériaux, de nouveaux éléments de construction peuvent être conçus pour réduire la consommation globale d'énergie grâce à la géométrie. L'automatisation et la robotique seront utilisées pour créer des structures ultralégères de géométrie complexe, impossibles à réaliser avec des méthodes de fabrication traditionnelles à un coût raisonnable.

Ce travail aborde un sujet particulier de l'automatisation dans la construction appelé impression 3D du béton, ou fabrication additive de matériaux cimentaires, ou béton numérique [5]. Il propose de nouvelles techniques de fabrication, autres que la coulée ou la projection, en utilisant des robots programmés pour amener progressivement le matériau là où il doit être, sans moules traditionnels. Les promesses associées sont donc la réduction des déchets, la rapidité et la polyvalence [6].

Pour devenir une véritable solution aux problèmes actuels du logement, l'impression concrète doit apporter une innovation significative. Il n'est pas encore clair si l'augmentation de la productivité sera suffisante pour y parvenir. Cependant, si de nouveaux produits de construction, de nouvelles performances, pouvaient être fabriqués à un coût raisonnable avec de telles techniques, ils pourraient devenir un ajout substantiel à l'industrie du bâtiment.

La consommation de matériaux peut être réduite en imprimant des murs avec une structure interne complexe et légère



Figure 2.1 : Un premier pont en béton imprimé en 3D aux Pays-Bas

Certains ponts ont déjà été construits, voir par exemple la **Figure 2.1**. Des ouvrages souterrains spécifiques ont également été imprimés et installés en France, Pour ces secteurs, le contexte géométrique complexe et la spécificité des objets préfabriqués peuvent rendre compte de l'impression 3D peut-être plus facilement que du logement.



Figure 2.2: Poteau 3D par Xtreee – Aix en Provence

L'esthétique est également un aspect clé des techniques de fabrication numérique car elles peuvent produire une géométrie et des motifs complexes à un coût très raisonnable. Les meubles ont déjà été conçus et fabriqués avec des techniques d'extrusion robotisées, ainsi que des éléments architecturaux (Figure 2.2). On peut espérer un renouveau de l'ornement en architecture, et pas nécessairement limité aux projets de luxe [2].



Figure 2.3: Fosse d'inspection souterraine (XtreeE, 2017).

2.2- Méthodes d'impression par extrusion/dépôt :

La méthode d'impression de matériaux cimentaires par extrusion/dépôt est la première méthode qui s'est développée dans le domaine de la construction béton grâce aux travaux du Pr Khoshnevizt et de son équipe au début des années 1990. C'est maintenant la technique d'impression la plus étudiée et la plus développée en vue d'applications industrielles. En effet, de nombreuses initiatives en France (XtreeE, Construction-3D, INHOVA), en Allemagne (projet ConPrin3D), aux Pays-Bas (Project Milestone, TU Eindhoven), en Chine (WinSun Company), en Russie (Apis Cor), aux États-Unis (Contour Crafting), etc. s'appuient sur cette méthode d'impression. [7]

L'impression 3D par extrusion/dépôt est aujourd'hui le procédé le plus utilisé dans le domaine de la construction digitale [8]. Ce procédé de construction automatisé est un processus complexe qui peut se décomposer en plusieurs étapes : acheminement du matériau par pompage, mise en forme par 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. Traditionnellement, en laboratoire, un bras robotisé vient déposer la matière acheminée par une pompe à mortier, couche par couche, en suivant une trajectoire imposée par la maquette numérique de la structure à imprimer (Figure 2.4) Sur chantier, ou dans des ateliers de préfabrication, le moyen d'acheminement reste une pompe à béton. En revanche, différentes solutions techniques sont utilisées pour déplacer la tête d'extrusion (ou d'impression). Celle-ci est fixée sur différents supports permettant de déplacer l'effecteur en suivant les trajectoires programmées : des ponts roulants [9], des bras articulés sur engins mobiles [10], ou supports fixes [11], ou encore des moyens de levage traditionnels dévoyés de leur usage initial [12].



Figure 2.4 : Impression 3D de mortier par extrusion/dépôt réalisée en laboratoire. Bras articulé et pompe à mortier

2.2.1- 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 2.5, le procédé peut se décomposer en six étapes : la fabrication du béton, son transport, une étape optionnelle de malaxage additionnel s'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.

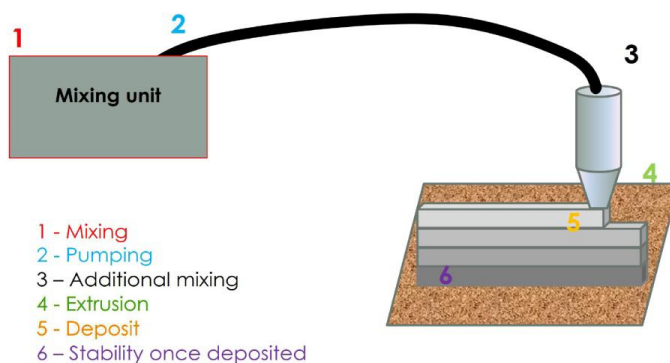


Figure 2.5 : Décomposition en étapes élémentaires de l'impression 3D de matériaux cimentaires par extrusion.

Il est important de noter qu'à chaque étape du procédé d'impression, des propriétés physiques, chimiques et mécaniques différentes (et parfois contraires) seront recherchées. Il en résulte une formulation complexe résultant d'un savant compromis, permettant de respecter le cahier des charges exigé pour que le matériau puisse subir les différentes phases de l'impression. [7]

La qualité de l'interface entre couches doit être traitée pour éviter la formation de faiblesses structurelles communément appelées « joints froids » [8]. Pour ce dernier phénomène, le matériau cimentaire, qui n'est pas protégé par un coffrage comme dans la construction traditionnelle, devra soit présenter une résistance vis-à-vis du séchage, soit bénéficier d'apports d'eau compensatoires.

Enfin, l'étude de la stabilité de la structure imprimée à un temps considéré 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 pour chacune des couches après leur dépôt. Ce gradient de résistance est symbolisé par les nuances de gris sur la Figure 2.5, Sur cette figure, les couches initiales les plus basses sont plus résistantes et plus rigides (gris foncé) que les couches supérieures juste déposées ou en cours de dépôt (gris le plus clair). [7]

2.2.2- Difficultés et limitations :

Plusieurs difficultés restent à surmonter pour pouvoir aboutir à une vraie démocratisation de l'impression 3D par extrusion/dépôt sur les chantiers de construction.

En effet, l'esthétique multicouche induite par le procédé n'est pas toujours du meilleur effet. Par ailleurs, la mécanique des joints à l'interface entre couches est une problématique qu'il convient de bien quantifier ou même d'éliminer. Aussi, il faudra veiller à ce que cette interface ne constitue pas un chemin d'entrée privilégié pour des agents agressifs vis-à-vis des matériaux cimentaires de remplissage.[9]

Aussi, à la manière de la construction en béton conventionnelle, il conviendra de trouver des moyens de renforcer le béton au moyen d'armatures pouvant conférer aux matériaux de bonnes propriétés mécaniques en traction. Une première solution pourrait déjà être de produire des formes (voûtes, par exemple) limitant les sollicitations de traction. L'utilisation de fibres ou de renforts extérieurs est aussi envisagée, tout comme le coulage ultérieur de béton armé dans des réservations laissées dans la structure imprimée.

Ces questions sont aussi liées à un manque de réglementation normative dans le domaine des bétons imprimés. Des commissions et des groupes de travail se mettent actuellement au travail, notamment au sein de sociétés savantes comme la RILEM (Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages) ou l'ACI (American Concrete Institute). [7]

2.3- Impression 3D par liaison sélective dans un lit de particules :

Dans le domaine de la fabrication additive pour la construction d'ouvrages ou de structures, deux techniques différentes sont utilisées : les procédés basés sur l'extrusion de béton frais et l'infiltration d'une encre dans un empilement de granulats ou d'un mélange matériau pulvérulent-agrégat. L'encre peut être composée d'eau et d'additifs, de matériaux cimentaires et/ou de matériaux organiques en fonction du procédé choisi. Ces procédés sont généralement regroupés sous le terme d'impression 3D par liaison sélective. [13]

La première pièce réalisée en béton par liaison sélective date de 1995 avec une technique utilisant la vapeur d'eau pour activer le ciment [14].

Le principe de la technique dite de fabrication additive par activation sélective est simple : un matériau fluide est déposé par la buse de l'imprimante 3D et pénètre ensuite dans le lit de particules afin de les relier. Il s'agit ensuite de répéter ces étapes couche par couche jusqu'à obtention d'une structure en trois dimensions telle que modélisée. La matière sèche et l'encre sont donc transportées à chaque étape indépendamment, différenciant ainsi cette technique de l'extrusion simple de béton. [13]

Il faut néanmoins utiliser deux procédés distincts de dépôt de l'encre et de la matière pulvérulente comparativement à de l'extrusion simple. [15]

De point de vue économique, entre 30 et 50 % du coût d'une construction est fixé par le coût de la matière et de la main-d'œuvre liée à l'utilisation des coffrages [16]. L'impression 3D par liaison sélective laisse envisager la suppression partielle de coffrages sur chantier et de

moules en préfabrication. Cette technique permet en effet de concevoir un coffrage perdu ou un coffrage provisoire sans utilisation de matière plastique pour un moule, de bois pour du coffrage, et aussi d'huile de démoulage. [7]

Nous allons dans ce qui suit énoncer les classifications des procédés d'impression par liaison sélective.

2.3.1- Classification des procédés et stratégies d'impression sélective :

Le choix de la technique d'impression 3D englobe plusieurs facteurs : fonctionnalité de la pièce finale, résolution et précision des contours de la pièce, type et durabilité du matériau, sollicitation future agissant sur la pièce, taille et renfort éventuel. La stratégie à adopter pour le choix de la technique utilisée résulte alors d'une réflexion et d'une étape de conception qui prend en compte les futures connexions de la pièce imprimée au sein d'un ouvrage. L'aspect esthétique et surtout la fonctionnalité du matériau réalisé par liaison sélective sont également essentiels pour le choix de la technique utilisée. Dans le secteur de la construction, le produit final réalisé par liaison sélective est le résultat de trois facteurs liés les uns aux autres : la matière initiale, l'imprimante et son procédé (vitesse, hauteur de couche de matière sèche, etc.) et la fonctionnalité de la pièce finale. [16]

Les Trois techniques, illustrées dans la Figure 2.6, peuvent être utilisées pour réaliser une structure, un ouvrage ou simplement une pièce par fabrication sélective. L'utilisation d'une ou l'autre des techniques peut se justifier par plusieurs critères : type d'encre, nature du granulat, fonction du rôle futur de la pièce dans l'ouvrage, post-traitement, renforcement, etc. [7]

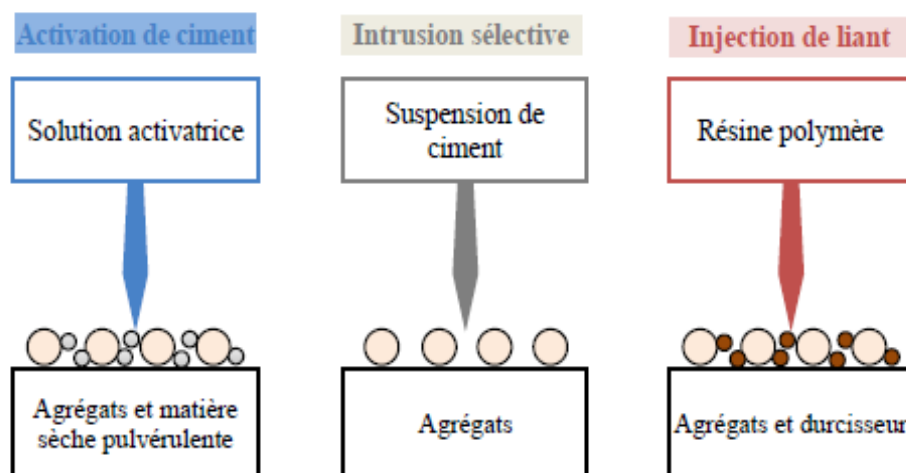


Figure 2.6 : Schématisation des techniques d'impression 3D par fabrication sélective

À l'heure actuelle, deux applications sont envisagées dans le domaine de la construction pour une utilisation en fabrication par liaison sélective :

- La première stratégie et la plus simple consiste à imprimer directement la pièce finale en utilisant une méthode d'activation ou d'intrusion sélective.
- La deuxième stratégie consiste à imprimer l'enveloppe de la structure ou de la pièce, tel un coffrage perdu, puis à réaliser un renforcement ad hoc par coulage de béton. Il est également possible de placer des armatures ou un renforcement au préalable. [2]

2.3.1.a) Activation de ciment :

La première méthode dite d'activation du ciment consiste à activer une poudre de ciment ou d'un liant minéral pulvérulent mélangé avec des granulats (sable avec ou sans gravier en injectant une solution composée d'eau et d'adjuvant. La poudre de liant minéral va alors faire prise par réactions d'hydratation [15] afin de former une matrice solide qui englobera les particules de granulats, de taille plus importante que les particules de ciment. Lorsque cette première couche composite est réalisée, deux options sont alors possibles : réaliser la structure en déposant une deuxième couche par élévation (Figure 2.7), ou en posant une couche par dénivellation. [17]

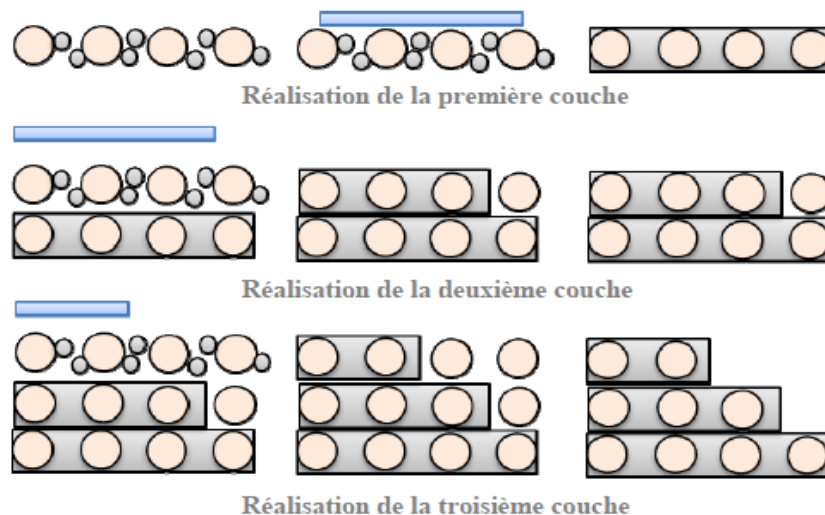


Figure 2.7 : Schématisation de la méthode d'activation de ciment par élévation

À l'heure actuelle, la méthode d'activation de ciment est la plus utilisée, [18] (Figure 2.8). Les propriétés de la pièce finale ne sont pas uniquement dépendantes de la formulation du béton, mais aussi des paramètres liés au procédé d'impression (viscosité de l'encre, épaisseur et composition de la couche, vitesse du jet liquide, etc.) tel que rapporté par Lowke et al. Les résistances mécaniques en compression obtenues sur des échantillons prismatiques de

dimensions 40 x 40 x 160 mm³ varient entre 5 et 16,4 MPa et sont fortement corrélées à la quantité d'eau utilisée [19].

Les résultats récents montrent en effet la tendance inverse par rapport à la théorie sur les formulations de béton classiques : plus la quantité d'eau utilisée est importante, plus la résistance mécanique est élevée.

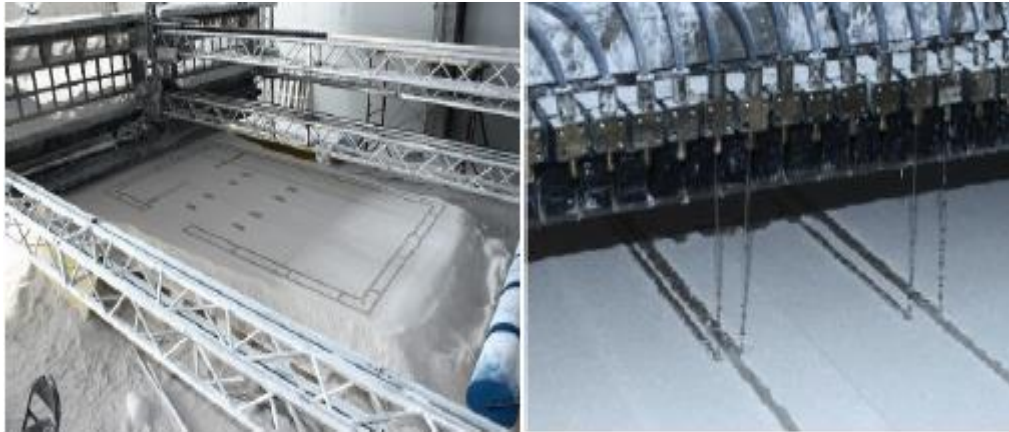


Figure 2.8: l'imprimante 3D D-Shape utilisant la méthode d'activation de ciment

2.3.1.b) Intrusion sélective :

La méthode d'intrusion sélective est simple : un matériau fluide est déposé par la buse de l'imprimante 3D et pénètre ensuite dans le lit de particules. Cette méthode d'intrusion sélective est un processus dans lequel une suspension d'origine minérale pénètre de manière localisée dans une couche de granulats. La suspension est généralement composée de ciment ou d'un liant minéral, d'eau et d'adjuvant ou d'un mélange d'adjuvants. L'homogénéité de la pièce finale permettra d'atteindre une résistance élevée lors de sollicitation mécanique [19, 17]. De manière équivalente à la méthode d'activation de ciment, il est possible de procéder par élévation (voir la figure 2.9) ou dénivellation pour la production de pièces par intrusion sélective.

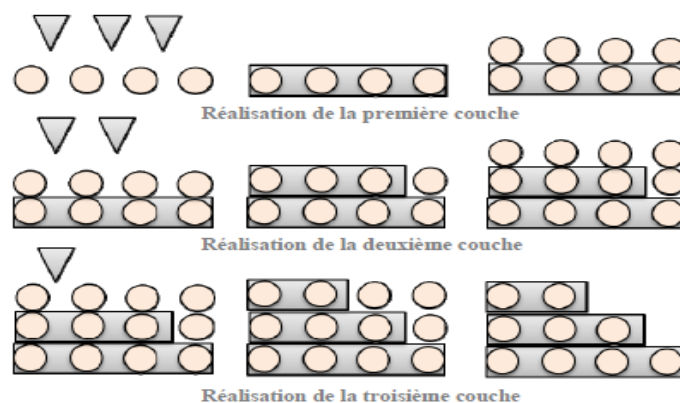


Figure 2.9 : Schématisation de la méthode d'intrusion sélective

Les applications utilisant la méthode d'intrusion sélective sont peu nombreuses en 2018. Des premiers essais, conduits par Weger et al. [20] sur des échantillons de 50 x 50 x 50 mm³ et réalisés par intrusion sélective avec du ciment CEM I 42,5R (E/C = 0,40) par couches de 3 mm, ont présenté des résistances en compression de 22,1 MPa. Une meilleure maîtrise de la méthode a permis à Weger et al. [21] d'obtenir des résistances à la compression de plus de 70 MPa à 7 jours sur des cubes de 100 mm de côté **Figure 2.10**.



Figure 2.10 : éprouvettes imprimées par liaison sélective.

2.3.1.c) Injection de liant :

Cette technique, à la frontière entre les deux précédentes, consiste à appliquer le liant seul à une couche composée de sable et d'un activateur. Un liant liquide, généralement une résine, est appliqué sur un lit de particules où un durcisseur est également présent. Les lits de particules sont de tailles plus fines en comparaison aux particules utilisées dans les deux méthodes citées précédemment : intrusion sélective et activation de ciment. Lorsque des coffrages sont imprimés, le liant est typiquement une résine qui réagit avec un composant durcisseur dans le lit de particules. Un matériau de construction peut ensuite renforcer la structure, comme illustré sur la **Figure 2.11** et **Figure 2.12** [21].



Figure 2.11 : Moule en sable réalisé par injection de liant par VoxelJet et pièce finale



Figure 2.12: Noyaux de moules de fonderie produits par fabrication additive sable – projet I Techmould – partenaires : ARRK Shapers', Safe Metal, FPSA, CTIPC, CTIF, ID PRO (Lycée Hector Guimard) et l'Enise. [22]

2.3.2- Difficultés et limitations :

Une des difficultés majeures du procédé d'impression par injection dans un lit de particules est de bien choisir les propriétés du fluide (rhéologie, tension superficielle) en fonction des paramètres physiques du lit granulaire (taille des pores, porosité totale). Si le fluide n'est pas adapté et qu'il pénètre totalement la couche ou de manière incomplète, le comportement mécanique du béton imprimé sera médiocre. [23].

2.4- Définition de robot :

L'impression de maisons en 3D nécessite l'utilisation de robots qui fabriquent sur place les différents composants du gros œuvre. Une fois les fondations du futur ouvrage réalisées, de façon traditionnelle, le robot coule les murs sur place. Cela génère un gain de temps et une efficacité inégalée.

Les robots intègrent l'ensemble des données enregistrées dans le modèle 3D du bâtiment, ce qui garantit la prise en compte des éléments nécessaires aux passages des corps de métiers suivants : électricité, plomberie... [23] Il existe différents types de robots tels que :

2.4.1- Big Delta, la plus grande imprimante 3D au monde :

Big Delta est la dernière création de la firme italienne WASP (World's Advanced Saving Project). Du haut de ses 12 mètres pour un diamètre de 6 mètres, il s'agit de la plus grande imprimante 3D au monde (Figure 2.13). La machine a été surtout développée afin d'imprimer des maisons rapidement et à faible coût. Ceci afin de proposer des logements de secours aux

sinistrés, mais également pour faire face au problème de logement qui sévit dans le monde, en particulier pour les pays en voie de développement. À cette fin, l'imprimante 3D va exploiter les matériaux existants sur le lieu (la boue et l'argile) afin de minimiser les coûts de construction [24,25]



Figure 2.13 : Imprimante 3D géante (Bigdelta) [25]

2.4.2- Les imprimantes 3D de bâtiments Contour Crafting

Contour Crafting est une technologie d'impression 3D de béton, développée à l'Université de Californie du Sud, dont le but est d'automatiser la construction de bâtiments entiers. Grâce à ce procédé, un ensemble de maisons différentes pourraient être construites automatiquement d'un seul coup. [26]

Le modelage de contours permet de construire automatiquement des structures sur mesure en déposant à plusieurs reprises des matériaux de construction (Figure.2.14). [27]

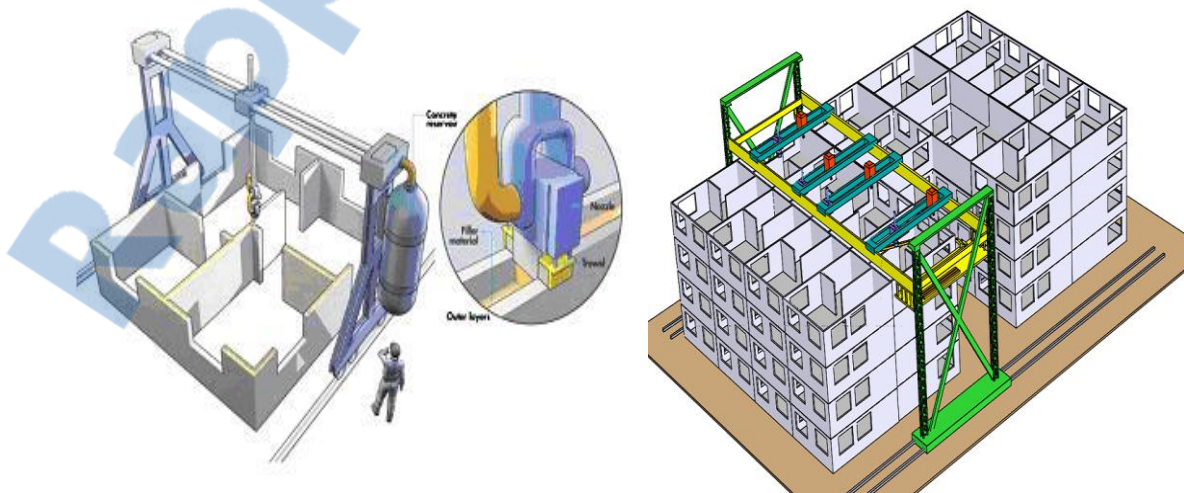


Figure 2.14 : imprimantes 3D Contour Crafting [27]

2.4.3- Apis Cor 3D printer :

L'Apis Cor est une imprimante 3D de maisons produite par Apis Cor, un fabricant basé en Russie. Cette imprimante 3D peut être transportée à différents sites de construction grâce à sa carrure compacte (mais elle pèse 2 tonnes). (Figure 2.15)

L'Apis Cor est presque entièrement automatisé. Elle requiert la main d'œuvre de deux personnes pour la faire fonctionner.

❖ *Caractéristiques principales d'Apis Cor 3D printer :*

- Volume d'impression énorme : cette imprimante 3D de maisons offre un volume d'impression de 8500 x 1600 x 1500 mm
- Économique : selon le fabricant, la Apis Cor permet de réduire les coûts jusqu'à 40 % par rapport aux techniques traditionnelles.
- Zéro déchet : puisque le matériau est distribué de manière précise, la Apis Cor ne produit pas de déchets.[28]



Figure 2.15: Apis Cor 3D printer

2.4.4- P1 BetAbram :

La P1 est une imprimante 3D produite par BetAbram (Figure 2.16 et 2.17), un fabricant basé en Slovénie. La BetAbram P1 se sert de ciment pour imprimer en 3D des maisons ou autres structures pouvant être à base de ciment. Cette imprimante 3D de maisons peut fonctionner avec deux systèmes différents :

- Système d'ascenseur : utilise un ascenseur pour élever le matériau à la buse. Ce système requiert le soutien d'une personne et est l'option la moins coûteuse. Cependant, l'impression 3D d'un mètre cube de ciment prend environ 35 minutes.

- Système de pompe : ce système pompe le matériau jusqu'à la buse et requiert le travail de trois personnes. C'est donc la solution la plus coûteuse, mais ne prend que 21 minutes pour imprimer un mètre cube de matériau. [28]

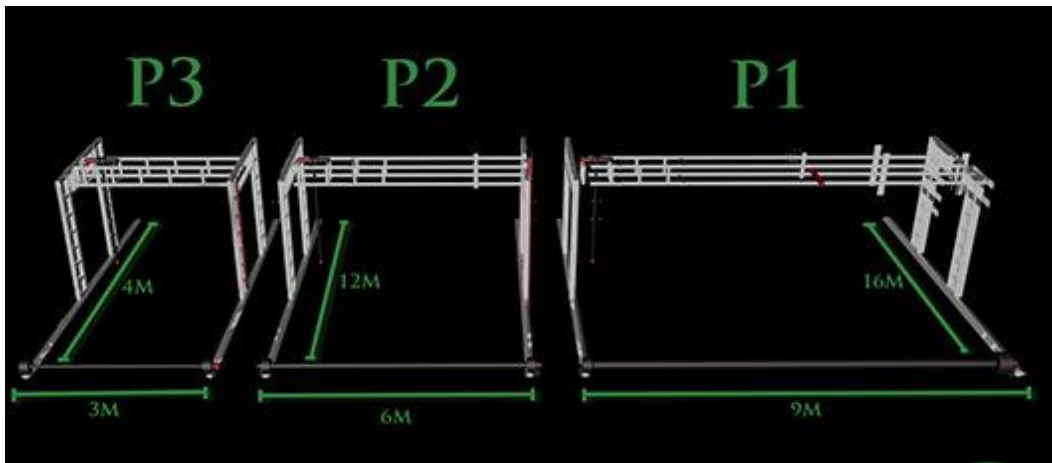


Figure 2.16: schéma de la machine P1 BetAbram



Figure 2.17: P1 BetAbram

2.4.5- BOD2 COBOD :

La COBOD BOD2 est une imprimante 3D de construction produite par COBOD, une entreprise danoise. [28] Elle a les caractéristiques suivantes :

- Modulable : il est possible d'adapter les dimensions de la BOD2 selon le projet.
- Rapidité : la BOD2 peut imprimer jusqu'à 60 mètres de matériau par minute.
- Buses interchangeables : la buse standard imprime des couches épaisses de 2 cm et larges de 5 cm.





Figure 2.18: BOD2 COBOD

2.4.6- MAXI PRINTER Constructions-3D :

La Constructions-3D MAXI PRINTER est une imprimante 3D de ciment conçue et assemblée en France (Figure 2.19). Elle a les caractéristiques suivantes :

- Transport simplifié : la MAXI PRINTER est construite sur le modèle d'une grue hydraulique de levage sur chenille : elle peut se replier pour être plus compacte durant le transport.
- Logiciel : logiciel de pilotage et de slicing dédié et développé en interne.
- Diamètres de buse : plusieurs tailles de buse sont disponibles, allant de 20 mm à 50 mm de diamètre. [28]

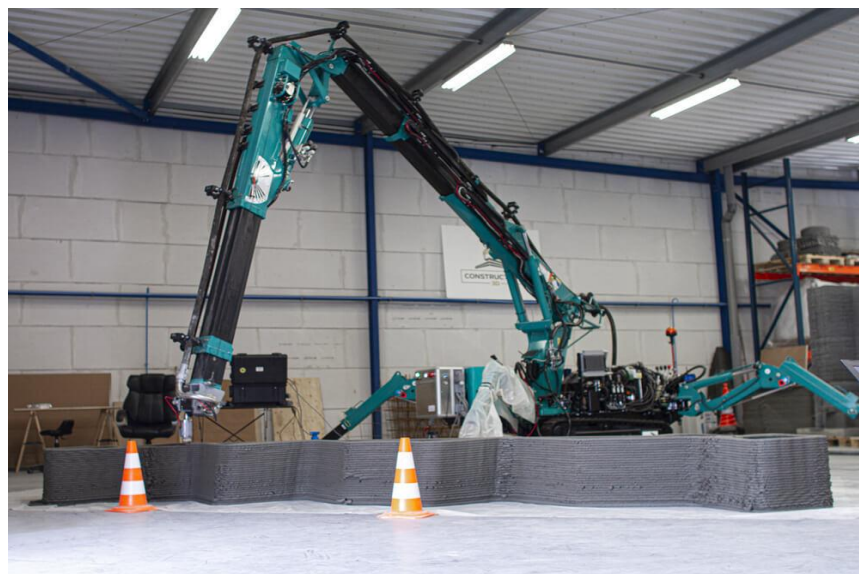


Figure 2.19 : MAXI PRINTER Constructions-3D

2.4.7- CyBe CyBe RC 3Dp :

La CyBe RC 3Dp est une imprimante 3D de construction produite par CyBe, un fabricant basé aux Pays-Bas depuis 2013 (Figure 2.20). Cette imprimante 3D de béton est composée d'un bras robotique qui dépose du matériau couche par couche en 3D. Ces caractéristiques principales sont :

- Mobile : cette version de l'imprimante 3D béton CyBe est fixée sur petit tracteur. Ainsi, la machine peut facilement être déplacée d'un site de construction à l'autre.

Plusieurs diamètres de buse sont disponibles pour varier l'épaisseur des couches. Par ailleurs, la connectivité USB et Wi-Fi sont disponibles en option. [28]



Figure 2.20: CyBe CyBe RC 3DP

2.4.8- ICON Vulcan II :

Il est commandée à l'aide de commandes intuitives à partir d'une tablette, de sorte que seuls quelques travailleurs sont nécessaires pour imprimer une maison [28] (Figure 2.21) .



Figure 2.21: ICON Vulcan II

2.4.9- MudBots MudBots Concrete 3D Printer :

La MudBots Concrete 3D Printer est une imprimante 3D de construction produite par MudBots (Etats-Unis). La MudBots Concrete 3D Printer a été lancée en 2019 et utilise la technologie d'impression 3D par extrusion.

Selon MudBots, cette imprimante 3D requiert le labeur de deux personnes. Plusieurs tailles sont disponibles, allant d'environ 1.8 x 1.8 mètres à environ 30.5 x 30.5 mètres.

Contrairement à certaines imprimantes 3D de construction nécessitant des mélanges de matériaux particuliers, la MudBots est compatible simplement avec du ciment et du chaux. De plus, l'imprimante lisse les murs en temps réel et peut imprimer une maison (fondations/murs) en 12 heures (Figure 2.22) [28].



Figure 2.22: MudBots Concrete 3D Printer

2.4.10- Strybot2:

Imprimante à béton 3D pour imprimer les maisons et autres structures en béton jusqu'à 10 x 20 x 6 mètres (Figure 2.23), Une maison de 150 m² (les murs) peut être imprimée pour 2000- 5000 USD. [29]

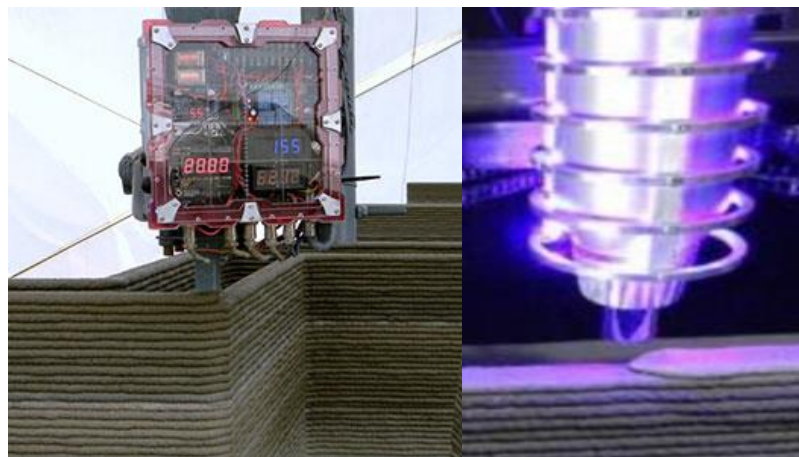


Figure 2.23: Strybot2[29]

2.4.11- Batiprint3D 3D printer :

Batiprint 3D (**Figure 2.24**) a imprimé une maison en 3D, à Nantes en France. Leur imprimante 3D imprime non seulement du ciment mais aussi de la mousse isolante, ce qui en fait l'une des solutions de construction 3D les plus complètes sur le marché

L'unité principale sur laquelle la tête d'impression est installée est un robot industriel Staubli. Il s'agit d'un bras robotique articulé à 6 axes, qui offre une grande flexibilité en termes d'atteinte du point cible Robot d'accès secondaire [29]



Figure 2.24 : Batiprint3D 3D printer [29]

2.4.12- XtreeE 3D printe :

Le système en béton de XtreeE (**Figure 2.25**) est le plus grand bras d'impression 3D à 6 axes du monde, qui est capable de créer des objets de 3 mètres de haut et de 5 mètres de long sans avoir à repositionner le bras. Grâce à une formule de béton spécialement développée pour l'impression 3D, ils atteignent une résistance à la compression de plus de 80 MPa. Leur béton ne met que 20 heures à durcir contre 20 jours pour le béton traditionnel, et il ne subit pratiquement aucun retrait grâce à son faible rapport eau/ciment. Ils peuvent également ajouter des pigments pour personnaliser les couleurs d'un objet imprimé.[30]



Figure 2.25: XtreeE 3D printe [30]

2.4.13- S-Squared ARCS VVS NEPTUN:

Elle est Capable de construire des maisons, des routes, des ponts et des bâtiments commerciaux, l'imprimante 3D spécialisée ARCS serait plus performante que les constructions traditionnelles en réduisant à la fois le temps et le coût jusqu'à 70% (Figure 2.26). [31]



Figure 2.26: S-Squared ARCS VVS NEPTUN [31]

Le tableau représente notre sélection d'imprimantes 3D de maisons. Les volumes d'impression sont indicatifs et peuvent varier selon le modèle de l'imprimante 3D.

Tableau 2.1 : sélection d'imprimantes 3D de maisons

Imprimante 3D de maison	Type	Volume d'impression (m)	Pays
BetAbram P1	Portique	16 x 8.2 x 2.5	Slovénie
COBOD BOD2	Portique	14.62 x 50.52 x 8.14	Danemark
Constructions-3D 3D Constructor	Bras robotique	13 x 13 x 3.8	France
CyBe Construction CyBe RC 3Dp	Bras robotique	2.75 x 2.75 x 2.75	Pays-Bas
ICON Vulcan II	Portique	2.6 x 8.5 x ∞	États-Unis
MudBots 3D Concrete Printer	Portique	1.83 x 1.83 x 1.22	États-Unis
Total Kustom StroyBot 6.2	Portique	10 x 15 x 6	États-Unis
WASP Crane WASP	Delta	Ø 6.3 x 3	Italie
Apis Cor	Bras robotique	8.5 x 1.6 x 1.5	Russie
Batiprint3D 3D printer	Bras robotique	Up to 7m high	France
S-Squared ARCS VVS NEPTUNE	Portique	9.1 x 4.4 x ∞	États-Unis
Contour Crafting	Portique	-	États-Unis
XtreeE	Bras robotique	-	France

***Type** : les imprimantes 3D de construction se déclinent sous deux formes principales ; soit en système à portiques (comme de géantes imprimantes 3D de bureau avec des axes X, Y et Z), soit en bras robotique. Seule la Crane WASP possède un format delta. [26]

2.5-Conclusion :

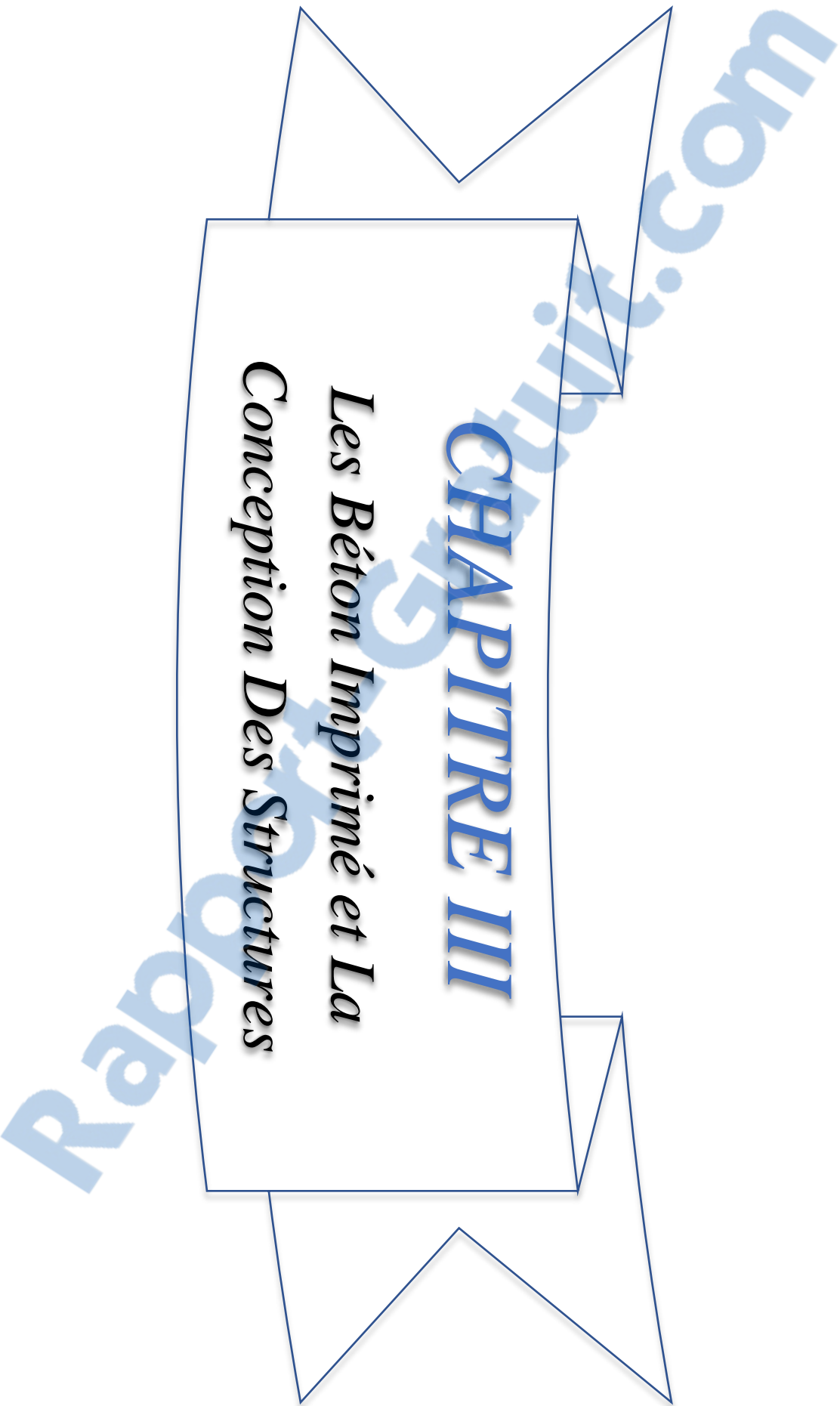
Dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence les différents aspects et phénomènes mis en jeu lors de l'impression par les deux méthodes (extrusion et liaison sélective dans un lit de particules) des matériaux à base cimentaire.

Aussi, nous avons présenté les différentes stratégies (trois) pour encourager l'utilisation de l'impression sélective dans le domaine de la construction. Nous sommes focalisés sur les deux techniques principales pour imprimer par liaison sélective : l'activation de ciment et l'intrusion sélective de pâte de ciment. Ces techniques utilisées ont montré qu'elles sont applicables pour des éléments constructifs.

Enfin, nous avons parlé des différents robots utilisés dans l'impression 3D, en ayant montré toutes leurs fonctionnalités et fonctionnement.

CHAPITRE III

*Les Béton Imprimé et La
Conception Des Structures*



3.1- Introduction :

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Les matières premières nécessaires à la production du béton sont bon marché et facilement disponibles dans la plupart des endroits du globe. Il est solide (en compression), durable, résistant au feu et, en raison de son état fluide avant la prise, il peut être appliqué sous pratiquement toutes les formes.

Malgré les avantages du béton en tant que matériau structural, il est également confronté à plusieurs défis qui sont de plus en plus reconnus. La production de ciment est très consommatrice d'énergie.

Un autre grand défi est lié au travail physique, en particulier pour le béton coulé sur place. L'érection de moules et la mise en place d'armatures nécessitent toujours un travail physique exigeant, en particulier lorsque des géométries sur mesure sont requises. Un troisième défi auquel l'industrie de la construction en béton est confrontée est les géométries complexes.

De nouvelles méthodes de fabrication d'additifs, telles que l'impression en trois dimensions (3D), ont été explorées pour la construction du béton depuis le milieu des années 1990.[1]

3.2- Compositions et propriétés des mortiers imprimables :

Il y a plusieurs types d'impression 3D des bétons et chaque méthode a une formulation de béton. Des exemples de matériaux testés en impression 3D, leurs compositions, leurs propriétés rhéologiques et mécaniques et les machines utilisées pour leurs impressions sont présentés dans le **Tableau 3.1**. Ce tableau montre que la plupart des mélanges sont réalisés à base de ciment portland. Les autres composants comme les cendres volantes, la fumée de silice, les accélérateurs, les retardateurs ou d'autres adjuvants sont utilisés pour régler le comportement rhéologique et la prise des matériaux à imprimer. Des études ont déterminé des intervalles du seuil de cisaillement et de viscosités. Les matériaux et les machines utilisés ainsi que les diamètres de buses et les vitesses d'impression variables ont montré leur influence sur le diamètre du filament. Ainsi, le diamètre des couches imprimées peut être plus large que celui de la buse selon le débit d'extrusion. Les résistances à la compression sont affectées par la direction d'impression par rapport à la direction de la force appliquée. Ces valeurs varient entre 20 MPa et 56 MPa dans les exemples présents dans le **Tableau 3.1**.

Tableau 3.1 : Caractéristiques des matériaux utilisés en impression 3D dans la littérature [2]

Ref.	Limite d'élasticité (kPa)	Viscosité plastique (Pa.s)	Buse (mm)	Filament (mm)	Vitesse	Résistance globale (Mpa)	Material	Machine
(Panda et al., 2018)	0.6-1	30-40	-	20x20, 30x15	80 mm/s	25	Cendres volantes de classe F, Laitier de haut-fourneau granulé broyé, Réactif alcalin, Sable de rivière	Une pompe à vis à coulis et une imprimante à béton à portique à 4 axes
(Zhang et al., 2018)	0.7-1.8	3.5-4.5	20	22-24	8000 Mm/min	-	Eau du robinet, type II 52,5 PC, nano argile, SF	Machine à imprimer le béton en 3D (châssis de 3,8 x 2,7 x 2,8 m) avec plate-forme mobile le long des axes Z et Y
https://d-shape.com	-	-	-	2.5-5	1-5 cm/hour	33-37	matériau granulaire et fibres de diam= 0,1-4 mm, Liant d'encre	
(Malaeb et al., 2015a)	-	-	20	-	18.76 cm/sec	40-56	Agrégats de Dmax= 2mm, ciment de type I, superplastifiant, accélérateur, retardateur	Imprimante 3D à plan retardertri-axial (x-y-z)
(Bao et al., 2018)	-	-	8	10	5-10 mm/s	25-43	Type 1 PC, CAC, cendres volantes, fumée de silice, sable de silice, farine de silice, fibre PVA, VMA, HRWR, TiO2, ANC	Manuel : pistolet à calfeutrer
(Marchment and Sanjayam, 2018)	-	-	25x25	25	2 mm/s	20	GP, OPC, sable de type 11(16/30) sable de type 2 (30/60), retardateur/agent modificateur de viscosité/rétenteur d'affaissement	Imprimante 3D sur mesure avec buse à 45 degrés et ouverture rectangulaire
(Nematollahi et al., 2018)	-	-	30x15	30	1 mm/min	20-35	Cendres volantes, scories, activateur solide, sable fin (172microm en moyenne) et grossier (898microm en moyenne)	Imprimante 3D sur mesure avec buse à 45 degrés et ouverture rectangulaire

La formulation de ces mortiers est basée sur l'étude de l'effet des constituants sur les réactions d'hydratation et les comportements rhéologiques.

3.3- Les caractéristiques du béton imprimé :

Le béton d'impression peut être caractérisé par une teneur élevée en poudre, l'absence de gros granulats, une fraction de pâte plus importante et l'utilisation d'un adjuvant modifiant la viscosité (AMV). Après la conception d'un mélange initial, le respect des exigences de qualité d'impression est la première étape du processus itératif d'évaluation et de modification du mélange proposé. En ce qui concerne la qualité d'impression acceptable, trois exigences : (a) la



qualité de la surface, (b) les bords carrés et (c) la conformité et la cohérence des dimensions, doivent toutes être satisfaites [3].

Ensuite, la stabilité de la forme d'un mélange doit être examinée et les ajustements nécessaires doivent être effectués. À cette fin, une expérience de tassement des couches est proposée, dans laquelle des couches de béton sont imprimées les unes sur les autres avec le même mécanisme d'extrusion que l'imprimante à béton pleine échelle. En outre, aucune déformation visible ne doit se produire lorsque l'intervalle de temps entre les couches est utilisé.

Après, la robustesse des mélanges développés est évaluée, et l'influence des variations de matériaux sur les propriétés du mélange d'impression est étudiée. La "variation de la teneur en eau" est considérée comme la seule source de variation [3].

La quatrième étape des essais en laboratoire d'un mélange d'impression concerne la fenêtre d'imprimabilité d'un mélange. Deux paramètres importants liés à la fenêtre d'imprimabilité sont la limite d'imprimabilité et la limite de blocage. La limite d'imprimabilité est la période la plus longue pendant laquelle un mélange peut être imprimé avec une qualité d'impression acceptable. La limite de blocage est la période la plus longue pendant laquelle un mélange peut rester dans la buse avant que le béton ne se raidisse et ne bloque l'extrusion. Les deux limites doivent être mesurées et rapportées pour chaque mélange spécifique.

Enfin, lorsque les essais en laboratoire visent à développer un mélange pour un projet de construction spécifique, un test de vérification est suggéré. Ce test doit être effectué à l'aide d'une imprimante de taille réelle dans une température et une humidité ambiantes similaires à celles du projet prévu, et il est fortement recommandé d'utiliser le même équipement de dosage, de mélange et de transport du béton que pour le projet réel. La principale fonction du test de vérification proposé est de soumettre le mélange conçu à une évaluation réelle sur le chantier. [3]

3.4- Codes de dimensionnement :

Pour justifier mécaniquement les structures en béton imprimé, un code de dimensionnement dédié pourrait s'avérer indispensable pour prendre en compte les spécificités des matériaux imprimés. Les différentes étapes de fabrication peuvent induire (notamment l'extrusion, l'injection ou le dépôt couche par couche) un comportement stratifié / ou orthotrope qui change du comportement d'un béton conventionnel isotrope et monolithique. De ce fait, l'utilisation de normes et de méthodes d'essai pour le béton conventionnel ne convient pas forcément aux matériaux d'impression et aux structures imprimées. Il est nécessaire de réviser les critères et les nouvelles règles pour mesurer et évaluer la performance mécanique du

béton d'impression 3D, ainsi que de développer de nouveaux modèles théoriques pour évaluer leur comportement structurel. Les nouvelles normes de conception et les critères d'évaluation sont très importants pour garantir l'utilisation d'éléments et de structures d'impression 3D pour supporter toutes les charges.

Une classification des différentes techniques d'impression et des stratégies de renforts (pouvant aboutir à une anisotropie du matériau) sera alors nécessaire. En attendant, l'utilisation de la mise en place des renforts a posteriori dans des réservations permet de s'appuyer sur les règlements existants : Eurocodes 2 et l'utilisation des fibres sur le Fib Model Code 2010.

3.5- Stratégies de renforcement :

Si les structures développées par Philippe Block et son équipe, soumises uniquement à la compression, ne nécessitent pas obligatoirement de renforts pour compenser la faiblesse du béton vis-à-vis d'une sollicitation de traction d'autres réalisations en béton imprimé ont nécessité l'ajout de renforts pour pouvoir assurer leur stabilité mécanique. Plusieurs stratégies ont pu être testées, comme l'ajout de fibres [4], l'ajout de renforts externes, la mise en place d'un câble inséré dans le matériau lors de l'extrusion, ou encore la mise en place de réservations pour placer ultérieurement des câbles de précontraintes ou des aciers. Le développement de stratégies de renforcement des structures en béton imprimé est donc un sujet d'étude primordial qui conditionnera l'établissement de règles de dimensionnement dédiées. Chaque solution sera présentée ci-après, avant de présenter la problématique de la normalisation et des codes de calcul. [5]

3.5.1-L'utilisation de fibres :

Afin de conférer des caractéristiques minimales en traction aux matériaux cimentaires, de nombreuses études proposent d'ajouter des fibres au mélange à imprimer [6]. Les fibres testées sont de plusieurs natures : verre, basalte, polypropylène, métal.

L'ensemble de ces études met en évidence une augmentation de la ductilité du matériau, avec une augmentation importante de la résistance à la traction par flexion. Dans son étude, Ogura et al. ont même réussi à formuler un matériau écrouissable.

Au-delà de l'apport mécanique, l'ajout de fibres permet de créer un matériau cimentaire fibré, et ainsi de pouvoir s'appuyer sur des méthodes de dimensionnement validées pour ces matériaux, le fib model code 2010 [7]. Toutefois, l'ajout de fibres, notamment en raison de leur orientation induite par le procédé d'extrusion, confère au matériau cimentaire un comportement

fortement anisotrope. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'orientation des fibres et même leur influence lors de l'extrusion et du dépôt en utilisant les théories développées sur la rhéologie des bétons fibrés.

Asprone et al., dans leur revue de littérature sur le renforcement des structures béton imprimées, indiquent toutefois que l'ajout de fibres peut s'avérer insuffisant dans le cas d'une sollicitation de traction importante [6].

On présente par la suite des exemples sur le béton imprimé renforcé par des fibres :

3.5.1.a) Impression 3D sur béton renforcé de fibres d'acier

La technique d'ajout de fibres d'acier au béton pour remplacer les barres d'armature classiques ou les réduire est appliquée dans la construction en béton depuis plusieurs décennies. L'application de ce concept à l'impression 3D du béton a nécessité la mise au point d'un dispositif permettant d'ajouter les fibres au filament imprimé près de la buse d'impression, car les fibres d'acier s'engorgeraient et endommageraient la pompe et le système de transport en raison de leur rigidité et de leur nature abrasive. Dans ce cas un prototype d'un tel dispositif a été mis au point et testé. Dans son état actuel, il s'est avéré possible de n'imprimer le béton qu'avec une courte fibre droite de 6 mm, bien que la quantité cible de 150 kg/m^3 ait été atteinte. L'orientation des fibres était très anisotrope, la majorité d'entre elles étant alignées dans la direction du flux des filaments, comme le montre un échantillon ouvert (Figure 3.4). Comme prévu, il en est résulté un fort comportement de ramollissement par déformation, mais une augmentation significative de la résistance à la flexion a néanmoins été obtenue (Figure 3.5) [8].

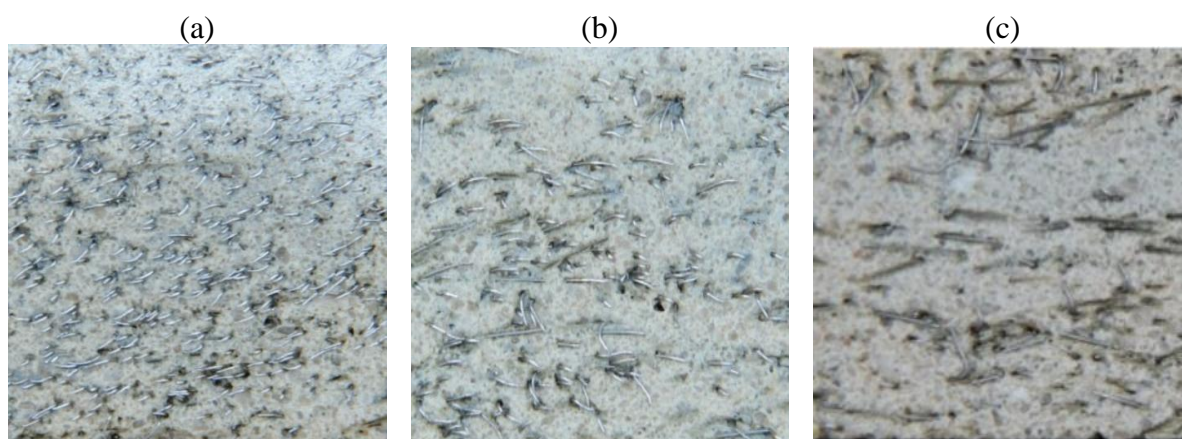


Figure 3.1 : Pièce de rechange sciée, en béton renforcé de fibres et imprimé. La figure (a) a été sciée ouverte perpendiculairement à la direction de l'impression. Les fibres sont légèrement pliées en raison du sciage. Dans les figures (b et c), montrant les sections parallèles, les fibres apparaissent comme de longues lignes, indiquant l'orientation des fibres dans la direction d'impression [8]

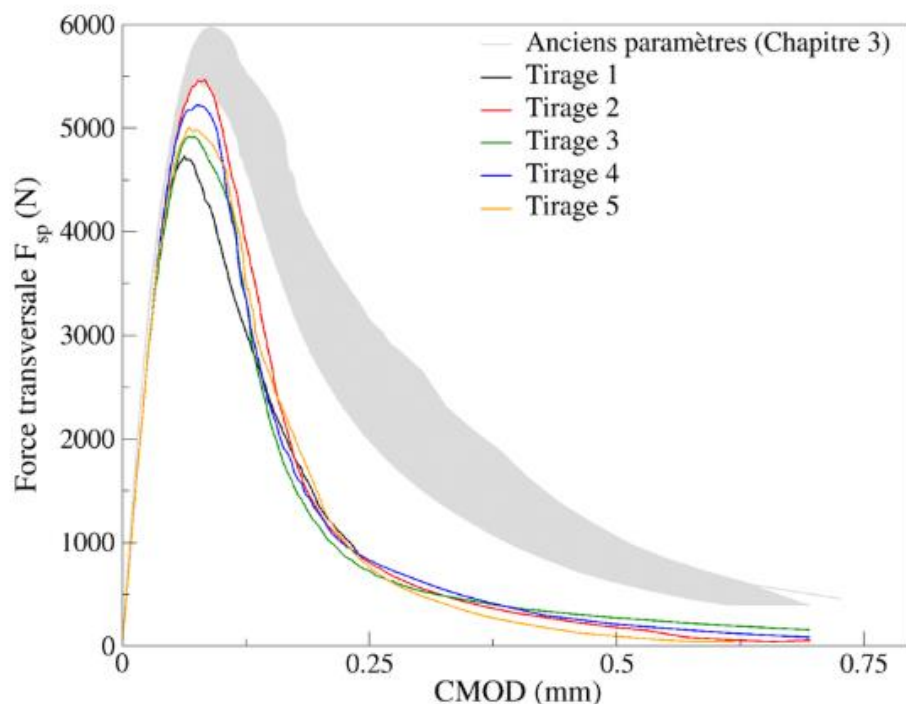


Figure 3.2: Test CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) courbes contrainte-CMOD résultantes pour les poutres imprimées, sans fibre (CM3.0.1-3) et avec fibre de 6 mm (CM3.6.1-3) [8]

3.5.1.b) Composite cimentaire à base de fibres PVA (alcool polyvinylique) à durcissement par contrainte

Récemment, des matériaux cimentaires à durcissement par contrainte ont été mis au point. Ceux-ci sont basés sur l'application de fibres PVA très finement réparties, qui possèdent une résistance relativement élevée (pour les polymères) et une excellente adhérence au béton. Ces matériaux sont généralement auto-nivelants. Dans le cadre de cet exemple, un matériau a été développé sur la base d'une caractérisation rhéologique approfondie en relation avec les propriétés de l'installation 3D. Après une trajectoire intense de mise au point des propriétés du matériau, deux mélanges imprimables ont été obtenus, qui ont tous deux montré un comportement clair de durcissement par déformation (Figures 3.3 et 3.4). Grâce à la flexibilité de la fibre PVA, ils ont pu être ajoutés au mélange initial et pompés vers la tête d'impression. Contrairement à la fibre d'acier, aucun dispositif supplémentaire n'est nécessaire, bien qu'un mélange soigneux des fibres dans un mélange très visqueux se soit avéré crucial pour éviter l'encrassement de la pompe à déplacement linéaire. Les performances structurelles des

matériaux développés sont extrêmement prometteuses et feront l'objet de recherches et de développements futurs [9].



Figure 3.3 : Impression avec l'un des composites cimentaires à durcissement sous contrainte renforcés de fibre PVA [9]

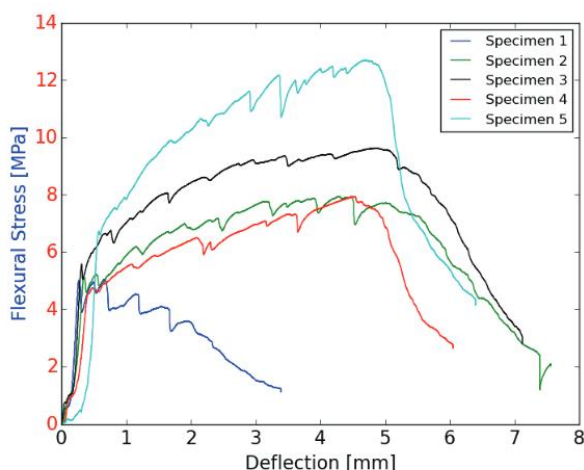
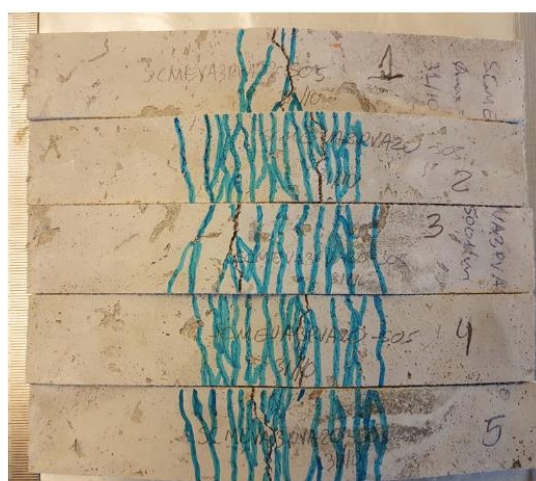


Figure 3.4 : Epreuves PVA SHCC imprimées après essai avec motif de fissuration indiqué et courbes contrainte-déformation du test de flexion en 4 points [9]

3.5.2- Les renforts externes :

Asprone et al. ont proposé la fabrication d'une poutre composée de segments assemblés par des barres en acier externes, tenant lieu de renforts. Les barres sont ancrées dans les segments à l'aide d'un mortier de scellement et permettent de donner aux matériaux des caractéristiques mécaniques suffisantes en flexion, un exemple est présenté en (Figure 3.5).

Cette solution s'avère satisfaisante d'un point de vue performance mécanique. Toutefois, le matériau du renfort doit être insensible à la corrosion pour permettre une

durabilité acceptable de la structure imprimée. Dans ce cas, l'utilisation d'acier inoxydable ou de carbone, par exemple, s'avère indispensable.

Il convient aussi de gérer l'interface entre les dépôts pour qu'il y ait une pénétration des fibres entre couches. Si ce n'est pas le cas, l'intercouche pourra présenter une faiblesse mécanique en traction.

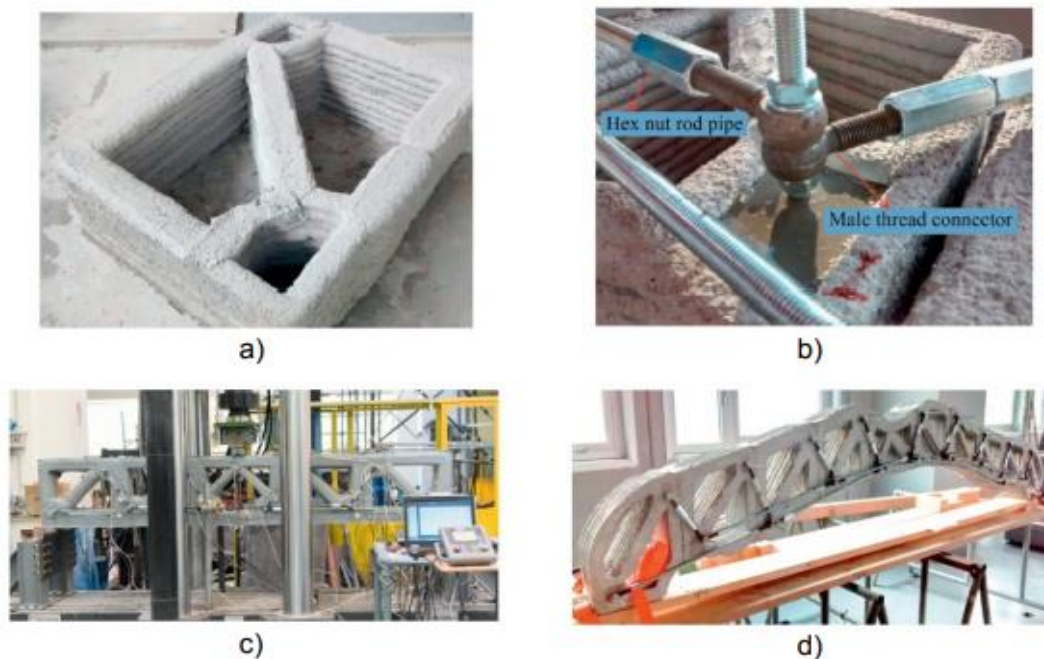


Figure 3.5 : Exemple de renforts externes : a) segment en béton imprimé 3D ; b) détails de raccordement des armatures extérieures en acier ; c) poutres à section droite ; d) poutres à section variable obtenues par montage des armatures externes [6].

3.5.3. Câble entraîné au sein du matériau extrudé :

Une solution de renfort a été proposée par les chercheurs de l'université technique d'Eindhoven. Elle consiste à l'entraînement d'un câble métallique par l'extrusion du matériau cimentaire. Le câble continu se retrouve enserré dans la couche de béton déposée et confère une résistance à la flexion au matériau cimentaire imprimé [10].

Cependant, l'effet du renfort est limité aux directions perpendiculaires au dépôt et le diamètre du câble est réduit, car il doit présenter une souplesse nécessaire pour que son entraînement soit possible lors de l'impression. De ce fait, l'efficacité de cette technique de renfort est limitée. Dans ces études, les câbles en acier haute performance utilisés présentent en effet des diamètres de 0,63 mm à 1,2 mm, ce qui est loin des diamètres standards utilisés dans le domaine du béton armé. Aussi, des problèmes de glissement des câbles avant la rupture ont été rapportés, surtout pour les câbles présentant les plus fortes résistances mécaniques (pas de rupture du câble lors des essais de flexion) [10].

Cette méthode requiert donc une fiabilisation pour obtenir une mise à l'échelle réussie des éléments structuraux fabriqués avec câbles d'armature entraînés. Ainsi, le dimensionnement des ancrages et la qualité de l'accroche câble/matrice doivent être mieux définis pour arriver à un dimensionnement fiable et optimal avec cette technique de renfort [10].

Un exemple sur un béton imprimé en 3D renforcé par des câbles en acier est donné par la suite. Cette approche complètement différente, consiste à repenser les barres de renforcement conventionnelles et à appliquer des câbles en acier à haute résistance et à haute flexibilité. Un dispositif a été mis au point pour entraîner les câbles dans le filament de béton pendant l'impression (Figure 3.6). Des essais d'arrachement et de flexion ont été effectués en utilisant 3 types de câbles de différentes résistances (Figure 3.7). Il a été confirmé que des méthodes de calcul communes pour le béton armé conventionnel pouvaient également être appliquées au béton imprimé renforcé par des câbles. La ductilité est facilement obtenue, mais le durcissement dépend fortement de la conception des éléments en béton, car dans de nombreux cas, les câbles les plus résistants ont cédé par glissement plutôt que par rupture, et n'ont donc pas pu développer toute leur résistance. Les recherches visant à améliorer le comportement des liaisons sont en cours. L'entraînement des câbles d'armature en acier améliore considérablement la sécurité structurelle et a donc été appliqué comme renforcement latéral dans les couches du premier pont en béton imprimé MDM au monde pour les bicyclettes à Gemert, dans le Brabant septentrional (Figure 3.8). Plusieurs centaines de mètres ont été appliqués [11].



Figure 3.6 : Impression 3D du béton avec une cabine de renfort directement entraînée [11].

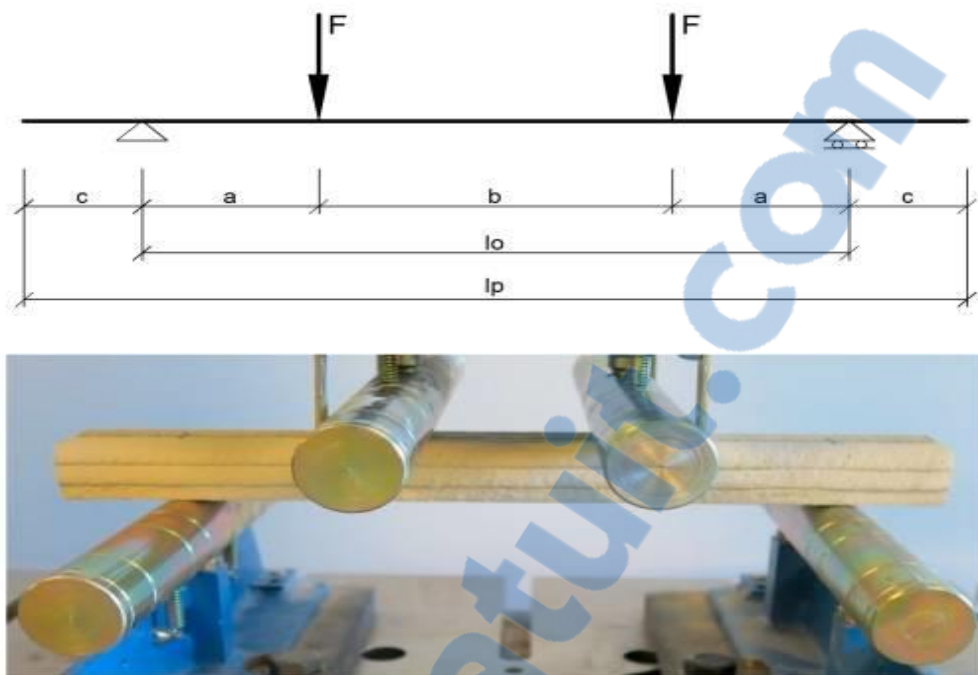


Figure 3.7 : Test de flexion sur poutre en béton imprimée en 3D avec armature de câble [11]



Figure 3.8 : Premier pont en béton imprimé MDM au monde pour vélos à Gemert, Noord Brabant, le jour de l'ouverture. Les couches imprimées contiennent du câble d'acier comme renfort latéral (le pont est précontraint dans le sens longitudinal).[11]

3.5.4-Les réservations :

Une autre technique est de laisser des réservations pour placer des aciers ultérieurement. Le but est ici de se servir de la structure imprimée comme coffrage ou éléments préfabriqués, puis de les assembler ou de les claveter avec des aciers et/ou du béton. Dans ce cadre, il est possible de se rapprocher des codes de calcul existants pour la justification mécanique de la structure. Cette utilisation des structures imprimées reste dans la continuité des méthodes de construction traditionnelles et permet donc d'utiliser les règles de dimensionnement Eurocodes [12].

Dans ce cas, plusieurs solutions sont possibles. Les chercheurs d'Eindhoven et les chercheurs de Longhborough[12] ont laissé des réservations dans des éléments imprimés pour les assembler ultérieurement à l'aide de câbles de précontraintes. Ainsi, l'utilisation de la technique de précontrainte a permis de réaliser une passerelle cyclable à partir de voussoirs imprimés (Figure 3.9).



Figure 3.9: Passerelle réalisée en voussoirs imprimés et assemblés par la technique de la précontrainte. Visualisation des blocs d'ancrage [7]

Une méthode de construction de murs par la méthode du Contour Craftings'inspire des murs maçonnés classiques. Lors de la réalisation de ce type de murs verticaux, des réservations verticales sont réalisées pour la mise en œuvre ultérieure d'un chaînage de structures maçonnées classiques, que l'on retrouve couramment dans les maçonneries en blocs béton de maisons individuelles. Ces méthodes sont reprises dans les applications des entreprises. Dans ce cas, les structures imprimées jouent le rôle de coffrages perdus, à l'intérieur desquels un poteau en béton armé classique est réalisé par ajout de barres d'acier et coulage de béton. Ainsi, pour cette technique de renfort, les Eurocodes et codes de dimensionnement relatifs au béton armé peuvent s'appliquer, ainsi que les méthodes de conception liées aux structures maçonnées conventionnelles en blocs bétons [14].

3.5.5. Envelopper des armatures préalablement mises en place :

Cette solution est notamment proposée par l'entreprise HuaShengTengda Ltd, où deux buses apportant du béton viennent déposer, couche par couche, du béton de part et d'autre d'une cage d'armatures préalablement mise en place (Figure 3.10). Cette technique est rapportée dans l'article de De Schutter et al. [15].

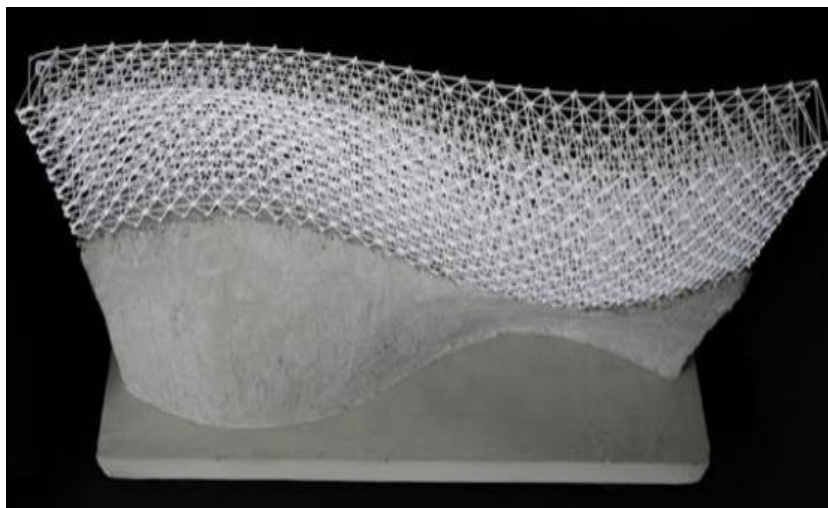


Figure 3.10 : Exemple de renfort imprimé [16] (Les treillis qui jouent le rôle de renfort structurel sont des applications intelligentes pour le béton)

Cette méthode se rapproche de celle du MeshMould, où du béton est coulé dans un treillis d'acier optimisé et imprimé, jouant le rôle d'armatures pour un mur porteur et pouvant avoir une géométrie complexe.

3.6. L'impression 3D et conception des structures :

3.6.1- L'impression 3D béton : une aubaine pour les architectes :

L'impression 3D des matériaux à base cimentaire procure une liberté de forme inédite pour les architectes et les concepteurs de pièces en béton. La réalisation récente montre la complexité des formes et des textures accessibles grâce aux méthodes de fabrication additive dédiées aux matériaux à base cimentaire (Figure 3.11 et 3.12).

La résistance des produits annoncée est équivalente à 95 % de celle d'un béton banché.



Figure 3.11 : Exemple de structures complexes réalisées par impression 3D béton : récifs artificiels immergés. Les nombreuses alvéoles dessinées par le béton favorisent l'implantation de la faune sous-marine [17].



Figure 3.12 : Réalisation d'une structure imprimée par l'université de Loughborough[18]

Grâce à la fabrication additive appliquée au béton, il est possible de réaliser des pièces à motif unique sans avoir préalablement à fabriquer de moules onéreux à usage unique. De ce point de vue, ce nouvel outil peut ouvrir des champs de possibilités jusqu'ici inaccessibles pour les architectes. L'exemple de la Dfab House, en Suisse, montre les libertés données aux architectes par ces nouvelles techniques de construction digitale pour concevoir des structures aux formes à la fois complexes, originales, mais également optimisées, (Figure 3.13) [19].

Un autre exemple Projet TailorCrete est un projet de recherche sur quatre ans menés 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 3.14) à moindre coût.



Figure 3.13 : La Dfab House : un bâtiment démonstrateur d'application concrète de la fabrication additive et numérique dans le monde de la construction [19].



Figure 3.14 : Réalisations du projet [20,21]

3.6.2- Vers des structures aux formes optimisées :

La fabrication digitale permet aussi d'optimiser les quantités de matériaux utilisés en plaçant la matière seulement là où elle est nécessaire pour la stabilité mécanique de la structure. Ainsi, la conception des structures de bâtiments et des ouvrages peut se faire en utilisant le concept d'optimisation topologique. Dans de nombreux domaines d'applications, la fabrication additive est liée à une conception utilisant cette optimisation topologique [22].

L'optimisation topologique est un outil de conception utilisant des méthodes mathématiques permettant de minimiser les quantités de matières dans un volume donné, soumis à des sollicitations mécaniques. Une illustration de la méthode sur une poutre chargée en milieu de travée sur deux appuis simples est donnée sur la Figure 3.15 et est issue des travaux de Vantighem et al. [23].

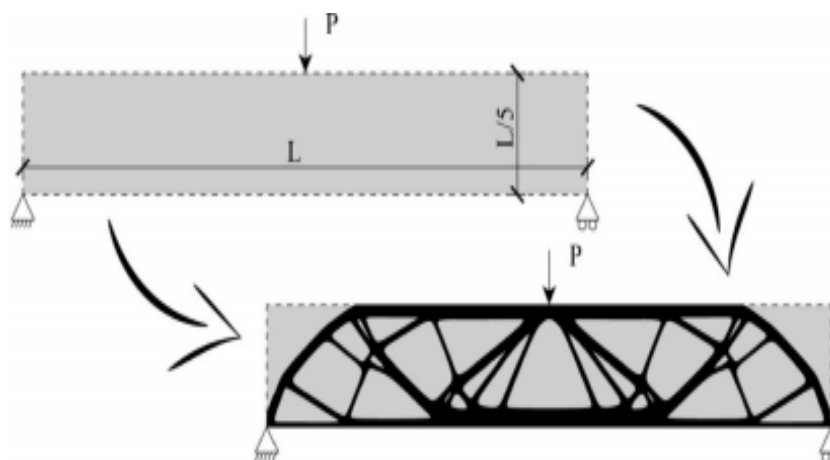


Figure 3.15 : Exemple d'application de l'optimisation topologique sur une poutre sur deux appuis simples chargée en milieu de travée

Il est aussi possible de s'inspirer de la nature et du vivant, qui a su, par une lente sélection naturelle, aboutir à des structures présentant une utilisation de la matière optimisée pour concevoir des éléments porteurs minimisant le volume de matière. Dans ce sens, la comparaison de la structure poreuse de l'os humain avec le poteau réalisé par l'entreprise XtreeE Aix-en-Provence montre les possibilités de l'impression 3D béton pour la construction de structures optimisées et bioinspirées (Figure 3.16). [24]

Une autre possibilité de la fabrication digitale béton est de construire des structures soumises uniquement à des sollicitations de compression, à l'image des structures maçonnées en forme de voûtes ou d'arches. On pallie ainsi la faiblesse mécanique et la fragilité naturelles des matériaux cimentaires en traction. Cette stratégie est notamment portée par l'équipe du Pr Block de l'ETH Zurich [25]. L'idée est d'utiliser des techniques de fabrication digitale de coffrage à base de tissus et de câbles « renforts » comme support pour la projection d'une couche mince de béton qui sera sollicité en compression (Figure 3.17).



Figure 3.16 : Poteau support à structures poreuses réalisé par fabrication digitale par l'entreprise XtreeE[23].



Figure 3.17: Structures réalisées en minimisant les efforts de traction dans le béton [26].

3.6.3- Vers un passage du noir et blanc à la couleur pour les imprimantes 3D béton :

De nombreux travaux de recherche portent aujourd'hui sur du travail simultané et collaboratif de différents robots. À l'image des imprimantes papier, il est ainsi possible d'imaginer des impressions avec plusieurs encres : bétons de différentes densités et résistances, isolants, renforts... Les combinaisons en découlant sont innombrables et pourraient aboutir à tirer bénéfice de l'utilisation de l'impression des différents matériaux : un isolant déposé pourrait servir de support au béton pour des géométries complexes [27]. (Figure 3.18)

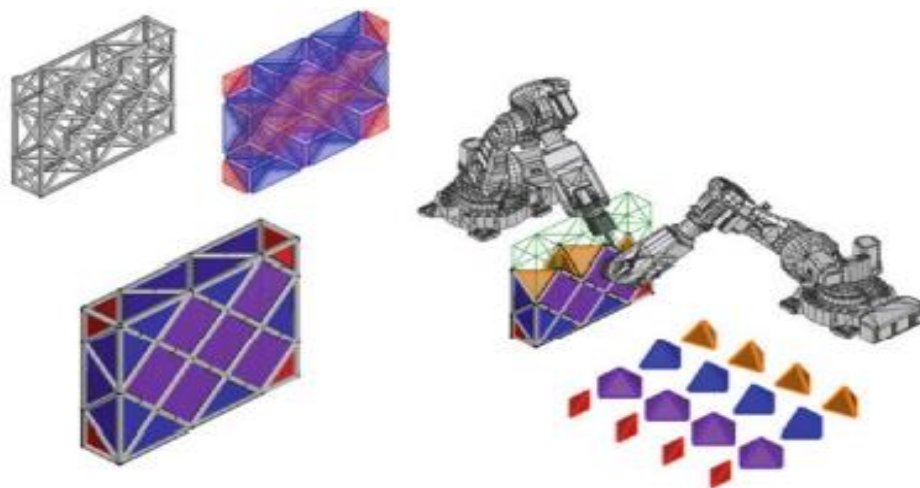


Figure 3.18 : Fabrication de murs en béton (en gris) /isolant (blocs colorés) par la collaboration de deux robots [28]

3.7. Conclusion :

Ce chapitre est consacré au béton imprimé. On distingue plusieurs types d'impression 3D des bétons et chaque méthode a une formulation de béton spécifique. La procédure d'impression du béton comprend des caractéristiques bien déterminées

Dans le but d'assurer la stabilité mécanique de la structure imprimée spécialement aux tractions, il existe plusieurs stratégies de renforcements tels que l'ajout de fibres, renforcement externes, renforcement par câbles ...

L'impression 3D donne la possibilité de réalisation des forme complexe, ce qui dans une liberté d'imagination pour les Architect et les concepteurs de pièces en béton, en plus nous donne la possibilité de l'optimisation de la structure par la minimisation des quantités de matériaux employés en les plaçant seulement ou elle est nécessaire pour la stabilisation de structure.

Le développement de la technologie d'impression 3D dans l'industrie a contribué au grand saut technologique grâce à diverses méthodes de production d'objets

Dans ce mémoire, nous avons effectué une étude bibliographique sur la technologie d'impression 3D en génie civil et ses utilisations en construction. L'impression 3D est un processus d'assemblage de matériaux pour fabriquer des objets ou structures à partir d'un modèle de données 3D, généralement couche par couche. Cette technologie a connu un grand essor surtout à partir des années 80. Elle est utilisée dans plusieurs domaines. Dans le présent mémoire on s'est intéressé à ses utilisations dans le domaine de la construction tout en se focalisant sur les deux principales technologies dont l'impression par extrusion/dépôt et l'impression par liaison sélective dans un lit de particules. Nous avons présenté les différents robots utilisés dans l'impression 3D, en ayant montré toutes leurs fonctionnalités.

L'impression en 3D, a été explorée pour la construction du béton depuis le milieu des années 1990. Où il y a eu l'apparition du béton imprimé. On distingue plusieurs types d'impression 3D des bétons et chaque méthode a une formulation de béton spécifique. La procédure d'impression du béton comprend des caractéristiques bien déterminées, tels que la qualité d'impression, la stabilité de la forme, la robustesse et la fenêtre d'imprimabilité du mélange. Ces caractéristiques doivent être vérifiées à l'avance au laboratoire.

Les réalisations en béton imprimé nécessitent l'ajout de renforts pour pouvoir assurer leur stabilité mécanique. Plusieurs stratégies ont été présentées dans ce mémoire, l'ajout de fibres, l'ajout de renforts externes, la mise en place d'un câble inséré dans le matériau lors de l'extrusion et la mise en place de réservations pour placer ultérieurement des câbles de précontraintes ou des aciers. Il semble que pour chaque projet conçu pour une mise en œuvre dans la technologie d'impression additive, une composition individuelle du mélange permet un renforcement spécifique qui devrait être conçue dans le but de répondre aux exigences standards

Conclusion Générale

démontrées dans les codes de dimensionnement et de calcul pour assurer la stabilité mécanique de la structure imprimée. Ainsi, l'application de béton imprimé en matériau structural ne semble plus une utopie et il est aujourd'hui important de poser les bases de ces nouvelles techniques de fabrication en faisant une revue exhaustive des savoirs et technologies développés dans le domaine.

L'impression 3D donne la possibilité de réalisation des forme complexe, ce qui donne une liberté d'imagination pour les architectes et les concepteurs de pièces en béton, en plus elle nous donne la possibilité de l'optimisation de la structure par la minimisation des quantités de matériaux employés en les plaçant seulement ou elle est nécessaire pour la stabilisation de structure.

Nous recommandons comme perspective pour les futurs travaux de faire une application réelle d'impression 3D d'un objet de génie civil. Pour commencer on peut utiliser les petites imprimantes disponibles pour imprimer :

- Des prototypes difficiles à réaliser avec les méthodes de production normale. Ces prototypes peuvent être utilisés pour la pédagogie. A titre d'exemple un modèle réduit pour un essai en table vibrante. Cette application était parmi les objectifs de ce mémoire, nous ne l'avons pas réalisé à cause de la pandémie COVID19.
 - Des maquettes complètes de bâtiments ce qui permettra d'aller plus loin dans l'anticipation de la réalisation d'un projet et permet d'aller vers une optimisation des méthodes de réalisation et vers une qualité de construction optimale.
-

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE I : Généralités sur l'impression 3D et la fabrication additive.

- [1] D'après le site : lamelee.com, Article publié d'investiture de Barak Obama- Février 2013.
- [2] Arnaud Perrot, Sofiane Amziane, livre l'impression 3D du béton, ISTE éditions LTD 2019
- [3] Mme Huguette Tiegna, par OPECST, Article publié le 22 mars 2018
- [4] Guillaume B, Michel B, 2017 écoles de design de l'université Laval 86p
- [5] Adapté de (CARRABINE 2010 ; SCHUMACHER, FABBRI ET AL.2014)
- [6] industrie-techno.com/article/les-promesses-de-l'impression-3d-metallique.38572
- [7] Alexandre Pierre, Maître de conférences au Laboratoire de mécanique et matériaux du génie civil et directeur des études du Cours master en ingénierie Génie civil de l'Université de Cergy-Pontoise, Spécialiste du comportement des matériaux cimentaires, Article,30 Janvier 2018
- [8] Par Martin Lansard, publication sur site .aniwaa.fr/les-technologies-d'impression-3d/, 17 octobre 2018
- [9] Allen Brooly, Halloran J, stéréolithographie, vol.3.NO.2, pp61,65, année 1997
- [10] Baicheng Zhang, Article publié le 04/2013 à Belfort-Montbéliard Ecole doctorale d'ingénierie et microtechnique
- [11] D'après CIMBeton, Article publié sur infociments.fr, Oct2019
- [12] PERROT A., RANGEARD D., PIERRE A., "Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques", Materials and Structures, vol. 49, no. 4, pp. 1213–1220, 2016.
- [13] LOWKE D., DINI E., PERROT A. et al., "Particle-bed 3D printing in concrete Construction Possibilities and challenges", Cement and Concrete Research, July2018.
- [14] LLORET E. et al., "Complex concrete structures: Merging existing casting Techniques with digital fabrication", Mater. Ecol., vol. 60, pp. 40–49, March 2015
- [15] HACK N., LAUER W., "Mesh–Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork", Architectural Design, vol. 84, no. 3, pp. 44–53,2014.
- [16] HACK N., LAUER W., GRAMAZIO F. et al., "Mesh Mould: Robotically fabricated metal meshes as concrete formwork and reinforcement", in Proceedings ofThe 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC InternationalConference on Textile Reinforced Concrete, Aachen, Germany, pp. 7–10, 2015.
- [17] NEUDECKER S. et al., "A new robotic spray technology for generative manufacturing of complex concrete structures without formwork", Procedia CIRP,vol. 43, pp. 333–338, 2016.
- [18] LINDEMANN H. et al., "Development of a Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) Technology for Additive Manufacturing of Reinforced Freeform Concrete Structures", in RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, pp. 287–298, 2018.

CHAPITRE II : Les méthodes d'impression 3D en génie civil

- [1] C. Haas. Identifying Root Causes of Construction Accidents. 9364(January 2000):1970–1998, 2015.
- [2] H. Van Damme. Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*, 112(April):5–24, 2018.
- [3] L. Huang, G. Krigsvoll, F. Johansen, Y. Liu, and X. Zhang. Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(June 2016):1906–1916, 2018
- [4] C. P. Vernet. Ultra-durable concretes: Structure at the micro- and nanoscale. *MRS Bulletin*, 29(5):324–327, 2004.
- [5] T. P. Wangler. SMART DYNAMIC CASTING SLIPFORMING WITH FLEXIBLE FORMWORK - INLINE. (March), 2017.
- [6] B. Khoshnevis. Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1):5–19, 2004.
- [7] Arnaud Perrot, Sofiane Amziane, livre l'impression 3D du béton, ISTE éditions LTD 2019
- [8] WANGLER T. et al., “Digital concrete: Opportunities and Challenges”, *RILEM Technical Letters*, vol. 1, pp. 67–75, October 2016
- [9] KHOSHNEVIS B., HWANG D., YAO K.-T. et al., “Mega-scale fabrication by contour crafting”, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 301–320, 2006.
- [10] KHOSHNEVIS B. et al, “Lunar contour crafting - a novel technique for ISRUbased habitat development”, in 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [11] “APIS COR | We print buildings”. Available at: <http://apis-cor.com/>, 2018.
- [12] NERELLA V.N., KRAUSE M., NÄTHER M. et al., “CONPrint3D—3D printing technology for onsite construction”, *Concrete Institute of Australia*, vol. 42, no. 3, pp. 36–39, 2016
- [13] BARLIER A., BERNARD A., *Fabrication additive du prototype rapide à l'impression 3D*, Dunod, 2016
- [14] PEGNA J., “Application of cementitious bulk materials to site processed solid freeform construction”, *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, United States, 1995.
- [15] MARCHON D., KAWASHIMA S., BESSAIES-BEY H. et al., “Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry”, *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 96–110, 2018.
- [16] LLORET E., SHAHAB A.R., LINUS M. et al., “Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication”, *Computer-Aided Design*, vol. 60, pp. 40–49, March 2015.
- [17] PIERRE A., WEGER D., PERROT A. et al., “Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: Analytical and experimental study”, *Materials and Structures*, vol. 51, no. 22, 2018.
- [18] CESARETTI G., DINI E., DE KESTELIER X. et al., “Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology”, *Acta Astronautica*, vol. 93, pp. 430–50, 2014.
- [19] LOWKE D., DINI E., PERROT A. et al., “Particle-Bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges”, *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 50–65, 2018.
- [20] WEGER D., LOWKE D., GEHLEN C., “3D printing of concrete structures using the selective binding method - Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength”, 11th Fib International PhD Symposium in Civil Engineering, The University of Tokyo Edition, Tokyo, pp. 403–410, 2016.
- [21] WEGER D., LOWKE D., GEHLEN C., “Additive manufacturing of concrete elements using selective cement paste intrusion – Effect of layer orientation on strength and durability”, *RILEM 1st International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Zurich, Switzerland, 2018.

- [22] LOWKE D., DINI E., PERROT A. et al., “Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges”, Cement and Concrete Research, July 2018.
- [23] PIERRE A., WEGER D., PERROT A. et al., “Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: Analytical and experimental study”, Materials and Structures, vol. 51, no. 1, p. 22, January 2018.
- [24] <https://www.emploi-environnement.com/news/impression-3d-btp-genie-civil-universite-cergy-pontoise-182.html>
- [25] <https://www.tomsguide.fr/big-delta-la-plus-grande-imprimante-3d-au-monde/>
- [26] <https://www.3dnatives.com/contour-crafting-dici-deux-ans/>
- [27] <https://www.engineeringcivil.com/automated-construction-by-contour-crafting.html>
- [28] <https://www.aniwaa.fr/guide-achat/imprimantes-3d/imprimante-3d-construction-maison/>
- [29] <http://www.totalkustom.com/>
- [30] <http://www.3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/Batiprint3D.pdf>
- [31] <https://3dprintingindustry.com/news/s-squared-3d-printers-debuts-large-autonomous-robotic-construction-system-145078/>

CHAPITRE III : Les Béton imprimé et la conception des structures

- [1] <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1752759.2016.1209867>
- [2] Noura, KHALIL, Formulation et caractérisation chimique et rhéologique des mortiers imprimables en 3D à base de mélanges de ciments portland et sulfoalumineux, THESE de DOCTEUR, soutenus en- 2018, UNIVERSITE DE LILLE, France, 149p
- [3] Ahmed, Z et al, First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018, springer, Timothy Wangler Robert J. Flatt, 2019
- [4] FARINA I. et al., “On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers”, Composites Part B: Engineering, vol. 90, pp. 76–85, 2016.
- [5] ASPRONE D., MENNA C., BOS F.P. et al., “Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete”, Cement and Concrete Research, 2018.
- [6] LE T.T. et al., “Hardened properties of high-performance printing concrete”, Cement and Concrete Research, vol. 42, no. 3, pp. 558–566, 2012.
- [7] HAMBACH M., VOLKMER D., “Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste”, Cement and Concrete Composites, vol. 79, pp. 62–70, May 2017.
- [8] BEVERLY P., fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013.
- [9] <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2018.1548069>
- [10] <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/10/2253/htm>
- [11] BOS F.P., AHMED Z.Y., JUTINOV E.R. et al., “Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete”, Materials, vol. 10, no. 11, p. 1314, 2017.
- [12] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706261/>
- [13] LIM S. et al., “Fabricating construction components using layered manufacturing technology”, in Global Innovation in construction Conference, pp. 512–520, 2009.
- [14] KHOSHNEVIS B., “Automated construction by contour crafting–related robotics and information technologies”, Best ISARC 2002, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, January 2004.

- [15] WU P., WANG J., WANG X., “A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry”, *Automation in Construction*, vol. 68, pp. 21–31, August 2016.
- [16] HACK N., LAUER W., GRAMAZIO F. et al., “Mesh Mould: Robotically fabricated metal meshes as concrete formwork and reinforcement”, in *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete*, Aachen, Germany, pp. 7–10, 2015.
- [17] <http://www.3ders.org/articles/20151022-swiss-mesh-mould-3d-printing-and-in-situ-fabricatorfor-construction-sites.html>
- [18] “Project – Rexcor Artificial Reef | XtreeE”, available at: <http://www.xtreee.eu/>, 2018
- [19] Innovative Manufacturing and Construction Research Center, Loughborough University, UK: <http://www.freeformconstruction.com/> Chercheurs : Richard Buswell et Simon Austin
- [20] “DFAB HOUSE – Building with robots and 3D printers”, Available at: <http://dfabhouse.ch/>, 2018.
- [21] <http://www.tailorcrete.com>.
- [22] 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
- [23] HOLLISTER S.J., “Porous scaffold design for tissue engineering”, *Nature Materials*, vol. 4, no. 7, p. 518, 2005.
- [24] VANTYGHM G., BOEL V., DE CORTE W. et al., “Compliance, Stress-based and Multi-physics topology optimization for 3D-Printed concrete structures”, in *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 323–332, 2018.
- [25] LES ECHOS, “L’impression 3D veut imiter la nature”. Available at: https://www.lesechos.fr/13/12/2016/LesEchos/22338-046-ECH_1-impression-3dveut-imiter-la-nature.htm, December 2016.
- [26] RIPPMANN M., BLOCK P., “Rethinking structural masonry: Unreinforced, stonecut shells”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, vol. 166, no. 6, pp. 378–389, December 2013.
- [27] VEENENDAAL D., BLOCK P., “Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork”, *Engineering Structures*, vol. 75, pp. 39–50, 2014.
- [28] DUBALLET R., BAVEREL O., DIRRENBARGER J., *Design of Space Truss Based Insulating Walls for Robotic Fabrication in Concrete*, 2018.