

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed Seddik Benyahia-Jijel-  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
**Département d'Architecture**



**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :  
Master Académique**

**Filière :  
ARCHITECTURE**

**Spécialité :  
ARCHITECTURE ET TECHNOLOGIE**

**Présenté par :  
Mohammed Fawzi BOUKRIAA  
Fawzi BOULOUSSEKH  
Idris CHENNAF**

**THEME :  
L'apport de l'impression additive dans la  
préfabrication du bâtiment**

Date de soutenance : 11 / 07 /2019

Composition du Jury :

**Hanane KIHAL** : M.A.A, Université de Mohammed Seddik BENYAHIA-Jijel, Président du jury

**Djenette LAOUAR** : M.A.A, Université de Mohammed Seddik BENYAHIA-Jijel, Directeur de mémoire

**Larbi BOUTAOUTAOU** : M.A.A, Université de Mohammed Seddik BENYAHIA-Jijel, Membre du jury

Année universitaire 2018-2019

# ***Remerciements***

***Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant***

***Qui nous éclaire toujours le bon chemin***

***On tient à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur de mémoire, Madame Djenette LAOUAR. On la remercie de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.***

***On 'adresse nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.***

***BOUKRIAA Mohammed Fawzi***

***BOULOUSSEKH Fawzi***

***CHENNAF Idris***

# ***Dédicace***

***Je dédie ce modeste travail :***

***A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.***

***A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement, A ma chère sœur pour son encouragement permanent, et son soutien moral***

***A tous mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,***

***Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,***

***Merci d'être toujours là pour moi.***

***BOUKRIAA Mohammed Fawzi***

# ***Dédicace***

***Je dédie ce modeste travail :***

***A ceux qui m'ont donné la vie, l'espoir et l'amour, à ceux***

***Qui m'ont encouragé le long de mes études :***

***Ma très chère mère et mon très cher père,***

***Que le dieu me les protègent et me les garde***

***A mes frères***

***A toute ma famille***

***A tous mes amis***

***A tous les personnes qui m'ont aidé de proche***

***Ou de loin pour réaliser ce travail***

***BOULOUSSEKH Fawzi***

# ***Dédicace***

***Je dédie ce modeste travail :***

***A mes très chers parents, qui sont la source de lumière qui  
m'éclairait depuis ma naissance***

***A ma chère mère, qui m'a toujours soutenue dans toutes les  
étapes de ma vie***

***A mon cher père, à qui j'exprime ma sincère et éternelle  
gratitude pour son attention, son soutien et surtout l'amour  
qu'il me procure.***

***A mes très chers frères : Zakaria , Yahia , Younes***

***A mes grands parents***

***A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines***

***CHENNAF Idris***

# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION GENERALE

Introduction .....	I
Problématique.....	II
Hypothèses .....	III
Objectifs .....	III
Motivation du choix du thème .....	III
Methodologie de recherche .....	III
Structure de memoire .....	IV

## **PARTIE 1 : PARTIE THEORIQUE**

### **CHAPITRE I : LA PREFABRICATION COMME UN PROCEDE DE CONSTRUCTION**

Introduction .....	1
I.1 Définition de la préfabrication .....	1
I.2 Historique de la préfabrication.....	1
I.3 Formes de préfabrication : .....	2
I.3.1 La préfabrication légère : .....	2
I.3.2 La préfabrication lourde :.....	3
I.4 Types d'installation de la préfabrication.....	4
I.4.1 Atelier précaire : .....	4
I.4.2 Atelier forain :.....	5
I.4.3 Usines fixes :.....	5
I.5 Innovation technologie de la préfabrication : .....	6
I.5.1 Système de structure et performance : .....	6
I.5.2 Innovation architectural .....	7
I.6 Avantages et Inconvénients de la préfabrication : .....	8

Conclusion.....	9
-----------------	---

## **CHAPITRE II : L'IMPRESSION ADDITIVE COMME PROCESSUS DE FABRICATION**

Introduction .....	10
II.1 Utilisation de l'impression additive.....	10
II.2 Aperçue historique.....	11
II.3 Développement de l'impression additive .....	12
II.4 Types de technologies d'impression additive .....	13
II.4.1 Stéréo-lithographie .....	13
II.4.2 Traitement numérique de la lumière.....	14
II.4.3 Modélisation par dépôt fondu.....	15
II.4.4 Frittage laser sélectif.....	16
II.4.5 Fusion par rayon d'électrons .....	16
II.4.6 Fabrication d'objets laminés .....	17
II.5 Principes de l'impression additive .....	18
II.5.1 La complexité de fabrication .....	18
II.5.2 La variété .....	19
II.5.3 Assemblage et montage .....	19
II.5.4 Délai d'exécution .....	19
II.5.5 Espace et conception .....	19
II.5.6 Fabrication et compétence .....	20
II.5.7 Fabrication compacte et portable.....	20
II.5.8 Déchets de produits .....	20
II.5.9 Nuances de matériaux.....	20
II.5.10 Réplication physique .....	21
Conclusion.....	21

## **CHAPITRE III : L'IMPRESSION ADDITIVE COMME MOYEN DE PREFABRICATION DANS LE BATIMENT**

Introduction .....	22
III.1 Définition de l'impression additive dans le bâtiment.....	22
III.2 Objectifs de l'impression additive.....	23
III.3 Aperçue historique .....	23
III.4 Développement de l'impression additive .....	24
III.5 Processus d'impression additives.....	25
III.6 Méthodes d'impression additive dans le bâtiment .....	27
III.6.1 Contour Crafting .....	27
III.6.2 L'impression 3D en béton .....	28
III.6.3 D-Shape .....	29
III.7 Solutions technologiques pour l'impression additive .....	30
III.7.1 Solutions à portiques .....	30
III.7.2 Plates-formes suspendues.....	31
III.7.3 Approche par essaim .....	32
III.7.4 Robotisation multifonctionnel et assemblage automatisé .....	33
III.7.5 Pliage et auto-assemblage .....	33
III.8 Exigences et recommandations à prendre lors de l'impression additive .....	34
III.8.1 L'extrudabilité.....	34
III.8.2 La constructibilité.....	34
III.8.3 Force de contact entre les couches .....	35
III.8.4 Les agrégats.....	35
III.8.5 Ratio eau-ciment .....	35
Conclusion.....	36

## **PARTIE 2 : PARTIE PRATIQUE**

### **CHAPITRE IV : CAS D'ETUDE**

Introduction .....	37
IV.1 Etude d'exemples .....	38
IV.1.1 Le cas d'un équipement public (bureau du futur –Dubai- / Killa Design).....	38
IV.1.2 Le cas d'un logement social Yhnova : .....	42
IV.1.3 Le cas de maisons imprimées en 3D dans l'architecture d'urgence .....	47
IV.1.4 Le cas d'un projet utopique (gratte-ciel vendeur de maisons) .....	50
IV.2 Synthèse .....	54
IV.3 Recommandations .....	55

### **CONCLUSION GENERALE**

Conclusion.....	56
-----------------	----

Références bibliographie

Résumé

Abstract

ملخص

# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION GENERALE

Introduction .....	I
Problématique.....	II
Hypothèses .....	III
Objectifs .....	III
Motivation du choix du thème .....	III
Methodologie de recherche .....	III
Structure de memoire .....	IV

## **PARTIE 1 : PARTIE THEORIQUE**

### **CHAPITRE I : LA PREFABRICATION COMME UN PROCEDE DE CONSTRUCTION**

Introduction .....	1
I.1 Définition de la préfabrication .....	1
I.2 Historique de la préfabrication.....	1
I.3 Formes de préfabrication : .....	2
I.3.1 La préfabrication légère : .....	2
I.3.2 La préfabrication lourde :.....	3
I.4 Types d'installation de la préfabrication.....	4
I.4.1 Atelier précaire : .....	4
I.4.2 Atelier forain :.....	5
I.4.3 Usines fixes :.....	5
I.5 Innovation technologie de la préfabrication : .....	6
I.5.1 Système de structure et performance : .....	6
I.5.2 Innovation architectural .....	7
I.6 Avantages et Inconvénients de la préfabrication : .....	8

Conclusion.....	9
-----------------	---

## **CHAPITRE II : L'IMPRESSION ADDITIVE COMME PROCESSUS DE FABRICATION**

Introduction .....	10
II.1 Utilisation de l'impression additive.....	10
II.2 Aperçue historique.....	11
II.3 Développement de l'impression additive .....	12
II.4 Types de technologies d'impression additive .....	13
II.4.1 Stéréo-lithographie .....	13
II.4.2 Traitement numérique de la lumière.....	14
II.4.3 Modélisation par dépôt fondu.....	15
II.4.4 Frittage laser sélectif.....	16
II.4.5 Fusion par rayon d'électrons .....	16
II.4.6 Fabrication d'objets laminés .....	17
II.5 Principes de l'impression additive .....	18
II.5.1 La complexité de fabrication .....	18
II.5.2 La variété .....	19
II.5.3 Assemblage et montage .....	19
II.5.4 Délai d'exécution .....	19
II.5.5 Espace et conception .....	19
II.5.6 Fabrication et compétence .....	20
II.5.7 Fabrication compacte et portable.....	20
II.5.8 Déchets de produits .....	20
II.5.9 Nuances de matériaux.....	20
II.5.10 Réplication physique .....	21
Conclusion.....	21

## **CHAPITRE III : L'IMPRESSION ADDITIVE COMME MOYEN DE PREFABRICATION DANS LE BATIMENT**

Introduction .....	22
III.1 Définition de l'impression additive dans le bâtiment.....	22
III.2 Objectifs de l'impression additive.....	23
III.3 Aperçue historique .....	23
III.4 Développement de l'impression additive .....	24
III.5 Processus d'impression additives.....	25
III.6 Méthodes d'impression additive dans le bâtiment .....	27
III.6.1 Contour Crafting .....	27
III.6.2 L'impression 3D en béton .....	28
III.6.3 D-Shape .....	29
III.7 Solutions technologiques pour l'impression additive .....	30
III.7.1 Solutions à portiques .....	30
III.7.2 Plates-formes suspendues.....	31
III.7.3 Approche par essaim .....	32
III.7.4 Robotisation multifonctionnel et assemblage automatisé .....	33
III.7.5 Pliage et auto-assemblage .....	33
III.8 Exigences et recommandations à prendre lors de l'impression additive .....	34
III.8.1 L'extrudabilité.....	34
III.8.2 La constructibilité.....	34
III.8.3 Force de contact entre les couches .....	35
III.8.4 Les agrégats.....	35
III.8.5 Ratio eau-ciment .....	35
Conclusion.....	36

## **PARTIE 2 : PARTIE PRATIQUE**

### **CHAPITRE IV : CAS D'ETUDE**

Introduction .....	37
IV.1 Etude d'exemples .....	38
IV.1.1 Le cas d'un équipement public (bureau du futur –Dubai- / Killa Design).....	38
IV.1.2 Le cas d'un logement social Yhnova : .....	42
IV.1.3 Le cas de maisons imprimées en 3D dans l'architecture d'urgence .....	47
IV.1.4 Le cas d'un projet utopique (gratte-ciel vendeur de maisons) .....	50
IV.2 Synthèse .....	54
IV.3 Recommandations .....	55

### **CONCLUSION GENERALE**

Conclusion.....	56
-----------------	----

Références bibliographie

Résumé

Abstract

ملخص

## Introduction

L'évolution des divers secteurs d'industrie : la mécanisation, les moyens de transport et de manutention, a permis l'apparition de nouveaux matériaux et technologies de constructions tels que le béton armé et précontraint et aussi, le besoin de fournir un grand nombre de logements dans des délais brefs et des aires de plus en plus réduites. Toutes ces raisons ont conduits les spécialistes à industrialiser et automatiser le domaine d'architecture et de la construction civile et cela par le développement d'une nouvelle technologie appelée : la préfabrication qui est une solution technique qui consiste à fabriquer à l'avance des produits (éléments de constructions) en grands nombres répétitifs soit en usine ou sur chantier pour être montés sur place.

La préfabrication a beaucoup retenu l'attention des industries de la construction dans de nombreux pays au fil des années. Cet intérêt peut être principalement attribué à la perception des avantages, tels que l'économie du temps, de l'argent, l'amélioration de la qualité, la sécurité et du nivellement des ressources. Ceux-ci ont contribué à amender l'efficacité et la productivité de cette industrie. Par exemple, aux États-Unis, Royaume-Uni et aussi en Algérie. La construction en béton préfabriqué a été largement développée depuis les années 1950 pour satisfaire la forte demande de logements suite aux destructions massives de la Seconde Guerre mondiale.

En Algérie par contre, c'est surtout après l'indépendance que le pays a eu recours à la préfabrication, car c'était le seul moyen pour résoudre le problème d'habitat, il fallait loger les milliers d'algériens qui ont perdu leurs maisons pendant la guerre ou les exilés qui sont retournés au Pays. Donc à cette époque, la seule préoccupation était de bâtir des immeubles en général préfabriqués.

Le développement remarquable de la préfabrication a provoqué la naissance d'un nouveau concept qui va permettre de révolutionner la construction au monde entier, c'est l'impression additive.

L'impression additive également appelée l'impression tridimensionnelle est une technologie avancée, c'est un processus de fabrication qui peut produire automatiquement des géométries et des formes complexes à partir d'un modèle tridimensionnel de conception assistée par ordinateur (CAO) sans aucun outillage, matrices et agencements.

Ce procédé de fabrication automatisé a été appliqué dans de nombreux domaines d'industrie de nos jours, pour ses avantages importants dans la création des prototypes fonctionnels dans des conditions raisonnables. Un temps de construction avec moins d'intervention humaine et un minimum de gaspillage de matériel. Cependant, L'application récente de cette technologie dans l'environnement bâti ne semble qu'améliorer les stratégies traditionnelles de construction, tout en réduisant les besoins en ressources humaines et coffrages supplémentaires.

L'Intérêt de recherche pour l'utilisation de l'impression additive dans le domaine du bâtiment et de la construction, a augmenté de façon exponentielle ces dernières années.

Après des années de recherche, développement et utilisation, en trois dimensions l'impression additive dans divers domaines industriels, tels que l'aérospatiale, l'automobile et le domaine médical, continue de croître avec l'ajout de nouvelles technologies, méthodes et applications. L'une de ces méthodes est actuellement à l'étude, dans le monde universitaire et dans la pratique de la construction, l'impression 3D du béton.

## **2-Problématique**

Bien que la préfabrication a connu un certain succès dans plusieurs pays et aussi en Algérie, conventionnellement le processus de construction semble être relativement simple et systématique ; nécessitant deux dimensions (2D) dessins et modèles réduits (pour l'évaluation de la conception des bâtiments), coffrage encombrant et beaucoup de main-d'œuvre qualifiée pour construire tout type de structures de forme libre, mais son utilisation dans l'industrie de la construction continue a créé des problèmes qui consiste notamment dans les dépassements de temps (transport des éléments préfabriqués), dans les coûts, et ce type de construction plus au moins traditionnelle continue d'avoir un taux de mortalité, de blessures et de maladies supérieur à celui de toute autre industrie.

Cela oblige l'introduction a l'impression additive et sa liaison avec la modélisation des informations du bâtiment (BIM) pour le suivi et la surveillance de nouvelles variables dans un environnement de travail dynamique tel qu'un chantier de construction pour augmenter la sécurité au travail.

La combinaison de l'impression additive et le BIM faciliterait également la création des composants de construction hautement personnalisés facilitant la conception complexe et sophistiquée. Cependant, de nombreux défis liés à l'échelle, aux matériaux, au système de livraison et à l'adéquation aux environnements défavorables.

Dans ce sens, notre étude tente de soulever quelques questions sur la préfabrication et l'impression additive dans le secteur du bâtiment :

1/Comment intégrer l'impression additive avec la préfabrication dans la réalisation et la construction du bâtiment tout en assurant une diversité architecturale ?

2/Que ce que l'impression additive va apporter de nouveaux dans la conception architecturale ?

### **3-Hypothèses :**

Pour répondre aux questions de recherche soulevées dans la problématique les hypothèses suivantes sont formulées :

-l'utilisation de l'impression additive pourrait être un nouveau moyen ou outil de préfabrication plus développé et plus évolué dans la conception et la réalisation du bâtiment

- l'impression additive pourrait remodeler et redéfinir les principes de conceptions architecturales, aussi permettre de réduire les couts, les délais, la main d'œuvre et assurer la préservation de l'environnement.

### **4-Objectifs :**

-le but essentiel de cette étude est de démontrer les principaux avantages de cette technologie nouvelle et comment son application va affecter le bâtiment et la pensée architecturale.

### **5-Motivation du choix du thème :**

L'impression additive cette technologie qui consiste à créer de divers objets à base de formes géométriques simples ou complexe avec des échelles indéfinis, a permis de révolutionner le monde de l'industrie dans pratiquement tous les domaines et surtout dans la construction.

L'application de cette nouvelle technique pourra évoquer la naissance d'un nouveau style architectural régnant.

### **6-Methodologie de recherche :**

D'après la problématique et les hypothèses de recherche soulevées précédemment, nous avons établi des démarches et protocoles d'investigation qui repose sur les points suivants :

1-Approche thématique : qui permet d'examiner avec soin le fond documentaire et la revue de la littérature, pour mieux comprendre les divers aspects et solutions concernant la préfabrication et sa relation avec l'impression additive dans le bâtiment

2-Approche analytique : qui permet d'établir une analyse d'exemples : pour démontrer l'impression additive comme un nouveau moyen de préfabrication et ses principaux avantages.

## **7-Structure de mémoire**

Notre travail est composé d'une introduction générale et de deux parties principales :

1/ L'introduction générale : Introduit le sujet sous sa forme problématique, les méthodes et les outils ainsi que les hypothèses d'étude. Elle comporte une introduction, la problématique, les hypothèses, la méthodologie de recherche ainsi que la structure de la mémoire.

2/La première partie théorique : Consiste à la compréhension des différents concepts et notions clés liés à notre domaine de recherche, elle découle d'une recherche bibliographique sur la préfabrication et l'impression additive ou elle est répartie en trois chapitres.

A-Premier chapitre : Comporte les concepts et les notions sur la préfabrication dans le bâtiment.

B- Deuxième chapitre : S'articule sur une étude globale sur l'impression additive.

C-Troisième chapitre : Est une étude sur l'évolution de la préfabrication et l'impression additive comme un nouveau outils ou moyen de préfabrication dans domaine du bâtiment.

3/La deuxième partie pratique : Consiste à effectuer une analyse d'exemples qui permettra de démontrer les avantages de cette nouvelle technologie d'impression additive comme moyen de préfabrication du bâtiment en matières de délais, de couts, de main d'œuvre et de qualité architecturale.

## Introduction

La destruction massive des bâtiments collectifs et individuels au cours de la Seconde Guerre mondiale a favorisé l'essor de la préfabrication. En effet, la difficulté à trouver de la main-d'œuvre qualifiée et la nécessité d'une construction massive ont permis de développer des techniques de conception plus rapides, le concept de préfabrication et déjà été le moyen d'expression d'une variété d'utopies, idéaux et convictions, autant d'ordre purement architectural que de dimension sociale.

En générale la préfabrication consiste à assembler les composants de la structure dans une autre usine ou site de fabrication, et à transférer l'ensemble des assemblages sur le site de construction où se trouve la structure.

### I-1-Définition de la préfabrication

Préfabrication : Système de construction permettant de réaliser des ouvrages au moyen d'éléments standardisés, ou composants, fabriqués d'avance et que l'on assemble suivant un plan préétabli. (dictionnaire la rousse, s.d.)

La préfabrication est un procédé de construction permettant de réaliser certaines pièces d'un ouvrage en usine, afin de n'avoir qu'à les assembler, une fois acheminées sur chantier. Cette technique de fabrication est largement utilisée dans le secteur de la construction et particulièrement dans les grands projets de génie civil tels que les ponts et les immeubles. Les éléments préfabriqués peuvent être réalisés en bois, en béton ou en acier. Quel soit leur taille ou leur forme, ceux-ci sont réalisable en usine à l'aide de machines spécifiques (réalisation de moules, etc.). (Karim Miled, 2012)

### I-2-Historique de la préfabrication

Le concept de préfabrication existe depuis toujours à travers des manifestations aussi simples que la brique ou le moellon, il ne s'est vraiment développé qu'avec les moyens de l'industrie, particulièrement après la seconde guerre mondiale.

La logique de la préfabrication revient à profiter de moyens d'usine supérieurs technologiquement et économiquement aux moyens du chantier. Depuis plus d'un siècle, des hommes convaincus que les nouvelles technologies offrent un potentiel à l'architecture ont réfléchi à des façons de les lui adapter.

Les pionniers ont d'abord envisagé des systèmes d'éléments préfabriqués assemblables de différentes façons. (, Levy Benjamin - Carado.Cyril., 2003/2004)



Photo I.1 : des éléments préfabriqués  
source : (matériauxdeconstructiondapresguerre, 2004)



Photo I.2 : la préfabrication dans l'usine  
Source : (cairn, 2004)

Le concept de préfabrication s'est d'autre part vu concrétiser via différents matériaux et techniques, l'application des nouvelles technologies de l'industrie à l'architecture, l'architecture usinée, semble perpétuer la logique selon laquelle les constructeurs ont toujours bâti au meilleur des possibilités techniques de leur temps. Si leurs techniques évoluaient, les matériaux de la pierre, du bois et de la brique ont été des millénaires durant à la base de la construction.

De ce fait, leur valeur et la beauté de leurs formes consacrées, sont particulièrement ancrées dans les esprits, et l'évolution vers de nouvelles formes pour de nouveaux matériaux ne sera admise que dans la longueur. Pourtant on se doit de respecter la contexture de l'architecture, c'est à dire la cohérence entre sa matière et sa forme, qui lorsqu'elle est bien comprise procure une émotion architecturale plus profonde que la forme seule (Ir. Arnold Van Acker., (2011)

### **I.3. Formes de préfabrication :**

#### **I.3.1 La préfabrication légère :**

La préfabrication légère fait appel à des éléments d'un poids maximal de l'ordre d'une tonne : elle, regroupe principalement les fabricants de maisons modulaires appelées aussi maisons sectionnelle de maisons mobiles installées surtout sur des terrains réservés à cet effet, ainsi que les fabricants de panneaux pour les murs extérieur.

Est de nouveaux matériaux autres que le béton ordinaire assurant la légèreté des éléments tel l'acier, l'aluminium, le verre, les plastiques, le bois et ses dérivés, et le béton léger.



Photo I. 3 : maison bleu préfabriqué  
Source : (maisonbleue, 2016)



Photo I .4 : maison préfabriqué en bois  
Source : (consultation.avocat, 2016)

### I.3.2. La préfabrication lourde :

La préfabrication lourde, classique consiste à fabriquer en usine, en atelier ou sur chantier, des éléments d'ouvrages dont la masse est très importante, de l'ordre de 2 à 10 tonnes. Ces éléments sont généralement, des grands panneaux en béton constituant des murs entiers, des cloisons, des façades, des planchers, etc. Ils se présentent, dans la plupart des cas, sous forme d'ouvrages entièrement terminés, par l'intégration, dans un même élément, de diverses fonctions (y compris les enduits, les parements et les canalisations). (OPPBT,1997).

La préfabrication lourde utilise deux catégories : la première est basée sur des moyens traditionnels évolués (produits de construction livrés sur chantier, usage du coffrage outil glissant ou tunnel, etc...). Elle utilise un matériel généralement lourd et coûteux dont l'amortissement exige des rotations rapides du matériel.



Photo I. 5 : Usine de préfabrication  
Source : (btp-dz, 2017)



Photo I. 6 : Notion sur la préfabrication d'éléments  
Source : (linkedin, 2017)

La seconde catégorie utilise plutôt des moyens industrialisés. Ces procédés consistent à fabriquer tous les éléments du gros œuvre, notamment les panneaux porteurs de 6 à 10 tonnes aux dimensions d'une pièce (mur de façade, de refond,...), les portiques et les systèmes structuraux poteaux/poutres, les planchers de même caractéristiques que les panneaux, les volées d'escalier, .etc.



Photo I. 7 : Poteaux préfabriqué  
Source : (lejdc, 2011)



Photo I. 8 : Mur de façade  
source : (lemoniteur, 2016)

## I.4. Types d'installation de la préfabrication.

### I.4.1 Atelier précaire :

Il s'agit d'un atelier de préfabrication destiné à disparaître après l'achèvement de l'ouvrage pour lequel il est installé des produits préfabriqués de formes simples sont généralement spécifique au bâtiment à construire. La préfabrication se fait alors le plus souvent au pied même de l'ouvrage, les moules sont généralement en bois et destinés à être détruits à la fin de la préfabrication

Le travail est effectué la plupart du temps à l'air libre, le stockage se fait directement dans la zone de service des grues de montage de telle manière que celles-ci puissent assurer à la fois la manœuvre de la préfabrication et la pose dans sa situation.



Photo I. 9 : Atelier précaire à l'air libre  
Source : (lemoniteur, 2016)



Photo I. 10 : Atelier précaire à l'air libre  
Source : (slideshare, 2017)

### I.4.2 Atelier forain :

Les moules utilisés dans un tel atelier seront réemployés ultérieurement sur un autre site, la distance entre les deux emplacements étant telle qu'il est plus économique de déplacer les moules que de transporter les éléments préfabriqués on bétonne dans des moules généralement métalliques conçus pour être rapidement déplacés et chauffés à la vapeur sous bâche.

L'amélioration des conditions de travail consiste à installer des hangars mobiles légers permettant de mettre le personnel à l'abri des intempéries au moment de la fabrication et protéger les éléments en cours de durcissement de la pluie et de la température excessive. Les hangars peuvent être mobiles sur des galets pour permettre la manutention et le déplacement des éléments préfabriqués par les grues. (www.technologuepro.com, 2011)



Photo I. 11 : Atelier forain  
source : (matiere-tp, 2015)

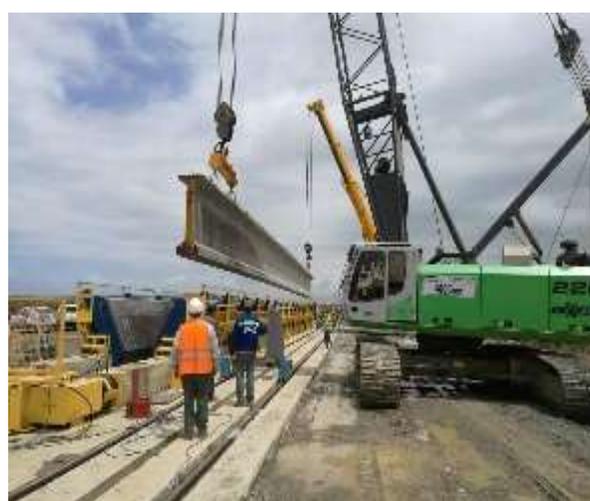


Photo I. 12 : Ateliers forains  
source : (matiere-tp, 2015)

### I.4.3 Usines fixes :

Une usine de préfabrication est destinée à fonctionner pendant une longue durée pour alimenter plusieurs chantiers situés dans un rayon maximal variant de 100 À 150km. La rentabilité, la qualité du produit, la vitesse de réalisation sont en fonction de la gestion de production de l'usine et de la bonne organisation de la chaîne de travail. (www.technologuepro.com, 2011)



Photo I. 13 : Usine de préfabrication en béton armé  
source : (ebawe, 2016)

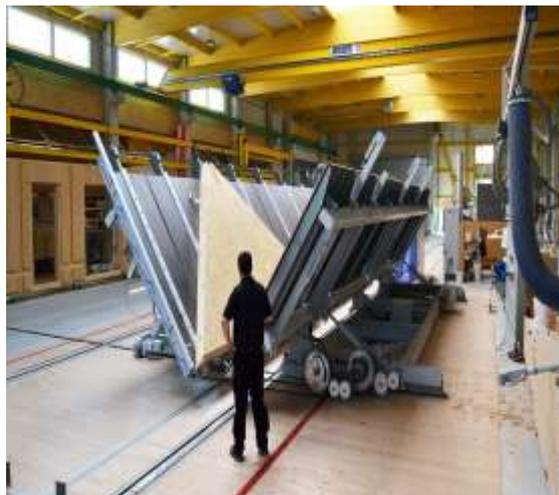


Photo I. 14 : La prefbriction dans une usine  
source : (homag, 2015)

## I.5. Innovation technologie de la préfabrication :

### I.5.1 Système de structure et performance :

Une grande quantité de recherche est actuellement poursuivie avec la participation des auteurs et de nombreux partenaires de l'industrie, sur la structure comportement et performance de faible hauteur et bâtiments préfabriqués à plusieurs étages. Modulaires méthodes de construction (volumétriques) sont étudiées de manière très détaillée à cet égard.

Les modules préfabriqués peuvent être classés en deux formes principales en fonction de leur transfert de charge mécanismes :

**-Modules porteurs** : Mur d'enceinte la structure du module transfère la gravité chargée aux modules ci-dessous. Ce système est possible uniquement avec des applications de faible hauteur.

Les modules préfabriqués sont empilés verticalement et reliés horizontalement par des plaques boulonnées. Ces connexions doivent être conçues pour supporter la totalité des forces de cisaillement générées par les charges latérales prévues par conséquent, le mécanisme de transfert de charge latérale est principalement assuré par ces connexions et grandement amélioré par l'introduction de modules avec des murs de béton rigides.

Ces modules rigides qui sont placés stratégiquement dans la structure principale résistent à la plupart des charges latérales et les transferts vers les fondations. En conséquence, la structure ne nécessiterait pas de noyau structurel central traditionnel. La structure peut

maintenant agir comme un système purement modulaire. (Gunawardena, T., Mendis, P. & Ngo, T. (2016), 2016)

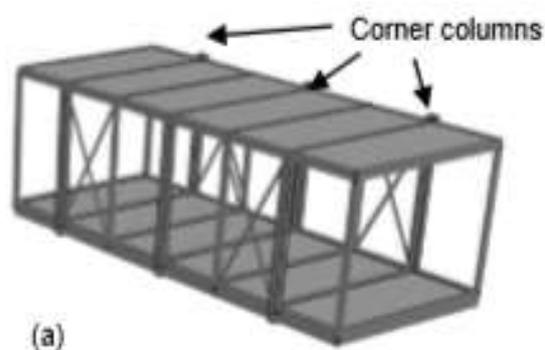


Photo I.15 : Structures modules porteurs  
source : (coursehero, 2017)

**-Modules en angle** : en externes colonnes connectées dans le module prennent la charge au sol et les transférer aux colonnes. Ce système est également capable de résister charges horizontales telles que tremblement de terre et forces du vent, donc idéales pour plusieurs étages applications.

La plupart des bâtiments modulaires à plusieurs étages à travers le monde, peuvent être considérés comme des systèmes de modules supportés en angle qui sont connectés latéralement à un noyau en béton coulé sur place ou en acier préfabriqué, qui sert en définitive d'élément résistant à la charge latérale de plus dans la plupart des cas les sols sont coulés avec du béton après la mise en place des modules. Bien que ces méthodes ajoutent encore de la valeur à la construction en réduisant initialement le temps de construction, elles ne définissent pas la structure comme une construction purement modulaire, par conséquent ces structures ne bénéficient pas pleinement des avantages présentés précédemment de la construction modulaire. (Gunawardena, T., Mendis, P. & Ngo, T. (2016), 2016)

### I.5.2 Innovation architectural

Les auteurs sont engagés dans des recherches visant à concevoir et développer un système durable préfabriqué système modulaire hybride qui favorise la masse personnalisation pour atteindre la variété et individualité dans les projets bas et moyens.

Le système modulaire proposé avec la normalisation des composants modulaires interchangeabilité des pièces, simplicité de pièces de raccordement, tailles cohérentes et processus de montage prévisibles.

L'évaluation complète tiendra compte de :

- nouveauté de conception pour modulaire flexible et intelligent et des systèmes hybrides utilisant sophistiqué modélisation paramétrique
- Spécifications de construction raisonnables pour des mesures de durabilité.
- Structure efficace, MEP (mécanique performance électrique et de plomberie).
- BIM (modélisation des informations du bâtiment) et Fabrication et assemblage allégés.
- Le caractère innovant de la technologie de construction préfabriquée moderne invite également à de nombreux nouveaux matériaux composites, en particulier pour les façades et les cloisons de séparation, qui sont aussi parfois des panneaux isolants structurels.

La récente étude réalisée par Nguyen et al, montre l'amélioration de la performance au feu des unités modulaires constituées de façades avec des stratifiés (polymère renforcé de fibre de verre) avec une concentration de 5% d'organo-argile. Ces matériaux innovants offrent aux concepteurs et aux constructeurs la possibilité d'utiliser des systèmes de construction non traditionnels pour produire des bâtiments plus performants. (Nguyen, Q., Ngo, T., Tran, J. P., Mendis, P., Zobec, M. & Aye, L. (2016, 2016)

## **I.6. Avantages et Inconvénients de la préfabrication :**

### **Avantage :**

- La préfabrication réside dans le fait qu'on a la possibilité de réaliser aisément une même pièce un grand nombre de fois.
- Fabriquer un élément en chaîne en un minimum de temps.
- Réaliser des éléments préfabriqués plutôt que de les réaliser sur place.
- La réalisation d'éléments préfabriqués en usine minimise les pertes et augmente leur durabilité.
- La réalisation de poutres ou de dalles sur chantier implique une utilisation massive de béton et la nécessité de réaliser le travail rapidement.
- Meilleure maîtrise de la qualité.
- Meilleure planification matérielle et du temps (délais, heures travaillées, hiver)
- Moins de personnel sur le site.

## Inconvénients :

- Les éléments préfabriqués leur acheminement vers le chantier n'est pas toujours évident.
- Pour de grosses pièces, il faudra parfois organiser des convois exceptionnels et utiliser des gros camions qui polluent
- Par ailleurs, lors de l'assemblage d'éléments préfabriqués, il se peut que certains joints posent problème.
- C'est la difficulté de rajouter des conduites des prises de courant

## Conclusion

Le système de construction préfabriqué qui mentionné dans cette recherche peut être utilisé dans les pays en développement et dans d'autres pays pour donner une nouvelle impulsion au développement du bâtiment.

Il s'agit d'un système structurel économiquement optimal d'unités préfabriquées, les influences climatiques, politiques et économiques ont également été prises en compte dans ce travail.

## Introduction

La destruction massive des bâtiments collectifs et individuels au cours de la Seconde Guerre mondiale a favorisé l'essor de la préfabrication. En effet, la difficulté à trouver de la main-d'œuvre qualifiée et la nécessité d'une construction massive ont permis de développer des techniques de conception plus rapides, le concept de préfabrication et déjà été le moyen d'expression d'une variété d'utopies, idéaux et convictions, autant d'ordre purement architectural que de dimension sociale.

En générale la préfabrication consiste à assembler les composants de la structure dans une autre usine ou site de fabrication, et à transférer l'ensemble des assemblages sur le site de construction où se trouve la structure.

### I-1-Définition de la préfabrication

Préfabrication : Système de construction permettant de réaliser des ouvrages au moyen d'éléments standardisés, ou composants, fabriqués d'avance et que l'on assemble suivant un plan préétabli. (dictionnaire la rousse, s.d.)

La préfabrication est un procédé de construction permettant de réaliser certaines pièces d'un ouvrage en usine, afin de n'avoir qu'à les assembler, une fois acheminées sur chantier. Cette technique de fabrication est largement utilisée dans le secteur de la construction et particulièrement dans les grands projets de génie civil tels que les ponts et les immeubles. Les éléments préfabriqués peuvent être réalisés en bois, en béton ou en acier. Quel soit leur taille ou leur forme, ceux-ci sont réalisable en usine à l'aide de machines spécifiques (réalisation de moules, etc.). (Karim Miled, 2012)

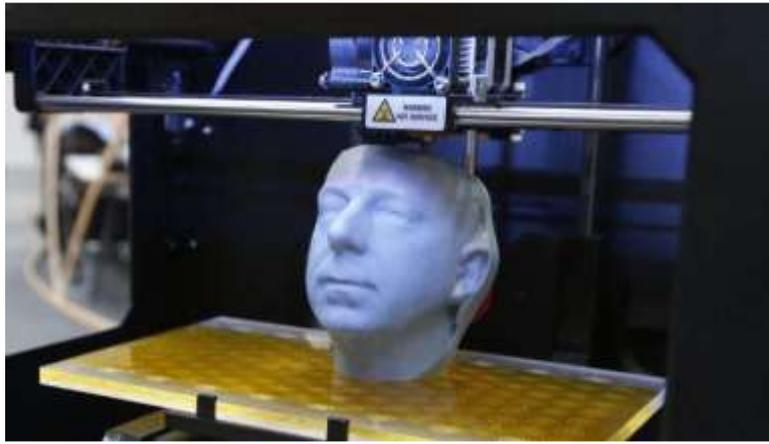
### I-2-Historique de la préfabrication

Le concept de préfabrication existe depuis toujours à travers des manifestations aussi simples que la brique ou le moellon, il ne s'est vraiment développé qu'avec les moyens de l'industrie, particulièrement après la seconde guerre mondiale.

La logique de la préfabrication revient à profiter de moyens d'usine supérieurs technologiquement et économiquement aux moyens du chantier. Depuis plus d'un siècle, des hommes convaincus que les nouvelles technologies offrent un potentiel à l'architecture ont réfléchi à des façons de les lui adapter.

## Introduction

Après trente ans de développement, l'impression 3D est devenue un processus de fabrication à grand public. Le principe est l'accumulation des pièces en ajoutant des matériaux couche par couche basée sur un modèle solide 3D informatisé. Il n'exige pas l'utilisation d'appareils, d'outils de coupe, de liquides de refroidissement ou d'autres ressources auxiliaires. Cela permet d'optimiser la conception et la production des pièces sur mesure et sur demande. Ses avantages par rapport à la construction conventionnelle est de captivé l'imagination du public, reflétée dans les grandes publications récentes en la décrivant comme une troisième révolution industrielle.



*Photo II .1: Procédé d'impression additive  
source : (lybraryc, 2015)*

### II.1. Utilisation de l'impression additive

L'impression additive, une conception sous la forme d'un modèle solide 3D informatisé peut être directement transformée en un produit fini sans l'utilisation de fixations et d'outils de coupe supplémentaires. Cela ouvre la possibilité de produire des pièces de géométrie complexe difficiles à obtenir avec des processus d'enlèvement de matière. (Gero, J. S, 1995).

Elle permet également de concevoir des produits respectueux de l'environnement. Contrairement aux processus de fabrication traditionnels, la flexibilité de l'impression additive permet aux fabricants d'optimiser la conception pour une production plus juste qui élimine les déchets. (Gero, J. S, 1995).

De plus, sa capacité à construire des géométries complexes signifie que de nombreuses pièces précédemment séparées peuvent être consolidées en un seul objet. En outre, les conceptions optimisées sur le plan topologique qu'elle est capable de réaliser pourraient augmenter la fonctionnalité du produit, réduisant ainsi la quantité d'énergie, de carburant ou de ressources naturelles nécessaires à son fonctionnement. (Chu C, Graf G, Rosen DW, 2008).

## II.2. Aperçue historique

La première imprimante additive a été inventée en 1984 et au cours des dernières décennies, l'impression additive est devenue l'une des technologies à la croissance la plus rapide. Au début, c'était très compliqué et en plus, une technologie coûteuse.

Au fil des années, l'impression additive a commencé à être présente dans la vie de tous et les imprimantes se sont généralisées dans tous les domaines de l'industrie. De nombreuses réalisations ont été effectuées dans les domaines de la médecine, de l'automobile et de l'aérospatiale.

L'amélioration du matériel d'impression et de la technologie additive est devenue l'objectif de nombreuses entreprises du monde entier, dans tous les secteurs. (Izabela Hager, Anna Golonka, Roman Putanowicz, 2016).



Photo II. 2 : Article sur l'invention de la première imprimante additive source : (Hod Lipson & Melba Kurman, 2013)



Photo II.3 : la première imprimante additive inventée par Chuck Hull source : (Krassenstein, 2015)

### II.3. Développement de l'impression additive

Le développement de la technologie de l'impression additive a commencé dans les années 1980 (J.P.Kruth, 1991).

Des progrès significatifs ont été accomplis depuis lors, et on s'attend à ce que cette technologie peut contribuer pour révolutionner la fabrication, l'industrie et procurer divers avantages à la société en général tels que :

- Les produits de soins et de santé personnalisés pour les besoins de l'individu consommateur, ce qui devrait considérablement améliorer le bien-être de la population.
- Réduire l'utilisation des matières premières et la consommation d'énergie, qui est une contribution clé à la durabilité environnementale.
- La fabrication à la demande, ce qui représente une opportunité pour reconfigurer la chaîne d'approvisionnement de fabrication à apporter des produits moins chers aux consommateurs plus rapidement tout en utilisant moins de ressources.

Bien qu'un grand nombre de communications relatives à l'impression additive ont été publiés au cours des trois dernières décennies, la plupart d'entre eux se sont concentrés sur diverses technologies de traitement. Récemment, certains chercheurs ont commencé à enquêter sur les systèmes problèmes de l'impression additive. (ATKINS, 2007).

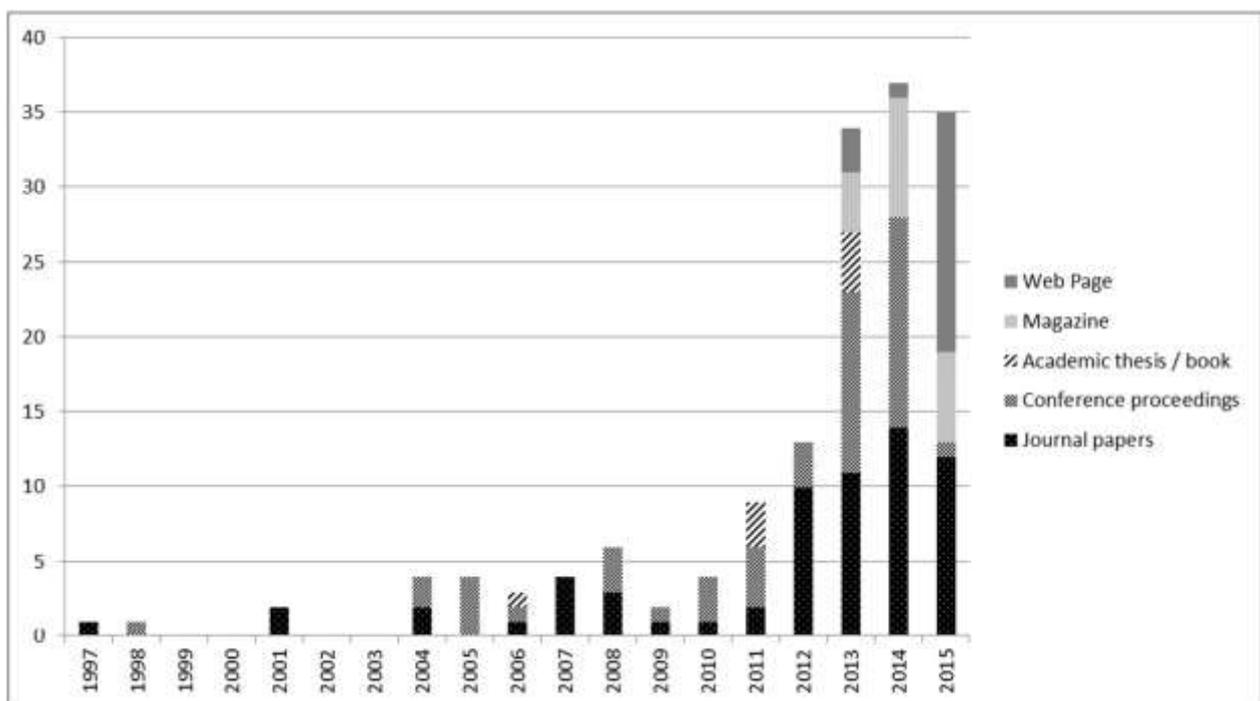


Fig II. 1 : Evolution des nombres et des types de publications sur l'impression 3D au cours des vingt dernières années  
source : (Nathalie Labonnote, Anders Rønquist, Bendik Manum, Petra Rüter , 2016)

## II.4. Types de technologies d'impression 3D :

Au fil des années, les chercheurs et les instituts de recherche ont utilisé diverses technologies d'impression additive. Un aperçu de ces technologies développées est présenté dans les sections suivantes :

### II.4.1 Stéréo-lithographie

Charles Hull, cofondateur de 3D Systems Inc, a breveté la stéréo lithographie (SL) en 1986 en tant que moyen de prototypage rapide (PR). Un appareil de stéréo lithographie (ASL) se compose de quatre parties principales : un réservoir pouvant être rempli de plastique liquide (photopolymère), une plate-forme perforée descendue dans le réservoir, un laser ultraviolet (UV) et un ordinateur contrôlant la plate-forme du laser. (Elizabeth Palermo, 2013).

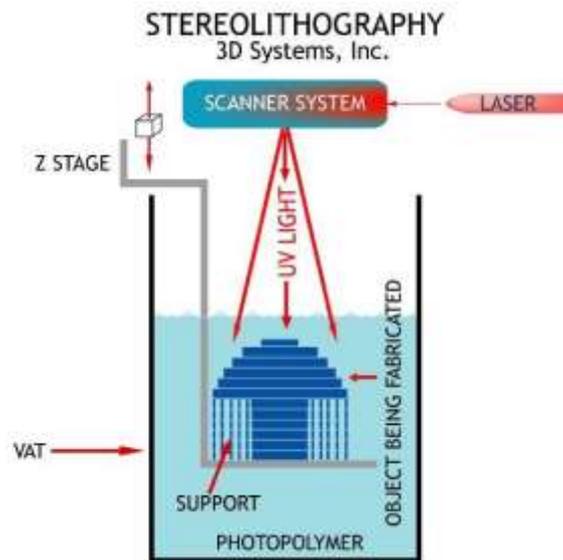


Fig II. 2 : Processus de stéréo lithographie  
source : (Chris Chen & Matthew Wettergreen, 2017)

Un fichier de modèle CAO est converti en fichier STL (Standard Tessellation Language) pour que les machines d'impression additive puissent comprendre le modèle.

L'étape initiale du processus ASL commence par une mince couche de photopolymère (généralement entre 0,05 et 0,15 mm) extrudée sur la plateforme perforée. La plate-forme est exposée au laser UV, qui durcit le photopolymère en formant instantanément la première couche de l'objet imprimé en 3D.

Le même processus est répété en ajoutant couche par couche au-dessus de chaque couche jusqu'à ce que tout l'objet ait été formé et entièrement immergé dans le réservoir. L'objet est rincé avec un solvant liquide pour éliminer l'excès de résine, puis soulevé pour exposer l'objet à un four à ultraviolets pour un durcissement ultérieur du plastique.

Les objets fabriqués ont généralement une surface lisse, mais la qualité de l'objet dépend de la qualité de la machine ASL utilisée pour le processus. (Elizabeth Palermo, 2013)

#### II.4.2 Traitement numérique de la lumière

Le traitement numérique de la lumière a été développé par Larry Hornbeck de Texas Instruments en 1987.

Ce processus utilise des micro-miroirs numériques disposés dans une matrice sur une puce à semi-conducteur appelé dispositif à micro-miroir numérique. Chaque miroir représente un pixel dans l'image pour l'affichage. ( Whiteclouds 3D printing, 2015).

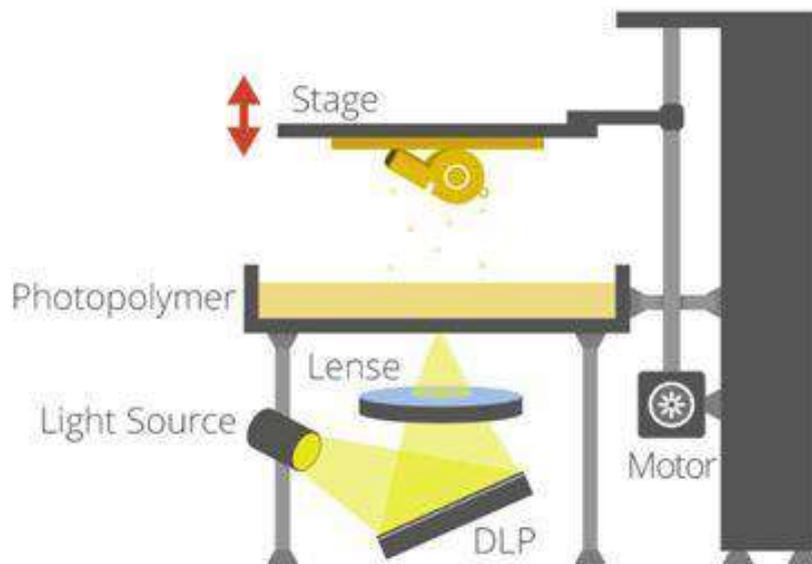


Fig II. 3 : Production de modèles par traitement numérique de la lumière source : (3dprintingindustry, 2017)

Une fois le modèle 3D est envoyé à l'imprimante, une cuve de polymère liquide est exposée à la lumière d'un projecteur de traitement numérique de lumière dans des conditions de sécurité.

Le projecteur à traitement numérique de la lumière fixe le modèle 3D dans le polymère liquide. Le polymère liquide exposé durcit et la plaque de construction s'abaisse et le polymère liquide est à nouveau exposé à la lumière du projecteur.

Ce processus est répété jusqu'à ce que tout le modèle 3D soit imprimé et que la cuve soit drainée pour que l'objet solide soit révélé.

La méthode d'impression additive (traitement numérique de la lumière) est plus rapide et permet d'imprimer des objets avec une résolution élevée. ( Whiteclouds 3D printing, 2015).

### II.4.3 Modélisation par dépôt fondu

Fondu dans les années 1980. Sur la base de cette technique, Maker Bot (maintenant détenu par Stratasys) a développé une méthode similaire d'impression additive appelée Fabrication de filaments fusibles. (Elizabeth Palermo, 2013).

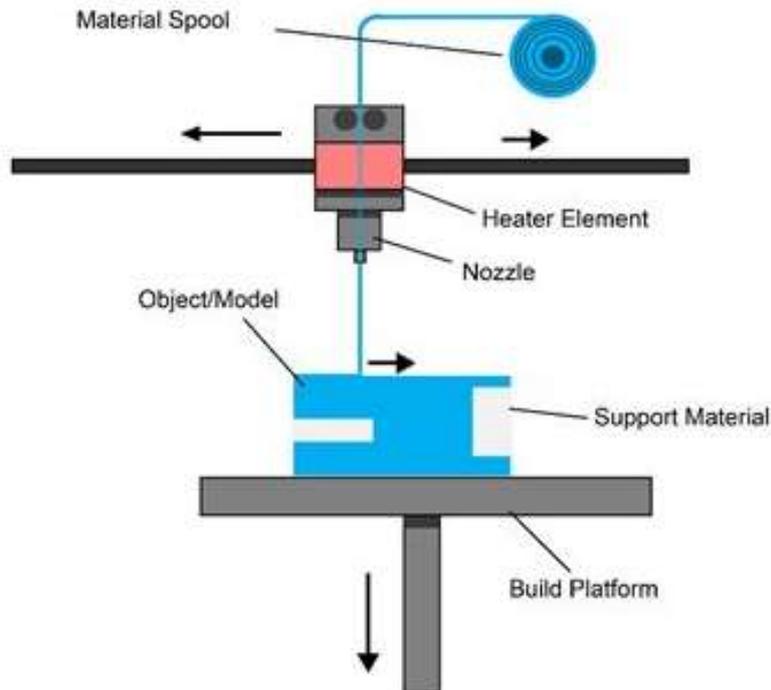


Fig II. 4 : Modélisation par dépôt fondu  
source : (The technologie house, 2016)

Le fichier de modèle 3D est envoyé à l'imprimante additive qui utilise des fils en plastique pour créer l'objet.

La buse de l'imprimante fait fondre les filaments et les imprime en couches superposées. Le plastique durcit rapidement dès qu'il est placé sur la plate-forme de construction. Les couches se lient lorsque le plastique refroidit, ce qui rend l'objet solide.

La buse est contrôlée par l'ordinateur qui se déplace dans les directions X, Y et Z pour imprimer l'objet en fonction du chemin d'impression créé par l'ordinateur. Le processus s'est répété jusqu'à ce que l'objet soit imprimé

Cette méthode d'impression additive est la méthode la plus courante de toutes les technologies d'impression, et elle est utilisée à grande échelle. (Elizabeth Palermo, 2013).

#### II.4.4 Frittage laser sélectif

Le frittage sélectif au laser a été mis au point et breveté par Carl Deckard et Joe Beaman dans les années 1980. Ce procédé d'impression additive utilise un laser pour lier des matériaux en poudre, le plus souvent des plastiques tels que le nylon, qui sont dispersés en couches minces sur la plateforme de fabrication. (Elizabeth Palermo, 2013).

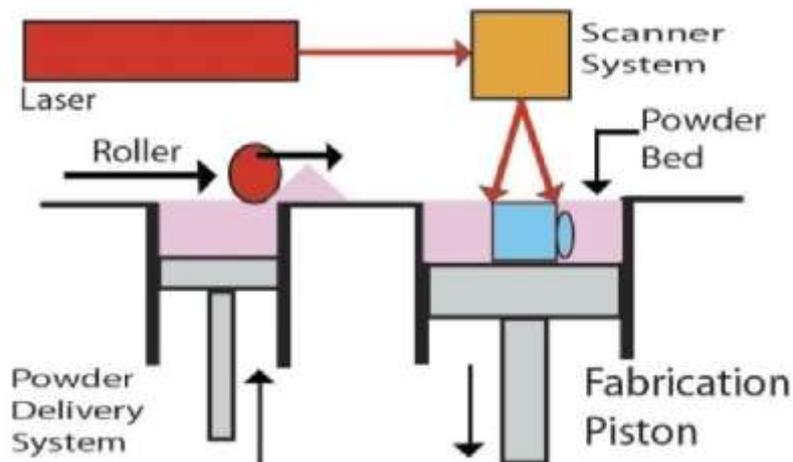


Fig II. 5 : Procédé de frittage laser sélectif et de fusion  
source : (Vijay Laxmi Kalyani, 2016)

La première étape de la création d'un objet consiste à convertir le fichier CAO au format et à l'envoyer dans l'imprimante additive. Ensuite, un laser, qui est contrôlé par l'ordinateur avec la forme de l'objet, est concentré sur la poudre sur la plate-forme de construction. Le laser chauffe la poudre soit juste au-dessous de son point d'ébullition ce qui fait fondre les particules dans la poudre pour former une couche solide.

Le processus est répété jusqu'à ce que l'objet soit formé, puis il est laissé pour se refroidir dans la machine avant d'être retiré.

Ce processus est coûteux car il utilise un laser plus puissant et potentiellement dangereux pour une utilisation commerciale. Andreas Bastian, étudiant en ingénierie au Swarthmore Collège, a récemment développé une imprimante à laser sélectif d'un faible coût qui crée des objets en carbone. (Elizabeth Palermo, 2013).

#### 4.5 Fusion par rayon d'électrons

La fusion par rayons d'électrons est une méthode similaire au frittage laser sélectif, car elle utilise de la poudre provenant de la plate-forme de construction de l'imprimante additive.

Dans ce type d'impression, un rayon de haute énergie constituée d'électrons est utilisé pour solidifier le métal. Les couches solidifiées sont empilées les unes sur les autres jusqu'à la création de l'objet. (3dnatives your source for 3d printing, 2017).

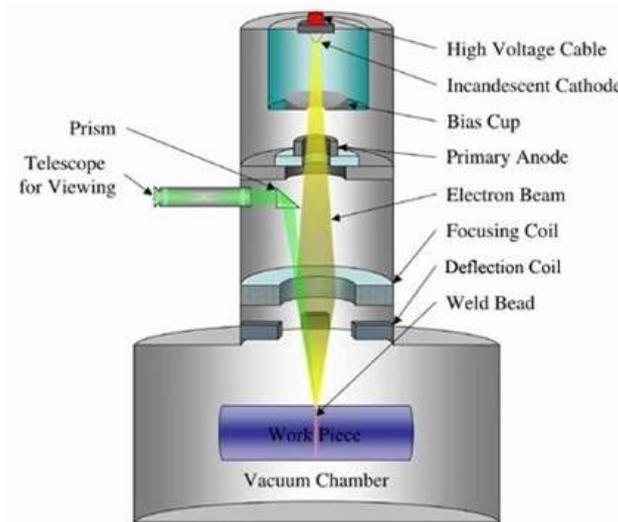


Fig II. 6 : Procédé de fusion par rayon d'électrons  
source : (MEEE, 2018)

Bien que le processus soit similaire au frittage du laser sélectif (SLS), les matériaux utilisés doivent être des conducteurs électriques car ils reposent sur des charges d'électrons.

Les matériaux se limitent donc principalement aux alliages de titane et de chrome-cobalt. La fabrication de pièces en céramique et de polymère sont donc techniquement impossibles dans ce processus.

Arcam, une société suédoise, est la seule à fabriquer ce type d'imprimantes additive. Le processus pourrait être coûteux car les matériaux en poudre de métal peuvent coûter entre 350 et 450 dollars par kg. (3dnatives your source for 3d printing, 2017).

#### II.4.6 Fabrication d'objets laminés

La fabrication d'objets laminés a été développée par Helisys Inc dans les années 1980. Dans ce processus, des couches de plastique ou de papier sont laminées ensemble à l'aide de chaleurs et de pression, puis découpées à l'aide d'un laser ou d'une lame à commande numérique.

Cette méthode est l'un des moyens rapides et abordables de créer des prototypes 3D. (Elizabeth Palermo, 2013).

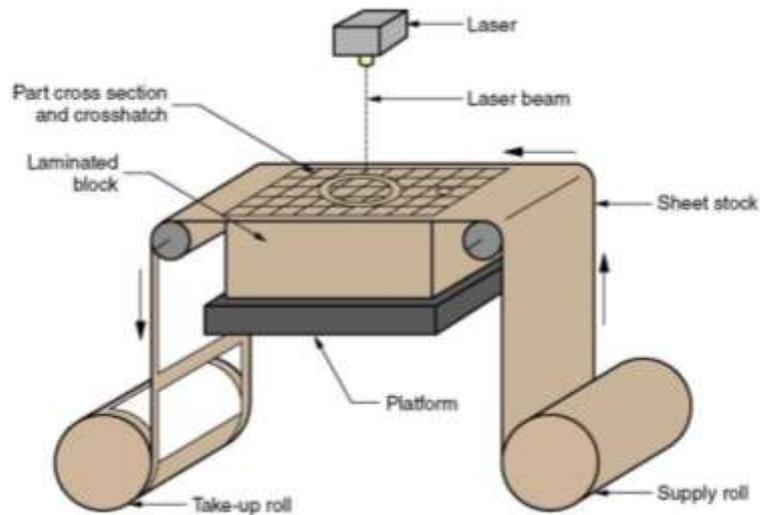


Fig II. 7 : Processus de fabrication d'objets laminés  
source : (Ravinder, 2018)

Comme d'habitude, un fichier de modèle 3D est introduit dans l'imprimante et l'appareil la fabrication d'objets laminés utilise une feuille continue de matériau, telle que du plastique, du papier ou du métal. Ces feuilles de matériaux sont tirées sur une plate-forme de construction par un système de rouleaux d'alimentation.

Lorsque l'impression commence, un rouleau chauffé passe sur la feuille de matériau de la plate-forme de fabrication, fait fondre l'adhésif et l'appuie sur la plate-forme. Ensuite, une lame ou un laser commandé par ordinateur coupe le matériau selon le motif souhaité.

Un processus similaire est répété en plaçant des feuilles de matériau les unes contre les autres, et en les découpant selon les modèles 3D (Elizabeth Palermo, 2013).

## II.5. Principes de l'impression additive

### II.5.1 La complexité de fabrication

Dans la fabrication traditionnelle, plus la forme d'un objet est compliquée, plus il en coûte pour faire. Sur une imprimante additive, la complexité a le même coût que la simplicité. La fabrication d'une forme ornée et compliquée ne nécessite pas plus de temps, de talent ou de coût qu'imprimer un simple bloc.

La complexité gratuite va perturber la tarification traditionnelle des modèles 3D, et changer la façon dont nous calculons le coût de fabrication des choses. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.2 La variété**

Une seule imprimante additive peut faire beaucoup de formes comme un artisan humain, elle peut fabriquer une forme différente chaque temps.

Les machines de fabrication traditionnelles sont beaucoup moins souples et peuvent faire seulement des choses dans un spectre limité de formes. L'impression additive supprime les frais supplémentaire associés au recyclage de machinistes humains ou au ré-outillage des machines d'usine. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.3 Assemblage et montage**

La fabrication en série est construite sur l'épine dorsale de la chaîne de montage. Dans les usines modernes, les machines fabriquent des objets identiques qui sont ensuite assemblés par des robots ou des travailleurs humains, parfois loin des continents.

Le plus de pièces que le produit contient, plus le temps de montage est long et plus ils deviennent coûteux. En créant des objets en couches, une imprimante additive peut imprimer une porte et des charnières imbriquées en même temps, aucun assemblage requis.

Moins d'assemblage raccourcira les chaînes d'approvisionnement et permettra d'économiser la main-d'œuvre et le transport ou ces chaînes d'approvisionnement plus courtes seront moins polluantes. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.4 Délai d'exécution**

Une imprimante additive peut imprimer à la demande quand un objet est nécessaire. La capacité de fabrication sur place réduit la nécessité pour les entreprises de stocker des inventaires physiques.

Des nouveaux types de services sont devenu possible car ces imprimantes permettent à une entreprise de se spécialiser ou personnalisé les objets à la demande en réponse aux commandes des clients avec Zéro-délai de fabrication et minimiser les coûts d'expédition sur de longues distances. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.5 Espace et conception**

Les technologies de fabrication traditionnelle et les artisans humains, ne peuvent constituer qu'un répertoire fini de formes. La capacité à créer des formes est limitée par les outils à disposition.

Une imprimante additive supprime ces barrières et ouvre de nouveaux espaces de conception. Elle peut fabriquer des formes qui jusqu'à présent étaient possibles uniquement dans la nature. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.6 Fabrication et compétence**

Les artisans traditionnels s'entraînent comme apprentis pendant des années pour acquérir les compétences dont ils avaient besoin. La production de masse et les machines de fabrication guidées par ordinateur diminuent le besoin de personnel qualifié pour la production. Cependant, les machines de fabrication traditionnelles exigent toujours un expert qualifié pour les ajuster et les calibrer.

Une imprimante additive tire la meilleure partie de son orientation à partir d'un fichier de conception. Pour faire un objet de complexité égale, elle nécessite moins de compétences de la part de l'opérateur qu'une machine traditionnelle. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.7 Fabrication compacte et portable**

Par volume d'espace de production, une imprimante additive a plus de capacité de fabrication qu'une machine de fabrication traditionnelle. Par exemple, un moulage par injection ne peut que créer des objets nettement plus petits qu'elle-même.

En revanche, l'imprimante additive peut fabriquer des objets aussi grands que son lit d'impression. Si elle est disposée de manière à ce que son appareil d'impression puisse bouger librement, elle peut fabriquer des objets plus grands qu'elle-même. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.8 Déchets de produits**

Les imprimantes additives fonctionnant en métal créent moins de déchets que la technique de fabrication traditionnelle du métal. L'usinage des métaux est une source de gaspillage, car on estime que 90% des métaux sont broyés et finis sur le sol de l'usine. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### **II.5.9 Nuances de matériaux**

On combinant différents matériaux bruts en un seul produit est difficile à utiliser avec les techniques de fabrication contemporaines. Puisque les machines de elles taillent, coupent ou moulent les choses en forme, ces processus ne peuvent pas facilement mélanger différents matériaux. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### II.5.10 Réplication physique

Un fichier de musique numérique peut être copié plusieurs fois sans perte de qualité audio. À l'avenir, l'impression additive sera étendre cette précision numérique au monde des objets physiques.

La technologie de scanner et l'impression additive introduiront ensemble un changement de résolution élevée de forme entre le monde physique et numérique. Nous allons scanner, éditer et dupliquer des objets physiques pour créer des répliques exactes ou pour améliorer l'original. (Hod Lipson & Melba kurman, 2013).

### Conclusion

L'industrie de l'impression additive est définie sur une trajectoire de croissance où ces applications se multiplient au fur et à mesure des recherches.

Cette production de couche par couche, pourrait révolutionner et remodeler le monde. Ou ses progrès peuvent considérablement changer et améliorer la façon dont nous fabriquons et produisons les produits dans le monde entier.

On peut évaluer l'importance d'une invention en déterminant les besoins de l'homme auxquels elle répond. Comme indiqué, l'impression additive peut avoir une application dans presque toutes les catégories de besoins humains. Même si elle ne remplit pas forcément un cœur vide et mal aimé, elle offrira aux entreprises et aux particuliers une fabrication rapide et aisée, qui n'est limitée que par leur imagination. Si la dernière révolution industrielle nous a amenés à produire en série et à réaliser des économies d'échelle, la révolution de l'impression additive numérique pourrait ramener la fabrication en série à un cercle complet dans une ère de personnalisation de masse.

## Introduction

En termes de développement technologique et de satisfaction des attentes des clients, il on peut faire valoir que la construction a des décennies de retard par rapport aux autres industries telles que l'aérospatiale, construction automobile et la construction navale. Les principes fondamentaux de la construction n'ont pas changé depuis des centaines d'années ; les Romains ont inventé le béton à propos de 100 avant JC et 2200 ans plus tard, nous l'utilisons toujours comme matériau de construction principal et plus ou moins de contrôle placement avec une main d'œuvre humaine.

En raison de la lenteur des méthodes de construction traditionnelle, les longs délais de construction étaient autrefois plus facilement acceptés. Aujourd'hui, essentiellement pour des raisons de rentabilité et de productivité, le temps admis pour la construction tend à être diminué.

Le progrès en matière d'impression additive qui est un nouveau outils de préfabrication dans le domaine du bâtiment s'est évolué rapidement où : les coûts baissent, de nouveaux matériaux imprimables sont ajoutés sur une base régulière et même plusieurs matériaux peuvent être imprimés à la fois. Cette technologie a dévoilée son potentiel dans un large éventail de disciplines. Il n'est donc pas surprenant que l'industrie du bâtiment souhaite appliquer l'impression additive à une plus grande échelle. Un groupe de sociétés et d'instituts répartis dans le monde ont déjà montré les perspectives de développement d'impression additive.

### III.1.Définition de l'impression additive dans le bâtiment

L'impression additive dans le bâtiment se définit dans : l'impression 3D du béton qui est une méthode de construction permettant de fabriquer un élément de construction prédéfini en plusieurs couches 2D superposées, dont la répétition complète un modèle 3D. Le béton, qui est coulé d'une buse d'impression, ne nécessite aucun coffrage ni vibration ultérieure.

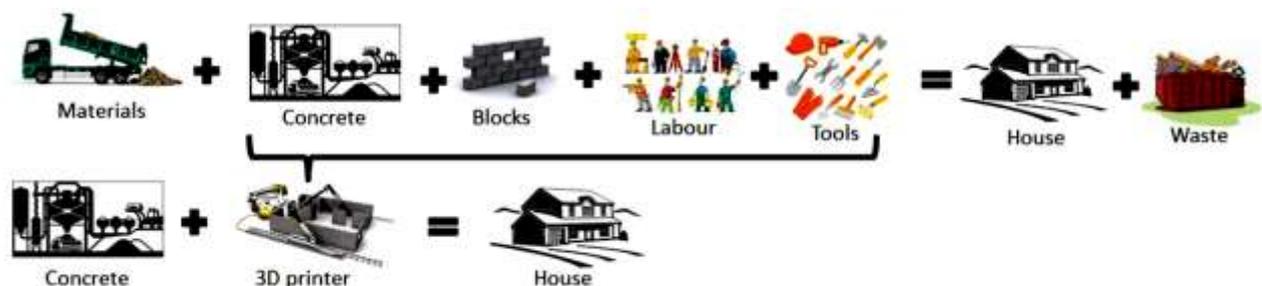


Fig III. 1 : La construction traditionnelle Vs L'impression additive (3D)  
source : (Renotech, 2019)

### III.2. Objectifs de l'impression additive dans le bâtiment

L'impression additive du béton vise à améliorer la construction sur plusieurs niveaux :

- Elle minimise la durée du processus de construction en éliminant certaines tâches qui prennent beaucoup de temps dans les méthodes traditionnelles. (C.M. Rouhana, M.S. Aoun, F.S. Faek, M.S. Eljazzar, and F.R. Hamzeh, 2014).
- Elle réduit les coûts liés au projet en minimisant le gaspillage et la surproduction, en plus minimiser le recours à la main-d'œuvre. (B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, and Z. Yeh, 2006) .
- Elle offre une grande flexibilité pour la création des formes structurelles qui sont impossible de construire de manière conventionnelle et offre une amélioration de la sécurité globale et l'impact environnemental de la structure. (Zeina Malaeb, Adel Tourbah, Farook Hamzeh, 2015).

### III.3. Aperçue historique

Depuis de nombreuses années, le développement de robots et l'automatisation des travaux de construction ont été très actifs. Avec cette base de technologie d'automatisation, le but est de parvenir à une intégration maximale des différentes technologies qui conduisent à la modernisation de la construction.

Les techniques d'impression additive dans la construction sont en nées depuis le milieu des années 90 avec la publication de deux techniques distinctes au cours de cette décennie.

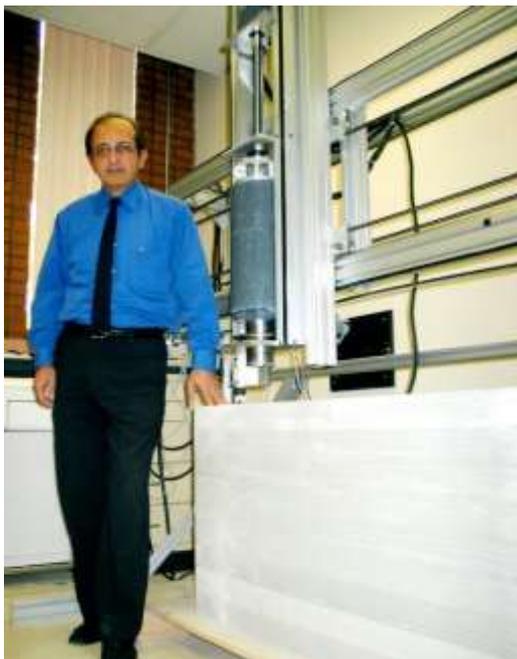


Photo III. 1 : Première version de la buse d'extrusion et de la machine, Dr. Khoshnevis, Université de Californie de Sud  
source : (James Bruce Gardiner, 2011)



Photo III .2: La tête de déposition Contour Craft  
source : (James Bruce Gardiner, 2011)

La première était une nouvelle technique basée sur le dépôt de sable et de ciment avec durcissement sélectif de ce matériau avec la vapeur ; cependant, cette technique n'a pas été développée plus tard.

La seconde était une technique de dépôt de béton contrôlée au portique appelée Contour Crafting. (Gardiner, J.B, 2011).

### III.4.Développement de l'impression additive dans le bâtiment

Les processus d'impression additive à base de ciment à grande échelle, appelé l'impression 3D du béton, ont été mis au point au cours des 10 dernières années et plus de 30 groupes dans le monde sont actuellement engagé dans la recherche de ce processus dans le domaine du bâtiment. (R.A. Buswell, 2018).

La première tentative d'utilisation de matériaux à base de ciment dans une approche d'impression additive a été suggérée par Pegna. (J. Pegna, 1997).

Actuellement, trois processus d'impression à grande échelle sont ciblés sur la construction et l'architecture dans le domaine public. Tous les trois ont prouvé la réussite dans la fabrication de composants de tailles importantes et sont convenable la construction et aux applications architecturales.

Les trois processus sont tous similaires en ce sens qu'ils construisent de manière additive, mais ils ont été développés pour différents types d'applications et de matériaux, ce qui confère à chacun des avantages distincts. (S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb and T. Thorpe, 2012).

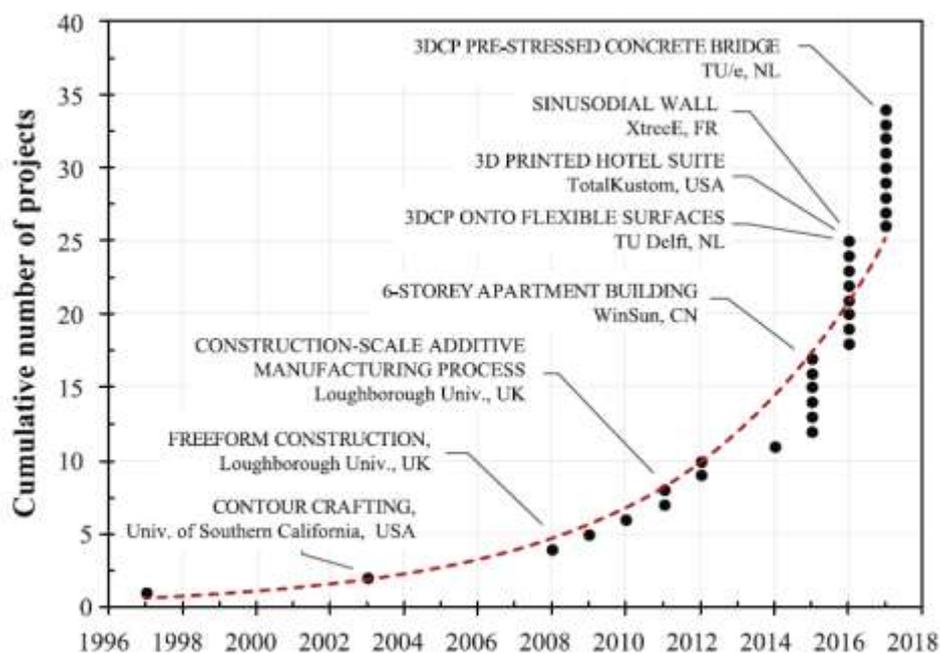


Fig III. 1 : Evolution de l'impression additive à grande échelle dans le bâtiment  
source : (Wilson Ricardo Leal da Silva, 2018)

### III.5. Processus d'impression additives (3D) dans le bâtiment

Le processus d'impression additive d'un objet 3d en béton se compose de trois étapes : préparation des données, préparation du mélange de béton et impression de l'objet.

Lors de la phase de préparation des données, le modèle spatial de l'objet à imprimer est créé au format CAO.

L'objet est ensuite découpé en couches à l'aide de l'un des logiciels de découpage. Le logiciel crée un plan pour l'imprimante additive afin de poser le béton sous forme de couche par couche. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016).

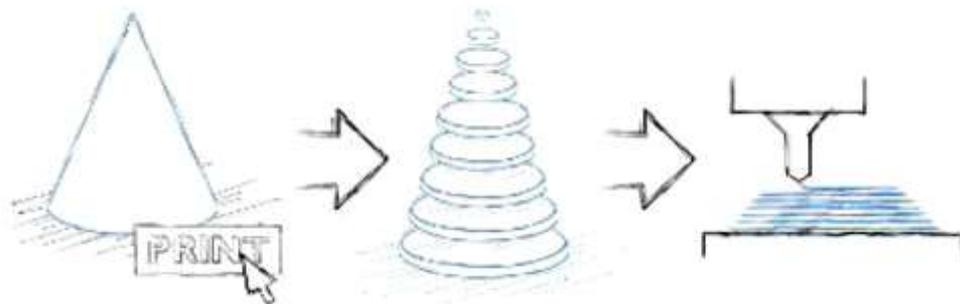


Fig III. 2 : Processus d'impression 3D du béton

La prochaine étape est la préparation du mélange de béton et la gestion de l'alimentation du béton vers l'imprimante additive.

Le béton est introduit dans l'imprimante avec un mélange discontinu (un mélange préparé en volumes puis placé dans le conteneur) ou un mélange continu (un mélange automatisé et s'écoule en continu dans l'imprimante).

Le temps d'ouverture du béton doit être noté à ce stade pour que le béton ne durcisse pas rapidement, ce qui provoquerait un blocage de l'imprimante. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016).

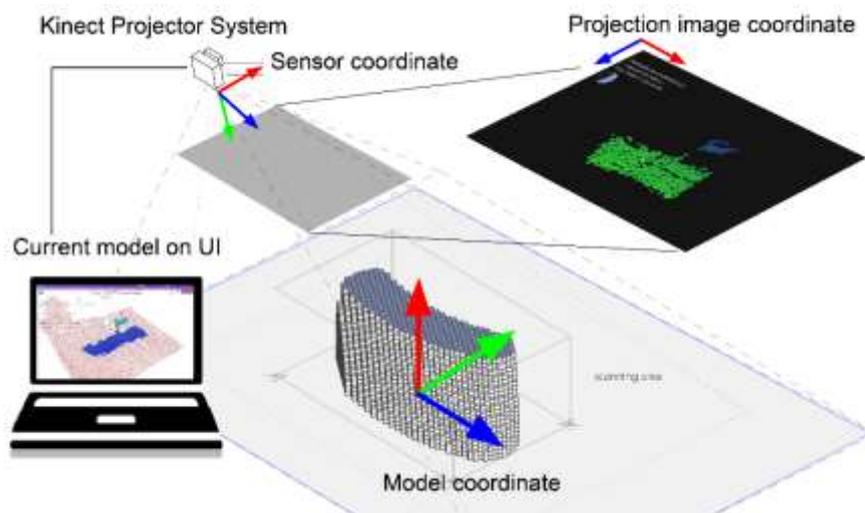


Fig III.3 : Détails sur le processus d'impression 3D du béton  
source : (H. Yoshida, 2015)

Dans la troisième étape, le mélange de béton est pressé hors de l'imprimante par la buse. Une pompe ou une poulie peut être utilisée pour extruder le mélange de béton et le placer en couches. Le béton s'écoule à travers la buse de l'imprimante selon un chemin défini, programmé par l'utilisateur vers l'imprimante additive. Ce chemin est programmé de sorte que l'imprimeur pose le béton couche par couche, formant ainsi un véritable objet tridimensionnel à partir du modèle numérique.

La maniabilité du béton joue un rôle essentiel à cette étape d'impression. La maniabilité est responsable à la fois des aspects d'extrudabilité et de constructibilité du béton. Il est donc nécessaire d'obtenir un bon mélange de ciment, de granulats, d'additions d'eau et de produits chimiques pour optimiser l'ouvrabilité lors de l'impression 3D du béton. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016).

Le béton étant de loin le matériau de construction le plus largement utilisé dans le monde, dans la plupart des applications renforcées avec des barres en acier, les activités dans le domaine de la construction numérique se concentrent sur le développement de techniques de fabrication numérique pour l'application du béton.

Dans le cas d'une construction additive «basée sur l'extrusion», le matériau pré mélangé est extrudé aux coordonnées spécifiées à travers une buse aux vitesses d'impression déterminées. Les options d'intégration du renforcement, la finesse du filament déposé est décisive.

Les contours des éléments structurels principalement verticaux sont produits en extrudant ou déposant des filaments de béton. Ces contours établissent un coffrage intégré permanent qui est finalement rempli de béton fluide dans la plupart des cas.

Avant de remplir les coffrages, des barres de renforcement verticales et horizontales peuvent y être placées. Des barres horizontales peuvent être ajoutées ou exclusivement entre les différentes couches de béton lors de l'impression additive. Cela peut être fait de manière discontinue (barre par barre) après l'achèvement des sections imprimées correspondantes, ou simultanément en plaçant un fil d'acier à l'aide de la tête d'impression directement pendant l'impression du béton. (Viktor Mechtcherine, Jasmin Grafe, Venkatesh Naidu Nerella, Uwe Füssel, 2018).

Diverses options peuvent être réalisées ici, y compris l'utilisation de chaînes en métal au lieu de fils, cette dernière mise en évidence par TU Eindhoven. (Viktor Mechtcherine, Jasmin Grafe, Venkatesh Naidu Nerella, Uwe Füssel, 2018).

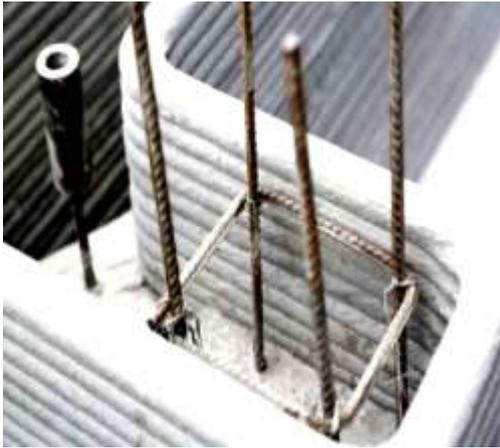


Photo III. 3 : Armature en acier verticale utilisée en combinaison avec la technologie Contour Crafting  
source : (Venkatesh Naidu Nerella, 2018)



Photo III.4 : Installation manuelle de barres d'armature horizontales lors d'une impression 3D en béton  
source : (Kerry Stevenson, 2018)

## III.6.Méthodes d'impression additive dans le bâtiment

### III.6.1.Contour Crafting

Le système Contour Crafting de Dr. M. Khoshnevis a permis à l'art d'imprimer en 3D des structures en béton. C'est une technologie d'impression additive qui utilise la commande par ordinateur pour exploiter la capacité de formation de surface supérieure de la truelle afin de créer des surfaces lisses et précises, plates et de forme libre.

Le Contour Crafting est une méthode hybride qui combine un processus d'extrusion pour former les surfaces de l'objet et un processus de remplissage pour construire le noyau de l'objet. (B.Khoshnevis , 2004)

Dr. Khoshnevis se concentre principalement sur les applications du CC dans le secteur de la construction, permettant ainsi une construction plus intelligente et automatisée de structures moins coûteuses et produisant le moins de déchets (B.Khoshnevis , 2004)



Photo III.5 : Impression d'une habitation par le Contour crafting  
source : (Wendy Bracat, 2016)



Photo III. 6 : Exemple de modèle 3d Contour Crafting  
source : (Behrokh Khoshnevis, 2004)

### III.6.2.L'impression 3D en béton

La technique d'impression 3D du béton est en cours de développement depuis 2004 au sein du groupe de recherche de l'Université de Loughborough, au Royaume-Uni, avec l'école de Mécanique et d'ingénierie de Wolfen.

Le projet a d'abord été conçu sous le nom de machine «Freeform Construction». Dont l'assemblage de la première machine a débuté en 2006.

La fabrication à l'aide de la machine d'impression de béton fonctionne sur la base du dépôt sélectif d'un matériau en pâte à l'aide d'une buse d'extrusion, de manière similaire à celui de l'artisanat du Contour crafting.

La principale différence entre le Contour crafting et l'impression du béton est la conception de la buse. La buse d'impression en béton est conçue pour avoir la capacité de faire varier sa résolution afin de permettre le dépôt de matériaux en vrac et de détails fins dans le même processus. (Gardiner, J.B, 2011)



*Photo III.7 : L'impression 3D en béton des procédés additifs à grande échelle développé par l'Université de Loughborough  
source : (Loughborough University, 2012)*

Les imprimantes pour l'impression 3d du béton contrôlées par ordinateur sont reliées à un bras de support et à un bras robotique qui déposent avec précision des couches successives de béton hautes performances spécialement conçues pour l'impression du béton afin de créer des éléments structurels complexes.

La technologie est utilisée pour former des éléments architecturaux sur des éléments en béton et des panneaux de façade complexes pouvant être produits de manière rentable avec une réduction des déchets de construction. (Gardiner, J.B, 2011).

### III.6.3.D-Shape

Un inventeur italien, Enrico Dini, président de la société Monolite au Royaume-Uni, a mis au point une énorme imprimante 3D appelée D-Shape, capable d'imprimer des bâtiments entiers à partir de sable et d'un liant inorganique.

Sa première technique d'impression additive de construction a obtenu un brevet en 2006. L'imprimante travaille en pulvérisant une fine couche de sable suivie d'une couche de liant à base de magnésium provenant de centaines de buses situées sur sa face inférieure.

La colle transforme le sable en pierre solide, qui est construite couche par couche à partir du bas pour former une sculpture ou un bâtiment en pierre de sable.

Le problème avec le processus décrit par Dini était que la résine époxy collait à tout, y compris la machine qui l'appliquait. (Gardiner, J.B, 2011)



Photo III.8 : La deuxième génération de machine D-Shape.  
Développé par l'ingénieur civil Enrico Dini.  
Source (Melissa Twiaq , 2016)



Photo III. 9 : Villa Roccia et Gaudi Tribute font partie du projet D-Shape  
source : (d-shape, 2009)

La sculpture Radiolaire (Fig 38) représente une mise à l'échelle significative des capacités démontrées des techniques d'impression additive dans la construction de notre jour. La sculpture est maintenant prévue pour atteindre une hauteur de 8,5 mètres pour un rond-point en Italie. (Gardiner, J.B, 2011)



Photo III. 10 : Assemblage radiolaire à grande échelle à l'usine D-Shape  
source : (Gardiner, 2011)

Le concept principal de l'impression additive de D-Shape a finalement basculé vers l'invention d'Archi-nature.

Enrico Dini a créé un nouveau concept d'architecture, ce nouveau concept est écologique et s'appelle Archi-nature. Dini pense que si nous ne sommes pas en mesure de créer des machines fantastiques, nous sommes au moins en mesure de fabriquer des objets très rugueux avec les machines existantes, et celles-ci sont totalement écologiques. (Enrico Dini : Large Scale 3D Printing, 2013)

### III.7.Solutions technologiques pour l'impression additive

Les technologies de d'impression additive existantes ont été développées à l'origine pour une taille donnée de «produit» et sont donc adaptées de manière appropriée à cette taille. Il a souvent été souligné que le plus grand défi de la construction additive était la mise à l'échelle des technologies d'impression additive existantes. Dans cette section, les défis liés aux aspects d'ingénierie de la structure du dépôt de matériaux sont examinés. Les solutions technologiques sont décrites par ordre chronologique.

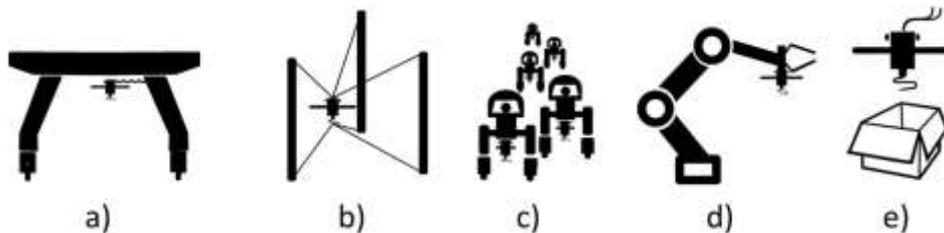


Fig III.4 : Différentes solutions technologiques. a) Portique, b) suspendu par câble, c) essaim, d) robotique, e) combiné au repliement.

Source : (Nathalie Labonnote, 2016)

#### III.7.1.Solutions à portiques

La solution de portique représente simplement une mise à l'échelle directe de l'impression additive à la construction additive, en bref : Une imprimante additive géante.



Photo III .11: Imprimante additive de construction à portique  
source : (COBOD International, 2018)

Dans les solutions à portique, un actionneur est commandé en translation dans toute direction définie par les axes X, Y et Z en coordonnées cartésiennes. Des solutions de portique ont été développées pour l'extrusion du béton en 2001, et Khoshnevis de l'Université de Californie du Sud aux États-Unis a déposé un brevet pour la combinaison de cette solution avec le processus de fabrication sous le nom de «*Contour Crafting*».

Au début, le processus se présentait sous la forme d'une méthode hybride associant un processus d'extrusion pour la mise en forme des surfaces de l'objet et un processus de remplissage (coulage ou injection) permettant de construire le noyau de l'objet. Les surfaces extérieures «exceptionnellement lisses et précises» ont été obtenues en contraignant l'écoulement extrudé dans les directions verticale et horizontale à l'aide de truelles. (Nathalie Labonnote, Anders Rønnquist, Bendik Manum, Petra Rüther, 2016)

### III.7.2. Plates-formes suspendues

À première vue, les coordonnées cartésiennes peuvent sembler plus appropriées pour une impression additive. Cependant, en raison de la grande taille des objets fabriqués (des composants de construction de grande envergure aux maisons entières et aux bâtiments achevés), leur utilisation nécessite également une quantité d'énergie considérable pour le transport et l'installation, ainsi que pour la translation de grues lourdes même lorsque les parcours d'outils sont optimisés.

Une solution plus rationnelle, qui améliore la facilité de transport du système, a été développée sous l'appellation générique de «plate-forme suspendue par câble».

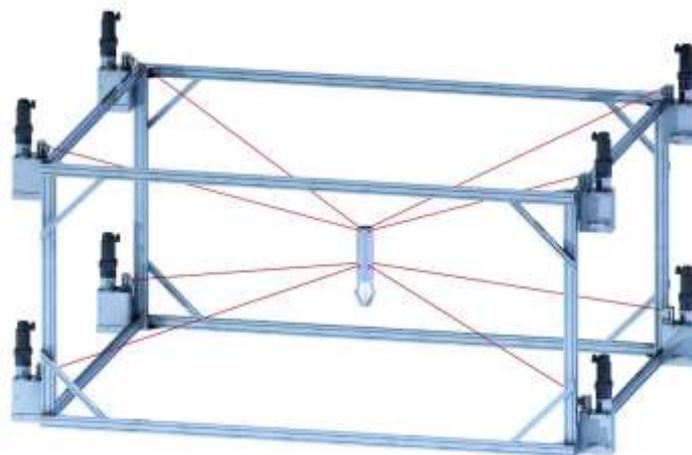


Photo III .12 : Imprimante additive avec câbles suspendus  
source : (Travis Deyle, 2014)

Les principaux avantages des plates-formes suspendues par câble sont la mise à disposition d'espaces de travail plus grands et le fait qu'ils sont relativement peu coûteux.

Ils sont également faciles à transporter, à démonter, à réassembler et sont plus facilement reconfigurables.

Une plate-forme suspendue par câble consiste en un effecteur terminal fixé à un cadre externe à l'aide de plusieurs câbles. L'effecteur est manipulé par des moteurs capables d'extraire ou de rétracter les câbles de manière entièrement automatisée. Elle est entièrement contrainte lorsque les câbles sont attachés à l'effecteur terminal par le dessous. (Nathalie Labonnote, Anders Rønnquist, Bendik Manum, Petra Rütter, 2016)

### III.7.3.Approche par essaim

Une approche radicalement différente rejette l'utilisation d'un seul cadre fixe géant au profit de plusieurs «robots» mobiles plus petits. Cette solution est communément appelée «*swarm approche*», en référence au concept de «comportement en essaim», pour dire un comportement collectif présenté par des entités.

L'approche avait déjà été décrite en 1997 par Pegna, qui envisageait la construction d'une grande structure par une armée de fourmis mécaniques, un grain de sable à la fois.

L'approche par essaim est particulièrement intéressante pour l'impression additive dans des environnements extraterrestres, pour lesquels des considérations de charge utile et de transport sont essentielles.



Photo III.13 : Approche en essaim dans l'impression additive à grande échelle  
source : (Kimberley Mok, 2018)

C'est une petite imprimante (avec une largeur d'impression de 1 ou 2 m) fonctionnant sur roues et assistée par un autre mobile assurant la fonction de collecte et de dépôt du régolithe pourrait faire le travail de manière plus efficace que l'alternative D-Shape.

L'approche par essaim présente un autre avantage : les robots plus petits peuvent trouver leur propre chemin vers le chantier de construction sans intervention humaine, ce qui n'est pas possible dans le cas d'installations à châssis fixe.

Encore une fois, cela est très bénéfique dans les environnements extraterrestres, ainsi que dans les endroits où l'exposition humaine au processus de construction peut être jugée dangereuse. (Nathalie Labonnote, Anders Rønnquist, Bendik Manum, Petra Rüther, 2016)

#### III.7.4. Robotisation multifonctionnel et assemblage automatisé

Un certain nombre de solutions impliquent l'utilisation de bras robotiques. Ceux-ci peuvent extraire des matériaux dans l'impression additive d'un certain composants dans le bâtiment ou exécuter des tâches annexes liées à la construction, telles que la peinture ou l'épandage d'adhésifs pour carrelage avant de cueillir les carreaux et de les placer avec précision sur la zone traitée.

Ces robots sont particulièrement très bien adaptés aux environnements indésirables. (Nathalie Labonnote, Anders Rønnquist, Bendik Manum, Petra Rüther, 2016)

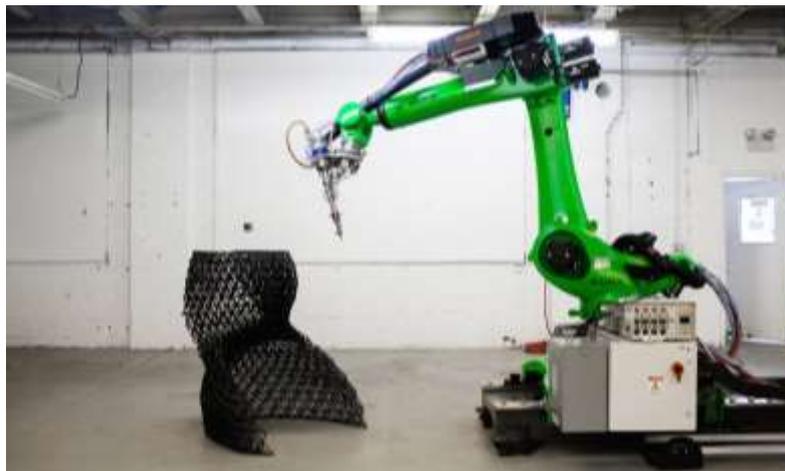


Photo III. 14 : La méthode d'impression additive par un bras robotique  
source : (Kerry Stevenson, 2016)

#### III.7.5. Pliage et auto-assemblage

Des opérations de pliage appropriées peuvent améliorer considérablement la vitesse de fabrication. À ce jour, les recherches ont été limitées aux objets de taille moyenne, mais le concept promet d'importants avantages pour l'impression additive de structures à coque mince.

Deng et Chen ont observé que l'impression additive d'une fonction à coque mince de grande taille nécessite généralement de nombreuses couches utilisant un faible volume de matière.

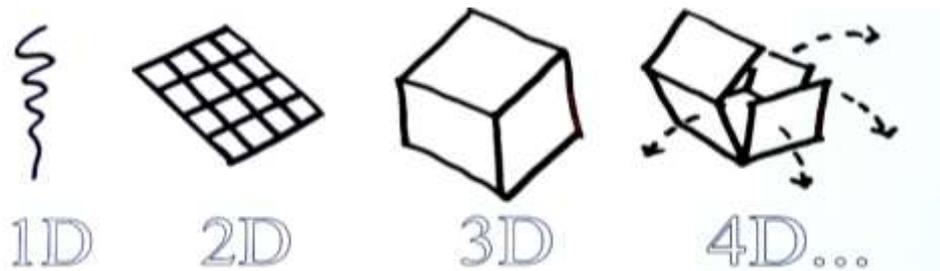


Fig III. 5 : L'impression additive auto pliable  
source : (Marianna Papaqeorqiou, 2017)

Ils ont décidé d'adopter les principes de la conception d'origami et d'intégrer l'approche de fabrication par couches aux opérations de pliage appropriées appelée autrement l'impression 4D dans le but d'améliorer considérablement la vitesse de fabrication.

Les problèmes critiques rencontrés lors de la conception de structures pliantes comprenaient :

- le développement d'un algorithme pour convertir une structure 3D à coque mince en une structure 2D pliable.
- un processus d'impression additive capable de produire soit un pli de conception multi matériaux, soit une conception de charnière en matériau rigide.
- développement de mécanismes d'actionnement pour déplier une structure 2D afin de produire une structure 3D conçue. (Nathalie Labonnote, Anders Rønquist, Bendik Manum, Petra Rüther, 2016)

### III.8.Exigences et recommandations à prendre lors de l'impression additive

#### III.8.1.L'extrudabilité

L'extrudabilité est un aspect crucial dans l'impression additive. L'extrudabilité peut être définie comme la capacité à se déplacer du mélangeur à la buse, laquelle imprime en couches sans modifier les propriétés physiques des matériaux.

Par exemple le béton doit couler doucement pour que l'imprimante les couche les unes sur les autres. Si la structure comporte de nombreux détails architecturaux, la vitesse d'impression sera ajustée en conséquence, de sorte que le système ne gaspille pas le matériau d'extrusion et que la qualité du matériau imprimé en béton soit irréprochable. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016).

#### III.8.2.La constructibilité

La constructibilité est définie comme la propriété du matériau extrudé de durcir avant que la couche suivante ne soit placée sur les couches imprimées. Donnant ainsi une bonne plate-

forme pour que ce matériau construise au-dessus de chaque couche. La constructibilité et l'extrudabilité sont les propriétés les plus importantes liées à l'impression additive. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016)

### **III.8.3.Force de contact entre les couches**

Un autre aspect important est le contact du matériau lorsqu'il est placé en couches. Il est nécessaire que ce dernier, lorsqu'il est placé l'un sur l'autre, le collage se produise à l'intérieur des couches pour obtenir une structure solide.

Il ne doit donc pas être à l'état durci, mais son hydratation doit être en cours lorsque qu'il est placé à la surface de la couche précédente. Cet aspect est également lié à la maniabilité et au temps de mise de ce matériau. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016).

### **III.8.4.Les agrégats**

Les agrégats jouent un rôle essentiel dans le processus d'impression additive. Le type et la taille des agrégats utilisés dans le mélange contribuent à la résistance à la charge de la structure.

Les tailles de buse varient de 20 mm à 40 mm d'épaisseur. En conséquence, la taille des agrégats n'est pas préférée à être supérieure à 4-6 mm car la buse pourrait être bouchée. L'utilisation d'agrégats de plus grande taille entraîne également un effondrement de la formation de la structure en provoquant une instabilité de la structure d'impression. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016)

### **III.8.5.Ratio eau-ciment**

Dans le cas d'impression du béton, il est recommandé de disposer d'un béton à affaissement nul pour le placer en couches. Cependant, il est difficile d'extruder le béton sans affaissement à travers les petites tailles de buse de l'imprimante additive.

Il faut donc ajouter des supers plastifiants au mélange pour obtenir la maniabilité souhaitée. Différents chercheurs ont expérimenté les ratios eau / ciment de 0,25 à 0,44 ; il a été prouvé que l'utilisation de la plus faible quantité de rapport eau / ciment avec des super plastifiants avait de meilleures propriétés constructibles du béton. (F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016)

## Conclusion

L'industrie de la construction, pas connue pour sa rapidité d'évolution, mais elle s'est adaptée à la révolution numérique avec la modélisation des données du bâtiment (BIM), et les technologies intelligentes parallèlement à un engagement plus fort en faveur d'une construction plus légère et plus verte.

La technologie d'impression additive est encore récente et présente de nombreuses limitations, mais les attentes et les espoirs sont grands pour l'avenir des bâtiments et des composants de construction imprimés en 3D. La création de bâtiments aux formes complexes peut devenir l'un des plus gros avantages pour la plupart des architectes. Leur imagination pourra vaincre les obstacles antérieurs liés à la limitation des techniques traditionnelles de construction. L'impression additive peut transformer l'architecture moderne.

## Introduction

Grâce au degré élevé de préfabrication des modules qui est considéré comme l'une des dernières innovations dans la préfabrication du bâtiment, le temps de construction est formidablement court. Ce qui permet d'écourter d'une part le temps de financement, la réduction des durées de financement se répercutant alors positivement sur les intérêts dus.

D'après Gerhard Hoffmann auditeur supérieur de DGNB : avec la construction modulaire, les coûts d'édification du bâtiment servant de comparaison sont de 11,4 % inférieurs à ceux de la construction classique ou l'ingénieuse structure des modules individuels accroît considérablement la flexibilité et la capacité de transformation du bâtiment tout entier. Comparativement au mode de construction classique, En outre, les éléments structurels d'un module peuvent être recyclés de façon ciblée et contribuer positivement, dans le cycle d'utilisation des matériaux de construction, à la réintroduction et à la revalorisation des matériaux.



*Photo IV. 1 : Construction par système de préfabrication modulaire  
source : (ZETARK, 2012)*

Notre étude consiste à présenter l'impression additive comme une nouvelle technique ou un nouveau moyen de préfabrication plus évolué plus économique et fourni des délais plus courts dans la construction du bâtiment.



*Photo IV. 2 : Couches de béton imprimé en 3D  
source : (News, 2018)*

## IV.1. Etude d'exemples

### IV.1.1. Le cas d'un équipement public (bureau du futur –Dubai- / Killa Design)

Le pavillon est le premier bâtiment imprimé en 3D au monde en 2016 conçue par Killa Design, disposant d'une superficie de 325 m<sup>2</sup>, qui est entièrement fonctionnel et occupé en permanence. En tant que «*Office of the Future*», le bâtiment sert comme résidence temporaire à «*Dubai Future Foundation*», et constitué également d'un espace d'exposition et un incubateur pour les futures technologies émergentes à Dubai.



Photo IV. 3 : Façade principale  
source : (WAM, 2017)

Cette initiative s'inscrit dans le cadre d'une stratégie d'impression additive à Dubai lancée la même année, qui met l'accent sur le développement de l'impression additive afin d'améliorer la vie des personnes dans tous les secteurs.

Le pavillon a été conçu pour permettre un mélange d'interactions créatives, de travail de réflexion discret et de rencontres fortuites. Cette approche soutient le travail d'équipes flexibles et de partenariats fluides.



Photo IV. 4 : Cour / cafète  
source (WAM, 2017)



Photo IV. 5 : Espace d'idéation  
source : (WAM, 2017)

La construction du pavillon s'inscrit dans le cadre d'une stratégie plus vaste lancée par les Émirats arabes unis, visant à devenir un incubateur majeur d'innovation et de technologies futures dans le monde. Cet agenda reflète l'engagement de Dubaï de développer des projets et des initiatives novatrices avec des partenaires au monde entier susceptibles de contribuer à l'amélioration du XXIe siècle.



Photo IV. 6 : Implantation du projet  
source : (WAM, 2017)



Photo IV. 7 : Cabines de bureaux  
source : (WAM, 2017)

La structure entière a été imprimée en béton selon une technique de fabrication additive. C'est le premier bâtiment au monde entièrement occupé à être construit à l'aide de telles techniques. Une imprimante 3D à grande échelle a été utilisée pour imprimer le bâtiment en couches de béton armé. L'imprimante est dotée d'une armature contrôlée par ordinateur permettant de mettre en œuvre le processus d'impression.



Photo IV. 8 : Les composants créés à partir du Contour Crafting  
source : (studio, 2017)

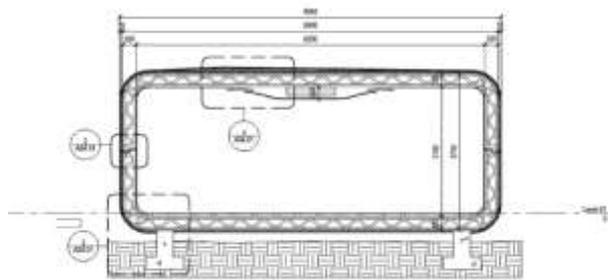


Fig IV. 1 : Coupe sur l'un des composants  
source : (Gensler, 2016)

L'imprimante s'étale sur 6 mètres de hauteur, 40 mètres de longueur et 15 mètres de largeur. Elle est équipée d'un bras robotique automatisé permettant de mettre en œuvre le processus d'impression qui a duré 17 jours et a été installé sur site en deux jours. Les travaux ultérieurs sur les bâtiments, les intérieurs et les paysages ont duré environ trois mois.

La fabrication des composants a été effectuée par la société chinoise WinSun en Chine puis transportés à Dubaï.

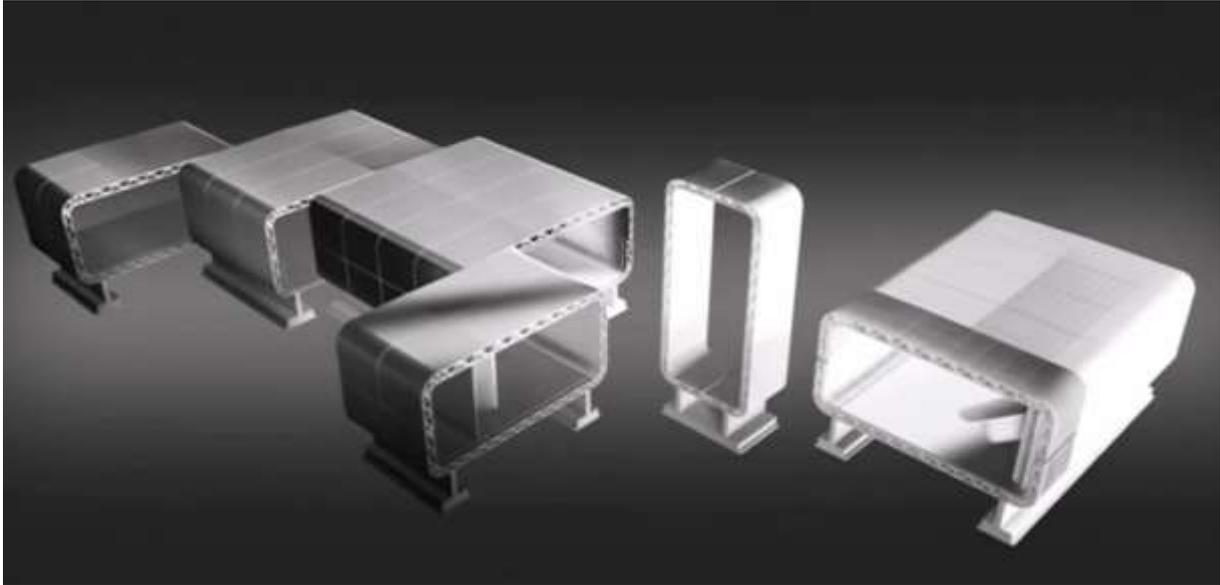


Photo IV. 9 : Les composants créés à partir du Contour Crafting source : (Stevenson, 2016)

Selon Desmarais directeur de Gensler, l'imprimante WinSun utilise un matériau d'encre «semblable au ciment» pour constituer les composants, couche par couche.

«Le matériau est inhabituel. Normalement, en impression 3D, vous utilisez du métal ou de la fibre de verre, mais il s'agit d'une sorte de béton. L'utilisation de ce béton nous a donné la possibilité de réaliser des planchers et des murs structurels », dit-il.

Le complexe de bureaux rayonne autour d'une cour de café ombragée.

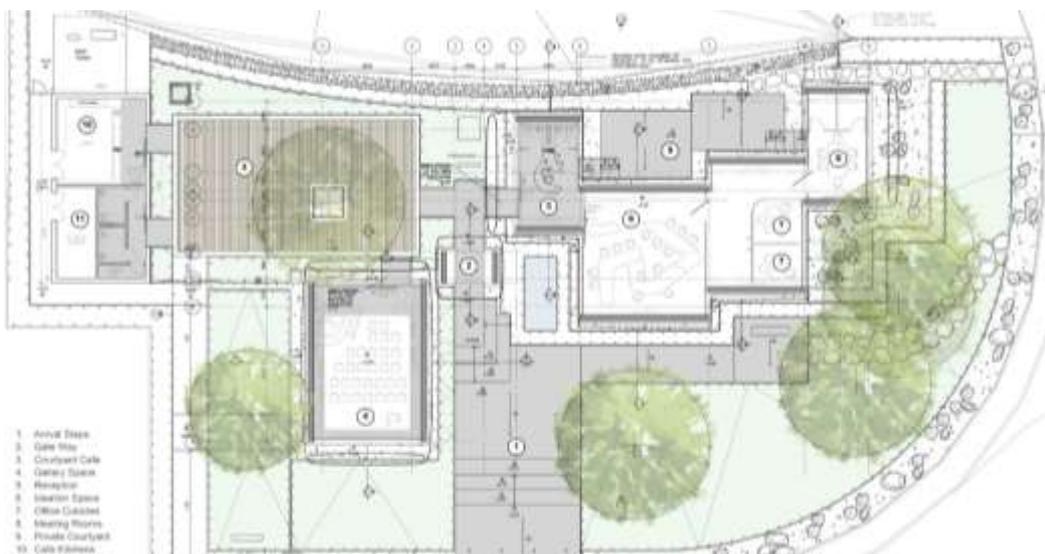


Fig IV. 2 : Plan rez-de-chaussée source : (Gensler, 2016)

Il comprend un salon et une galerie de partenariat pour des expositions, des événements et des ateliers, un espace flexible pour les travaux de réflexion et de conception en équipe et des salles de réunion privées pour les travaux en toute quiétude. Une série d'ouvertures tout au long du projet permettent à la lumière naturelle de pénétrer dans l'espace tout en permettant aux occupants de rester connectés à l'environnement extérieur.

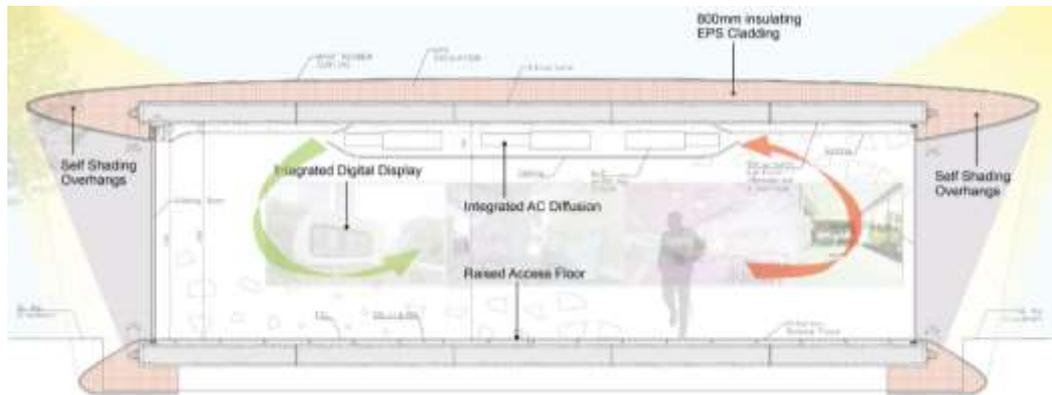


Fig IV. 3 : Coupe A  
source : (Gensler, 2016)

La conception du bâtiment est destinée à améliorer l'efficacité énergétique dans le climat chaud des Emirats Arabes Unis, qui subit généralement des températures supérieures à 45 ° C (113 ° F) et utilise un revêtement isolant de 800 mm d'épaisseur. Le projet est orienté de manière à maximiser la visibilité et la lumière naturelle, mais à protéger l'intérieur par des surplombs saillants au-dessus des fenêtres, optimisé pour protéger complètement le vitrage du soleil.

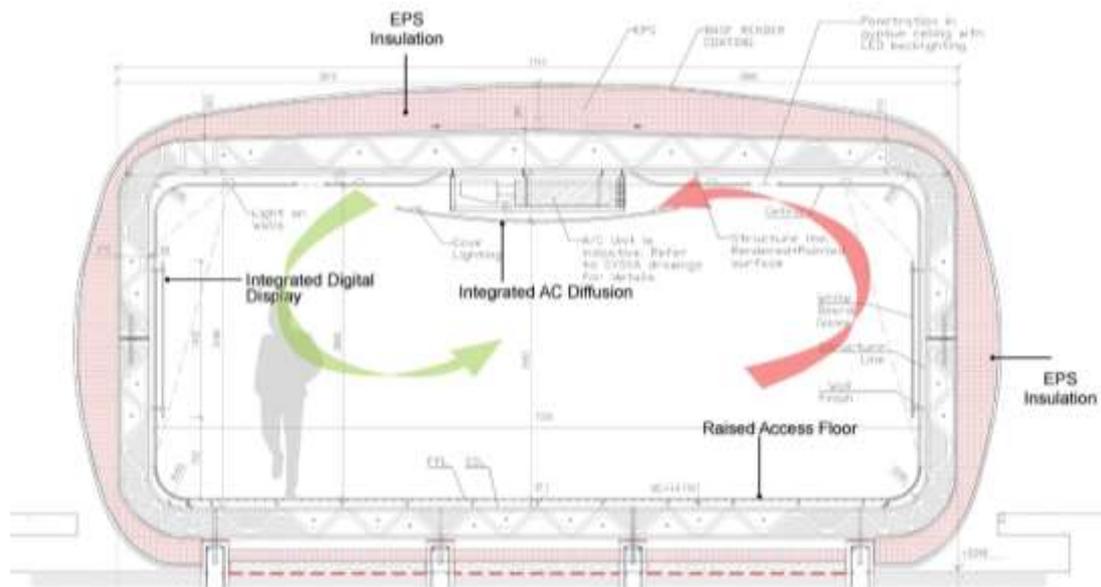


Fig IV. 4 : Coupe B  
source : (Gensler, 2016)

Cette technique de construction novatrice a permis de réduire de plus de 50% le coût de la main-d'œuvre par rapport à des bâtiments classiques de taille similaire et de minimiser les pertes sur site et contribué à réduire l'empreinte environnementale globale du projet.

### IV.1.2.le cas d'un logement social Yhnova :



Photo IV. 10 : Yhnova, une maison 3D dans le quartier de la Bottière  
source : (nantes-amenagement, 2018)

Les chercheurs de l'Université de Nantes, Nantes Métropole Habitat, Ouest Valorisation et Nantes Métropole, accompagnés de leurs partenaires, réunissent leurs savoir-faire et expertises autour d'un projet innovant et unique en France : la construction en quelques jours d'une maison en locatif social, à partir d'une imprimante additive industrielle, dans le quartier nantais de la Bottière...

Inauguré le 21 mars 2018, c'est dans le quartier de la Bottière que le premier logement d'habitat social fabriqué à l'aide de l'impression additive a vu le jour. Adaptée au terrain en forme de Y, cette maison est équipée de multiples capteurs et d'équipements qui permettront d'évaluer et d'analyser l'évolution des matériaux, ainsi que la qualité thermique et acoustique

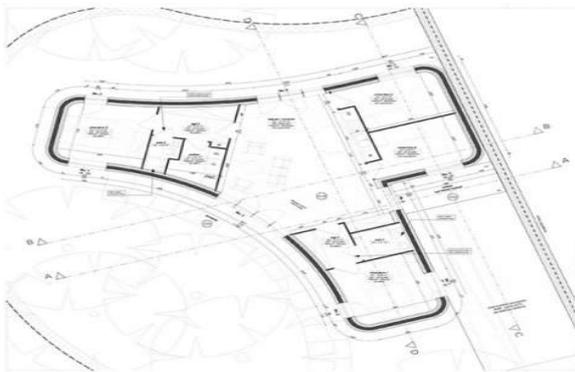


Fig IV .5 : Plan de maison yhnova  
source : (lepaveblog, 2018)



Photo IV. 11 : Yhnova  
source : (lepaveblog, 2018)

D'une surface de 95 m<sup>2</sup>, le projet « YHNOVATM » comprendra 5 pièces, des murs arrondis, des coins, des portes fenêtres, des fenêtres, des portes... un ensemble de formes architecturales complexes qui seront réalisées par le biais d'une technologie révolutionnaire de fabrication additive robotisée : BatiPrint3D™ brevetée par l'Université de Nantes.

L'imprimante additive Cet outil principalement utilisé pour fabriquer des maquettes de petite échelle se développe de plus en plus, mais aujourd'hui c'est à l'échelle du bâtiment que le mécanisme a été adapté. Il faut tout d'abord créer une maquette en 3D via un logiciel de création assistée par ordinateur (CAO) qui servira de canevas à l'imprimante. Guidée par un laser, la machine dépose successivement des couches de mousse expansive qui gonflent et s'empilent jusqu'à la hauteur souhaitée au fur et à mesure des passages.



Photo IV. 12: Imprimante additive  
source : (novabuild, 2017)



Photo IV. 13: Imprimante additive  
source : (tlanstic2020, 2018)

Les murs sont composés de trois parois : les deux extrémités sont faites en mousse polyuréthane. Un matériau qui ressemble à de la crème chantilly, sèche en 5 secondes et apporte une excellente isolation.



Photo IV. 14: Mise en œuvre de l'imprimante additive  
Source (lepaveblog, 2018)

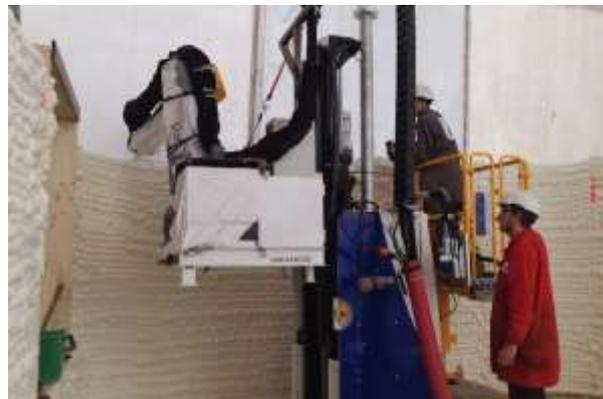


Photo IV. 15: Impressions des murs  
source : (numerama, 2017)

Cette mousse blanche, qui ressemble à de la crème Chantilly, se solidifie, formant une succession de boudins blancs s'élevant à chaque passage du robot. Lui aussi mis au point à l'université de Nantes, il est mobile, pour se déplacer facilement le long du mur.



Photo IV. 16 : L'imprimante additive utilise du polyuréthane pour la construction de la maison Yhnova  
Source : (wedemain, s.d.)



Photo IV. 17 : Un des murs en polyuréthane de la maison réalisé par l'imprimante  
Source : (franceinter, 2017)

Les murs sont ensuite enduits à l'extérieur pour les protéger des intempéries et des plaques de placoplatre sont posées à l'intérieur. Ainsi le locataire a le champ libre pour aménager l'intérieur de cette maison.



Photo IV. 18 : Mur extérieur  
source : (egis, 2018)



Photo IV. 19 : Mur extérieur en enduit  
source : (egis, 2018)

Les ouvertures présentes sur la maquette CAO sont prises en compte par l'imprimante, des cadres en bois destinés à accueillir les menuiseries en fin de chantier sont posés au cours du processus d'impression.



Photo IV. 20 : À Nantes, une maison construite par impression  
Source : (cnrs, 2017)



Photo IV. 21 : Mise en place des ouvertures  
source : (batiweb, 2017)

Au centre, une paroi en béton est coulée par le robot et les murs intérieurs sont ensuite recouverts de Placoplâtre par les maçons.



Photo IV. 22 : Murs intérieurs  
source (bouygues-construction, 2017)

L'ensemble de l'édifice repose sur une dalle de béton traditionnelle et le toit est également composé de béton.



Photo IV. 23 : Les armatures entre les murs  
source : (batijournal, 2017)

Plan :



Fig IV .6 : Plan d'Yhnova  
source : (franceinter, 2017)

Cet étrange bâtiment de plain-pied en forme de Y, l'architecte fait un grand espace de vie, comme une cellule centrale, à laquelle sont branchées quatre chambres et deux salles de bain, en faisant attention au vis-à-vis. Des poutres en bois ont été placées au plafond pour réchauffer l'ambiance. Au sol, du béton brut. Et au mur, une « peinture qui retient la chaleur.

Grâce à cette technique, la maison Yhnova n'a coûté que 195 000 euros, contre 250 000 à 350 000 euros pour une superficie égale dans le même quartier. Soit une économie de 20 à 30%, également à un temps de construction record. Il faut compter 9h pour voir s'élever les murs du bâtiment, 33 heures pour que ce dernier soit prêt à être habité.

### IV.1.3. Le cas de maisons imprimées en 3D dans l'architecture d'urgence :



*Photo IV .24 : Des logements à bas coûts imprimé en 3D  
source : (a3dm-magazine, 2019)*

La technologie de l'imprimante additive devient de plus en plus élaborée. Désormais, il est même possible d'imprimer des maisons en béton.

C'est le fruit de la collaboration entre l'ONG américaine New Story et le constructeur Icon. Il est désormais possible d'imprimer des maisons en 3D, rapidement et à moindre coût. Une technologie de poids dans l'architecture d'urgence.

La maison imprimée en 3D au Texas par l'ONG New Story en 05/05/2018. C'est une petite maison en béton de 55 mètres carrés, conçue en 24 heures pour moins de 4000 dollars (soit 3300 euros).

L'imprimante, nommée Vulcan, sera bientôt officiellement mise en service par l'ONG pour construire cinquante maisonnettes au Salvador, avec l'aide d'une main-d'œuvre locale pour y ajouter toitures, fenêtres et installations électriques et sanitaires



Photo IV. 25 : Processus d'impression  
source : (positivr.fr, 2018)

Icon, le constructeur ayant mis au point l'imprimante additive, a suivi à la lettre les recommandations de l'ONG : la composition du béton utilise uniquement des matériaux peu coûteux et locaux. De plus, légère et facilement transportable, l'imprimante fonctionne grâce à un générateur électrique



Photo IV.26: Les murs imprimé en béton  
source : (positivr.fr, 2018)

La maison a un salon, une chambre, une salle de bain et un porche courbé. Le ciment Portland est le principal matériau utilisé. Ces maisons devraient durer aussi longtemps ou plus

longtemps que les maisons standard construites en unités de maçonnerie en béton et sont conformes aux normes du code de construction IBC (International Building Code).



Photo IV. 27 : Espaces intérieures  
source : (positivr.fr, 2018)

**Plan :**

1. un salon
2. un porche courbé
3. une salle de bain
4. une chambre

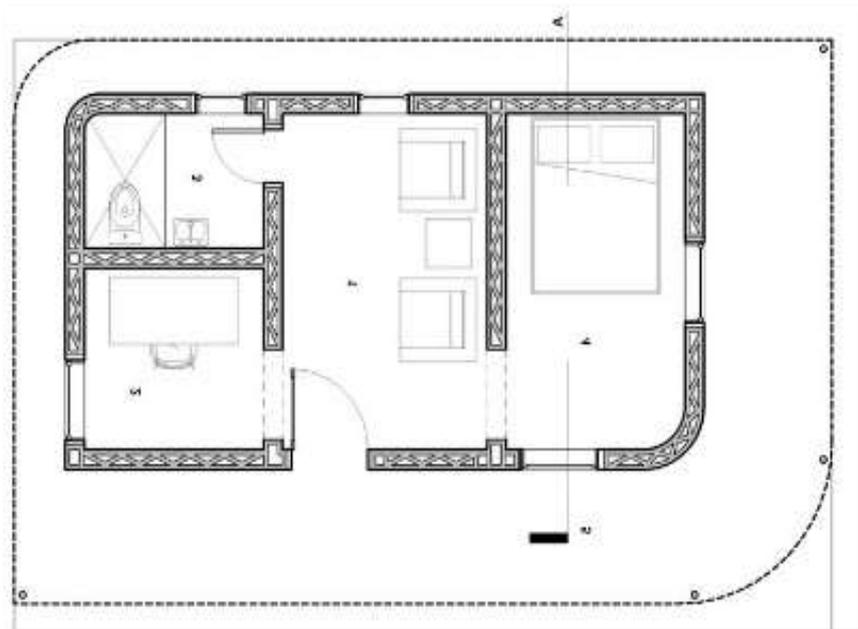


Fig IV.7 : Plan de la maison  
source : (a3dm-magazine, 2019)

Les entreprises choisissent de s'installer au Salvador parce qu'elles croient que ces maisons imprimées en 3D peuvent constituer une contribution importante à une région qui a du mal à trouver un abri. Ils ont également lancé des campagnes de financement afin que les donateurs puissent financer un foyer 3D pour une famille. En Amérique latine, 33 millions de personnes vivent dans des bidonvilles et les «refuges pour sans-abri» et les services similaires n'existent pas pour la plupart. En outre, les maisons équivalentes construites par l'être humain mettent entre 13 et 20 jours.

#### IV.1.4. Le cas d'un projet utopique (gratte-ciel vendeur de maisons)

Haseef Rafiei, un architecte malaisien, a imaginé un immeuble à Tokyo composé de logements-capsules qui s'insèrent dans une grille. Ces habitations, imprimées en 3D, sont entièrement personnalisables.



Photo IV.28: Le gratte-ciel vendeur de maisons  
source : (Haseef Rafiei, 2017)



Photo IV. 29 : Un gratte-ciel auto-imprimable  
source : (Haseef Rafiei, 2017)

Ce gratte-ciel qui reprend les codes du jeu Tetris. L'idée du jeune architecte est que la structure de l'immeuble soit une immense grille et que les logements soient des modules géométriques.



Photo IV. 30: Centre d'achat et de personnalisation  
source : (Haseef Rafiei, 2017)

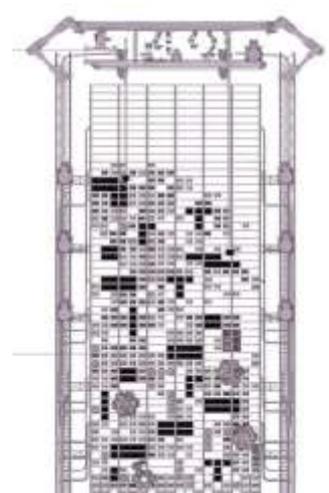


Fig IV.8 : Coupe sur le gratte-ciel  
source : (Haseef Rafiei, 2017)

Le propriétaire choisit l'emplacement de son appartement sur la grille. Ce logement, construit grâce à des imprimantes additives, est entièrement personnalisable. Il est composé de différents éléments (un espace lit, un espace salle de bain, un espace cuisine, ...) qui sont rattachés les uns aux autres. Une famille par exemple, pourra décider d'avoir un logement sur deux ou trois étages en fonction de la place dont elle a besoin. Ces logements sont donc des capsules qui s'insèrent sur la grille.

Le gratte-ciel vendeur de maisons propose une stratégie plus durable sur le plan économique pour la construction, la valeur immobilière et l'habitation, en réponse à l'incertitude économique mondiale, à la spéculation immobilière et à la demande de logements dans les villes.

Une imprimante additive de capsules est installée au sommet du gratte-ciel. Ces derniers sont produits à chaque demande. L'imprimante reçoit les matériaux pompés par les hydrauliques situés sur les côtés du bâtiment.



Photo IV. 31 : L'imprimante additive installée au sommet du gratte-ciel  
source : (Haseef Rafiei, 2017)

Les capsules fabriquées sont isolées et étanche à l'air. Une fois connecté avec des tuyaux d'alimentation et d'entretien. Ils sont facilement habitables. Les capsules abandonnées depuis un certain temps, seront démontées et stockées ou ramenées à l'imprimante pour être recyclées.

L'abandon de projets de construction reste un problème sérieux dans l'industrie de la construction. Il en résulte du gaspillage de matériaux et des ressources. Cela concerne non seulement les acheteurs de maison immédiats, mais également les autres acteurs du projet et le grand public.

Dans certains cas, cela implique également l'utilisation de fonds publics pour la relance de projets abandonnés. En réponse au problème, le projet propose une construction en croissance constante : une tour qui croît parallèlement à la demande de logements de la ville.



Fig IV. 9 : L'évolution et la croissance du gratte-ciel selon la demande  
source : (Haseef Rafiei, 2017)

La technologie robotique de l'impression additive permettrait de réduire la quantité de travail, le temps et les coûts de construction. Grâce à la construction de haute précision, les déchets de matériaux peuvent également être réduits.

Le distributeur automatique des capsules suggère la construction automatisée, abordables et prêtes à l'emploi. L'unité de base d'une maison est explorée en tant qu'objets tectoniques.

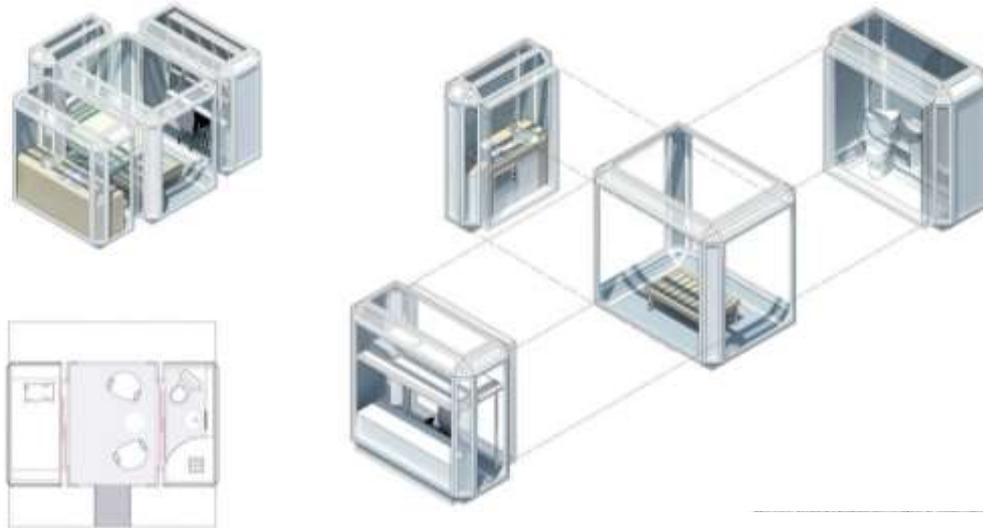


Fig IV. 10 : Personnalisation des capsules  
source : (Haseef Rafiei, 2017)

Inspirée de la culture vivante minimaliste des foyers japonais, la maison est décomposée en équipements de base permettant aux utilisateurs de choisir ceux dont ils ont besoin.

Le propriétaire peut déterminer le type de capsules qu'il souhaite en combinant plusieurs sous-capsules pour constituer sa maison. Les capsules non utilisées seront démontées ou stockées pour être réutilisées, ce qui économisera de la matière et créera un cycle métabolique dans le gratte-ciel.

En cas de déménagement, la capsule-logement pourra être retirée et installée dans une autre grille dans l'immeuble ou alors stockée. Le propriétaire conservera ainsi son intérieur. Et il sera aussi possible de choisir un autre emplacement sur le gratte-ciel en fonction de la place disponible.



Fig IV. 11 : Disposition des différentes capsules dans le gratte-ciel  
source : (Haseef Rafiei, 2017)

Les capsules peuvent être combinées pour créer des espaces plus grands si l'utilisateur le souhaite. Les capsules voisines peuvent être achetées et combinées en utilisant les sous-capsules connectées.

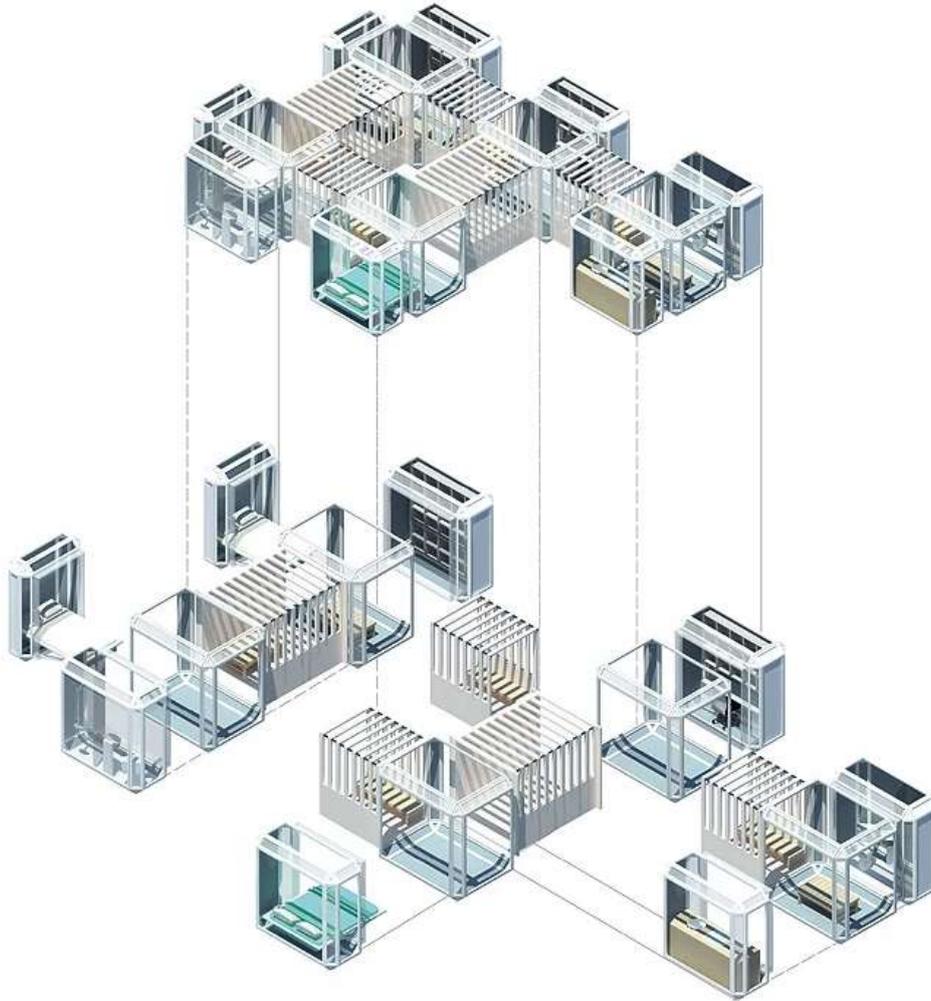


Fig IV. 12 : Combinaisons des capsules pour créer un espace plus grand à l'utilisateur  
source : (Rafiei, 2017)

Tokyo a longtemps été la ville phare de la robotique et de la fabrication. La fascination de la ville pour la science et l'ingénierie a changé la manière dont la société interagit avec les machines. Sa culture et ses modèles sociaux ont longtemps tourné autour de son obsession pour l'automatisation et de sa haute estime pour les systèmes automatisés.

La prolifération des distributeurs automatiques à Tokyo est impossible à ignorer. Ces machines ont minimisé le coût du travail humain, éliminant ainsi le besoin de commis aux ventes. Le distributeur automatique de capsules explore la possibilité de convertir le secteur immobilier en un système de vente automatique.

## IV.2.Synthèse

L'impression additive est une nouvelle technologie révolutionnaire qui a mis son empreinte dans le monde entier et dans tous les domaines et surtout dans le bâtiment.

L'analyse des différents exemples existants et livresques a permis de démontrer que cette nouvelle technologie régnante est un nouveau moyen de préfabrication dans le bâtiment qui est plus évolué plus développée pour ces divers avantages, dont les plus importants sont :

- **Amélioration de la qualité** : L'impression additive dans la construction permettrait de réaliser des formes de production impossibles ou très coûteuses avec les méthodes conventionnelles.
- **Réduction des coûts** : le coût d'impression des éléments de construction est bien inférieur aux méthodes de construction traditionnelles, aussi le transport et le stockage des matériaux sur les sites sont limités.
- **Gain de temps** : les délais requis pour terminer le bâtiment peut être considérablement réduit.
- **Impression additive à grande échelle** : elle peut être utilisée pour construire des maisons peu coûteuses imprimées en 3D dans les pays en développement.
- **Procédés de construction respectueux à l'environnement** : l'utilisation de matières premières à faible énergie incarnée.
- **Réduction du nombre d'incidents et de fatalités sur le site** : les imprimantes seront en mesure d'effectuer les travaux les plus dangereux.
- **Minimiser les risques d'erreurs** : grâce à un dépôt de matériau extrêmement précis.

D'après l'entreprise d'impression additive «*CyBe construction*» : Les processus de construction traditionnels prennent beaucoup de temps et d'argent. En raison du temps d'ingénierie et de préparation, la construction prend plus de temps que l'impression additive du béton. Les coûts finaux d'une imprimante à béton sont réduits et peuvent aller jusqu'à 70%.

Cette réduction des coûts résulte des facteurs tels que les faibles coûts de main-d'œuvre et les coûts des matériaux.

En termes d'inconvénients, créer un bâtiment qui respecte toutes les exigences actuelles en matière de construction est évidemment un défi. Il y a la question de l'isolation, de la résistance au feu, des charges dues au vent, des fondations et autres.

Actuellement, l'impression additive d'un bâtiment présenterait un ensemble d'énormes défis technologiques et économiques. L'automatisation de divers produits et pièces a considérablement évolué au cours des deux dernières décennies, mais la construction reste essentiellement une pratique manuelle. Il reste encore beaucoup d'inquiétudes à prendre en compte.

La principale inconnue est que, si le développement de la technologie d'impression additive n'éliminera pas l'emploi des milliers de travailleurs qualifiés, Il est difficile d'imaginer jusqu'à présent que l'impression additive pourrait remplacer la construction traditionnelle dans les prochaines années.

### **IV.3. Recommandations**

L'impression additive est un nouveau moyen de préfabrication dans le bâtiment, son application en Algérie pourrait permettre de raccourcir les délais, minimiser les couts, abaisser le taux d'incidents sur site et assurer une bonne qualité architecturale, tous cela nécessite :

- L'introduction de l'impression additive dans le secteur de construction Algérien et ses divers avantages.
- Elaborer plus de recherches sur cette nouvelle technologie au niveau local.
- Etablir des formations pour but d'obtenir une main d'œuvre qualifié et fournir plusieurs emplois dans ce domaine.
- Faire naissance à un nouveau style architectural régnant.
- Le recours à des nouveaux matériaux de construction recyclables, a bas carbone pour minimiser l'impact du bâtiment sur l'environnement immédiat.

## Conclusion générale

Cette thèse débute par une introduction à la préfabrication du bâtiment qui a joué un rôle principale dans l'industrialisation du bâtiment en facilitant le déroulement d'un chantier en fournissant des délais moins courts avec des couts de réalisations plus diminué.

On démontre les divers types de préfabrifications et son évolution à travers les années où elle était surtout appliquée après l'indépendance pour répondre à la demande massive de logements.

L'impression additive un nouveau outil de préfabrication ou appelé autrement le prototypage rapide qui consiste à créer des objets 3D à partir d'un fichier numérique pour but de faciliter la production en masse. Cette technologie d'impression de couche par couche a contribué dans le développement de plusieurs domaines.

Dans la construction l'impression additive a rapidement modifié les conceptions avec l'utilisation du béton en tant que matériau imprimable.

Notre étude se consiste à présenter l'impression additive comme un nouveau moyen de préfabrifications dans le bâtiment qui va permettre de réduire de plus en plus les délais et les couts de réalisation avec une meilleure qualité architectural

Cependant, l'industrie elle-même, y compris ses architectes, ingénieurs et constructeurs, doit être prêts à innover et à penser d'une manière novatrice.

Une fois ces adaptations effectuées, les besoins de l'impression additive se traduiront par le développement de nouveaux matériaux. Les projets deviendront mécaniquement réalisables et économiquement viables, et de nouvelles méthodes de production, rationnelles et simples.

Bien que l'impression additive puisse offrir de nombreux avantages, tels que la création d'une conception complexe, le gain de temps et le gain de matière, la nécessité d'abolir complètement les méthodes conventionnelles ne peut pas être nécessaire. L'avenir de la construction sera probablement un processus intégré permettant aux organisations de tirer parti à la fois des technologies additives et conventionnelles.

## Références bibliographie

### Ouvrages

- Arnold Van Acker., 2011. « *Conception des planchers en dalles alvéolées* ».
- ATKINS, 2007. « *Project of manufacturing a low carbon footprint* ».
- Gero, J. S, 1995. « *Recent advances in computational models of creative design* ».
- Glass, Matthew Ponsford and Nick, 2015. « *The night I invented 3D printing* ».
- Goldberg, Dana, 2003. « *History of 3D Printing: It's Older Than You Think* »..
- Hod Lipson & Melba kurman, 2013. « *FABRICATED the new world of 3dprinting* ».
- Levy Benjamin, Carado.Cyril., (2003/2004). « *Prefabrication* ».

### Articles sur périodiques

- B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, and Z. Yeh, 2006. « *Mega-scale fabrication by contour crafting* ». International Journal of Industrial and Systems Engineering, pp. 301-319.
- B.Khoshnevis , 2004. « *AUTOMATED CONSTRUCTION BY CONTOUR CRAFTING* ». Automation in Construction , pp. 5-19.
- Chu C, Graf G, Rosen DW, 2008. « *Design for additive manufacturing of cellular structures* ». Computer-Aided Design and Applications, pp. 686-696.
- F.P. Bos, R.J.M. Wolfs, Z.Y. Ahmed, T.A.M. Salet, 2016. « *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing* ». Virtual and Physical Prototyping, pp. 209-225.
- Gunawardena, T., Mendis, P. & Ngo, T. (2016), « *Behaviour of Multi-Storey Prefabricated Modular Buildings under seismic loads* ». Earthquakes and Structures, 11(6), pp. 1061-1076.
- H. Yoshida, 2015. « *Architecture-Scale Human-Assisted Additive Manufacturing* ». ACM transactions on Graphics.

- Izabela Hager, Anna Golonka, Roman Putanowicz, 2016. « *3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction* ». Procedia Engineering, pp. 292 – 299.
- J. Pegna, 1997. « *Exploratory Investigation of Solid Freeform Construction* ». Automation in construction, pp. 427-437.
- J.P.Kruth, 1991. « *Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques* ». CIRP Annals, pp. 603-614.
- Karim Miled, 2012. « *La prefabrication en Tunisie : un secteur à proumouvoir* ». Investir En Tunisie.
- Nathalie Labonnote, Anders Rønnquist, Bendik Manum, Petra Rüter , 2016. « *Additive construction* ». Automation in Construction.
- Q.T.Nguyen, T.Ngo, P.Tran, P.Mendis, M.Zobec, L.Aye, 2016. « *Fire performance of prefabricated modular units using organoclay/glass fibre reinforced polymer composite* ». Construction and Building Materials, pp. 204-215.
- R.A. Buswell, W. L. d. S. S. J. J. D., 2018. « *3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research* ». Cement and Concrete Research, pp. 37-49.
- S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb and T. Thorpe, 2012. « *Developments in construction-scale additive manufacturing* ». Automation in Construction, pp. 262-268.
- Zeina Malaeb, Adel Tourbah, Farook Hamzeh, 2015. « *3D Concrete Printing: Machine and Mix Design* ». International Journal of Civil Engineering and Technology, pp. 14-22.

## **Mémoires**

- Gardiner, J.B, 2011. These de doctorat intitulé : « *Exploring the emerging design territory of construction 3D printing* ».

## **Sites web**

- 3dnatives your source for 3d printing, 2017. [www.3dnatives.com](http://www.3dnatives.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>  
[Accès le 20 05 2019].

- 3dprintingindustry, 2017. 3dprintingindustry.com. [En ligne]  
Available at: <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/05/dlp1.png>  
[Accès le 29 06 2019].
- a3dm-magazine, 2019. a3dm-magazine.fr. [En ligne]  
Available at: <https://www.a3dm-magazine.fr/news/toutes-industries/un-quartier-de-logements-imprime-3d-amerique-latine>
- batiweb, s.d. batiweb.com. [En ligne]  
Available at: <https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/nantes-inaugure-une-maison-construite-par-un-robot-imprimante-3d-2018-03-22-32262>
- Behrokh Khoshnevis, 2004. www.predictingourfuture.com. [En ligne]  
Available at: [https://i0.wp.com/www.predictingourfuture.com/wp-content/uploads/homebuilding/contour\\_3.png?w=940&ssl=1](https://i0.wp.com/www.predictingourfuture.com/wp-content/uploads/homebuilding/contour_3.png?w=940&ssl=1)  
[Accès le 30 06 2019].
- C.M. Rouhana, M.S. Aoun, F.S. Faek, M.S. Eljazzar, and F.R. Hamzeh, 2014. THE REDUCTION OF CONSTRUCTION DURATION BY IMPLEMENTING 3D PRINTING. [En ligne]  
Available at:  
<https://pdfs.semanticscholar.org/49a8/765f19e6fd607f261a010880d74984b6c2ba.pdf>  
[Accès le 20 05 2019].
- Chris Chen & Matthew Wettergreen, 2017. openwetware.org. [En ligne]  
Available at: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/oww-files-public/2/2d/Sla2.jpg>  
[Accès le 29 06 2019].
- cnrs, s.d. lejournal.cnrs.fr. [En ligne]  
Available at: <https://lejournal.cnrs.fr/videos/a-nantes-une-maison-construite-par-impression-3d>
- COBOD International, 2018. 3dprintingindustry.com. [En ligne]  
Available at: <https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2019/03/BOD2-1024x768.png>  
[Accès le 30 06 2019].

- d-shape, 2009. [www.d-shape.com](http://www.d-shape.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.d-shape.com/wp-content/uploads/2015/03/JF.jpg>  
[Accès le 30 06 2019].
- dictionnaire la rousse, s.d. [www.larousse.fr](http://www.larousse.fr). [En ligne]  
Available at: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/pr%C3%A9fabrication/63451>
- ebawe, s.d. ebawe. [En ligne]  
Available at: <https://www.ebawe.de/fr>
- egis, s.d. [egis.fr](http://egis.fr). [En ligne]  
Available at: <https://www.egis.fr/convictions/cadre-de-vie/et-si-imprimait-des-logements-sociaux>
- Elizabeth Palermo, 2013. [www.livescience.com](http://www.livescience.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>  
[Accès le 20 05 2019].
- Elizabeth Palermo, 2013. [www.livescience.com](http://www.livescience.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>  
[Accès le 20 05 2019].
- Elizabeth Palermo, 2013. [www.livescience.com](http://www.livescience.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>  
[Accès le 20 05 2019].
- Elizabeth Palermo, 2013. [www.livescience.com](http://www.livescience.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>  
[Accès le 20 05 2019].
- Enrico Dini : Large Scale 3D Printing, 2013. [www.youtube.com](http://www.youtube.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=L65QKBDQ6mc>  
[Accès le 20 05 2019].
- Gardiner, J. B., 2011. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net). [En ligne]  
Available at:  
[https://www.researchgate.net/profile/James\\_Gardiner11/publication/314116498/figure/fig29/AS:643895868272657@1530528146465/Full-scale-Radiolaria-assembly-at-D-Shape-](https://www.researchgate.net/profile/James_Gardiner11/publication/314116498/figure/fig29/AS:643895868272657@1530528146465/Full-scale-Radiolaria-assembly-at-D-Shape-)

factory-Italy-Image-source-Enrico-Dini.png

[Accès le 30 06 2019].

- Gensler, 2016. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965e00ab22e38a4e10000d7-office-of-the-future-killadesign-ground-floor-plan>  
[Accès le 25 06 2019].
- Gensler, 2016. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965e024b22e38bedf0002e7-office-of-the-future-killadesign-longitudinal-section>  
[Accès le 25 06 2019].
- Gensler, 2016. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965e06db22e38bedf0002e9-office-of-the-future-killadesign-cross-section>  
[Accès le 25 06 2019].
- Gensler, 2016. [www.enr.com](http://www.enr.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.enr.com/articles/39692-office-built-out-of-3d-printed-components-opens-in-dubai>  
[Accès le 25 06 2019].
- groupe-pigeon, s.d. [En ligne]  
Available at: <https://www.groupe-pigeon.com/nos-activites/activite-prefabrication-delements-de-beton>
- Haseef Rafiei, 2017. [bfmbusiness.bfmtv.com](http://bfmbusiness.bfmtv.com). [En ligne]  
Available at:  
<https://img.bfmtv.com/c/1191/741/d37/d4a3219b2473dc781db3abb318ee0.jpeg>  
[Accès le 02 07 2019].
- Haseef Rafiei, 2017. [i.dailymail.co.uk](http://i.dailymail.co.uk). [En ligne]  
Available at: [https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/10/3F9D4B4100000578-4447278-As\\_well\\_as\\_being\\_assembled\\_within\\_the\\_building\\_s\\_ground\\_the\\_pods-a-5\\_1493283729585.jpg](https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/10/3F9D4B4100000578-4447278-As_well_as_being_assembled_within_the_building_s_ground_the_pods-a-5_1493283729585.jpg)  
[Accès le 02 07 2019].

- Haseef Rafiei, 2017. [i.dailymail.co.uk](https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/10/3F9D4B2B00000578-4447278-As_more_pods_are_created_and_placed_into_the_skyscraper_the_enti-a-7_1493283779929.jpg). [En ligne]  
Available at: [https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/10/3F9D4B2B00000578-4447278-As\\_more\\_pods\\_are\\_created\\_and\\_placed\\_into\\_the\\_skyscraper\\_the\\_enti-a-7\\_1493283779929.jpg](https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/10/3F9D4B2B00000578-4447278-As_more_pods_are_created_and_placed_into_the_skyscraper_the_enti-a-7_1493283779929.jpg)  
[Accès le 02 07 2019].
- Haseef Rafiei, 2017. [www.dailymail.co.uk](https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/09/3F9D4B3300000578-4447278-The_pod_skyscraper_which_has_been_proposed_for_Tokyo_is_a_huge_s-a-2_1493283552733.jpg). [En ligne]  
Available at: [https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/09/3F9D4B3300000578-4447278-The\\_pod\\_skyscraper\\_which\\_has\\_been\\_proposed\\_for\\_Tokyo\\_is\\_a\\_huge\\_s-a-2\\_1493283552733.jpg](https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2017/04/27/09/3F9D4B3300000578-4447278-The_pod_skyscraper_which_has_been_proposed_for_Tokyo_is_a_huge_s-a-2_1493283552733.jpg)  
[Accès le 02 07 2019].
- Haseef Rafiei, 2017. [www.ladn.eu](https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/2-4.jpg?v=2). [En ligne]  
Available at: <https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/2-4.jpg?v=2>  
[Accès le 02 07 2019].
- Haseef Rafiei, 2017. [www.ladn.eu](https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/okok.jpg). [En ligne]  
Available at: <https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/okok.jpg>  
[Accès le 02 07 2019].
- Haseef Rafiei, 2017. [www.ladn.eu](https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/4-1.jpg?v=2). [En ligne]  
Available at: <https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/4-1.jpg?v=2>  
[Accès le 02 07 2019].
- Haseef Rafiei, 2017. [www.ladn.eu](https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/7-1.jpg?v=2). [En ligne]  
Available at: <https://www.ladn.eu/wp-content/uploads/2017/04/7-1.jpg?v=2>  
[Accès le 02 07 2019].
- Kerry Stevenson, 2016. [www.fabbaloo.com](https://static1.squarespace.com/static/509c281de4b0cd18c7335aab/t/572fa54fc6fc08291273ecbb/1462740306461/?format=1500w). [En ligne]  
Available at:  
<https://static1.squarespace.com/static/509c281de4b0cd18c7335aab/t/572fa54fc6fc08291273ecbb/1462740306461/?format=1500w>  
[Accès le 01 07 2019].
- Kerry Stevenson, 2018. [www.fabbaloo.com](https://static1.squarespace.com/static/509c281de4b0cd18c7335aab/t/5ad527cdaa4a9981be). [En ligne]  
Available at:  
<https://static1.squarespace.com/static/509c281de4b0cd18c7335aab/t/5ad527cdaa4a9981be>

d84c66/1523918802523/?format=1000w

[Accès le 01 07 2019].

- Kimberley Mok, 2018. thenewstack.io. [En ligne]  
Available at: <https://cdn.thenewstack.io/media/2018/09/27d4409f-mobile-robot-swarm-printing-nanyang-technological-university-1.jpeg>  
[Accès le 01 07 2019].
- Krassenstein, E., 2015. 3dprint.com. [En ligne]  
Available at: <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/06/sla1g.jpg>  
[Accès le 28 06 2019].
- lepaveblog, s.d. lepaveblog.com. [En ligne]  
Available at: <https://lepaveblog.com/2018/01/24/yhnova-un-logement-social-sur-pieds-en-33-heures/>
- Loughborough University, 2012. www.kurzweilai.net. [En ligne]  
Available at: [https://www.kurzweilai.net/images/Nonlinear\\_construction.jpg](https://www.kurzweilai.net/images/Nonlinear_construction.jpg)  
[Accès le 30 06 2019].
- lybraryc, 2015. www.usimm.ca. [En ligne]  
Available at: [https://www.usimm.ca/wp-content/uploads/2015/11/impresion\\_3D\\_3-1024x675.jpg](https://www.usimm.ca/wp-content/uploads/2015/11/impresion_3D_3-1024x675.jpg)  
[Accès le 28 06 2019].
- Marianna Papageorgiou, 2017. www.sculpteo.com. [En ligne]  
Available at: <https://www.sculpteo.com/blog/wp-content/uploads/2017/10/Webp.net-resizeimage8.png>  
[Accès le 01 07 2019].
- matiere-tp, s.d. [En ligne]  
Available at: <https://www.matiere-tp.fr/installation-atelier-de-prefabrication-pre-tension-prad-jijel-algerie/>
- MEEE, 2018. www.meee-services.com. [En ligne]  
Available at: <https://www.meee-services.com/wp-content/uploads/2018/06/Electron-Beam-Melting-EBM-Technology.png>  
[Accès le 29 06 2019].

- Melissa Twigg , 2016. [www.scmp.com](http://www.scmp.com). [En ligne]  
Available at:  
[https://www.scmp.com/sites/default/files/styles/660x385/public/images/methode/2016/12/01/b73485fe-b529-11e6-a8ef-4657c68d1ed0\\_660x385.JPG?itok=Am-ZRhyU](https://www.scmp.com/sites/default/files/styles/660x385/public/images/methode/2016/12/01/b73485fe-b529-11e6-a8ef-4657c68d1ed0_660x385.JPG?itok=Am-ZRhyU)  
[Accès le 30 06 2019].
- nantes-amenagement, 2018. [www.nantes-amenagement.fr](http://www.nantes-amenagement.fr). [En ligne]  
Available at: <http://www.nantes-amenagement.fr/2018/04/19/yhnova-maison-3d-quartier-de-bottiere/>
- Nathalie Labonnote, 2016. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net). [En ligne]  
Available at:  
[https://www.researchgate.net/profile/Nathalie\\_Labonnote/publication/309193955/figure/fig6/AS:668527920967702@1536400885886/Different-technological-solutions-a-Gantry-b-cable-suspended-c-swarm-d-robotics.png](https://www.researchgate.net/profile/Nathalie_Labonnote/publication/309193955/figure/fig6/AS:668527920967702@1536400885886/Different-technological-solutions-a-Gantry-b-cable-suspended-c-swarm-d-robotics.png)  
[Accès le 30 06 2019].
- News, S., 2018. [all3dp.com](http://all3dp.com). [En ligne]  
Available at: <https://all3dp.com/2/concrete-3d-printing-how-to-do-it-and-application/>  
[Accès le 25 06 2019].
- novabuild, s.d. [novabuild.fr](http://novabuild.fr). [En ligne]  
Available at: <https://www.novabuild.fr/rendez-vous/table-ronde-360deg-robotique-chantier>
- Rafiei, H., 2017. [www.treehugger.com](http://www.treehugger.com). [En ligne]  
Available at: <https://media.treehugger.com/assets/images/2017/05/pod5.jpg>  
[Accès le 02 07 2019].
- Ravinder, 2018. [rapidprototyping3d.com](http://rapidprototyping3d.com). [En ligne]  
Available at: <https://rapidprototyping3d.com/wp-content/uploads/2018/03/ergerg.png>  
[Accès le 29 06 2019].
- Renotech, 2019. [www.renotech.fi](http://www.renotech.fi). [En ligne]  
Available at:  
<https://www.renotech.fi/uploads/1/0/7/6/107635591/published/4.png?1557125588>  
[Accès le 30 06 2019].

- Stevenson, K., 2016. [www.fabbaloo.com](http://www.fabbaloo.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.fabbaloo.com/blog/2016/6/9/what-is-going-on-in-dubais-3d-printing-project>  
[Accès le 25 06 2019].
- studio, O. t. i., 2017. [www.oosterhuis.nl](http://www.oosterhuis.nl). [En ligne]  
Available at: <http://www.oosterhuis.nl/?p=122>  
[Accès le 25 06 2019].
- The technologie house, 2016. [www.tth.com](http://www.tth.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.tth.com/wp-content/uploads/FDM-Process.jpg>  
[Accès le 29 06 2019].
- tlanstic2020, s.d. [tlanstic2020.fr](http://tlanstic2020.fr). [En ligne]  
Available at: <https://atlanstic2020.fr/actualites/chercheurs-nantais-imprimeront-premier-logement/>
- Travis Deyle, 2014. [www.hizook.com](http://www.hizook.com). [En ligne]  
Available at: [http://www.hizook.com/files/users/3/Fraunhofer\\_cable\\_robot\\_3.jpg](http://www.hizook.com/files/users/3/Fraunhofer_cable_robot_3.jpg)  
[Accès le 30 06 2019].
- Venkatesh Naidu Nerella, 2018. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net). [En ligne]  
Available at:  
[https://www.researchgate.net/profile/Venkatesh\\_Naidu\\_Nerella/publication/325392633/figure/fig1/AS:630946881622017@1527440867455/a-Vertical-steel-reinforcement-used-in-combination-with-Contour-Crafting-technology-108.png](https://www.researchgate.net/profile/Venkatesh_Naidu_Nerella/publication/325392633/figure/fig1/AS:630946881622017@1527440867455/a-Vertical-steel-reinforcement-used-in-combination-with-Contour-Crafting-technology-108.png)  
[Accès le 01 07 2019].
- Vijay Laxmi Kalyani, 2016. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net). [En ligne]  
Available at:  
[https://www.researchgate.net/profile/Vijay\\_Kalyani/publication/307574898/figure/fig12/AS:401861564747787@1472822671795/Selective-Laser-Sintering-SLS-Source-entopmaxtechnet.png](https://www.researchgate.net/profile/Vijay_Kalyani/publication/307574898/figure/fig12/AS:401861564747787@1472822671795/Selective-Laser-Sintering-SLS-Source-entopmaxtechnet.png)  
[Accès le 29 06 2019].
- Viktor Mechtcherine, Jasmin Grafe, Venkatesh Naidu Nerella, Uwe Füßel, 2018. 3D-PRINTED STEEL REINFORCEMENT FOR DIGITAL CONCRETE CONSTRUCTION. [En ligne]

Available at:

[https://www.researchgate.net/profile/Venkatesh\\_Naidu\\_Nerella/publication/325392633\\_3D-PRINTED\\_STEEL\\_REINFORCEMENT\\_FOR\\_DIGITAL\\_CONCRETE\\_CONSTRUCTION\\_-\\_MANUFACTURE\\_MECHANICAL\\_PROPERTIES\\_AND\\_BOND\\_BEHAVIOUR/links/5b0ae5dfaca2725783ea4e12/3D-PRINTED-STEEL-REINFORCEMENT-FOR-DIGITAL-CONCRETE-CONSTRUCTION-MANUFACTURE-MECHANICAL-PROPERTIES-AND-BOND-BEHAVIOUR](https://www.researchgate.net/profile/Venkatesh_Naidu_Nerella/publication/325392633_3D-PRINTED_STEEL_REINFORCEMENT_FOR_DIGITAL_CONCRETE_CONSTRUCTION_-_MANUFACTURE_MECHANICAL_PROPERTIES_AND_BOND_BEHAVIOUR/links/5b0ae5dfaca2725783ea4e12/3D-PRINTED-STEEL-REINFORCEMENT-FOR-DIGITAL-CONCRETE-CONSTRUCTION-MANUFACTURE-MECHANICAL-PROPERTIES-AND-BOND-BEHAVIOUR)  
[Accès le 01 07 2019].

- WAM, 2017. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965df8fb22e38bedf0002e3-office-of-the-future-killadesign-photo>  
[Accès le 25 06 2019].
- WAM, 2017. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965e094b22e38bedf0002eb-office-of-the-future-killadesign-photo>  
[Accès le 25 06 2019].
- WAM, 2017. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965e0fdb22e38bedf0002ee-office-of-the-future-killadesign-photo>  
[Accès le 25 06 2019].
- WAM, 2017. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965e05ab22e38a4e10000d9-office-of-the-future-killadesign-photo>  
[Accès le 25 06 2019].
- WAM, 2017. [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com). [En ligne]  
Available at: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-killadesign/5965e195b22e38a4e10000df-office-of-the-future-killadesign-photo>  
[Accès le 25 06 2019].
- Wendy Bracat, 2016. [www.huffingtonpost.fr](http://www.huffingtonpost.fr). [En ligne]  
Available at:  
[https://img.huffingtonpost.com/asset/5c938495240000f7054ed368.jpeg?ops=scalefit\\_630](https://img.huffingtonpost.com/asset/5c938495240000f7054ed368.jpeg?ops=scalefit_630)

\_nouplescale

[Accès le 30 06 2019].

- Wilson Ricardo Leal da Silva, 2018. [miro.medium.com](https://miro.medium.com/max/700/1*N2uso9FvbHgufuJNIMOrHg.png). [En ligne]  
Available at: [https://miro.medium.com/max/700/1\\*N2uso9FvbHgufuJNIMOrHg.png](https://miro.medium.com/max/700/1*N2uso9FvbHgufuJNIMOrHg.png)  
[Accès le 30 06 2019].
- Whiteclouds 3D printing, 2015. [ss.whiteclouds.com](http://ss.whiteclouds.com). [En ligne]  
Available at: <http://ss.whiteclouds.com/3dperia-index/digital-light-processing-dlp>  
[Accès le 20 05 2019].
- [www.technologuepro.com](http://www.technologuepro.com), 2011. [genie-civil/Modulation-Constructions-Prefabrication](https://www.technologuepro.com/genie-civil/Modulation-Constructions-Prefabrication).  
[En ligne]  
Available at: <https://www.technologuepro.com/genie-civil/Modulation-Constructions-PrefabricationChapitre1-Notion-prefabrication-construction.pdf>  
[Accès le 2019].
- [www.technologuepro.com](http://www.technologuepro.com), s.d. [genie-civil/Modulation-Constructions-Prefabrication](https://www.technologuepro.com/genie-civil/Modulation-Constructions-Prefabrication). [En ligne]  
Available at: <https://www.technologuepro.com/genie-civil/Modulation-Constructions-PrefabricationChapitre1-Notion-prefabrication-construction.pdf>
- ZETARK, 2012. [datacenter-modulaire.fr](http://datacenter-modulaire.fr). [En ligne]  
Available at: <http://datacenter-modulaire.fr/la-solution-beton-cmdc/>  
[Accès le 25 06 2019].
-

## **Résumé :**

La préfabrication, une technique de construction permettant d'aboutir à la production répétitif ou la production massive en usine ou sur site des différents composants d'un bâtiment, puis les assembler pour arriver à une construction à bas coûts et exécuter dans des délais plus réduits qu'une construction traditionnelle.

L'évolution de diverses technologies d'industrie a provoqué l'apparition d'une nouvelle technologie révolutionnaire :

L'impression additive qui est connue par sa fabrication de masse des différents produits dans plusieurs domaines, cette technique de fabrication débute son utilisation dans une plus grande échelle surtout dans le domaine de construction, pour bénéficier de ses avantages tels que : la réduction des longs délais, de la main d'œuvre et des déchets produits par le bâtis.

Cette étude consiste à présenter les différents processus, méthodes et les avantages principaux de ces techniques et définir la relation existante entre eux dans le monde de la construction.

## **Mots clefs :**

Préfabrication, construction, production de masse, impression additive, technologies

**Abstract :**

Prefabrication, a construction technique that can achieve the repetitive production or mass production, by creating different building components in factory or in site and assembling them to provide a construction with low costs and smaller delays than the traditional ways.

The evolution in various industrial technologies has caused the appearance of a new and revolutionary technology:

Additive printing is known for its mass production of different products in several areas, this manufacturing technique begins its debut in a larger scale utilities, mainly in the construction field, to benefit from its advantages such as reducing long deadlines, labor and wastes produced by the building.

This study consists of presenting the different processes, methods and main advantages of these techniques and defining the existing relationship between them in the construction domain.

**Key words :**

Prefabrication, construction, mass production, additive printing, technologies

## ملخص:

التصنيع المسبق، تقنية بناء تؤدي إلى إنتاج متكرر أو الإنتاج الضخم في المصنع أو في موقع البناء اين يتم تصنيع المكونات المختلفة للمبنى، ثم يتم تجميعها للوصول إلى بناء منخفض التكلفة وتنفيذها في وقت أقصر من البناء التقليدي : تسبب تطور تقنيات الصناعة المختلفة في ظهور تقنية ثورية جديدة إن الطباعة المضافة المعروفة بإنتاجها الضخم للمنتجات المختلفة في العديد من المجالات، بدأت هذه التقنية التصنيعية في استخدامها على نطاق أوسع وخاصة في مجال البناء، لاستغلال مزاياها العديدة مثل: التقليل من طول المواعيد النهائية، اليد العاملة والنفايات التي ينتجها المبنى. تتمثل هذه الدراسة في تقديم مختلف العمليات والأساليب والمزايا الرئيسية لهذه التقنيات وتحديد العلاقة القائمة بينها في عالم البناء

## الكلمات المفتاحية :

التصنيع المسبق، البناء، الإنتاج الضخم، الطباعة المضافة، التقنيات