N° Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

Mr. OUAMARANE Hakim

Mr. MAKACI Oussama

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en **:**

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème :

L'impression 3 D dans la construction.

Devant le jury composé de :

HAMI Brahim	MCB	UAMOB	Président
KENNOUCHE Salim	MCB	UAMOB	Encadreur
ARIBI Chouaib	MCB	UAMOB	Examinateur

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIMENT

Nous remercions chaleureusement, Dr. **KENNOUCHE Salim** de nous avoir encadré, de nous avoir témoigné son soutien et sa confiance, de nous avoir guidé et encouragé dans ce travail, pour toutes les connaissances scientifiques et les conseils qu'il nous a apportés, pour sa disponibilité. Grâce à vous nous avons beaucoup appris.

On tient à remercier tous les enseignants Génie civil qui nous ont permis d'atteindre cette étape.

Nous remercions tous ceux qui ont crus en nous et en notre idée.

DEDICACES

À tous les hommes libres.

Aux détenus d'opinion.

Aux HIRAKISTS.

Aux pauvres malheureux, aux misérables de la terre, à tous ceux qui ne trouve pas de toit sur la tête.

À DADDA et NANNA.

À MA FAMILLE.

HAKIM OUAMRANE

DEDICACES

À tous les hommes libres.

Aux détenus d'opinion.

Aux HIRAKISTS.

Aux pauvres malheureux, aux misérables de la terre, à tous ceux qui ne trouve pas de toit sur la tête.

À LA MEMOIRE DE MON CHER VAVA.

À NANNA.

À MA FAMILLE.

OUSSAMA MAKACI

Résumé

L'impression 3D est l'un des développements les plus prometteurs d'aujourd'hui. Il a montré son potentiel dans une large gamme de disciplines, allant du monde médical à l'industrie alimentaire et de l'aérospatiale. Sans surprise, l'industrie du bâtiment a adopté cette technique et vise à l'appliquer à plus grande échelle. L'impression 3D des bétons se traduit par une construction à faible coût et rapide, qui permet une plus grande liberté dans la conception architecturale et structurelle. Malgré ces des avantages évidents illustrés par une poignée d'entreprises et d'instituts pionniers répartis dans le monde, l'industrie du bâtiment est toujours en retard dans le développement de l'impression 3D. Cela peut être attribué au manque de recherche fondamentale sur le comportement (structurel) des formes et des matériaux à imprimer.

Mots clés : Impression 3 D, construction, béton, rhéologie, environnement.

ABSTRACT

3D Printing is one of the most promising developments of today. It has shown its potential in a wide range of disciplines, varying from the medical world to the food industry and from aerospace engineering to household uses. Unsurprisingly, the building industry has adopted this technique and aims to apply it on a larger scale. 3D Concrete printing results in a low cost and high-speed construction method, which allows for a greater freedom in both architectural and structural design. Despite these clear benefits shown by a handful of pioneering companies and institutes spread around the world, the building industry is still behind in the development of 3D printing. This may be attributed to the lack of fundamental research on the (structural) behaviour of the to-be-printed shapes and materials.

Keywords: 3D printing, construction, concrete, rheology, environment.

الملخص

تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد واحدة من أهم التطورات الواعدة اليوم. لقد أظهرت إمكاناتها على نطاق واسع من القطاعات و التخصصات ، من عالم الطب إلى صناعة الأغذية ومن الهندسة الفضائية للاستخدامات المنزلية. ليس من الغريب أن تستعمل هذه التقنية في قطاع البناء و يهدف إلى تطبيقه على نطاق أوسع. ينتج عن الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد تكلفة منخفضة وسرعة عالية في البناء، التي تسمح حرية أكبر في كل من التصميم المعماري والإنشائي. بالرغم من هذا الفوائد الواضحة التي نشرتها الشركات والمؤسسات الرائدة المنتشرة في جميع أنحاء العالم، قطاع البناء لا يزال متخلف في تطوير الطباعة ثلاثية الأبعاد. قد يعزى هذا إلى عدم وجود بحث أساسي حول السلوك (البنيوي) للأشكال والمواد التي سيتم طباعتها.

الكلمات المفتاحية : الطباعة ثلاثية الأبعاد ، البناء ، الخرسانة ، الريولوجيا، البيئة.

Table des matières

Liste des figures I

Liste des Tableaux III

Liste des abréviations IV

Introduction générale 1

I Historique de l'impression 3D 4

I.1 La présentation de la technique d'impression 3D 6

I.1.1 Les matériaux utilisés dans l'impression 8

I.2 Les domaines d'application de la technique d'impression 3d 11

I.2.1 Le domaine médical 11

I.2.2 Domaine d'aéronautique et aérospatiale 11

I.2.3 Domaine d'automobile 12

I.2.4 Domaine alimentaire 12

I.2.5 Domaine d'architecture 13

I.3 Les applications de la technique d'impression 3d dans la construction 14

I.3.1 Bâtiment 14

I.3.2 Travaux publics 16

I.3.3 Hydraulique 18

I.3.4 Espace 18

I.4 Paramètres influençant l'impression 3D en construction 19

I.4.1 Extrudabilité 19

I.4.2 La constructibilité 19

I.4.3 L'ouvrabilité 20

I.4.4 Temps ouvert 20

I.4.5 Force de contact entre les couches 20

I.4.6 Agrégats 21

I.4.7 Rapport eau-ciment 21

I.4.8 Paramètres d'impression 21

I.4.9 Blocages lors de l'extrusion 23

I.4.10 Impression des couches 23
I.5 Les imprimantes 3D du Béton 27
I.5.1 Zone imprimable 28
Conclusion 32
II.1. Caractérisation des mélanges cimentaires pour l'impression 3 D 35
II.2. Discussion et critique 37
II.3. Le développement de l'imprimante 37
II.3.1. Caractéristiques du matériel pour le béton imprimable en 3D 39
II.4. La comparaison entre la construction traditionnelle et l'impression 3D 51
II.4.1. Introduction 51
II.4.2. Présentation de la construction à comparer 51
II.4.3. Présentation de la méthodologie d'évaluation 52
II.4.4. Description du processus de fabrication 53
II.4.5. Résultats 59
II.4.5.1. Évaluation économique de la production imprimées en 3D et préfabriquées 59
Conclusion 66
Recommandations et perspectives 71
Références bibliographiques 72

Liste des figures

Figure I. 1 : Le procédé d'impression 3D en quelques étapes simplifiées. 8
Figure I. 2 : Une main humaine imprimée en 3D. Source Forbes.fr. 11
Figure I. 3 : l'utilisation de l'impression 3D pour imprimer une pièce d'avion. 12
Figure I. 4 : Un moteur imprimé complètement en 3d. Source : Makershop. 12
Figure I. 5 : Du chocolat imprimé. Source : Quoidansassiètte.fr. 13
Figure I. 6 : Une maison totalement imprimée en 3d. Source : Iconbuild.com. 13
Figure I. 7 : DFAB HOUSE, une maison imprimée avec des imprimantes 3D. 14
Figure I. 8 : Gaia, la maison imprimée en 3D avec de la terre. Source : WASP. 15
Figure I. 9 : Immeuble d'habitation en Chine. 15
Figure I. 10 : Passerelle pour piéton à Madrid. 16
Figure I. 11 : La première passerelle à vélo en Pays-Bas. Source : The Gardian. 17
Figure I. 12 : Le collecteur d'eau pluviale réalisée à Lille en 2017. 18
Figure I. 13 : Le concept que présente FABULOUS pour sa maison bulle. 18
Figure I. 14 : Relation entre les paramètres de l'impression 3D. 22
Figure I. 15 : Différence entre le type des matériaux imprimés (le plastique et le béton). 23
Figure I. 16 : Différentes modes de déposition des couches. 24
Figure I. 17 : Une imprimante de type portique. 27
Figure I. 18 : Une imprimante 3D avec un bras robotisée. 27
Figure I. 19 : Zone imprimable pour le plus grand bras de robot. 29
Figure II. 1 : Les phases de décomposition et de formation de matières thixotropes……..41
Figure II. 2 : Résultat du test rhéologique de croissance des contraintes. 42
Figure II. 3 : Résistance au cisaillement statique en fonction du temps……. 42
Figure II. 4 : Installation de mesure directe de viscosité par rhéomètre**.** 43
Figure II. 5 : Distribution granulométrique du liant et du sable combinés. 44
Figure II. 6 : Force d'adhérence entre les couches. 45
Figure II. 7 : Mauvais état ou échec typique pendant le processus d'impression. 47
Figure II. 8 : Organigramme illustrant le processus d'obtention d'une largeur de couche. 48
Figure II. 9 : Progression du contrôle de l'impression 3D du béton. 49
Figure II. 10 : Impression 3D de différente forme. 49
Figure II. 11 : Le plan de l'unité imprimée (a : vue générale, b : coupe longitudinale). 53
Figure II. 12 : La vue finale montrant les différentes parties de la construction. 54
Figure II. 13 : L'équipement utilisés dans l'impression. 54
Figure II. 14 : Le système d'impression en treille utilisé dans la structure UI. 54

Figure II. 15 : Moulage de la dalle de base avec Tuyauterie. 54
Figure II. 16 : Coffrage métallique pour UP..... 55
Figure II. 17 : Silo à béton (une partie de l'équipement de dosage du béton)..... 55
Figure II. 18 : Répartition des coûts associée aux PBU imprimés et préfabriqués en 3D. 64
Figure II. 19 : Les émissions de CO_2 et la consommation d'énergie. 64
Figure II. 20 : La distribution des émissions CO_2..... 65
Figure II. 21 : Les dégâts causés par l'impression 3D et la préfabrication..... 65
Figure II. 22 : Le temps de travail et le poids de l'unité..... 66

Liste des Tableaux

Tableau I. 1: L'historique de l'impression 3D……6

Tableau I. 2: Conditions des mélanges imprimables et des procédés d'impression….....22

Tableau I. 3 : Caractéristiques des matériaux utilisés en impression 3D dans la littérature….....26

Tableau I. 4 : Comparaison entre types d'imprimantes….....32

Tableau II. 1: Composition des mélanges étudiés **…**….....35

Tableau II. 2: Résultats des caractéristiques rhéologiques…..……36

Tableau II. 3: Conception de mélange d'un mortier imprimable en 3D….....43

Tableau II. 4: Caractéristiques mécaniques du mortier imprimable 3D….....44

Tableau II. 5: Paramètres d'impression fixes basés sur les spécifications de l'imprimante….....46

Tableau II. 6: Géométrie de l'objet imprimé en 3D….....48

Tableau II. 7 : Matériaux, consommation et coût des PBU imprimés en 3D….....58

Tableau II. 8 : Matériaux, consommation et coût des PBU préfabriqués….....58

Tableau II. 9: Consommation d'électricité et coût des PBU imprimés en 3D et préfabriqués….....58

Tableau II. 10 : Évaluation économique de la production en 3D….....61

Tableau II. 11: Évaluation économique de la production en préfabriqué….....62

Tableau II. 12: Le coût des équipements dans l'impression 3D et la préfabrication….....63

Liste des abréviations

D : Dimension.

SLA : la Stéréo lithographie.

UV : Ultra-Violet.

STL : C'est un format utilisé dans les logiciels de stéréolithographie, la stéréolithographie c'est une technique de prototypage rapide grâce auquel on confectionne des objets à partir d'un fichier numérique.

SLS : Sintering Laser System ou, le frittage laser sélectif en français.

FDM : Fused Deposition Modeling ou dépôt de fil fondu en français.

DMLS: Direct Metal Laser Sintering.

3DPP: 3D Paper Printing.

RepRap: Replication Rapid.

ASTM: American Society of Testing and Materials.

CAO : Conception assistée par ordinateur.

AM: Additive manufacturing.

BOD: building on demand (construction à la demande).

3DPUB : 3D prefabricated bathroom unit (une salle de bain imprimée en 3d).

PBU : prefabricated bathroom unit (salle de bain préfabriquée par coulage).

CED : demande d'énergie cumulée

Introduction générale et problématiques

Introduction générale

De nos jours, le secteur de la construction se développe davantage, notamment le recours aux technologies nouvelles, afin de construire vite avec moindre coût, et de plus en plus le secteur de la construction a pris conscience de la politique adhérer au principe de développement durable, car le secteur de la construction génère des quantités importantes d'émission de CO_2. La population mondiale, notamment celle des pays sous-développés a des difficultés d'accès au logement et aux structures annexes, vu le coût excessif de réalisation des projets avec une main d'œuvre qualifiée, engendrant ainsi plus d'un milliard de personnes à vivre dans les bidonvilles dont les conditions précaires, affectant l'état de santé et la scolarisation, conduisant ainsi à des taux de chômages élevés avec une hausse notable du phénomène de criminalité. Et particulièrement durant la pandémie du **« CORONA »**, due à la propagation de virus **« COVID-19 »**, on a constaté l'arrêt des activités dans les chantiers de construction, ce qu'a contribué à des pertes économiques évaluées à des milliards de dollars.

Comme solution innovante l'introduction de l'impression 3D fait ses premiers pas dans le domaine de la construction, ce n'est pas impressionnant de voir cette technique en construction, car elle a bien fait ses preuves dans plusieurs secteurs, à savoir la médecine, la mécanique et autres, pourquoi pas celui de la construction ?

La technologie appelée impression 3D, est une technique de fabrication révolutionnaire qui est en train de remettre totalement en cause notre manière de produire et de consommer. La fabrication additive (AM) est un procédé de fabrication très prometteur en termes de possibilités de formes et de complexité de pièces. À la fois simple et novatrice, cette technique consiste en fait à superposer des couches de matières à partir des coordonnées transmises par un fichier 3D. Ce fichier, qui correspond au modèle numérique de votre projet, est réalisé à partir d'un logiciel CAO.

Cette nouvelle technologie a suscité notre intérêt, car ni son fonctionnement ni sa production ne ressemble aux procédés conventionnels. En effet, l'innovation requise lors de la conception permet aux architectes une grande liberté ainsi qu'une imagination très vaste qu'on ne peut avoir en utilisant les méthodes traditionnelles. Ce qui explique d'ailleurs la grande course que fait les grandes entreprises et université à travers tout le globe pour trouver des solutions aux défis que rencontre cette technique, la standardisation de procédés d'essais et de trouver de

nouveaux matériaux imprimable et utilisable à part le béton, c'est dans ce sens que notre travail s'inscrit.

Ce travail est organisé comme suit :

Le premier chapitre : comportant une manière générale les informations relatives à la technique d'impression 3D, cernant son historique, la présentation de cette technique et son fonctionnement, ainsi que ses domaines d'application particulièrement dans le domaine de la construction, en notant les paramètres influençant la technique, et enfin une présentation des différentes imprimantes existantes dans le monde.

Le deuxième chapitre : dédié aux études scientifiques réaliser en relation avec le sujet d'impression 3D des constructions, avec une discussion et critiques.

Enfin, une conclusion générale, avec des perspectives et des recommandations.

Chapitre I : Présentation de la technique d'impression 3 D

I Historique de l'impression 3D

La capacité de générer un objet tridimensionnel (3D) à partir d'une seule image semblerait être une idée tirée d'une œuvre fantastique ou de science-fiction. Néanmoins, à partir du milieu des années 1980, avec les premiers brevets sur la fabrication additive et l'impression 3D, cette possibilité future est devenue réalité. Initialement limitée aux polymères, la fabrication additive s'est maintenant étendue à un nombre toujours croissant de matériaux **[1]**.

Les premiers essais d'impression 3D ont été réalisés par le Docteur Kodama. Il a développé une méthode de prototypage rapide en 1980. Il fut le premier à décrire une approche de la production couche par couche, créant ainsi un ancêtre de la Stéréolithographie (SLA) : une résine photosensible est polymérisée par une lampe à UV. Malheureusement, il n'a pas rempli le dossier de dépôt de brevet avant la date limite.

Ce n'est que le 16 juillet 1984 que le 1er brevet sur l'impression 3D (dite « fabrication additive ») est déposé. Les dépositaires sont français : Jean-Claude André, Olivier de Witte, et Alain le Méhauté pour le compte de l'entreprise CILAS ALCATEL. La même année, aux Etats-Unis, le 1er août 1984, c'est l'américain Chuck Hull qui dépose le brevet sur la technique d'impression 3D de stéréolithographie (SLA pour StéréoLithographie Apparatus). Ce brevet donnera non seulement le nom de l'extension du fichier d'impression. stl, mais donnera aussi naissance à une entreprise leader : 3D Systems, géant de la fabrication d'imprimantes 3D, 3D Systems lancera fin 1988 la première imprimante 3D, la SLA-250.

En 1987, le procédé de frittage laser sélectif (ou SLS pour Sintering Laser System) est inventé par l'entreprise DTM Corp. Ce nouveau procédé de fabrication additive consiste en la fabrication couche par couche de poudres polymères par frittage laser.

En 1988, une autre entreprise américaine, la société Stratasys fondée par Scott Crump, lance sur le marché une nouvelle technologie reposant elle aussi sur le dépôt couche par couche en fabrication additive : le procédé FDM pour Fused Deposition Modeling ou dépôt de fil fondu en français. Cette technique donnera naissance par la suite aux imprimantes domestiques personnelles telles que nous les connaissons aujourd'hui.

En 1995, c'est la technologie d'impression 3D métallique ou DMLS (Direct Metal Laser Sintering) qui fait son apparition. La technologie est similaire à celle du frittage laser sélectif mais adaptée aux métaux, avec un laser encore plus puissant.

En 2003, la société MCor technologies présente un nouveau procédé, le 3DPP (3D Paper Printing). L'impression 3D utilise du papier de format A4 agrégé en couches successives avec une colle spéciale, et couplé avec une lame en pointe de tungstène pour couper la forme.

En 2005 la société ZCorporation lance la première imprimante couleur, fonctionnant sur le même principe de quadrichromie que les imprimantes 2D couleurs que nous connaissons. L'impression sur la hauteur en couches successives est rendue possible grâce à une matière de type minérale agrégée par un liant de colle.

En 2006 apparaît pour la première fois un projet d'imprimante 3D open source qui ouvrira la voie aux futures imprimantes domestiques : le projet RepRap a été initié dès 2004 par le Dr Adrian Browyer alors professeur en génie mécanique de l'Université de Bath au Royaume-Uni. L'idée à la base de ce projet est de pouvoir construire par soi-même une imprimante 3D en technologie de dépôt de fil fondu. C'est le début de ce qu'on a pu appeler par la suite le mouvement Makers.

À partir de 2011, on voit apparaître des initiatives dans l'impression 3D alimentaire. C'est le cas avec l'impression 3D en sucre rendue possible par des machines fabriquées par exemple par la société américaine The Sugar Lab, rachetée en 2013 par le géant 3D System. En 2012 la firme anglaise Choc Edge lance la première imprimante 3D chocolat.

En 2014, l'évolution technologique s'attaque à la contrainte de la taille. La société chinoise Win Su annonce fabriquer des maisons en impression 3D.

En 2015 la société Carbon3D annonce une nouvelle technologie révolutionnaire permettant de multiplier par 7 la rapidité en impression 3D. La technologie s'appuie sur l'utilisation de résine, lumière et d'oxygène pour polymériser l'objet **[2]**.

Le tableau suivant représente un récapitulatif sur l'historique du l'impression 3D :

Tableau I. 1: L'historique de l'impression 3D.

Dates	Évènements
1980	Les premiers essais réalisés par le Docteur Kodama
16 /07/1984	Le premier brevet déposé par Jean-Claude André, Olivier de Witte, et Alain le Méhauté pour le compte de l'entreprise CILAS ALCATEL
01/08/1984	Le brevet déposé par l'américain Chuck HullSLA pour la SLA pour « StéréoLithographie Apparatus ».
1987	L'invention du frittage laser sélectif de SLS pour Sintring Laser System
1988	Le lancement de la première imprimante 3D (SLA-250) par l'entreprise américaine 3D Systems
	Le lancement de FDM le dépôt du fil fondu par Stratasys
1995	L'apparition de l'impression 3D métallique DMLS
2003	MCor technologies lance 3DPP (3D Paper Printing)
2004	Le lancement du projet RepRap
2005	Z Corporation lance l'impression 3D en couleur
2006	L'apparition du premier projet 3D open source qui se repose sur l'initiative RepRap
2011	L'apparition de l'impression alimentaire en sucre
2013	Lancement de l'impression avec chocolat
2014	Le géant chinois annonce fabriquer des maisons avec impression 3D
2015	La société Carbon3D annonce une nouvelle technologie qui permet d'accélérer l'impression sept (7) fois plus

I.1 La présentation de la technique d'impression 3D

L'impression 3D ou la fabrication additive est un processus de fabrication d'objets solides tridimensionnels à partir d'un fichier numérique. L'objet imprimé en 3D est créé en superposant des couches de matériaux. Chacune de ces couches peut être considérée comme une coupe transversale horizontale mince de l'objet temporaire. Ce procédé s'appelle aussi processus additif. L'impression 3D est l'opposé de la fabrication soustractive qui coupe ou creuse un morceau de métal ou de plastique avec des machines conventionnelles. Elle permet de créer des formes complexes (fonctionnelles) en utilisant moins de matériaux que les procédés de fabrication traditionnelles **[3].**

Elle est définie par l'ASTM comme un processus de fabrication additive (ou additive manufacturing, AM) consistant à « assembler des matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèles 3D, généralement couche après couche » (American Society for

Testing and Materials (ASTM), 2013). C'est donc un processus automatisé consistant à réaliser des objets conçus en 3D avec un logiciel de CAO, en les imprimant couches par couches, de bas en haut **[4].**

Il est important de garder à l'esprit qu'on donne pas mal de noms à l'impression 3D telle que : e-manufacturing, freedom fabrication, generative manufacturing, rapid manufacturing, constructive manufacturing, direct digital manufacture et additive fabrication.

Comment ça marche ?

Afin de pouvoir imprimer quelque chose en 3D on doit suivre les étapes suivantes :

La première : se présente avant l'impression elle-même, lors de la préparation du fichier 3D de l'objet à imprimer. Ce fichier 3D peut être créé grâce au logiciel de CAO tel que SolidWorks, Autodesk, Inventor ou Pro/ENGINEER, à un scan en 3D ou directement téléchargé à partir d'un site spécialisé. Une fois que vous avez vérifié que votre fichier 3D est prêt à être imprimé, vous pouvez alors passer à la seconde étape.

La deuxième étape concerne le processus d'impression. Dans un premier temps, vous devez choisir le matériau que vous souhaitez utiliser en fonction des propriétés de l'objet. La gamme des matériaux utilisés dans la recherche et le développement de l'impression 3D est immense. Cette dernière comprend différents Plastiques, Céramiques, Résines, Métaux, Sables, Textiles, Matériaux biologiques, le Verre, différents types de nourritures et même de la poussière lunaire ! Néanmoins, l'utilisation la plus commune et accessible est l'impression de Plastique, de Résine, de Métal, de Céramique ou de Sable ; qui peuvent être ensuite complétés par de nombreuses options de finition vous permettant ainsi de créer le projet que vous aviez à l'esprit. Les autres matériaux ne sont pour le moment qu'utilisés dans le cadre d'expérimentations effectuées en laboratoire de recherche.

La troisième étape se situe lors des opérations de finition. Cette dernière est complexe et fait appel à des aptitudes et des matériaux précis. L'objet, une fois imprimé, ne peut être délivré ou utilisé ; il nécessite d'être poncé/sablé, vernis ou peint afin d'obtenir son aspect final.

Vous devez également prendre en considération la technique d'impression 3D que vous souhaitez utiliser en fonction du matériau sélectionné **[5]**.

Le schéma suivant récapitule les étapes d'impression 3d :

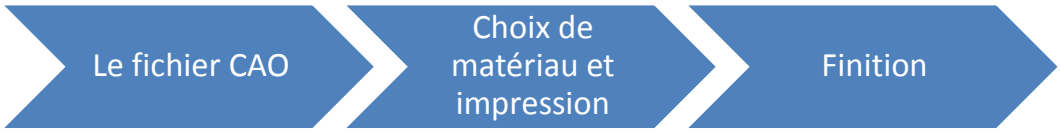

Figure I. 1 : Le procédé d'impression 3D en quelques étapes simplifiées.

I.1.1 Les matériaux utilisés dans l'impression

I.1.1.1 PLA (Acide polylactique)

Le PLA est le consommable le plus couramment utilisé pour les imprimantes personnelles à dépôt de fil. Ecologique car d'origine végétale (amidon de maïs, racine de manioc et betterave) ce plastique biodégradable et non toxique, il dégage une légère odeur sucrée pendant son impression. Si le PLA est pur et que l'extrudeur de l'appareil est en acier inoxydable, alors celui-ci peut être utilisé pour imprimer des objets destinés à être en contact avec des aliments tels que des bols ou des tasses par exemple **[6]**.

I.1.1.2 ABS (acrylonitrile butadiène styrène)

Fabriqué à base de pétrole, L'ABS qui est soluble dans l'acétone permet de souder les pièces métalliques avec une goutte ou deux, ou de lisser et créer un effet brillant par brossage ou trempage pièces entières dans l'acétone. Sa force, sa souplesse et sa meilleure résistance à la température font de lui le matériau préféré pour les ingénieurs, et les applications professionnelles **[6]**.

I.1.1.3 La poudre de polyamide

Ce matériau est notamment utilisé pour imprimer des prototypes en plastique blanc, selon un procédé d'impression 3D par frittage laser. Cette technique se repose sur l'utilisation d'un faisceau laser qui vient sculpter votre objet en fusionnant les grains qui se solidifient sous l'effet de la chaleur **[6]**.

I.1.1.4 La poudre d'alumide

L'alumide est un mélange de polyamide et d'aluminium. Ce matériau offre l'avantage de pouvoir réaliser des pièces à la fois très solides et très flexibles avec une importante résistance à la chaleur **[6]**.

I.1.1.5 La résine liquide

La résine est un polymère liquide photosensible. L'impression avec ce matériau consiste en un dépôt successif de couches qui sont immédiatement solidifiées par UV. La pièce prend alors les allures d'une pièce plastique rigide et lisse **[6]**.

I.1.1.6 Acier inoxydable

Plus connu sous l'appellation « d'inox », l'acier inoxydable a été le premier métal à être commercialisé pour la fabrication additive. Comme son nom le suggère il possède des propriétés mécaniques de haute résistance à la corrosion **[6]**.

I.1.1.7 Le titane

Les pièces imprimées à partir de titane ou de ses alliages sont réputées pour leur légèreté, leur solidité et leur résistance à la corrosion très élevée **[6]**.

I.1.1.8 L'aluminium

Il est le plus souvent utilisé pour la fabrication de moules à parois fines et aux géométries complexe. Il existe aussi l'alumide, une poudre à base de polyamide et d'aluminium. Il offre l'avantage de pouvoir réaliser des pièces à la fois très solides et très flexibles avec une importante résistance à la chaleur **[6]**.

I.1.1.9 Le bois

Sous la forme de filament, le bois est utilisé dans de nombreuses technologies de l'impression 3D. Il ne s'agit pas de bois brut mais de bois composite, matériau composé de fibres de bois et de résine de polymère. Très utilisé pour l'habillage et l'isolation de bâtiment et de mobilier extérieur, ce matériau souple a aussi l'avantage d'être en partie fabriqué en bois recyclé. Le bois composite, ou WPC pour Wood-plastic composite en Anglais, résiste aux intempéries, au soleil et ne pourrie pas avec le temps. De plus, il ne nécessite pas d'entretien particulier comme le demanderait du vrai bois **[7]**.

I.1.1.10 Le béton

Le béton avec sa grande capacité a résisté à la compression et surtout la capacité à modifier ces caractéristiques rhéologique le béton et le meilleur matériau à faire imprimer les habitations et ces pièces.

Les types de l'impression 3D :

L'impression tridimensionnelle a été reparti par l'ISO en sept grandes familles sont les suivantes :

Extrusion de matière ou Fused Deposition Modeling (FDM) : procédé de fabrication additive dans lequel le matériau est à distribuer de manière sélective par une buse, un jet ou à travers un orifice.

Frittage Laser ou DMLS et SLS : procédé de fabrication additive dans lequel l'énergie thermique fait fondre de manière sélective certaines zones d'un lit de poudre ou de métal.

Stéréolitographie ou Vat photopolymerization (SLA) : procédé de fabrication additive dans lequel un photopolymère liquide plonger dans une cuve est durci de manière sélective par polymérisation activée par la lumière.

Projection de matière ou Material jetting : procédé de fabrication additive dans lequel des gouttelettes du matériau fabriqué sont déposées de manière sélective.

Fusion par faisceau d'électrons ou Electron Beam Melting : procédé de fabrication additive dans lequel l'énergie thermique focalisée sert à faire fondre les matériaux au fur et à mesure qu'ils se déposent.

Projection de liant ou Binder jetting : procédé de fabrication additive dans lequel un agent de liaison liquide est déposé de manière sélective pour lier/agglutiner des matériaux en poudre.

Laminage par dépôt sélectif ou Sheet lamination : procédé de fabrication additive dans lequel des couches de matériau sont liées entre elles pour former un objet **[8]**.

I.2 Les domaines d'application de la technique d'impression 3d

I.2.1 Le domaine médical

Le domaine médical a très tôt adopté l'impression 3d comme une alternative aux techniques traditionnelles de fabrication d'outils et de matériel médical et paramédical, cela en raison des options de personnalisation et de l'amélioration de la vie des gens au fur et à mesure que ces procédés sont actualisés et que les matériaux sont développés.

Les technologies d'impression 3D sont utilisées pour diverses applications, la création de prototypes dans le secteur médical et dentaire, créer des moules de couronnes dentaires et des outils pour réaliser des bagues orthodontiques ; aussi pour personnaliser la fabrication des prothèses auditives, les semelles orthopédiques, les prothèses personnalisées et les implants uniques.

Les développements de cette technologie ont permis également l'impression 3D (figure I.2) de la peau, des os, du tissu, des médicaments et même des organes humains. Néanmoins, ces technologies sont encore largement éloignées de la commercialisation **[3]**.

Figure I. 2 : Une main humaine imprimée en 3D. Source Forbes.fr.

I.2.2 Domaine d'aéronautique et aérospatiale

Sans aucun doute l'industrie aéronautique et aérospatiale a le plus utilisé l'impression 3D en raison de son pouvoir à répondre à plusieurs besoins de l'industrie, en particulier la production de moules et de noyaux de sable imprimés pour les prototypes et la production de pièces moulées et de composants métalliques imprimés utilisant les superalliages à base de nickel. De plus, l'impression 3D permet un gain de poids pour les pièces en plastique et offre une meilleure isolation électrique. L'utilisation des thermoplastiques représente une solution idéale pour la fabrication de composants des avions, en raison de leur légèreté et résistance à

la chaleur. Actuellement, les grands groupes industriels tels qu'Airbus, Boeing, GE, et bien d'autres ont déjà utilisé cette technologie d'impression 3D (figure I.3) pour améliorer leur productivité et baisser leurs coûts de revient **[3]**.

Figure I. 3 : l'utilisation de l'impression 3D pour imprimer une pièce d'avion.

I.2.3 Domaine d'automobile

L'automobile a aussi bénéficié de l'impression 3D (figure I.4), en l'utilisant dans le prototypage rapide des moteurs et des composants de moteurs, des boîtiers de transmission et presque tous les autres composants pour cette raison, les concepteurs en ce secteur ont eu recours à l'impression 3D pour prototyper et fabriquer plus rapidement **[3]**.

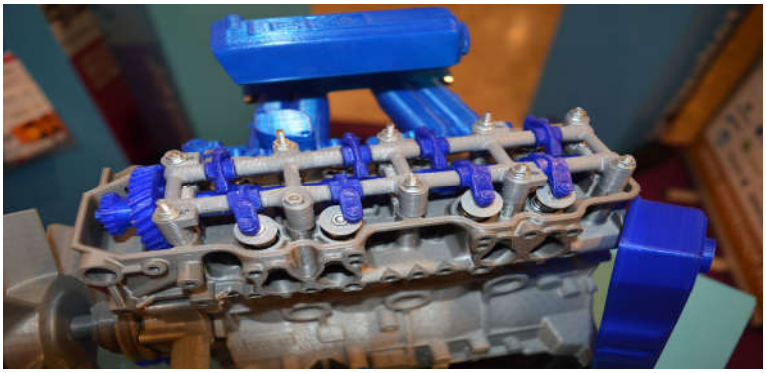

Figure I. 4 : Un moteur imprimé complètement en 3d. Source : Makershop.

I.2.4 Domaine alimentaire

Le domaine alimentaire aussi commence à s'intéresser de l'impression 3D surtout les grands chefs cuisinier et artistes en créant des sculptures en pate en chocolat ou même en sucre, même la NASA suit les évolutions de ces techniques d'impression 3D de prêt. En effet, une imprimante 3D (figure I.5) alimentaire représenterait un gain de place considérable lors de missions dans l'espace. Elle pourrait ainsi approvisionner les astronautes et des tests ont même été faits pour imprimer des pizzas **[2]**.

Figure I. 5 : Du chocolat imprimé. Source : Quoidansassiètte.fr.

I.2.5 Domaine d'architecture

L'imprimante 3D permet aux cabinets d'architecture, aux bureaux d'études ou studios de design d'avancer rapidement en créant des modèles résistants et complexes à partir de données CAO issues d'un logiciel d'architecture ou de design. Les modèles d'impression 3D sont lisses et donnent des maquettes détaillées dans une large gamme de matériaux dont les photopolymères, y compris ceux rigides prêts pour la peinture.

L'application de la fabrication additive dans ce domaine permet de réduire considérablement le temps et les dépenses de production des maquettes qui nécessitent souvent des détails très précis imprimées en 3D et qui sont également plus résistantes que les modèles traditionnels **[3]**.

Et dernièrement on assiste à une avancée dans le domaine de construction non seulement le prototypage, mais la construction a échelle réelle, ce qui donne une certaine liberté de design aux architectes vu la capacité de l'impression 3D (figure I.6) de construire des formes complexes sans avoir besoin ni de savoir-faire particulier ni de coffrages spéciaux.

Figure I. 6 : Une maison totalement imprimée en 3d. Source : Iconbuild.com.

I.3 Les applications de la technique d'impression 3d dans la construction

L'impression 3D appliquée à la construction a déjà été utilisée dans presque tous les domaines de la construction. Ci-dessous, quelques exemples emblématiques de réalisations en impression 3D.

I.3.1 Bâtiment

En 2004, le professeur Behrokh Khoshnevis de l'Université de la Caroline du Sud commence pour la première fois à imprimer en 3D un mur de béton (figure I.7). Véritable innovation dans le domaine de la construction, sa technologie, Contour Crafting, fait parler d'elle : elle permettrait de créer de manière automatisée une maison entière en 20 heures seulement ! Le professeur a en effet mis au point une imprimante 3D de type FDM, montée sur un bras robotisé qui, au lieu d'extruder du plastique, crée des couches de béton selon un modèle 3D. Et depuis, plusieurs acteurs se sont engagés dans le développement de la technique on site :

DFAB House :

Figure I. 7 : DFAB HOUSE, une maison imprimée avec des imprimantes 3D.

Localisation : Dübendorf, Suisse

Caractéristiques : 200 m²

Année de construction : 2019

Architecte : ETH Zurich et ses partenaires industriels

De quoi s'agit-il ? La DFAB HOUSE (figure I.7), est la première maison habitée au monde qui a été à la fois planifiée et construite à l'aide de technologies numériques. Inauguré en février 2019, ce projet a été réalisé par des chercheurs de l'ETH Zurich en collaboration avec des partenaires industriels, à l'aide de robots et d'imprimantes 3D de maison. Cette structure de 3 étages est perchée tout en haut de la plate-forme NEST. Sa création part d'une volonté de tester en conditions réelles les nouvelles technologies du secteur de la construction ou de

l'énergie, l'objectif final étant d'améliorer l'efficacité et la durabilité de la planification et de la construction de bâtiments à travers une approche numérique **[9]**.

Gaia, Le retour à la terre

Figure I. 8 : Gaia, la maison imprimée en 3D avec de la terre. Source : WASP.

Localisation : Italie.

Caractéristiques : 12 m².

Année de construction : 2018.

Architecte : Alberto Chiusoli, WASP.

De quoi s'agit-il ? Si WASP (figure I.8), entendait faire ses preuves, quoi de mieux que la construction de Gaia, une maison en chair et en os (façon de parler, évidemment) pour y parvenir ? Ce modèle imprimé en 3D applique la technologie Crane WASP, qui utilise des matériaux naturels directement prélevés sur place. Totalement en phase avec les principes du développement durable, ce projet exploite la terre crue et les déchets naturels issus de la chaîne de production rizicole dans le but d'obtenir un produit performant d'un point de vue bioclimatique : la méthode idéale pour bâtir des maisons à moindre coût. Précisons également que cette maison imprimée en 3D est construite de manière à se passer de chauffage ou de climatisation tout au long de l'année **[9]**.

Immeuble d'habitation en Chine (figure I.9)

Figure I. 9 : Immeuble d'habitation en Chine.

Localisation : province de Jiangsu, Chine.

Caractéristiques : 1 100 m².

Année de construction : 2014.

Architecte : Winsun.

De quoi s'agit-il ? Les murs et autres composants structurels de ce bâtiment ont été imprimés hors site, avant d'être transférés sur le site de construction pour assemblage. Pour ériger les murs, Winsun a recouru à son « encre » brevetée, composée de déchets de construction mélangés à un agent durcissant. Et le fabricant ne s'est pas contenté de réutiliser des déchets recyclables : le matériau fournit également une isolation haute performance et une grande solidité permettant à la maison imprimée en 3D de résister aux tremblements de terre. Selon Winsun, cette solution leur a permis d'économiser 60 % sur le coût des matériaux, 80 % sur la main d'œuvre, et 70 % sur la durée du chantier, comparé aux méthodes de construction conventionnelles.

Il convient tout de même de mentionner les graves allégations soulevées en 2015, selon lesquelles Winsun aurait violé les droits de propriété intellectuelle de Contour Crafting et simulé les résultats de leurs dix maisons imprimées en 3D **[9]**.

I.3.2 Travaux publics

Passerelle pour piéton à Madrid

Figure I. 10 : Passerelle pour piéton à Madrid.

Localisation : Madrid, Espagne.

Caractéristiques : 12 m de long.

Année de construction: 2017.

Architecte: Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC).

De quoi s'agit-il ? Bien que MX3D ait annoncé son intention d'imprimer un pont en 3D dès 2015, l'Institute of Advanced Architecture of Catalonia l'a devancé en achevant en premier son propre projet de passerelle (figure I.10). Celle-ci a été érigée par ACCIONA, entreprise

spécialisée dans le BTP et les énergies renouvelables, avec l'aide d'Enrico Dini, l'inventeur de la D-Shape.

La passerelle a été imprimée en béton micro-renforcé et mesure 12 mètres de long pour 1,75 m de large. Selon l'IAAC, ce projet est la culmination de 15 ans de recherche sur l'impression 3D à grande échelle appliquée au secteur de l'architecture. L'équipe a eu recours à une approche de design paramétrique pour éliminer au maximum les déchets de matériaux tout en renforçant la solidité de la passerelle **[9]**.

Passerelle à vélo :

Figure I. 11 : La première passerelle à vélo en Pays-Bas. Source : The Gardian.

Localisation : Pays-Bas

Caractéristiques : 3,5 m de large, 8 m de long

Année de construction : 2017

Architecte : université technique d'Eindhoven et BAM

De quoi s'agit-il ? L'université technique d'Eindhoven a créé un pont pour vélos imprimé en 3D en béton armé et précontraint (figure I.11). L'institut de formation a travaillé en partenariat avec l'entreprise de construction britannique BAM pour s'assurer que cette passerelle puisse accueillir les cyclistes en toute sécurité dans son milieu naturel, aux Pays-Bas. Elle a été imprimée en huit parties individuelles, avant d'être assemblée sur place grâce à un mortier de béton.

Le pont final mesure 3,5 mètres de large sur 8 mètres de long et relie deux routes de la ville de Gemert. À la différence des mélanges de béton traditionnels, le matériau utilisé pour ce projet possède des propriétés uniques : au lieu de se répandre sur tous les côtés, ce béton spécial garde sa forme une fois coulé. Ceci permet de gaspiller moins de matière, un vrai plus pour l'environnement **[9]**.

I.3.3 Hydraulique

Collecteur d'eaux pluviales par XtreeE

Figure I. 12 : Le collecteur d'eau pluviale réalisée à Lille en 2017.

Localisation : Lille, France.

Caractéristiques : 2.3 x 2.7 x 1.55

Année de construction : 2017.

Architect : XtreeE & Artelia.

De quoi s'agit-il ? Le négociant en matériaux Point.P TP, la startup XtreeE (impression 3D) et l'entreprise de réseaux Sade se sont associés pour concevoir et imprimer en 3D un déversoir d'orage en béton (figure I.12). Cet élément de 5 tonnes a pris forme en moins de 9 heures, avant d'être installé à La Madeleine, en banlieue de Lille.

Pour soutenir son développement, Point.P TP s'efforce de proposer de nouveaux produits et services à ses clients. L'enseigne a organisé un atelier de co-conception avec XtreeE, Sade et des maîtres d'œuvre pour essayer de préciser l'intérêt de l'impression 3D sur le marché des travaux publics. La fabrication d'un déversoir d'orage sur mesure a été retenue, un ouvrage de grandes dimensions (2.3 x 2.7 x 1.55) et aux formes complexes qui a été posé à La Madeleine pour le compte de la Métropole Européenne de Lille **[10]**.

I.3.4 Espace

Sfero : la maison bulle sur mars

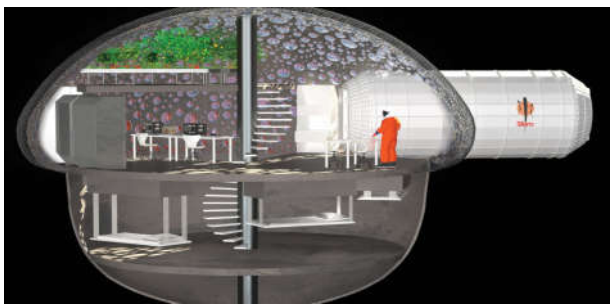

Figure I. 13 : Le concept que présente FABULOUS pour sa maison bulle.

L'entreprise française **Fabulous** spécialisée en impression 3D a conçu une maison- bulle d'aspect étrange.

Le procédé d'impression est original puisqu'il s'agit d'utiliser le sol martien comme matière première, ce qui rend la construction particulièrement durable.

La maison **Sfero**, tout en rondeurs, s'installerait dans le cratère de Gale (D'un diamètre de 154 km, ce cratère a été évalué comme favorable à la présence de traces de molécules organiques sur la planète Mars.). Elle comporte deux étages composés notamment d'un jardin intérieur, d'espaces de travail et de chambres reliées par un escalier en colimaçon **[11]**.

I.4 Paramètres influençant l'impression 3D en construction

I.4.1 Extrudabilité

Le processus d'extrusion est la capacité du béton à passer à travers une pompe à béton, un tuyau de transmission et la buse de pulvérisation sans que ses propriétés physiques ne soient modifiées. Une bonne extrudabilité est obtenue par l'application conjointe des principes du béton autocompactant et du béton projeté à la conception du mélange. Le béton doit avoir un débit régulier pour permettre à l'imprimante de couler en couches l'une sur l'autre. Si la structure comporte beaucoup de détails architecturaux, la vitesse d'impression doit être ajustée par conséquent, le système ne gaspille pas le matériel d'extrusion et la qualité du béton imprimé est sans défaut. L'accumulation excessive de béton pendant l'impression entraîne un mauvais revêtement de surface résultant d'un contrôle incorrect du système. La construction de couches de béton avec l'extrusion et les propriétés du béton frais en 3D est mentionnée dans de nombreuses études, mais Une méthode d'essai appropriée n'a pas été définie pour évaluer cette propriété concrète **[12]**.

I.4.2 La constructibilité

La constructibilité peut être définie comme la capacité de la couche de béton sous-jacente à durcir et porter les autres couches avant que la couche de béton suivante ne soit placée sur la couche imprimée. De cette façon, une plateforme est prévue pour la construction à chaque étage. Extrudabilité et constructibilité sont les caractéristiques les plus importantes du béton dans l'impression 3D. Les exigences de ces deux types d'impression sont liées à la maniabilité du béton, on a constaté que dans la production 3Dles sous-couches ne doivent pas se déformer sous le poids de la couche supérieure, mais les couches intermédiaires doivent adhérer et

doivent être bien connectés avec les couches supérieures pour pouvoir se former. Les facteurs qui affectent. Les possibilités de construction le sont : Les adjuvants chimiques, la température et l'utilisation de moins de ciment de gypse **[12]**.

I.4.3 L'ouvrabilité

La qualité de la structure imprimée finale est fortement influencée par les propriétés du béton frais après avoir été coulé, reste intact et avoir une maniabilité suffisante (peut être extrudé) et ne s'effondre pas sous une charge de couches successives. Les méthodes conventionnelles d'évaluation de l'exploitabilité comprennent les essais d'affaissement, de facteur de compression et de débit pour lesquels il existe diverses normes nationales. La maniabilité du béton imprimé en 3D est affectée par de petites modifications des conditions environnementales (température, humidité, humidité des matières premières, etc.). Pour augmenter la maniabilité du mélange de béton 3D l'agent modificateur de viscosité doit être ajouté et le mélange doit avoir une petite taille de particules pour s'adapter au diamètre de la buse. L'ajustement de la maniabilité du béton 3Dpour la pompabilité et l'extrudabilité est similaire à la production par voie humide du Béton projeté. Il est essentiel que des agents modificateurs de viscosité soient utilisés dans l'impression 3D du béton. En effet, ces agents modifient la rhéologie en ajoutant des propriétés thixotropiques au béton. Ainsi, la viscosité du béton diminue lorsque la force est appliquée, ce qui permet une mise en œuvre confortable **[12]**.

I.4.4 Temps ouvert

La période de temps ouverte est déterminée comme étant la période de temps pendant laquelle la maniabilité du béton frais pour le béton 3D est suffisante pour maintenir l'extrudabilité. Cela signifie que le temps ouvert est le temps pendant lequel le La pompabilité, l'imprimabilité et la constructibilité du béton 3D sont constantes dans des tolérances acceptables **[12]**.

I.4.5 Force de contact entre les couches

En plaçant le béton l'un sur l'autre, l'adhérence interfaciale doit être forte pour obtenir une structure solide. Par conséquent, le béton ne doit pas être dans un état durci mais au lieu d'hydrater le béton, la couche précédente doit continuer lorsque le béton est placé à la surface. En d'autres termes, le joint froid ne doit pas se produire. Pour s'en assurer, certains chercheurs ont souligné l'importance de la forme des couches. La forme des couches peut être modifiée par la variation des formes de la buse d'impression. Outre la taille et la forme des buses,

l'imprimante doit pivoter de 90 degrés autour des coins afin de donner aux coins une forme précise pour la structure. La polyvalence de l'imprimante à béton 3D est prise en considération et testé à de nombreuses reprises avant l'impression réelle **[12]**.

I.4.6 Agrégats

Les granulats jouent un rôle très important dans le processus de fabrication du béton 3D. Le type et la taille des granulats utilisés dans le mélange de béton ont un effet sur la capacité portante de la structure. La taille des buses varie entre 20 mm et 40 mm. En conséquence, la taille des granulats doit être supérieure à 4-6 mm afin d'éviter que la buse ne se bouche. L'utilisation d'agrégats grossiers entraîne une instabilité de la structure d'impression, ce qui provoque l'effondrement de la formation de la structure **[12]**.

I.4.7 Rapport eau-ciment

Le rapport eau-ciment a été expérimenté de 0,25 à 0,44 par divers chercheurs. L'utilisation d'une quantité minimale d'eau avec les superplastifiants est importante pour l'amélioration l'adhérence du béton. En outre, il a été déterminé que l'ajout de matériaux tels que la silice et les fumées pourraient être bénéfiques au mélange si elles sont ajoutées à raison de 5 à 30 % du volume total du liant **[12]**.

I.4.8 Paramètres d'impression

D'après Noura KHALIL dans sa thèse de doctorat intitulée « Formulation et caractérisation chimique et rhéologique des mortiers imprimables en 3D à base de mélanges de ciments portland et sulfoalumineux » **[13]** (13). Les filaments imprimés doivent satisfaire à un cahier des charges exigeant et très stricte. Ils doivent tout d'abord être suffisamment fluides pour pouvoir sortir à travers la buse de l'imprimante sans blocages. Ensuite, les couches déposées doivent conserver leurs formes au cours de l'impression et ne pas s'affaisser sous le poids des couches supérieures pour assurer la stabilité de la structure imprimée. Ces deux exigences doivent être satisfaites tout en conservant une résistance à la compression suffisante. La première condition, appelée « extrudabilité », conditionne la maniabilité initiale du matériau. La seconde condition, appelée « aptitude à la construction », est liée au temps d'ouvrabilité du matériau imprimé.

Une illustration de la relation entre le processus d'impression et le matériau est présentée dans le tableau I.2 qui suit **[14]**. Ce qui montre l'importance de certain paramètre telle que les

conditions environnementales et la continuité du malaxage en entrainant des changements dans système et puis ça affecte directement le processus d'impression.

Tableau I. 2: Conditions des mélanges imprimables et des procédés d'impression.

Conditions	Paramètres
L'âge du béton	-Mélange non continu entraînant une variation de l'âge du béton dans le système - Impression non continue influençant l'âge du filament à la sortie de la tête de buse - Stabilisation : impossible de retarder la prise par mélange continu
Température du mélange	-Conditions environnementales et température de démarrage du système -Friction dans le système -Conductivité thermique du système -réglage de la réaction elle-même (exothermique)
Densité du matériau imprimé	-Compaction -Pression -Vitesse linéaire de la buse
-Rapport eau/ciment	-réglage de la machine

D'après Wolfs **[15]**, la relation entre la forme à imprimer, le matériau cimentaire et les forces appliquées sur le produit imprimé n'est pas encore maîtrisée. La Figure I.14 suivante montre cette relation entre ces différents facteurs. L'impression alors n'a pas trouvée son droit chemin et elle est gérée de façon très empirique et itérative, en faisant des essais et des corrections successives pour converger vers des paramètres d'impression adéquats, la meilleure combinaison d'impression.

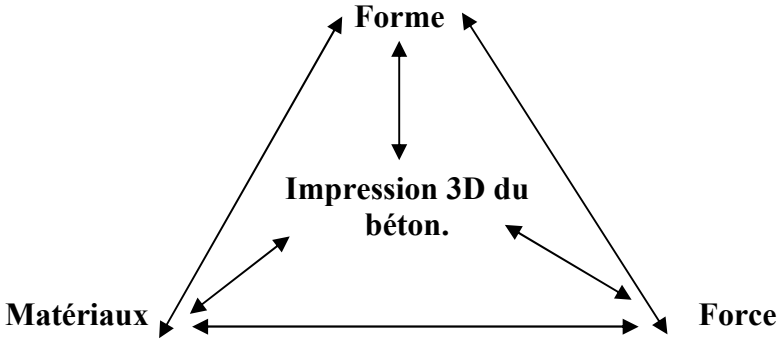

Figure I. 14 : Relation entre les paramètres de l'impression 3D.

I.4.9 Blocages lors de l'extrusion

La géométrie du cordon déposé dépend étroitement des dimensions de la buse utilisée. Toutefois, pour une buse particulière, les matériaux utilisés doivent être formulés de manière à éviter les blocages lors de l'extrusion.

Les granulats utilisés ont une dimension maximale de 2 mm, et l'imprimante 3D à une buse de 2 cm de diamètre, **[16]**. Une ouverture de buse de 40×10 mm à Eindhoven University of Technology **[14]**. Des mortiers de Dmax=2mm en utilisant une buse circulaire de 15mm de diamètre en Contour Crafting pour obtenir une épaisseur de couche de 13 mm **[17]**. L'utilisation de buses circulaires de diamètre compris entre 6 et 20 mm permet d'imprimer des couches d'épaisseur comprise entre 6 et 25mm **[18]**. Le et al. Ont utilisé un procédé d'impression contrôlé numériquement avec une buse de 9 mm (Dmax =2 mm) **[17]-[19]**.

I.4.10 Impression des couches

I.4.10.1 Stabilité

La stabilité des couches imprimées de l'élément est liée aux propriétés chimique et rhéologique du matériau lors de l'impression et au processus d'impression (notamment temps entre les couches imprimées). Les couches imprimées superposées dans le matériau cimentaire n'ont pas un état de durcissement similaire **[14]**. Par conséquent, l'aptitude à la construction dépend de l'âge de la couche qui affecte sa rigidité. Par exemple, le schéma de la (Figure I.15) montre l'âge de durcissement d'un plastique qui est identique tout au long de l'impression et celui des ciments qui varie en fonction du temps tout en imprimant.

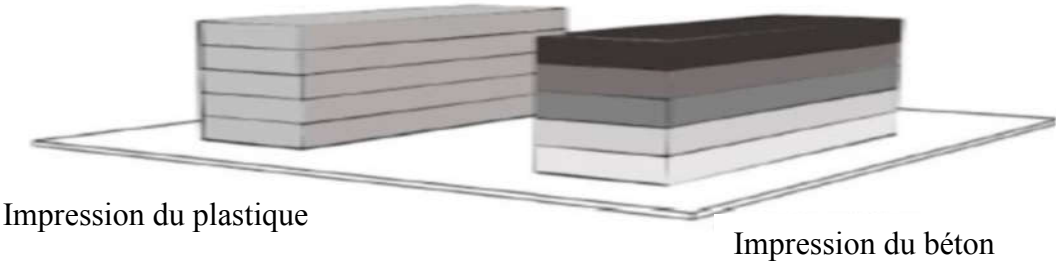

Figure I. 15 : Différence entre le type des matériaux imprimés (le plastique et le béton).

I.4.10.2 Liaisons entre couches

La liaison entre les couches et la maîtrise du traitement et du durcissement du matériau sont des paramètres importants pour la résistance finale du matériau imprimé **[20]**. Le dépôt de couches n'est pas toujours le même en se déplaçant d'une couche à l'autre. En fait, quatre méthodes différentes peuvent être utilisées (Figure I.16) en fonction du processus d'impression **[14]**.

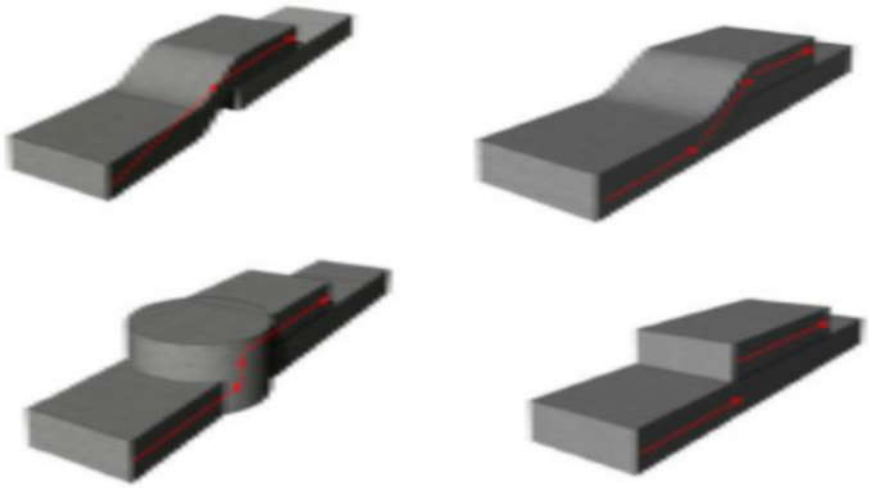

Figure I. 16 : Différentes modes de déposition des couches.

Dans la première méthode, la tête d'impression se déplace progressivement vers le haut à partir de la surface d'impression, le mouvement vers le haut étant uniformément réparti sur une majeure partie du plan de dépôt du filament. La deuxième méthode est similaire mais le déplacement vertical s'effectue sur une longueur beaucoup plus petite que la première. Cette stratégie est utilisée par Eindhoven University of Technology, puisqu'elle résulte en des couches ayant des zones de discontinuité relativement petites **[15]**. Dans la troisième méthode, le déplacement vertical s'effectue sans mouvement dans la direction horizontale et résulte ainsi en un dépôt de matériau supplémentaire dans cette zone. Enfin, un mécanisme d'interruption sophistiqué pourrait permettre l'impression d'une seule couche en arrêtant l'impression verticalement avant de poursuivre la couche suivante. Théoriquement, cela produirait les aspects les plus lisses **[14]**.

I.4.10.3 Compositions et propriétés des mortiers imprimables

Comme nous l'avons vu précédemment, l'impression 3D en construction se développe rapidement et de nombreuses réalisations ont déjà été fabriquées avec cette technologie dans le monde. Toutefois, il n'existe pas de normes pour la qualification des matériaux imprimés. L'un des obstacles à la mise en œuvre de l'impression 3D dans le domaine de la construction concerne ainsi le manque de spécifications pour les matériaux imprimés, comme discuté par Wu et al **[21]**.

Quelques exemples de matériaux testés en impression 3D, leurs compositions, leurs propriétés rhéologiques et mécaniques et les machines utilisées pour leurs impressions sont présentés dans le (Tableau I.3). Ce tableau montre que la plupart des mélanges sont réalisés à base de ciment portland. Les autres composants comme les cendres volantes, la fumée de silice, les accélérateurs, les retardateurs ou d'autres adjuvants sont utilisés pour régler le comportement rhéologique et la prise des matériaux à imprimer. Des études ont déterminé des intervalles du seuil de cisaillement et de viscosités pour lesquels l'extrudabilité des matériaux est favorisée. Par exemple, des seuils de cisaillement compris entre 0,27 et 0,7 KPa et des viscosités comprises entre 30 et 40 Pa.s sont mesurés pour un mortier de géopolymère développé par Panda et al **[22]**. Les matériaux et les machines utilisés ainsi que les diamètres de buses et les vitesses d'impression variables ont montré leur influence sur le diamètre du filament. Ainsi, le diamètre des couches imprimées peut être plus large que celui de la buse selon le débit d'extrusion. Les résistances à la compression sont affectées par la direction d'impression par rapport à la direction de la force appliquée. Ces valeurs varient entre 20 MPa et 56 MPa dans les exemples présents dans le (Tableau I.3).

Tableau I. 3 : Caractéristiques des matériaux utilisés en impression 3D dans la littérature.

Réf	Limite élastique (kpa)	Visco-sité (Pa.s)	Buse (mm)	Filam-ent (mm)	Vite-sse	Résista-nce à la compre-ssion	Matériaux	Machine
[22]	0.6-1	30-40	-	20x20, 30x15	80mm/s	25	Cendres volantes de classe F, Laitier de haut-fourneau granulé broyé, Réactif alcalin, Sable de rivière	Une pompe à vis à coulis et une imprimante à béton à portique à 4 axes
[23]	0.7-1.8	3.5-4.5	20	22-24	8000 mm/ min		Eau du robinet, type II 52,5 PC, nano argile, SF	Machine à imprimer le béton en 3D (châssis de 3,8 x 2,7 x 2,8 m) avec plate-forme mobile le long des axes Z et Y
[24]	-	-	-	2.5-5	1-5 cm/h	33-37	Matériau granulaire et fibres de diam= 0,1-4 mm, Liant d'encre	
[16]	-	-	20	-	18.76 cm/sec	40-56	Agrégats de Dmax= 2mm, ciment de type I, superplastifiant, accélérateur, retardateur	Plan triaxial (x-y-z) imprimante 3D
[25]	-	-	8	10	5-10 mm/s	25-43	Type 1 PC, CAC, cendres volantes, fumée de silice, sable de silice, farine de silice, fibre PVA, VMA, HRWR, TiO2, ANC	Manual : caulk gun
[26]	-	-	25 X 25	25	12 mm/sec	20	GP, OPC, sable de type 11(16/30) sable de type 2 (30/60), retardateur/agent modificateur de viscosité/rétenteur d'affaissement	custom-made 3D printer with 45-degree nozzle with rectangular opening
[27]	-	-	30 X 15	30	1 mm/sec	20-35	Cendres volantes, scories, activateur solide, sable fin (172microm en moyenne) et grossier (898microm en moyenne)	Imprimante 3D sur mesure avec buse à 45 degrés et ouverture rectangulaire

La formulation de ces mortiers est basée sur l'étude de l'effet des constituants sur les réactions d'hydratation et les comportements rhéologiques. L'augmentation du seuil de cisaillement (thixotropie) peut être contrôlée en modifiant la chimie du matériau développé.

I.5 Les imprimantes 3D du Béton

Il y a fondamentalement un choix à faire entre une imprimante à bras robotique et une imprimante de type portique comme les présentes les figures I.17 et I.18 suivantes.

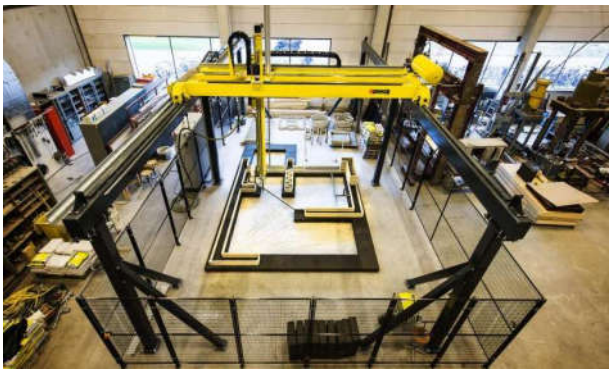

Figure I. 17 : Une imprimante de type portique.

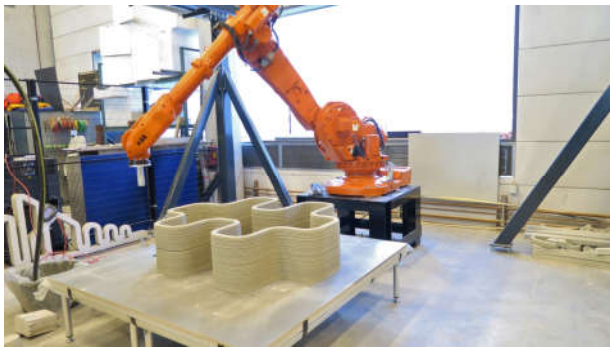

Figure I. 18 : Une imprimante 3D avec un bras robotisée.

D'une manière générale, les imprimantes robotisées ont l'avantage d'être plus mobiles que les imprimantes à portique et de pouvoir imprimer certaines impressions en raison du mouvement à 6 axes avec lequel les imprimantes à portique auraient des difficultés. Les imprimantes à portique, quant à elles, présentent généralement des avantages en termes de coût et de stabilité, offrent la possibilité de réaliser des impressions plus grandes et même d'imprimer des bâtiments entiers en une seule fois (par opposition aux impressions plus limitées des imprimantes robotiques et des imprimantes robotisées nécessaires pour imprimer des éléments uniques). Les imprimantes à portique permettent également une impression non continue, qui est nécessaire lors de l'impression de bâtiments entiers, sont beaucoup plus faciles à contrôler et ne nécessitent pas de programmeurs hautement qualifiés. En bref et peut-être un peu trop

simpliste : une imprimante robot est plus adaptée aux opérateurs « experts » (généralement le fournisseur de robots eux-mêmes) qui impriment des éléments uniques avec une complexité et des détails élevés, tandis que les imprimantes à portique conviennent mieux aux opérateurs plus ordinaires imprimant variété d'impressions et pour imprimer des structures beaucoup plus grandes, jusqu'à des bâtiments entiers. Dans ce qui suit, nous expliquerons plus en détail les caractéristiques et les problèmes **[28]**.

I.5.1 Zone imprimable

L'un des principaux inconvénients des imprimantes robotisées est la zone imprimable limitée qu'elles offrent, ce qui rend particulièrement difficile l'utilisation de ce type d'imprimante pour les tests et l'expérimentation. Les utilisateurs de l'imprimante robotisée sont pratiquement obligés de n'imprimer que des éléments et non des structures / bâtiments entiers. Pour les imprimantes robotisées, le robot lui-même est plutôt grand, le bras plutôt court et le robot a besoin de beaucoup d'espace libre autour de lui. Cela limitera considérablement la zone imprimable de chaque imprimante robotisée. Dans les images suivantes (figure I.19), ce point est illustré.

Les illustrations ci-dessous montrent le plus grand bras de robot que l'on puisse trouver, le bras de robot Fanuc M-2000i / A900L. La portée du bras est de 4683 mm. Le bras du robot peut atteindre une rotation de 330 degrés. Il en résulte une zone morte où le robot ne peut pas atteindre, ou en d'autres termes, le robot peut imprimer au maximum un morceau de « tarte » couvrant 330 degrés. Ainsi, lorsque vous utilisez une imprimante robotisée, vous ne pouvez pas imprimer à 360 degrés autour du robot, et en fait pour la plupart des impressions robotisées, le robot est situé devant la zone imprimée et n'imprime en fait qu'une « tarte » correspondant à environ 120 degrés maximum. Cela limite considérablement la zone imprimable des imprimantes robotisées. En comparant une telle zone imprimable de robots avec le chemin d'impression pour "The BOD", on peut voir ce qui suit: Si l'impression avec un robot à partir d'un emplacement fixe, même le plus grand bras de robot est à peine capable d'imprimer un bâtiment, la taille du BOD (peut imprimer les zones vertes mais ne peut pas imprimer les zones rouge / orange), et certainement pas beaucoup plus (le cercle jaune), mais le robot prend en plus tellement de place qu'il n'y a pas de place pour le robot à l'intérieur de l'impression elle-même, ce qui signifie que certaines parties de l'intérieur ne peuvent pas être imprimées (la zone orange). Les points ci-dessus sont illustrés plus en détail dans les images suivantes. Dans les images ci-dessous, le beignet jaune est la zone accessible / imprimable. Le

vert est la partie de la maison que le robot peut imprimer, la partie rouge est la partie de la maison que le robot ne peut pas imprimer **[28]**.

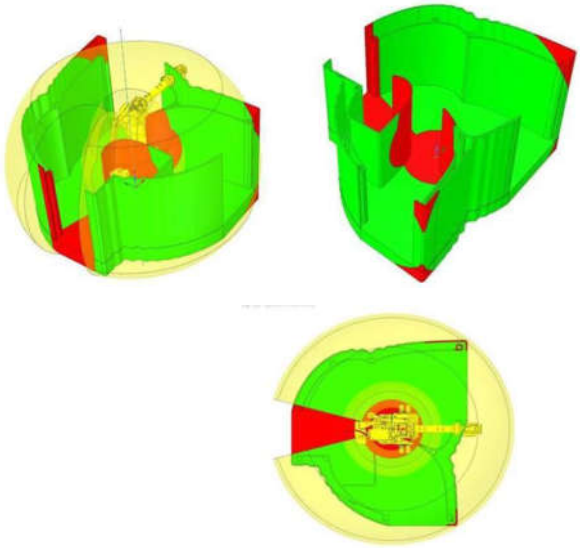

Figure I. 19 : Zone imprimable pour le plus grand bras de robot.

L'une des façons dont les fabricants d'imprimantes robotiques tentent de surmonter ce problème est de déplacer le robot de telle sorte qu'il imprime à partir de plusieurs points fixes ou en le rendant mobile. Cependant, cela pose également de nombreux problèmes, comme expliqué ci-dessous.

Impossibilité d'impression de structure entière

En combinaison avec le problème ci-dessus de la zone imprimable, un autre problème devient pertinent : avec les imprimantes de type robot, il est pratiquement impossible de construire des bâtiments entiers en une seule fois (en raison de la zone imprimable limitée), forçant un utilisateur à imprimer uniquement les structures de bâtiment qui peuvent être constitué de plusieurs éléments / sections réalisés par l'imprimeur et assemblés sur place.

L'imprimante peut imprimer les éléments hors site ou sur site. Hors site présente l'avantage de faire fonctionner l'imprimante dans un environnement plus contrôlé, mais nécessite le transport et l'assemblage des éléments imprimés sur place. Un tel transport ne peut être effectué avant que les éléments imprimés aient suffisamment durci pour pouvoir gérer le transport. Cela se produit généralement après plusieurs jours.

L'impression sur site des éléments en revanche supprime le besoin de transport, mais pas le besoin d'assemblage et de connexion des éléments. De plus, lors de l'impression d'éléments sur site, l'impression ne se produit pas dans une zone entièrement contrôlée comme ce serait le cas avec l'impression d'éléments hors site.

Même si l'imprimante en raison de pistes ou de roues est mobile, l'utilisation d'une imprimante robotique signifie généralement qu'il est nécessaire d'imprimer entièrement chaque élément, puis de déplacer l'imprimante pour imprimer l'élément suivant (et créer le besoin d'assemblage / de connexions) en raison de la mise en place du béton. Ainsi, un utilisateur ne peut généralement pas simplement imprimer une couche d'un premier élément (la zone accessible du robot à partir de sa première position fixe), déplacer l'imprimante pour imprimer la première couche d'un autre élément, puis revenir en arrière et imprimer davantage sur le premier élément, car la première couche de cet élément se serait complètement prise une fois de retour, la couche deux ne se liant probablement pas à la couche 1. Évidemment, pour surmonter ce problème, la recette du béton pourrait être ajustée pour permettre un temps de prise plus long, mais même cela ne supprime pas la nécessité de s'assurer que le robot retourne précisément au premier élément au bon moment, ce qui avec plusieurs mouvements de l'imprimante sera très difficile à chronométrer **[28]**.

Connexions solides des éléments nécessaires

L'impression d'éléments signifie également qu'il faut trouver des solutions pour la connexion des éléments. Des solutions qui peuvent être à la hauteur des codes du bâtiment concernant l'humidité, l'isolation, etc. Pas une tâche facile. De toute évidence, la connexion d'éléments est une tâche bien connue dans l'industrie du béton préfabriqué, mais les éléments en béton préfabriqué sont très différents des éléments imprimés en 3D. Lors de la fabrication d'éléments préfabriqués en béton, ceux-ci contiennent généralement déjà l'isolation et sont préparés pour les connexions et sont donc beaucoup plus appropriés pour les connexions **[28]**.

Impression de fichiers / programmation du robot à imprimer / logiciel

En plus des deux problèmes critiques ci-dessus, les éléments suivants doivent également être pris en compte : Un bras de robot est difficile à programmer, car les 6 degrés de liberté de l'imprimante ont tendance à se gêner les uns les autres, Pour utiliser un bras de robot, il faut vraiment un opérateur (programmeur de robot) préalablement formé à la manipulation (et à la programmation) du robot. Ainsi, alors qu'un robot « programmeur » serait préférable d'avoir lorsqu'un utilisateur applique une imprimante robotique, le strict minimum est un robot « opérateur » qui au moins peut faire une certaine programmation. Pour une situation multi-utilisateur, c'est vraiment un problème à considérer. De plus, comme l'ont mentionné d'autres entreprises impliquées dans l'impression robotisée, il n'est pas si facile de passer d'un fichier.

stl ordinaire (que n'importe quel programme de dessin d'architecture comme Autocad ou similaire peut créer) à un code de programme capable de contrôler l'imprimante robotique. En d'autres termes, pour passer des dessins d'architectes au « fichier d'impression » à nouveau, un programmeur est nécessaire et le programmeur doit programmer manuellement des parties des mouvements du robot. Il est difficile d'estimer le temps nécessaire, mais il faudrait généralement des heures de programmation. Même si les fournisseurs d'imprimantes robotiques ont développé leur propre logiciel pour les conversions de fichiers (à partir de. stl), de telles solutions logicielles ne signifient généralement pas que tous les problèmes ont été résolus et tout fichier d'architecte peut simplement être converti en fichier d'impression sans saisie manuelle pour chaque impression. Par conséquent, généralement même avec de telles solutions logicielles développées par le fournisseur d'imprimante robotique, une entrée manuelle en termes de programmation robotique est requise.

L'imprimante à portique BOD, quant à elle, utilise un logiciel d'imprimante 3D "normal" qui a été développé pendant 10 ans en tant que projets open source et dont le code source est disponible gratuitement afin que chacun soit libre de le modifier pour répondre à ses besoins **[28]**.

Le contrôle du flux de matériel / trémie permet une impression non continue

Enfin, il est à noter que l'impression avec une imprimante de type portique augmente la possibilité de contrôler le flux de matière en appliquant une trémie au-dessus de la tête d'impression. En raison du réservoir de matériaux dans la trémie, l'imprimante n'est pas obligée d'imprimer uniquement en continu, car la sortie de matériaux peut être arrêtée lorsque la tête d'impression se déplace sur des zones où aucune impression n'est censée se produire.

L'application d'une telle trémie n'est souvent pas possible lors de l'utilisation d'un bras de robot et lorsque les trémies sont appliquées aux imprimantes robotisées, la tête d'impression devient assez grande et « maladroite », ajoutant encore plus de défis lors de la préparation du chemin d'impression (comme la grande tête d'impression "heurtera" souvent les zones imprimées précédemment) **[28]**.

Les imprimantes portiques peuvent imprimer des bâtiments plus grands et plus petits

L'imprimante 3D de type Portique peut très bien imprimer des bâtiments plus grands ou même plus petits que ceux imprimés par un bras robotisé car on change de dimension du portique selon le besoin du bâtiment **[28]**.

Tableau I. 4 : Comparaison entre types d'imprimantes.

Les caractéristiques	Imprimante de type portique	Imprimante à bras robotisé
Surface de la zone imprimable	Oui	Non
Impression de structure entière	Oui	Non
Nécessité de connexion entre éléments	Oui	Non
Facilité de programmation et logiciel	Oui	Non
Contrôle de flux de matériel	Oui	Non
Possibilité d'imprimer différentes tailles de structure	Oui	Non
Possibilité d'imprimer d'objets complexe et avec haut détails	Oui	Oui
Mobilité	Non	Oui

Les imprimantes de type portique peuvent également imprimer des pièces architecturales complexes avec un haut détail.

Une imprimante de type portique peut être contrôlée avec précision dans les directions X, Y et Z et l'extrudeuse peut fonctionner à vitesse variable permettant des vitesses d'impression lentes et rapides (et même une pause lorsqu'une impression non continue est nécessaire). Pour des impressions plus fines avec un niveau de détail élevé, elles utilisent des buses plus petites et une hauteur de couche inférieure **[28]**.

Les imprimantes de type portique sont mobiles et peuvent être utilisées sur situ aussi bien hors site.

Ce type d'imprimante peut être déplacé. De toute évidence, il est plus difficile de déplacer une imprimante à portique qu'une imprimante robotisée, mais une fois déplacée elle sera fixée pour imprimer toute la construction à l'opposition de l'imprimante robotisée qui nécessite un déplacement à chaque fin d'impression d'élément **[28]**.

Conclusion

La technique d'impression 3D est une innovation technologique prometteuse, le défi technologique va toucher un ensemble d'aspect, de la machine elle-même et de sa technologie, ainsi que l'évolution des matériaux imprimables, seront dans le futur des axes prisés, permettant ainsi une vulgarisation et une large utilisation dans le secteur de la construction.

Chapitre II: Travaux de recherches sur la technique d'impression 3D

II.1. Caractérisation des mélanges cimentaires pour l'impression 3 D

La nécessité d'automatiser le processus de construction des infrastructures a été sans cesse motivée par le nombre d'accidents survenus sur les chantiers, la réduction du temps le temps de réalisation et les gaspillages de matériaux, forte intensité de main-d'œuvre. L'impression 3D additive pourrait révolutionner le domaine de la construction. Plusieurs avantages de l'impression 3D du béton comprennent une personnalisation plus large de la construction, une ambiance de travail plus sûre, une économie du temps et du coût de construction. Le défi majeur de l'impression du béton est d'identifier et de maintenir les caractéristiques des bétons à l'état frais adaptées à l'impression et à l'empilement des couches.

Dans ce sens les auteurs Karthick Manikandan et alla en 2020, étudient l'effet de la composition de 6 mélanges avec un rapport E/C = 0.3 (fixe), de ciment avec de la fumée de silice et un superplastifiant ont été caractérisés pour leur imprimabilité sur leurs propriétés rhéologiques.

Les mélanges étudiés sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau II. 1: Composition des mélanges étudiés **[29]**.

E/C	Ciment (g)	Fumée dé silice (g)	Superplastifiant (g)	Eau(g)
0.3	95	5	1.5	28.5
	97.5	2.5	1.5	29.25
	100	0	1.5	30
	95	5	2.5	28.5
	97.5	2.5	2.5	29.25
	100	0	2.5	30

Les propriétés rhéologiques de l'ensemble des mélanges ont été étudiées.

Une procédure de préparation des mélanges a été suivie pour la préparation des échantillons, dont plusieurs facteurs ont été pris en considération tels que le mélange des additifs, la proportion et temps de malaxage), qui affectaient les propriétés rhéologiques. Premièrement, les additifs solides (fumées de ciment et de silice) ont été mélangées à sec pendant 3 min, puis mélange avec 50% (proportion p / p) d'eau et de superplastifiant (SP) pendant 5 min à vitesse d'agitation constante. Tous les échantillons ont été mélangés à la main. C'est avec la même procédure que les échantillons ont été préparés pour l'impression. Tous les six échantillons ont été testés au rhéomètre et laissé au repos pendant 120 s de sorte qu'ils retrouvent l'état initial perdues lors du malaxage. Les paramètres suivants ont été placés dans le rhéomètre pour obtenir les rhéogrammes : 1) Vitesse de déformation : 0,1 à 100 s1 ; 2) Chargement (0,1 à 100 s) et déchargement (100 à 0,1 s 1) temps : 5 min chacun ; 3) Temps d'attente entre le chargement et déchargement : 1 min ; 3) Géométrie : plaques parallèles Ø 40 mm ; et 4).

Taille de l'espace : 1200 mm. Le chargement et le déchargement ont été effectués trois fois sur des échantillons à l'état frais pour les six mélanges afin d'assurer la répétabilité des données expérimentales.

Le tableau suivant présente les résultats après impression avec les différents mélanges, aussi des discussions des auteurs **[29]**.

Tableau II. 2: Résultats des caractéristiques rhéologiques **[29]**.

Mélanges	95C 5FS 1.5SP	95C 5FS 2.5SP	97.5C 2.5FS 1.5SP	97.5C 2.5FS 2.5SP	100C 0FS 1.5SP	100C 0FS 2.5SP
Limité d'élasticité (Pa)	28.63	27.83	39.01	41.19	11.57	2.24
Zone de boucle thixotrope	85.99	534.9	2874.4	541.24	230.1	583.32
Viscosité de Bingham (Pa/s)	0.63	0.66	1.98	1.1	1.91	2.23

Mélanges	Forme après impression	Remarques et discussions
95C-5FS-1.5SP		A la plus faible proportion de fumée de silice, le mélange est hautement cohésif, à un taux de restructuration plus lent, le mélange durcit lentement et conserve la viscosité souhaitée pour l'impression pendant une longue période, avec une limite d'élasticité élevée, lors de l'impression une élimination des couches en dessous affectant ainsi les hauteurs des couches.
95C-5FS-2.5SP		En raison de leur teneur plus élevée en SP, ils sont moins visqueux que les autres mélanges, avec un taux de restructuration légèrement plus élevé et ne conservent pas la viscosité durant l'impression pendant une longue période, car le précédent durcit plus rapidement dans l'extrudeuse en raison d'une capacité de restructuration plus élevée.
97.5C-2.5FS-1.5SP		Ce mélange contient la fumée de silice et le SP appropriés pour l'impression et la cohésion des couches. Comme le montre l'évaluation rhéologique, ils possèdent une viscosité et une limite d'élasticité similaires à celles du premier mélange. Ils retrouvent lentement la limite d'élasticité et, par conséquent, lors de l'impression, ils n'affectent pas les couches inférieures.
97.5C-2.5FS-2.5SP		Ce mélange est moins visqueux avec une restructuration plus élevée en raison d'une teneur plus élevée en SP, ils ne conservent pas la viscosité souhaitée pour l'impression pendant une longue période car ils durcissent plus rapidement. Puisqu'elles retrouvent leur limite d'élasticité avec l'augmentation du temps, la couche durcie.
100C-0FS-1.5SP		Sans fumée de silice, c'est le plus faible de tous les six mélanges, ils ont une thixotropie plus élevée et sont moins cohésifs. Comme ils ont besoin de plus de temps pour regagner la limite d'élasticité, ils sont si faibles et ne possèdent pas assez de résistance pour maintenir la couche.
100C-0FS-2.5SP		Comme le montre l'évaluation rhéologique, à des taux plus élevés (pendant l'extrusion), ils deviennent moins visqueux, mais ils ont le taux de restructuration le plus élevé de tous les six mélanges. Comme ils sont moins visqueux, ils conviennent pour une impression instantanée.

Dans cette étude, des mélanges de béton frais ont été imprimés en 3D et ont été caractérisés en fonction de leurs propriétés rhéologiques. Les additifs, la fumée de silice et la SP ont amélioré la limite d'élasticité et maintenu la viscosité souhaitée du mélange de béton pour l'impression 3D pendant une longue durée, mais la proportion du mélange affectait l'imprimabilité **[29]**.

Un mélange avec une limite d'élasticité plus élevée bien que souhaité pour plus de résistance, ils n'étaient pas adaptés à l'impression 3D car les couches ne s'empilent pas et s'effondrent pendant l'impression. D'autre part, un mélange avec une viscosité plus élevée durcirait plus rapidement et ne pourrait pas être extrudé. D'où une proportion appropriée d'additifs adaptée pour l'impression et l'empilement des couches a été identifié. La thixotropie des mélanges de béton a été utilisée pour prédire l'imprimabilité du mélange car la surface de la boucle dicte la viscosité, la limite d'élasticité, et la capacité de structuration des mélanges **[29]**.

Dans les perspectives proposées par les auteurs, ils proposent de d'axer les travaux sur la possibilité d'avoir les formes stables et la vérification des paramètres d'impression tels que la vitesse d'impression, géométries de buses et autres additifs **[29]**.

II.2. Discussion et critique

Le travail présenter est très intéressant et ouvre des voies de développement de la technique d'impression trois D des bétons, notamment ceux en relation avec le matériau utilisé avec des additifs comme la fumée de silice, qu'améliore les propriétés à l'état frais, aussi l'aspect durabilité du béton, car la fumée de silice est connue pour ses propriétés pouzzolanique, et les perspectives dégagées en relation avec les paramètres d'impression.

Néanmoins, l'effet d'échelle n'est pas pris en compte par les auteurs, qu'est un élément important pour la reproduction des structures à l'échelle réel, afin de permettre une concrétisation dans les chantiers même sur des maisons individuelles.

Aussi, l'étude des propriétés mécaniques à l'état durci est primordiale, afin de pouvoir juger sur les limites en termes de résistances mécaniques en compression des bétons issus de l'impression.

En fin, l'aspect règlementaire, que ce soit pour les techniques d'essais à l'état frais ou durci des bétons issus de l'impression ne sont pas encore connues, qui va poser un problème lors de la réalisation ou le suivi sur chantier.

II.3. Le développement de l'imprimante

Comme mentionné précédemment dans le premier chapitre, les imprimantes les plus utilisées sont soit de type portique, soit une imprimante dotée d'un bras robotisé. Chaque type a des

avantages et des inconvénients, cependant, le type à portique a été choisi dans cette étude, car il est relativement simple et peu coûteux à construire, polyvalent et le type le plus courant dans le domaine de la recherche. La conception conceptuelle, mécanique et électrique a débuté en 2017 au niveau de la Stellenbosch University, Sud Afrique. L'imprimante 3D de type portique de qualité industrielle, à l'échelle de laboratoire, avec des dimensions extérieures de 1,3 x 1,3 x 1,67 m et un volume de construction d'environ 1 m^3 a été construite en 7 mois de travail.

Une unité de microcontrôleur (MCU), le cœur de l'imprimante 3D, contrôle les signaux d'entrée / sortie (E / S) et est alimentée par un bloc d'alimentation (PSU) 12 V pour accueillir d'autres fonctionnalités électroniques telles que les ventilateurs et l'éclairage. Le code G généré par le logiciel selon le modèle 3D est interprété par le MCU et communique avec les moteurs pas à pas pour produire le mouvement de buse requis.

L'imprimante à portique permet trois degrés de liberté de translation (DOF), avec l'option d'extension future au DOF de rotation pour permettre des détails géométriques complexes avec une forme et une taille de buse alternatives. Actuellement, une buse de 25 mm de diamètre est utilisée pour imprimer une coupe transversale uniforme autour des coudes en l'absence de DOF de rotation. Les mouvements du système de portique dans le plan horizontal (direction x et y) et dans le sens vertical sont autorisés par les systèmes de guidage linéaire et de rail montés.

Dans le plan horizontal, un système de courroie et de poulie entraîné par des moteurs pas à pas sélectionnés est utilisé pour chaque axe, tandis que les vis à billes sont le mécanisme choisi pour le mouvement vertical du portique dans lequel l'entraînement arrière peut être empêché en cas de perte de puissance. La plate-forme d'impression 3D illustrée à la Fig. 2 est un chariot stabilisé avec 12 roues en polyuréthane d'une capacité ultime de 700 kg chacune. Le chariot facilite le retrait et le transport de l'objet imprimé du cadre du portique. Le cadre du portique est associé à une pompe à béton triphasée 380V, 3kW fabriquée localement (Rockcrete TSL), achetée à l'origine pour la recherche sur l'application par projection de béton de fibres, également connu sous le nom de béton projeté, avec une taille d'agrégat maximale de 4 mm.

Un variateur de fréquence (VFD) a été complété pour le contrôle de la vitesse du moteur de la pompe, qui est également manipulé par le MCU. Cela permet de contrôler la vitesse de

pompage du béton, nécessaire par exemple lorsque des coudes de petit rayon sont imprimés et qu'un dépôt excessif peut entraîner une épaisseur de filament incohérente ou un renflement.
Le microcontrôleur basé sur le micro logiciel Marlin est associé à deux packages logiciels basés sur le code G dans le PC de l'opérateur, à savoir «Slic3r» et «Simplify3D». Les deux packages offrent diverses options de personnalisation pour différents types d'imprimantes et de matériaux. En particulier, l'impression en mode vase, imprimant en spirale vers le haut au lieu d'imprimer chaque niveau de couches, est fonctionnelle dans les deux logiciels. L'option permet de gagner du temps et améliore la qualité d'impression de certains objets tels que les colonnes circulaires.

L'imprimante 3D béton permet à l'équipe de recherche de produire des éléments structurels à l'échelle du laboratoire (murs, poutres, colonnes, etc.) pour tests, dans le but de contribuer à la recherche fondamentale pour l'industrie 3DPC.

L'imprimante est conforme aux critères de conception structurelle de résistance et de rigidité, afin de permettre l'impression de béton à grand volume et la vitesse de la tête de buse sans vibrations excessives.

II.3.1. Caractéristiques du matériel pour le béton imprimable en 3D

II.3.1.1. Rhéologie

Malgré les techniques de fabrication additive diverses et sophistiquées mises au point, le dépôt et la formation des matériaux sont principalement traités thermiquement. Par conséquent, les techniques de chauffage et de refroidissement sont des caractéristiques vitales du processus d'impression. Cependant, le dépôt d'impression 3D conventionnel et la formation traitée thermiquement, tels que les métaux ou les plastiques, ne sont pas essentiels pour le béton, bien qu'un chauffage à 60 - 70 ^{O}C puisse être utilisé pour une prise et un développement de résistance plus rapides. Notez qu'aucune activation thermique n'a été utilisée dans les résultats de recherche 3DPC rapportés ici.

Au lieu de cela, le béton nécessite une rhéologie modifiée grâce à une conception de mélange optimisée, des adjuvants et d'autres ajouts, y compris des nanomatériaux **[30],[31]** et fibres **[32]** pour être adapté à l'impression 3D en termes de transport (pompabilité) et de construction, ou d'extrudabilité et de rétention de forme sous poids propre et couches supérieures déposées ultérieurement.

La fabrication additive étant sans coffrage, le matériau fraîchement extrudé doit avoir une rétention de forme appropriée et développer rapidement une résistance et une rigidité suffisante pour supporter les couches suivantes. Par conséquent, le béton traditionnel conçu pour être coulé dans un coffrage ne peut pas être utilisé directement. Le béton peut être conçu pour être rigide, ou très visqueux, sous forme de béton dit à affaissement nul / pseudo-solide, par modification des constituants et de leurs proportions pour conserver la forme extrudée sans déformation significative. La rétention de forme est l'un des principaux facteurs influençant la qualité de la couche extrudée. En revanche, le matériau doit avoir une faible viscosité au transport pendant le pompage, ce qui minimise la probabilité de ségrégation des ingrédients sous une pression de pompage élevée dans la plage de 1 à 4 MPa **[33].** La ségrégation peut entraîner un blocage ou une mauvaise dispersion et des propriétés mécaniques et de durabilités inférieures associées du produit extrudé. La vitesse d'impression, le chemin, la taille et la forme d'un objet imprimé influencent également la qualité d'impression, mais les caractéristiques rhéologiques distinctes du matériau influenceront notablement la capacité de construction et la pompabilité.

La rhéologie est la branche de la physique qui étudie les phénomènes de déformation et d'écoulement de la matière. Et comme on le sait tous, l'écoulement du matériau démarre lorsque la contrainte de cisaillement appliquée dépasse la limite d'élasticité statique du matériau. Une fois que le matériau commence à s'écouler, la contrainte de cisaillement mesurée atteint un plateau de quasi-équilibre, défini comme la contrainte de cisaillement dynamique. Une différence distincte entre la limite élastique statique et dynamique du matériau est requise pour 3DPC et est définie comme un comportement thixotrope [(*)] sous l'effet d'une contrainte constante. Les fluides thixotropes sous forme de dispersions forment un système intermoléculaire de forces au repos, qui se traduit par une floculation des particules qui augmente la viscosité du fluide, lui permettant de supporter son propre poids **[34].** L'écoulement se déclenche lorsque les structures intermoléculaires sont rompues par l'énergie externe par agitation, ce qui entraîne une rhéofluidification [(**)] du matériau.

[(*)] Un fluide thixotrope est capable de passer de l'état liquide à l'état solide.

[(**)]La rhéofluidification désigne le fait, pour un fluide, de « devenir plus fluide » lorsque la vitesse d'écoulement augmente. Plus précisément, cela désigne le fait que la viscosité dynamique diminue lorsque le taux de cisaillement augmente.

Cette phase est appelée défloculation, ce qui réduit la viscosité du matériau. Une fois l'énergie externe éliminée, le matériau thixotrope commence à refloculer et retrouve un comportement pseudo-solide lorsque la microstructure d'origine est reconstruite et la viscosité d'origine est restaurée. Ce comportement thixotrope triphasé est illustré sur la figure II.1.

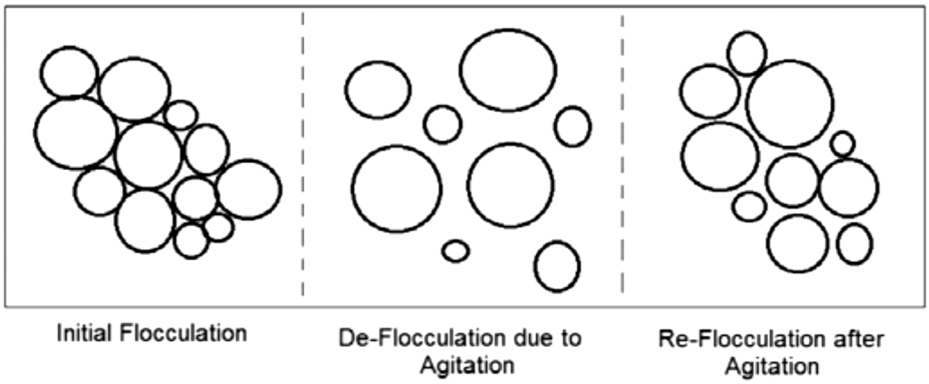

Figure II. 1 : Les phases de décomposition et de formation de matières thixotropes.

Chaque phase illustrée dans la figure peut être étroitement associée aux échelles de temps suivantes :

1- Floculation : du béton est placé dans la trémie de la pompe.

2- Défloculation : le matériau est agité par une pale rotative ou une vis sans fin et pompé à travers le tuyau.

3- Refloculation : le matériau est extrudé et déposé sur le lit d'impression ou une couche précédente.

Le comportement thixotrope est déterminé par plusieurs facteurs, notamment la teneur en eau, la température, les adjuvants chimiques, les diluants de ciment, le classement des agrégats et le taux d'hydratation. Le taux de restauration entre la limite élastique statique et dynamique peut être considéré comme le degré de thixotropie. Un degré plus élevé de thixotropie est souhaité pour les applications d'impression 3D dans le béton. Le degré de thixotropie peut être caractérisé par la mesure de la contrainte de cisaillement du béton frais avec un rhéomètre. Les contraintes d'élasticité statiques et dynamiques initiales mesurées sont de 1860,4 Pa et de 1474,4 Pa selon la figure II.2.

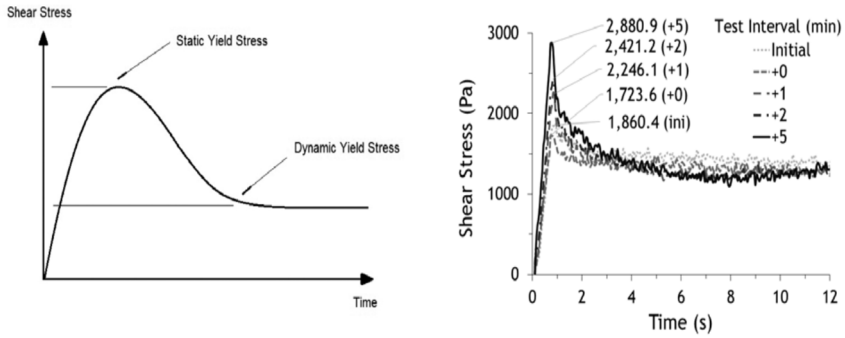

Figure II. 2 : Résultat du test rhéologique de croissance des contraintes.

Le résultat du test montre en outre une restauration rapide et une accumulation de la limite d'élasticité statique en une courte période de moins d'une minute. Notez que le retour de la buse de l'imprimante 3D pour déposer une couche supérieure varie en fonction de la vitesse de la buse et de la géométrie et de la taille de l'élément structurel imprimé. Les périodes de retour typiques peuvent être de plusieurs minutes. Pour un test en laboratoire d'impression 3D d'une colonne creuse circulaire de 400 mm de diamètre, la période de retour est de 21 secondes avec une vitesse de tête d'impression de 60 mm / s. Le taux de reconstruction de la limite élastique de cisaillement statique du matériau est utilisé pour concevoir un processus d'impression 3D du béton, afin d'éviter l'instabilité et l'effondrement de l'objet imprimé non pris en charge, compte tenu de la géométrie et des paramètres d'impression **[35].** La figure 4 présente une évolution temporelle bilinéaire de la contrainte de cisaillement statique, collectant les valeurs de contrainte de cisaillement de pointe de la figure II.3, et plus à des périodes d'attente plus longues jusqu'à la prise initiale du béton. Le graphique de la figure 4 sert d'outil de conception 3DPC pour la résistance en fonction du temps, qui doit dépasser la demande, généralement le poids des couches supérieures à mesure que l'impression 3D progresse. Le gradient initial de la résistance au cisaillement statique l'évolution est représentée par R_{Thix}, se référant à la reconstruction rapide par refloculation. Le deuxième gradient est représenté A_{Thix}, qui se réfère à un taux de renforcement plus faible, induit un processus de structuration après refloculation (Fig.II.3).

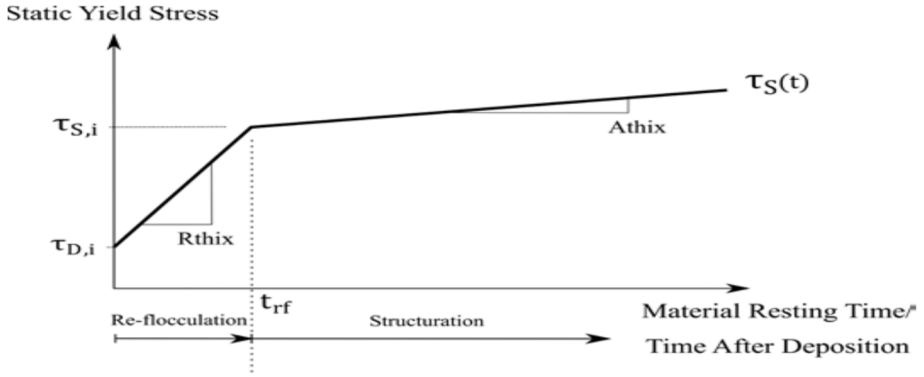

Figure II. 3 : Résistance au cisaillement statique en fonction du temps **[36].**

Le mélange imprimable en 3D a été conçu principalement sur la base des performances rhéologiques du matériau. De la littérature **[37], [38],** la conception de mélange optimale a été développée avec des constituants disponibles localement en Afrique de Sud, y compris le ciment CEM II / A 52,5N, les cendres volantes de classe S, la fumée de silice (fournie par les fonderies de silicium) et le sable de Malmesbury naturel avec un module de finesse de 2,12. La conception finale du mix, avec Le rapport eau / ciment de 0,45 est présenté dans le tableau 1. À noter que les fibres de polypropylène (PP) sont incluses dans le mélange. La teneur en volume et la rigidité relativement faibles des fibres de polypropylène incorporées ici contrôlent la fissuration par retrait plastique et réduisent la fragilité du produit imprimé **[32].**

Figure II. 4 : Installation de mesure directe de viscosité par rhéomètre**.**

Tableau II. 3: Conception de mélange d'un mortier imprimable en 3D.

Constituant	**Masse [kg]**
Ciment	579
Cendres volantes	165
Fumée de silice	83
Le sable	1167
L'eau	261
Superplastifiant	1.48% le de masse de ciment
Agent modifiant la viscosité	0.13% de la masse de ciment

La théorie de Fuller Thompson **[39],** qui vise à atteindre une densité de tassement maximale, est utilisée comme objectif optimal de classement des agrégats. Le taux de cisaillement de la pâte de ciment est inversement proportionnel à la fraction de garnissage des granulats granulaires **[40]** dans lequel le taux de cisaillement est déterminé par l'état de floculation. On s'attend à ce que le tassement maximal et les vides minimaux donnent des taux de cisaillement inférieurs et un état de floculation plus élevé. Une étude récente de Weng et al. **[36]** confirme que la théorie de Fuller Thompson peut servir d'approche de conception rhéologique

raisonnable pour 3DPC. Un sable naturel disponible dans le Cap occidental est sélectionné pour être utilisé dans le mélange 3DPC présenté ici. Il est possible d'obtenir une courbe de gradation Fuller-Thompson par tamisage et remélange, ce qui est généralement un processus coûteux. Compte tenu de la concordance raisonnable avec la courbe idéale représentée sur la figure II-3, et du coût associé de recalage, le sable naturel est accepté. Notez que la figure II.5 montre le classement combiné du liant et des particules de sable.

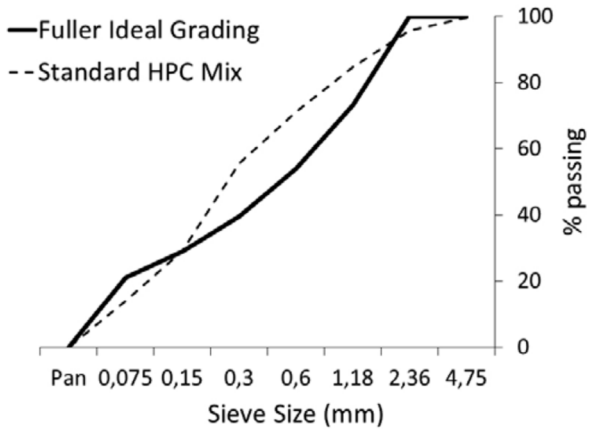

Figure II. 5 : Distribution granulométrique du liant et du sable combinés.

II.3.1.2. Propriétés mécaniques

La rhéologie à l'état frais détermine la qualité d'impression 3D, mais la robustesse mécanique à l'état durci est également cruciale. La résistance à la compression, f_{cu} détermine la classe d'application structurelle particulière et est classiquement utilisé comme paramètre de contrôle qualité de béton. Il est souvent lié à plusieurs autres propriétés mécaniques de béton, comme le module de Young 'E' et la capacité de flexion, $f_{fléchir}$ du béton par corrélation, ce qui en fait une propriété importante du matériau.

Le béton gagne en résistance par cristallisation et structuration à l'intérieur de la masse de béton au fil du temps, grâce au processus d'hydratation. Le béton à haute résistance est défini par l'American Concrete Institute (L'institut Américain du Béton) comme un béton ayant une résistance à la compression de 28 jours d'au moins 55 MPa **[41].** Le tableau II.4 résume les résistances à la compression et à la flexion, ainsi que le module de Young du béton utilisé ici pour 3DPC.

Tableau II. 4: Caractéristiques mécaniques du mortier imprimable 3D.

Âge	**F_{fl} (MPa)**	**F_{cu} (MPa)**	**E (GPa)**	**IBS (MPa)**
Un jour	1.7(0.081)	7.9(0.026)	-	-
7 jours	7.3(0.05)	55.6(0.006)	26.6(0.023)	-
28 jours	8.4(0.057)	70.6(0.103)	30.8(0.02)	6.8(0.021)
56 jours	8.7(0.02)	80(0.151)	-	-

Notez que la préparation et les tests standards des échantillons ont été effectués conformément à la norme EN 196-1 pour les tests de flexion en quatre points et ASTM C469-02 pour le module de Young. Des échantillons de flexion de taille (40 x 40 x 160) mm et des échantillons de module de Young de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur ont été coulés dans des moules réguliers, protégés et décapés après 1 jour, et durcis à l'eau à 23 ± 2 °C jusqu'à l'âge du test. Cependant, le procédé 3DPC peut altérer la microstructure du matériau et donc également les propriétés mécaniques. De plus, sans la protection des moisissures, un séchage plus précoce peut se produire. De plus, l'interface entre les couches peut modifier considérablement le comportement mécanique. Dans une large mesure, une forte liaison inter faciale peut contrer ces changements, en des couches de liaison appropriées pour répondre comme un continuum. Pour vérifier la liaison inter faciale, des tests de flexion ont été effectués sur des éprouvettes de poutre d'environ (40 x 40 x 160) mm découpées dans une structure imprimée en 3D, comme l'illustre la figure II.6.

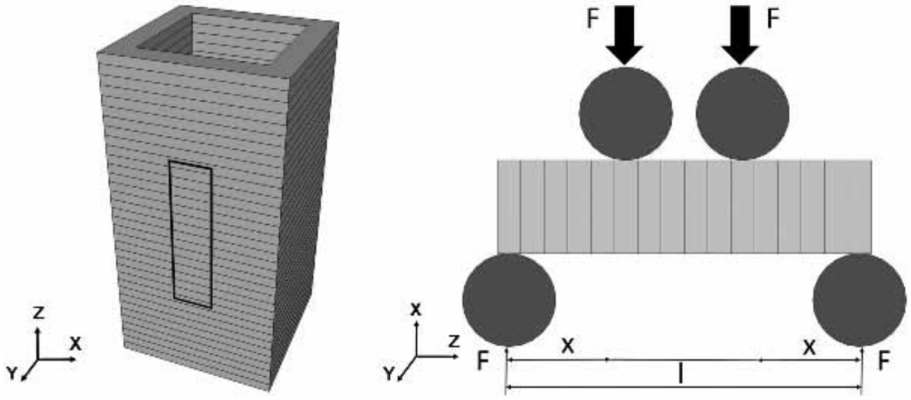

Figure II. 6 : Force d'adhérence entre les couches.

Les tests de flexion ont été effectués dans une machine d'essai de matériaux Zwick Z250 (MTM) avec une longueur de portée (l) de 150 mm, et chargé aux troisièmes points (x = 50 mm). Tous les échantillons ont échoué à une interface dans la zone de moment de flexion uniforme (entre les points de charge). À partir de la charge ultime, la résistance maximale à la flexion a été calculée en considérant le comportement élastique linéaire, c'est-à-dire que le module de rupture a été calculé. Ces résistances à la flexion sont désignées comme la force de liaison inter faciale (flexion) (IBS) dans le tableau 2, et déterminées à 28 jours seulement sur trois échantillons.

La résistance à la flexion inter faciale inférieure de 19 % (IBS) de 6,8 MPa, par rapport à la résistance à la flexion de l'échantillon coulé de 8,4 MPa, pourrait être attribuée à la fois au régime de durcissement et aux caractéristiques de liaison inter faciale. Notez qu'il y a eu un

court laps de temps inférieur à une minute entre l'impression de couches successives dans la colonne 3DPC. Le lien inter facial fait l'objet de recherches continues par les auteurs. Pour étudier le potentiel de retrait plastique et de fissuration des structures 3DPC, en raison du manque de protection contre les moisissures, des tests de retrait plastique ont été récemment réalisés et rapportés par les auteurs **[32].** Pour le mélange particulier présenté ici, aucune fissure de retrait plastique ne s'est produite, même dans des conditions climatiques extrêmes de vent de 20 km / h, température de l'air de 40 °C et humidité relative de 10 %.

II.3.1.3. Procédure d'impression en béton 3d et évolution du produit

Calibrage de l'imprimante

Étant donné que le matériau du béton est nouveau pour l'impression 3D, aucun des logiciels d'impression 3D disponibles dans le commerce n'a de valeurs prédéfinies de matériau pour le béton. Par conséquent, la détermination des paramètres d'impression primaires, tels que la vitesse d'extrusion, la vitesse de la tête d'impression et la hauteur de couche, était nécessaire avant d'imprimer un objet. Les paramètres fixes sont indiqués dans le tableau II.5.

Tableau II. 5: Paramètres d'impression fixes basés sur les spécifications de l'imprimante.

Diamètre de la buse	25 mm
Diamètre du filament	25 mm
Largeur d'extrusion	25 à 30 mm
Construire du volume	990 x 860 x 980 mm (X, Y et Z)

Comme cité avant dans la partie précédente que le béton fraîchement mélangé a une certaine rigidité et une certaine fluidité en fonction des constituants. Puisque la rhéologie du matériau ne peut pas être modifiée simplement sans changer les propriétés mécaniques, la rigidité et la fluidité du matériau doivent être caractérisées ou étudiées à l'avance pour être acceptables pour l'impression, tout en atteignant également des propriétés mécaniques appropriées à l'état durci. Ainsi, la vitesse de la tête d'impression n'est considérée que comme un paramètre variable pour déterminer la vitesse d'extrusion optimale. La vitesse d'impression a été testée dans une plage de 50 à 100 mm / s sur la base de l'étude précédente de Nerella et al. **[37].** Le test normalisé d'imprimabilité du matériau n'ayant pas encore été développé, la détermination du paramètre a été jugée par les auteurs. Pour chaque vitesse d'impression, la vitesse d'extrusion doit être calibrée jusqu'à ce que la largeur de la couche extrudée ne dépasse pas le diamètre de la buse de 5 mm, soit une largeur de couche comprise entre 25 et 30 mm.

La composante structurelle dans l'environnement de la construction est, tout d'abord, souhaitée pour avoir une stabilité globale. Dans une première approche, l'effet de flambement en tant que cause de rupture n'est pas pris en compte pour étudier l'aptitude à la construction du matériau en béton. Par conséquent, la colonne creuse cylindrique est choisie pour un modèle de test de constructibilité. Le temps d'impression, la compressibilité de chaque couche imprimée sous le poids propre et la hauteur de l'objet imprimé ont été comparés dans chaque résultat d'impression. L'épaisseur optimale de la couche a été étudiée en imprimant le modèle de constructibilité. L'épaisseur de la couche affecte directement la résistance de la liaison inter couche, qui influence l'intégrité du composant structurel et ses propriétés mécaniques. L'épaisseur de la couche a été obtenue dans la plage de 10 à 15 mm en fonction de l'état du matériau.

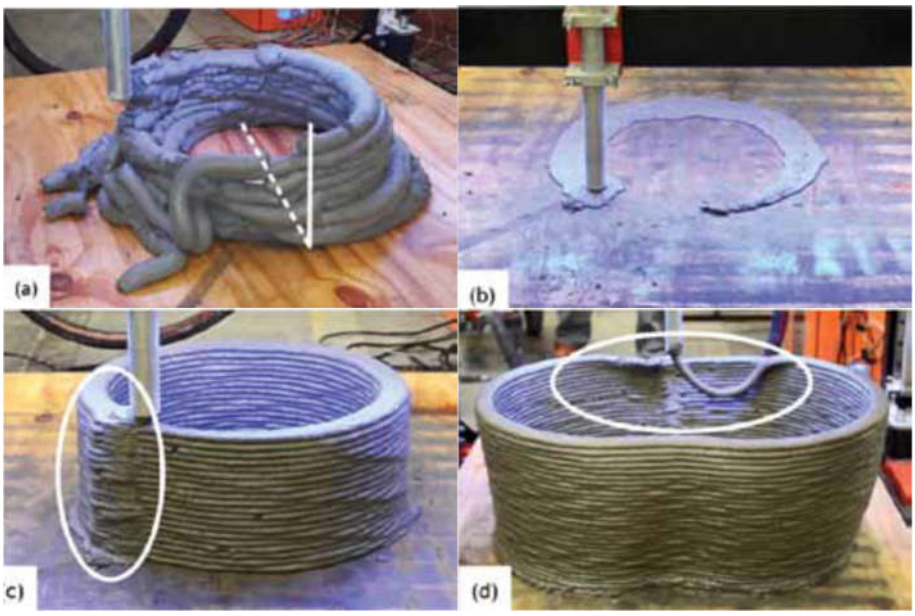

Figure II. 7 : Mauvais état ou échec typique pendant le processus d'impression.

Au cours du processus d'étalonnage, quelques observations typiques (Fig.II-7) d'essais réalisés montrent des imperfections et des irrégularités de qualité ou une défaillance globale :

(a) Une poulie de translation desserrée n'est pas engagée correctement avec le mouvement pas à pas de la machine entraînant un glissement. Le glissement provoque un chemin d'impression imprécise ou un déplacement complet du plan d'impression.
(b) Eau résiduelle à l'intérieur du tuyau altérant la fluidité du matériau.
(c) À la position de levage verticale pour chaque couche, du matériau supplémentaire est déposé en raison de l'alimentation par gravité. Ainsi, un actionneur au niveau de la buse est nécessaire pour contrôler le flux de matière plus précisément.
(d) Impression d'une baignoire. L'action décrite en (c) provoque une déviation globale de la paroi.

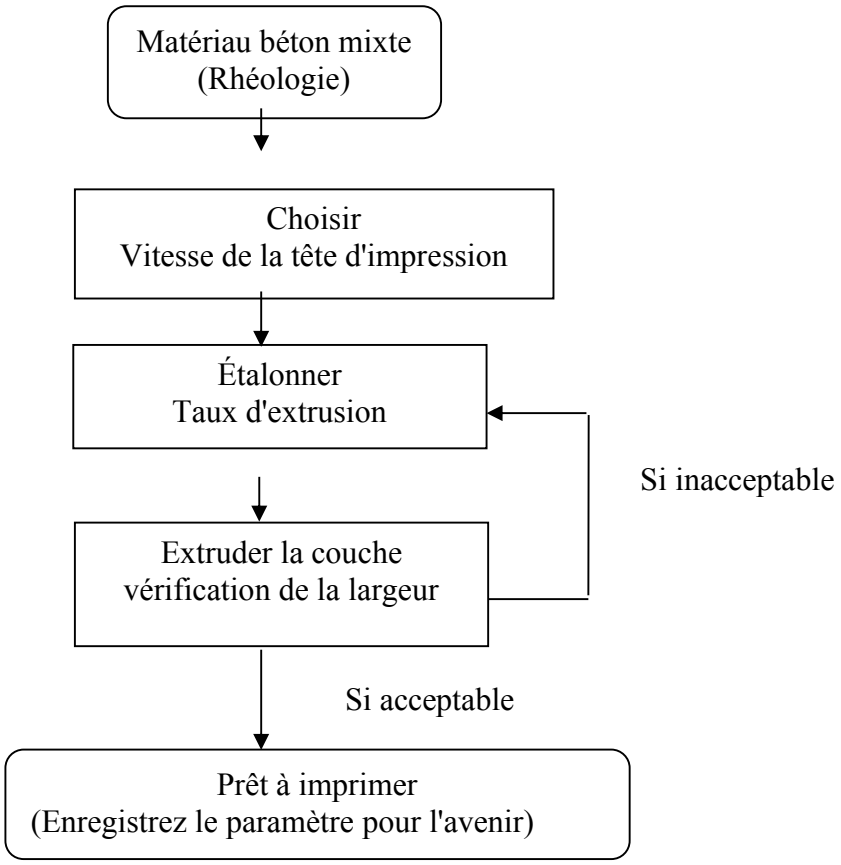

Figure II. 8 : Organigramme illustrant le processus d'obtention d'une largeur de couche.

Tableau II. 6: Géométrie de l'objet imprimé en 3D.

Figure	**Couches**	**Largeur (mm)**	**La taille (mm)**	**Durée 3DP (min: s)**	**Couche moyenne épaisseur (mm) Base Haut**	**Remarques sur contrôle du matériel amélioration**
7a	40	-	-	13	- -	Réduit en raison d'erreur d'opérateur, surface de mauvaise qualité
7b	47	402.5 (0.002)	478 (0.033)	21	11.9 9.3 (0.046) (0.141)	Meilleur tirage. Surface de bonne qualité, Logiciel amélioré Contrôle
7c	59	-	590	13	- -	Couche uniforme et meilleure constructibilité.
8a	70	250.5 (0.003)	792.5 (0.003)	26	11.9 12.6 (0.046) (0.152)	Bonne impression ; mais couches irrégulières montré en raison de entrée d'air.
8b Dome	14	300	125	3 :04	- -	Impression raisonnable de variable ascendant géométrie de la pente

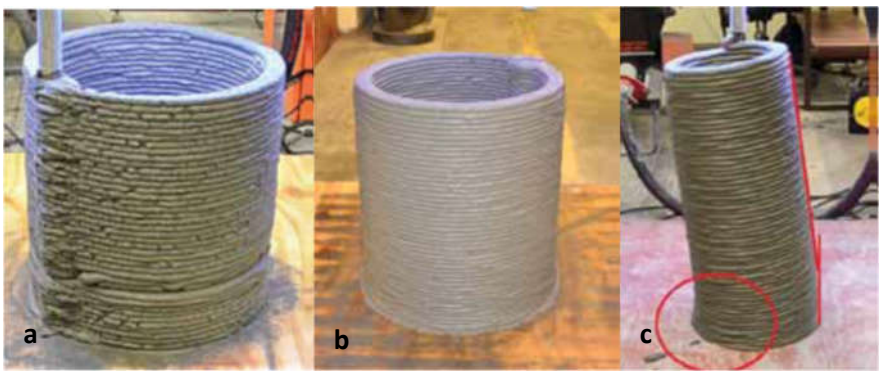

Figure II. 9 : Progression du contrôle de l'impression 3D du béton.

La figure II.9 ; (a) Première colonne circulaire imprimée ; (b) une uniformité de couche et une qualité de surface améliorées grâce à une rhéologie et un contrôle de la vitesse de pompe améliorés au début de nouvelles couches ; (c) le modèle de test de construction a été imprimé avec une hauteur accrue avant l'effondrement en raison du rendement plastique des couches inférieures.

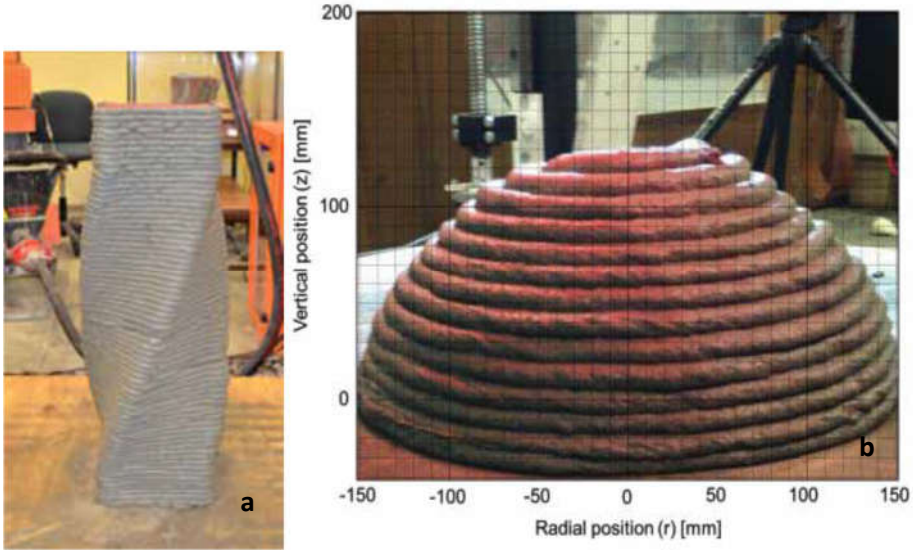

Figure II. 10 : Impression 3D de différente forme.

(a) colonne de béton fibré avec une torsion de 90 degrés sur 0,6 m du 0,8 m de hauteur de 70 couches, montrant une vue de dessus et de côté à droite ; (b) dôme de référence **[42].**

II.3.1.4. Qualité d'impression et conservation de la forme

Une colonne creuse circulaire de 400 mm de diamètre est imprimée en 3D et représentée sur les figures II-7(a) et (b) pour démontrer une amélioration progressive du contrôle et des performances du matériau. La vitesse de translation de la buse lors de l'impression de 60 mm /

s a été maintenue pour toutes les impressions. Le tout premier spécimen imprimé en 3D du groupe est illustré à la figure II.10 (a), en utilisant un matériau de mortier d'un autre groupe de recherche **[33].**

Le spécimen présentait une épaisseur de couche irrégulière et une certaine discontinuité dans l'impression en raison de l'entrée d'air du dispositif d'alimentation de la pompe et d'un mauvais contrôle de la vitesse de la pompe. L'entrée d'air est causée par la viscosité élevée du matériau, qui nécessitait plus d'énergie d'agitation dans la trémie pour une alimentation uniforme. La mauvaise qualité de surface est montrée sur la figure qui indique une rhéologie inadéquate pour 3DPC. L'épaisseur moyenne de la couche n'a pas été enregistrée, car le spécimen s'est effondré en raison d'une erreur de l'opérateur juste après le processus d'impression.

Le spécimen suivant, représenté sur la figure II.9, a montré une colonne cylindrique presque parfaite de 47 couches (hauteur 471 mm) malgré la présence de dépôts de matériau supplémentaires à la position de début d'impression des couches. L'amélioration rhéologique du matériau a conduit à une uniformité notablement améliorée de la couche extrudée et de la qualité de surface. Puisqu'une discontinuité est observée à certains endroits, une source d'énergie supplémentaire (vibrateur de poker dans la trémie) a été considérée pour améliorer la cohérence. Enfin, figure II-7, la colonne creuse circulaire de Ø250 mm a été imprimée pour valider le modèle de constructibilité. La petite addition de ralentisseur a aidé à réduire l'énergie d'agitation requise pour une impression de couche uniforme en prolongeant la période de l'état frais et en réduisant la contrainte dynamique d'élasticité. Un vibrateur de poker en béton a été utilisé pour fournir une énergie d'agitation supplémentaire dans la trémie. La modification du matériau, ainsi que l'utilisation du vibrateur de poker, ont abouti à 59 couches (hauteur 590 mm). L'utilisation du mode vase a amélioré l'uniformité des épaisseurs de couche. Comme l'éprouvette a été imprimée jusqu'à l'échec du test de construction, l'épaisseur moyenne de la couche n'a pas été enregistrée. La complexité géométrique a également été validée avec une colonne carrée torsadée à 90 degrés (Fig.II-8 a). On voit que les couches irrégulières sont réduites, mais apparaissent toujours en raison de l'entrée d'air de la pompe d'alimentation. Cependant, les deux spécimens pourraient être imprimés en 3D tout en restant stables même avec la complexité géométrique et le taux de construction élevé - voir le tableau 4. Enfin, des structures de référence pour 3DCP l'évaluation de la qualité et la standardisation ont été récemment proposées par les auteurs **[42].** La figure II-8, montre une structure de dôme en demi-sphère imprimée en 3D, recouverte par une grille pour l'évaluation

de la précision géométrique **[42].** La structure du dôme est restée stable, mais la couche pré finale (couche numéro 14, tableau II-6) a introduit une instabilité locale due à la déformation des couches supérieures, qui ont des interfaces de plus en plus petites avec les couches de support. Le gradient ascendant variable de la structure du dôme présente un test rigoureux pour la stabilité du matériau et la précision de l'imprimante 3D.

II.3.1.5. Constructibilité et vitesse de construction

Lors de l'impression de l'échantillon, la durée de l'impression 3D a été enregistrée pour corréler la limite de construction par rapport à la contrainte de temps. Les colonnes circulaires et carrées initialement imprimées ont été imprimées jusqu'à 40 à 70 couches en 30 minutes, à l'exclusion du spécimen plié (Fig.II-8) qui a été délibérément imprimé à une plus petite dimension à la même vitesse. Comme l'amélioration du matériau a permis d'imprimer presque à la hauteur totale du cadre du portique, le modèle de construction de rapport hauteur / largeur plus élevé (hauteur / diamètre) avec un diamètre plus petit et une vitesse d'impression accrue a été testé. En conséquence, l'échantillon imprimé avec le matériau de rhéologie améliorée par des adjuvants a été imprimé jusqu'à 59 couches en environ 13 minutes. Le mécanisme de rupture était la plasticité du matériau dans les couches inférieures, mais reste à confirmer dans la poursuite des recherches pour exclure une défaillance géométrique (flambage) comme cause de l'instabilité. Les détails de la géométrie globale de l'éprouvette et de l'épaisseur de la couche sont résumés dans le tableau II-6.

II.4. La comparaison entre la construction traditionnelle et l'impression 3D

II.4.1. Introduction

Dans le cadre de bien expliquer la technologie d'impression 3D du béton, il y'a lieu de se référer à la technique ancienne, afin de comprendre les point forts et faible, en suivant une démarche comparative sur tous aspects, à savoir ceux en relation avec l'économie, l'environnement et techniques, ce qu'on va présenter dans cette partie.

II.4.2. Présentation de la construction à comparer

Dans l'ouvrage publié dans le journal « cleaner production » plusieurs chercheurs ont essayés de prouver l'utilité de l'impression 3D pour présenter une alternative à la construction traditionnelle **[43]**.

L'objectif de ce travail est de faire ressortir une étude comparative de point de vue économique, des impacts environnementaux, et la productivité associée à la fabrication d'une unité de salle de bains préfabriquée (PBU, langueur : 1620 mm ; largeur : 1500 mm ; hauteur : 2800 mm) via l'impression 3D du béton par extrusion (3DCP) et une approche préfabriquée, respectivement. Les paramètres pris en charge pour cette étude comparative par les auteurs est axée essentiellement sur la consommation des matériaux, les dépenses d'électricité, le coût de la main-d'œuvre/ la productivité et le cycle d'installation.

II.4.3. Présentation de la méthodologie d'évaluation

L'évaluation économique comparative des PBU fabriqués par impression 3D et l'unité préfabriquée est basée sur un modèle de coût proposé par Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., Hague, R**. [44]**. Ce modèle simple et complet basé sur le coût, qui couvre plusieurs aspects.

La méthode utilisée dans l'évaluation environnementale est basée sur l'Organisation internationale de normalisation (ISO) 14040 **[45]**. L'éco-indicateur 99 a été sélectionné, car il prend en compte différentes catégories environnementales. Des indicateurs de points intermédiaires et de points finaux ont été inclus dans cette méthode pour couvrir la majorité des impacts environnementaux tels que le changement climatique. Les dommages causés par ces charges environnementales sont également évalués. Les points intermédiaires ont fourni une indication claire de l'impact écologique des productions 3DPBU et PBU préfabriqués, alors que les points finaux ont révélé l'influences de ces procédures sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et ressources **[46]**. De plus, l'impact associé avec le changement climatique a également été étudié et exprimé en CO_2-eq émission selon IPCC 2007 **[47]** sur une période de 100 ans. Enfin, une analyse de sensibilité a également été réalisée pour évaluer l'effet du temps de réutilisation des coffrages sur les résultats. La consommation d'énergie a été calculée selon la méthode de la demande d'énergie cumulée (CED). La méthode CED indique la consommation d'énergie directe et indirecte tout au long du cycle de vie d'une production de la salle de bain, y compris l'énergie consommée lors de l'extraction des matières premières, de la production et de l'élimination à la fin de son cycle de vie **[48]**.

Les autres indicateurs, tels que les heures de construction globales ou le poids propre, étaient une somme de toutes les données fournies par Sembcorp Design and Construction Pte Ltd.

II.4.4. Description du processus de fabrication

II.4.4.1. L'unité de salle de bain imprimé 3DPBU

La CAO du 3DPBU a une taille de 1620 mm 1500 mm 2800 mm sélectionnées pour l'analyse est présentée à la (FigII.9). Au cours de l'impression, le mur été imprimé en deux parties, qui ont ensuite été assemblées pour éviter d'imprimer la structure en surplomb. La première partie a une dimension de 1620*1500*2200 mm^3, correspond à la partie inférieure (Fig.II.11), alors que la deuxième partie avec une dimension de 1620*1500*600 mm^3 appartient à la partie supérieure (Fig.II.12). L'équipement utilisé pour l'impression est illustré à la (Fig.II.13), comprenant une imprimante à béton robotisée, une pompe à béton et un mélangeur de matériaux. La pompe à béton (Fig.II.13) est intégrée à une poinçonneuse, qui pourrait pousser le mélange nouvellement mélangé dans un système de livraison pour assurer un processus de livraison continu. Au cours du processus d'impression, les matières premières ont d'abord été mélangées dans une bétonnière. Ensuite, le mélange a été versé dans une pompe à béton et acheminé vers une tête de buse. Enfin, le robot a contrôlé la et a imprimé la structure en suivant le tracé du dessin. Comme la 3DPUB est une pièce non structurelle et que les murs ne sont pas porteurs, la structure en treillis a été conçue pour l'impression murale et cela afin de réduire le poids et de loger les tuyaux de plomberie à l'intérieur le mur. Les structures en treillis conçues pour le haut et le bas les parties sont indiquées à la (Fig.II.14), où la ligne bleue indique le chemin d'impression pour le treillis et la limite a été conçue pour être exacte sans chevauchement, car la largeur du filament a tendance à changer, ce qui les fera chevaucher en raison de la diversité des conditions de pompage pendant l'impression. Les quatre coins de la maquette étaient conçus pour permettre un espace fermé, où un tirant sera inséré et boulonné dans le trou fileté de la dalle coulée en dessous. Ce trou fermé sera ensuite rempli avec le mortier ordinaire pour sceller le tirant et de relier les deux parties imprimées. En outre, pour le transport et l'installation, le la partie inférieure devait être imprimée sur une dalle de base coulée de 1620 mm 1500 mm 130 mm (L. L. H). Cette dalle de base était coulée séparément (Fig.II.43), et la partie imprimée finale est présentée dans la (Fig.II.11).

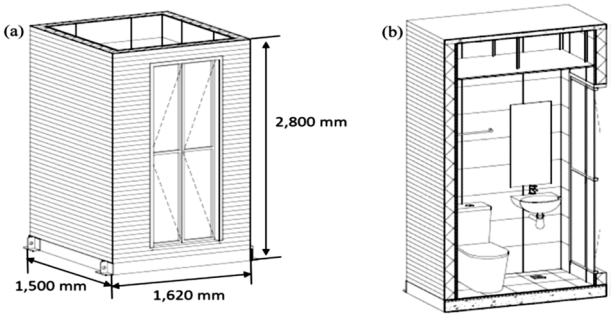

Figure II. 11 : Le plan de l'unité imprimée (a : vue générale, b : coupe longitudinale).

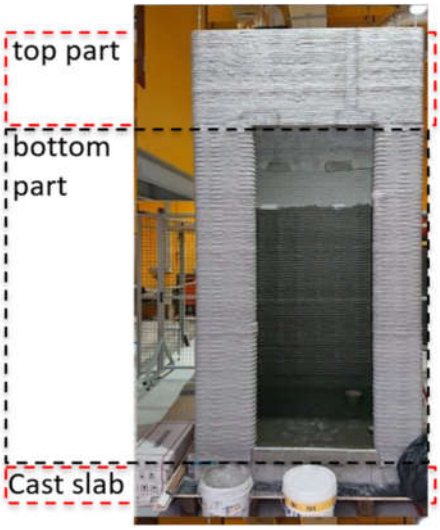

Figure II. 12 : La vue finale montrant les différentes parties de la construction.

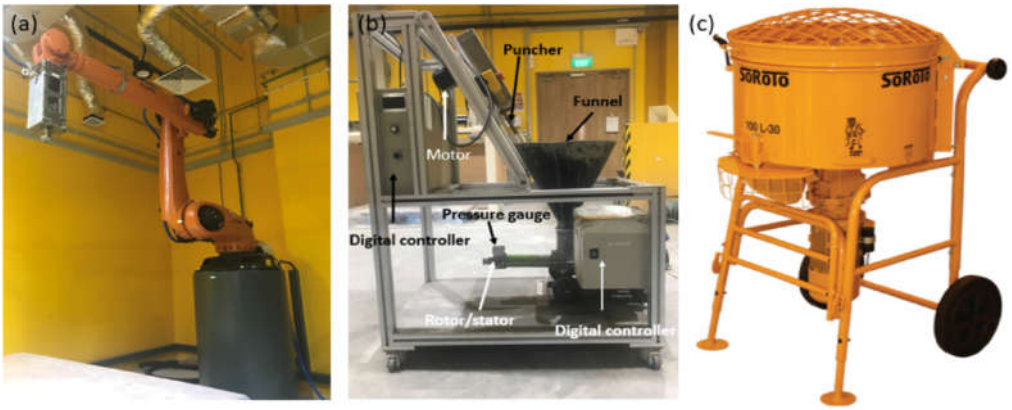

Figure II. 13 : L'équipement utilisés dans l'impression.

(a : une imprimante à béton robotisée, b : une pompe à béton, c : un mélangeur de matériaux).

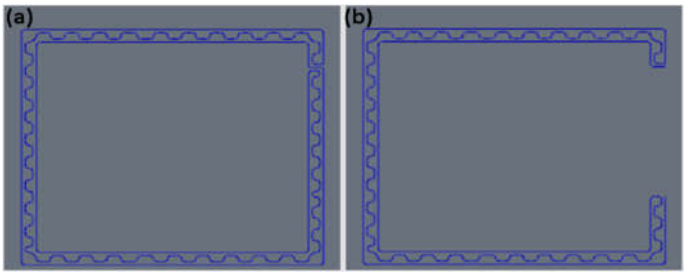

Figure II. 14 : Le système d'impression en treille utilisé dans la structure UI.

(a : la partie supérieure, b : partie inferieure).

Figure II. 15 : Moulage de la dalle de base avec Tuyauterie.

II.4.4.2. L'unité de salle de bain coulée PBU

Le mur en béton a été fabriqué selon une approche préfabriquée. (Fig.II.16) montre le moule préfabriqué, et l'équipement de dosage du béton est montré dans (Fig.II.17), qui a été utilisé pour la distribution du mélange et le coulage du béton dans le moule PBU. La vibration a ensuite été appliquée sur la surface du moule pour consolider le mélange. Après durcissement, l'PBU a été démoulé, Le PBU préfabriqué a été fabriqué par Sembcorp Pte Ltd à Singapour.

Figure II. 16 : Coffrage métallique pour UP.

Figure II. 17 : Silo à béton (une partie de l'équipement de dosage du béton).

II.4.4.3. Inventaires

II.4.4.4. Consommation et coût des matériaux

Les types de matériaux et leur consommation, ainsi que les coûts de fabrication des PBU imprimés en 3D et préfabriqués, sont présentés dans (Tableau II.7). Ces informations sont fournies par Sembcorp Design and Construction Pte Ltd, Singapour. Les matériaux utilisés pour 3DCP sont constitués de ciment Portland ordinaire (OPC, type I 42,5), cendres volantes, fumées de silice et sable. Cependant, les auteurs ne sont pas en mesure de publier les informations détaillées sur les compositions des matériaux, car ils sont conservés

confidentiels. Pour les deux technologies, le même type de dalle de support est utilisé, comme indiqué dans (Fig.II.15).

Dans cette évaluation environnementale, les inventaires des cendres volantes ont été obtenus à partir de **[49]**. Cependant, les valeurs de ses entrées et sorties liées à sa production sont proches de zéro, ce qui peut être attribué au fait que les cendres volantes sont un type de déchet industriel après la combustion du charbon et seuls les inventaires associés à son processus de collecte doivent être pris en compte. De même, la fumée de silice est également une sorte de déchet, qui est généré lors de la production d'alliages de silicium métallique ou de ferrosilicium. Par conséquent, sa consommation d'énergie et ses émissions peuvent également être négligées **[50].** Comme le coffrage est constitué de moules préfabriqués avec un cadre métallique (par exemple, acier ou aluminium), un seul processus de cadres de fenêtres, similaire au coffrage, à partir de la base de données Ecoinvent développée par le Centre suisse pour les inventaires du cycle de vie a été utilisé. On a supposé que l'aluminium produisait le cadre **[48]-[51]**. Les anneaux de levage et les boulons à œil, qui sont des pièces avec une boucle à une extrémité, ont également été adoptés lors de la production. Ils ont l'habitude de fixer fermement plusieurs œillets de fixation à un composant dans un PBU (3d et avec coulage) pour vous assurer que les cordes ou câbles y sont attachés pendant le levage. Dans cette étude, les inventaires de 4 anneaux de levage ont été remplacés par l'équivalent en acier moulé (soit environ 200 kg) de la base de données **[52]** développé par l'Université de technologie de Delft. Les inventaires des autres matières premières, y compris le ciment, sable et béton, ont été obtenus à partir des bases de données Ecoinvent et ETH-ESU, qui ont été développées par le Centre suisse pour les inventaires du cycle de vie **[51]** et Eidgenössische Technische Hochschule **[53]**, respectivement.

II.4.4.5. Comparaison économique

L'analyse des coûts est importante pour un produit en raison de la concurrence internationale et du progrès des changements technologiques et comme l'un des facteurs critiques influent le profit net réalisable par l'adoption de 3DCP. Par conséquent, une analyse complète du coût monétaire lié à l'utilisation de 3DCP devrait être effectuée, ce qui fournira des orientations pour les analyses futures de l'impact économique de l'utilisation de 3DCP dans la pratique **[54]**. Par conséquent, une série de coûts associés à la production de PBU imprimés et préfabriqués en 3D a été collectée auprès de différentes sources, telles que les données de première main ou la littérature. Ces coûts peuvent être divisés en 3 types : (1) Coût d'électricité ; (2) Coût de la main-d'œuvre ; (3) Coût de l'équipement. La consommation

d'électricité et les coûts liés à la fabrication de PBU imprimés et préfabriqués sont présentés dans (Tableau II-8) le tableau montre clairement que la consommation électrique des équipements 3D est environ 27 fois plus élevée que celle des équipements préfabriqués, indiquant un niveau automatique potentiellement élevé de l'impression 3D puisque plus d'équipements sont nécessaires dans la construction numérique pour réduire le nombre de travailleurs. (Tableau II-9) montre les procédures de travail, le temps et les coûts de main-d'œuvre liés à la fabrication de PBU imprimés et préfabriqués en 3D Les premières données ont été obtenues auprès de Sembcorp Design and Construction Pte Ltd, Singapour. Le tableau montre que le temps de travail global de la fabrication du PBU 3DCP est inférieur de 13 h à celui du préfabriqué en raison de sa période de durcissement plus courte. Par exemple, 8 heures de travail supplémentaires (1 jour) ont été nécessaires pour le PBU préfabriqué en tant que processus de durcissement supplémentaire, alors que dans la production de 3DPBU, cette procédure a été éliminée. Le coût de l'équipement en termes de fabrication 3DCP et PBU préfabriqués est indiqué dans (Tableau II-10).

Comme indiqué dans (Tableau II-10), les heures de fonctionnement annuelles de la machine et l'amortissement de l'équipement ont été obtenus **[54]**, tandis que les autres coûts d'équipement ont tous été obtenus auprès de Sembcorp Design and Construction Pte Ltd, Singapour. Comme prévu, plus de capital de départ devrait être alloué à l'achat de l'équipement 3D que celui du préfabriqué.

II.4.4.6. Cycle d'installation

Wu, P., Low, S.P., Jin, X. **[55]** A indiqué que les étapes de transport et d'installation devraient être prises en compte dans le cycle d'installation. Comme le PBU préfabriqué est préfabriqué dans un endroit différent puis transporté sur le chantier de construction, une distance de transport de 20 km ont été supposés et des chariots élévateurs ont été utilisés pour transférer le PBU, alors que le PBU imprimé en 3D peut être identifie en tant que structure via la construction sur site, car les composants de construction à petite échelle, y compris les structures intérieures et les panneaux, peuvent être fabriqués via un 3DCP, qui peut être assemblé sur place **[56]**, et le transport lié à la production n'a pas été pris en compte dans la production d'un 3DPBU dans cette étude.

Les unités de béton préfabriquées et imprimées en 3D ont toutes les deux étés installées par des grues à tour, qui était identifié comme méthode d'installation typique à Singapour **[55]**. La consommation de carburant associée à l'utilisation des grues à tour est de 7 L d'essence par

heure, dérivée de **[55]**, et il a fallu 1 h chacun pour l'installation des deux PBU, comme indiqué dans Tableau II-7.

Tableau II. 7 : Matériaux, consommation et coût des PBU imprimés en 3D.

PBU imprimé en 3D (L: 1620 mm; l: 1500 mm; H: 2800 mm)					
Pièce	Article	Quantité	Unité	Prix (SGD)	Totale (SGD)
Dalle de plancher de base (130 mm)	Béton	0.32	M^3	115	36.8
	Armature à 120 kg / m^3	38.4	Kg	1.2	46.08
	Coffrage	3.43	m^2		120.87
	Œil de levage	4	-	50	200
Mur imprimé en 3D (100 mm)	Béton imprimable	-	kg	-	318.2
				Total	722

Tableau II. 8 : Matériaux, consommation et coût des PBU préfabriqués.

PBU préfabriqué (L: 1620 mm; l: 1500 mm; H: 2800 mm)					
Pièce	Article	Quantité	Unité	Prix (SGD)	Totale(SGD)
Dalle de plancher de base (130 mm)	Béton	0.32	M^3	115	36.8
	Armature à 120 kg / m^3	38.4	Kg	1.2	46.08
	Coffrage	3.43	m^2		120.87
	Œil de levage	4	-	50	200
Mur en béton armé coulé manuellement (100 mm)	Béton	1.6352	m^3	115	188.05
	Armature à 60 kg / m^3	98.112	Kg	1.2	117.73
	Coffrage	32.704	m^2		637.92
				Total	1347

Tableau II. 9: Consommation d'électricité et coût des PBU imprimés en 3D et préfabriqués.

PBU imprimé en 3D (L: 1620 mm; l: 1500 mm; H: 2800 mm)						
Equipements	Marque	Puissance(w)	Temps(h)	Electricité (kWh)	Prix (cents/kWh)	Coût
Bras robotisé KUKA	Kuka KR 120 R3900 ultra K	6600*6	9.5	376.2	24.39	91.8
machine à puncher	Personnalisé	400	9.5	3.8	24.39	0.9
Pompe	Pompe MAI2PICT-OR	1500	9.5	14.25	24.39	3.6
Mixeur	80L variooo	1100	9.5	10.45	24.39	2.5
					Total (SGD)	98.7
PBU préfabriqué (L: 1620 mm; l: 1500 mm; H: 2800 mm)						
Centrale à béton	QILEE	10000	1.5	15	24.39	3.7
					Total(SGD)	3.7

II.4.5. Résultats

II.4.5.1. Évaluation économique de la production imprimées en 3D et préfabriquées

De nombreux modèles de dépenses associés à une technologie d'impression 3D sont basés sur temps de construction global **[57]**; **[58]**, et le modèle de coût utilisé dans cette étude a été dérivé d'une étude précédente **[44]**, qui comprend les coûts directs associés à la matière première et à la consommation d'énergie ainsi que les coûts indirects (en fonction du temps) liés à la durée de construction d'un PBU. La dépense totale C PBU encourus lors de la construction est exprimée en Eq. (1).

$C_{PBU} = (C_{indirect} * T_{PBU}) + (M * Prix_{Composants}) + (E_{PBU} * Prix_{énergie})$ (1)

Dans lequel,

$C_{indirect}$: le taux de coût indirect total, exprimé en SGD / heures. Lors de la production d'un PBU

$C_{indirect}$: la somme des dépenses associées au salaire de la main-d'œuvre et à l'achat de la machine

Comme montré dans (Tableaux II.9 et II.10) Comme l'un des inconvénients d'une technique 3DCP est le coût élevé de la machine, le coût lié à la machine pour produire un PBU imprimé en 3D sera beaucoup plus élevé par rapport à celui d'un homologue préfabriqué, et cela augmente inévitablement les $C_{indirect}$ d'une production PBU imprimée en 3D.

T_{PBU} et E_{PBU} sont les estimations du temps de construction (c.-à-d. PBU imprimé en 3D: 9,5 h par rapport au préfabriqué PBU: 1,5 h) et consommation d'énergie associée à la fabrication de PBU respectivement.

M est la masse de tous les composants impliqués dans la production d'une unité PBU. Alors que le prix unitaire des composants ($Prix_{Composants}$) est exprimé en SGD / kg, le prix de l'énergie ($Prix_{énergie}$) fait référence au coût de l'électricité, mesuré en SGD / kWh.

Dans cette étude, comme indiqué ci-dessus, un PBU préfabriqué est supposé être préfabriqué dans une zone de construction différente, puis transporté vers le site final. Par conséquent, les frais de transport encourus doivent également être pris en compte en conséquence. D'autre part, le PBU fabriqué par un 3DCP peut être identifié tel que produit sur site construction **[56]**.

La répartition des coûts selon le modèle associé à la fabrication d'un PBU imprimé en 3D et préfabriqué est présentée dans (FigII.18) On remarque très bien que le coût global d'une fabrication PBU préfabriquée est 34,1 % plus élevé qu'un homologue imprimé en 3D. Cependant, les coûts indirects engendrés par une production de PBU via les approches 3DCP et préfabriqués sont assez similaires.

Bien qu'une réduction de 13,8 % du coût de la main-d'œuvre soit obtenue dans un PBU imprimé en 3D, plus d'argent a été alloué à l'investissement sur l'achat de machines d'impression 3D par rapport à la seule machine, équipement de dosage du béton, acheté dans une production PBU préfabriquée. Ceci est conforme à **[44]**, car le coût de l'équipement de dosage du béton utilisé dans la production d'un PBU préfabriqué est bien inférieur à celui de la machine d'impression nécessaire à la production d'un homologue imprimé en 3D. En termes de coût du matériau (c'est-à-dire de toutes les matières premières, y compris le coffrage), pour produire un PBU, le coût en utilisant une méthode préfabriquée est 86,6 % plus élevé car aucun coffrage n'est nécessaire dans la fabrication de murs dans un PBU imprimé en 3D. 3DCP construit une structure couche par couche avec du matériau déposé avec précision, donc les coffrages sont inutiles et signifie qu'une réduction de l'utilisation des matériaux peut être obtenue. Gardons que les coffrages sont essentiels à la fabrication d'une structure mais sont responsables d'un coût plus élevé dans l'approche préfabriquée par rapport à l'impression 3D.

En ce qui concerne le coût associé à la consommation d'électricité, comme prévu, ses dépenses liées à un PBU imprimé en 3D sont beaucoup plus élevées par rapport à son homologue préfabriqué (soit 98,7 SGD vs. 3.7SGD), qui peut être attribuée à la puissance plus élevée utilisée et au temps de service plus long en raison du fonctionnement de la machine d'impression 3D. **[44]** A également adopté l'équation (2) pour révéler l'efficacité de conversion des composants et de l'énergie dans le produit imprimé final (R). L'équation s'exprime sous la forme d'un rapport coût des composants et de l'énergie par rapport au coût total

$$\mathbf{R = (M * Prix_{composants} + E_{PBU} * Prix_{énergie}) / C_{PBU}} \qquad \mathbf{(2)}$$

En termes de PBU imprimé en 3D, le rapport est de 0,43, ce qui indique que les composants et le coût énergétique de 0,43 SGD sont convertis en produits par rapport à chaque dollar dépensé pour la production d'un PBU. Il est intéressant de trouver que le rapport d'un PBU préfabriqué est de 0,53, ce que suggère que l'utilisation d'une approche préfabriquée est plus

efficace qu'un 3DCP en ce qui concerne la conversion des composants et de l'énergie en PBU, ce qui est lié à son coût direct plus élevé que l'impression 3D pendant la production d'un PBU.

Tableau II. 10 : Évaluation économique de la production en 3D.

PBU imprimé en 3D (L: 1620 mm; l: 1500 mm; H: 2800 mm)						
N° de la tâche	La tâche	La durée	Nombre des travailleurs	Travailleur * heure	Le prix /h/travailleur	Le coût (SDG)
1	-Préparation de la base de la dalle -Installation d'armature -Coulée de dalle de béton	6	2	12	15	180
2	Préparation du béton	4	2	8	15	120
3	Impression : -Partie sup -Partie inf.	8	1	8	15	120
4	Le levage de la partie sup vers la partie inf.	3	3	9	15	135
5	Le levage et l'installation	1	2	2	15	30
	Le temps total pour la coque en béton	16 27				
	Le test de l'imperméabilité pour le mur et le sol	3	1	3	15	45
5	Le test d'accumulation d'eau de la dalle	8	-	-	-	-
6	La dalle de sol et la faillance	8	2	16	15	240
7	Plafond et porte	4	2	8	15	120
8	Articles sanitaires et toilettes, luminaires etc.	3	1	3	15	45
	Le temps total	42		54		1035

Tableau II. 11: Évaluation économique de la production en préfabriqué.

PBU préfabriqué (L: 1620 mm; l: 1500 mm; H: 2800 mm)						
N° de la tâche	La tâche	La durée	Nombre des travailleurs	Travailleur * heure	Le prix /h/travailleur	Le coût(SDG)
1	Fabrication et installation du coffrage pour les murs et la dalle	6	2	12	15	180
2	Préparer / installer le moule de coffrage 3D. Installez le coffrage d'armature dans le moule, coulée dans les objets	6	3	18	15	270
3	Coulée de béton 3D pour dalle et mur PBU	3	3	9	15	135
4	Durcissement du béton	8	-	-	-	-
5	Démoulage du PBU	2	3	6	15	90
6	Levage et installation	1	2	2	15	30
	Le temps total pour la coque en béton	20 47				
7	Durcissement du béton	8	-	-	-	-
8	Inclinaison du PBU	1	3	3	15	45
9	Vérification de l'imperméabilité au sol et au mur	3	1	3	15	45
10	Le test d'accumulation d'eau de la dalle	8	-	-	-	-
11	Dalle de sol et faillance	8	2	16	15	240
12	Plafond et porte	4	2	8	15	120
13	Articles sanitaires et toilettes, luminaires etc.	3	1	3	15	45
.	Le temps total	55		80		1200

Tableau II. 12: Le coût des équipements dans l'impression 3D et la préfabrication.

Le prix des machines dans l'impression 3D			Le prix des machines dans la préfabrication		
La machine d'impression 3D	Le bras kuka	260000(SGD)	Centrale à béton	Le prix de la machine	8200(SGD)
	Machine à puncher	4000(SGD)		La durée d'utilisation d'équipement	10
	La pompe	13000(SGD)		L'utilisation annuelle des machines en heure	5000(h)
	Le coût total des machines	277000(SGD)		Le coût par heure	0.16(SGD)
	La durée d'utilisation d'équipement	8 années		La durée	1.5(h)
	L'utilisation annuelle des machines en heure	5000(h)		Le coût total	0.24(SGD)
	Le coût de l'imprimante 3D par heure	6.92(SGD)			
Le mixeur	Le mixeur	8000(SGD)			
	La durée d'utilisation de l'équipement	15 années			
	L'utilisation annuelle de la machine	500(SGD)			
	Le coût du mixeur par heure	0.1(SGD)			
La machine (l'imprimante et le mixeur)	Le coût total de la machine par heure pour la production PBU	7.02(SGD)			
	La durée totale	9.5 années			
	Le coût total de la machine	66.7(SGD)			

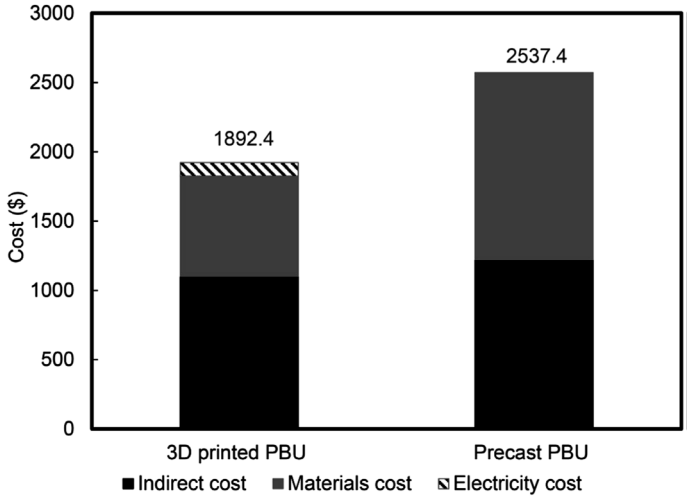

Figure II. 18 : Répartition des coûts associée aux PBU imprimés et préfabriqués en 3D.

II.4.5.2. Évaluation environnementale

La figure II.17, montre les émissions CO_2 associées à la production de deux PBU, elle indique que la 3DPBU dégage 85,9 % moins bas de CO_2 que le préfabriqué. Comme prévu, une consommation d'énergie similaire est mentionnée dans (Fig.II.19) ce qui peut être attribué à l'adoption d'un plus grand nombre de coffrages lors de la construction de mur dans un PBU préfabriqué, et leur processus de production est assez énergivore (c.-à-d., laminage de barres profilées, extrusion et traitement de surface). Par conséquent, la demande d'énergie plus élevée dans une fabrication PBU préfabriquée conduit inévitablement à une plus grande quantité d'émissions CO_2.

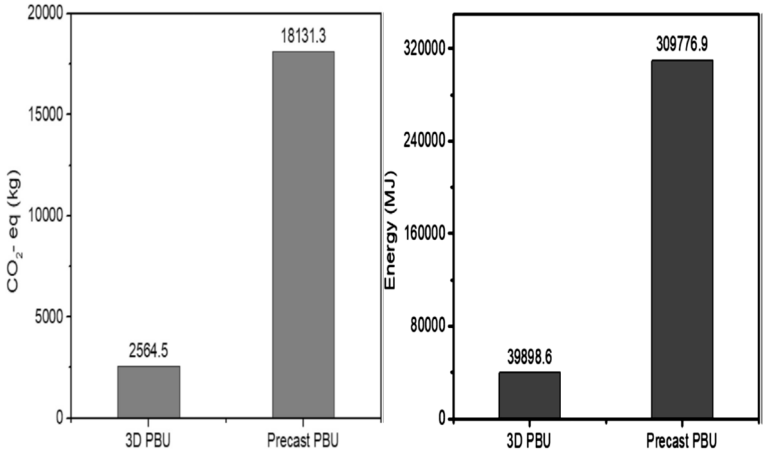

Figure II. 19 : Les émissions de CO_2 et la consommation d'énergie.

La figure II.19, montre la distribution du CO_2 émis lors de la production d'un PBU imprimé en 3D et préfabriqué. En termes de construction un PBU imprimé en 3D, l'utilisation des coffrages pour la dalle de support occupe la proportion la plus importante des émissions CO_2. Le pourcentage de l'émission CO_2 lié à l'électricité est également assez importante, atteignant 18,2 %, ce qui est dû à la longue durée de service et à la puissance utilisée pendant l'utilisation

de la machine d'impression 3D. Les émissions CO_2 dues à la production d'un PBU préfabriqué, de même, l'utilisation de coffrages est également le principal contributeur (soit 98,6 % des émissions CO_2), conduisant à une négligence des émissions CO_2 liées à l'électricité, au béton ou à l'installation.

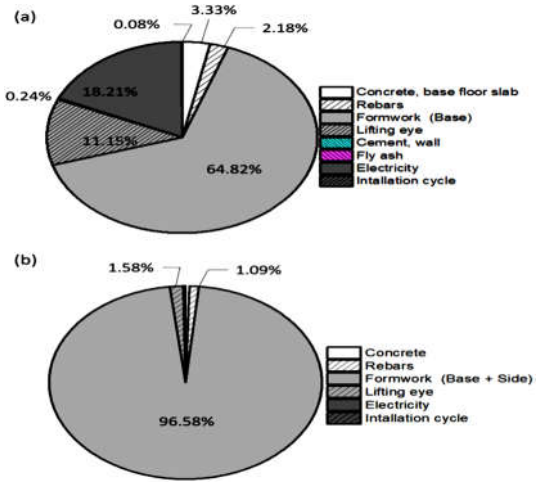

Figure II. 20 : La distribution des émissions CO_2.

La figure II.20, comme prévu, un PBU imprimé en 3D a surpassé un PBU préfabriqué car il cause moins de dégâts à la santé humaine, à la qualité de l'écosystème et aux ressources. De plus, les PBU 3DCP et préfabriqués causent des dommages plus graves aux ressources qu'à la santé humaine et à la qualité des écosystèmes, ce qui est dû aux combustibles fossiles car il est le principal contributeur de cette tendance (Fig.II.21).

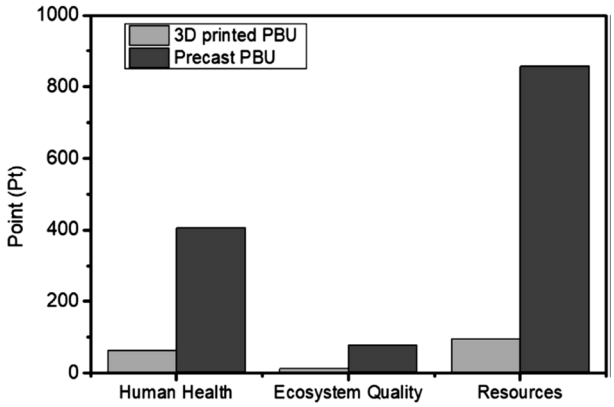

Figure II. 21 : Les dégâts causés par l'impression 3D et la préfabrication.

II.4.5.3. Temps de travail et productivité

La figure II.21, indique le temps de travail et le poids total du PBU imprimé en 3D et préfabriqué. La représentation démontre qu'une réduction globale de 1,6 jour ouvrable et 26,2% du poids total a été obtenue dans le PBU imprimé en 3D par rapport au PBU préfabriqué. La productivité peut être définie via diverses approches. Dans le domaine de la

construction, la productivité est généralement exprimée en travail moyen productivité, c.-à-d. unités de travail produites (c.-à-d. production de PBU dans cette étude) par heure-ouvrier **[59]**, exprimé par :

La productivité du travail = production/(ouvrier*heure) **(3)**

Le résultat de cette étude est une production de PBU. Par conséquent, la productivité de la PBU imprimée en 3D (c'est-à-dire une PBU / 54 heures de travail) est 48,1% plus élevé que celui du PBU préfabriqué (c'est-à-dire un PBU / 80 heures de travail). La technologie d'impression est une méthode prometteuse pour améliorer la productivité. Car elle est plus légère et ne nécessite qu'une installation et une manipulation moins chères **[60]**, réduisant le coût global associé à la production.

En résumé, un 3DCP présente un énorme potentiel pour faciliter la productivité en raison de la réduction globale des heures de travail passées par rapport à la méthode préfabriquée (c.-à-d. 54 contre 80 heures de travail), ce qui peut être lié à un niveau automatique relativement élevé dans la fabrication 3D.

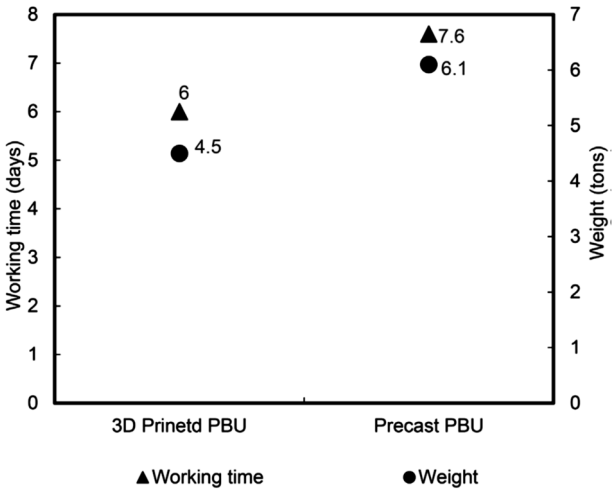

Figure II. 22 : Le temps de travail et le poids de l'unité.

Conclusion

La technique d'impression 3D, s'avère très intéressante, car elle permet de réaliser des gains économiques lors de la réalisation, notamment la réduction des délais de réalisation, économie des matériaux, de plus une bonne qualité d'exécution, et une réduction des gaz à effet de serre, ce qui induit une meilleure contribution au développement durable.

Néanmoins, la concrétisation de cette technique sur le terrain n'est pas pour demain, car il reste beaucoup d'amélioration à faire de point de vue techniques, nature et caractéristiques de matériaux à utiliser, ainsi que l'aspect réglementaire permettant de suivre l'exécution des projets avec cette technique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail, nous a permis de découvrir une nouvelle technique de construction basée sur l'impression 3D. Les techniques de fabrication numérique évoluent davantage, qui tendent à devenir populaires dans plusieurs secteurs notamment celui de l'industrie de la construction.

L'ensemble des études sur la technique d'impression 3D des bétons, convergent à dire que cette technique permettra de se positionner comme solution innovante, car elle permet une amélioration des qualités techniques des structures, de faire des économies, et une participation au développement durable.

Cette technique, permet une élimination du coffrage, la diminution des émissions carboniques, la réduction de la main-d'œuvre et la flexibilité de la conception et de la géométrie.

Il est démontré que les principales propriétés comme l'extrudabilité, la constructibilité et les propriétés mécaniques sont interconnectées tel qu'il a déjà était mentionné. La non prise en compte de ces propriétés peut entraîner une défaillance de la structure imprimée, malgré l'absence d'un document de référence normalisé sur ce type de technique basée sur l'impression 3D des constructions, malgré que ais plusieurs projets ont été réalisés par cette technique dans plusieurs pays dans le monde.

Les principaux travaux de recherche entrepris par différentes universités ainsi que par les diverses industries à travers le monde sont illustrés dans la deuxième partie de ce travail, axé sur une étude comparative entre deux structures, l'une imprimée et l'autre préfabriquée avec coffrage.

Les résultats révèlent qu'un PBU fabriqué par 3DCP permet de :

- Réduire de 25,4 % le coût global de la structure,
- Réduire les émissions de CO_2 de 85,9 %,
- Réduire la consommation énergétique de 87,1 %,
- Réduire le poids de la structure de 26,2 %,

Par rapport à la préfabrication, cela est expliquer par l'élimination du coffrage dans la technique d'impression 3 D.

Il est clair que l'impression 3D aura sans aucun doute l'avenir dans le secteur de la construction, néanmoins plusieurs aspects doivent être améliorés, notamment l'établissement des règles ou des documents de références permettant de cerner le contrôle et le suivi de la réalisation des structures avec la technique d'impression 3D.

Recommandations et perspectives

Recommandations et perspectives

À l'issue de ce travail, les recommandations et perspectives suivantes sont dégagées à savoir :

- La réflexion sur l'aspect réglementaire, par l'établissement d'un document technique réglementaire, et normes d'essais et de contrôle des matériaux utiliser dans la technique d'impression 3 D.

- Mener des travaux de recherche sur les adjuvants et additifs, permettant l'amélioration des propriétés physico-mécaniques des matériaux d'impression.

- Élargir le champ d'application de cette technique dans le secteur de la construction, notamment dans les phases de réalisation des éléments non structuraux, tels les murs de séparation.

- Le développement d'une recherche appliquée axée sur la technique d'impression 3 D, et les matériaux susceptibles de pallier les problèmes techniques rencontrer.

- Une réflexion à long terme sur le volet formation en relation avec cette nouvelle technique, afin de mieux accompagner l'utilisation de cette technique dans le secteur de la construction.

Références bibliographiques

[1] H ULL CW, "Appareils de production d'objets tridimensionnels parstéréolithographie", Brevets Google, 1986.

[2] https://www.fabulous.com.co/, site consulté le 19/09/2020. [En ligne]

[3] http://www.tunisieindustrie.nat.tn/fr/download/cepi/notes/Impression-3D.pdf/, site consulté le 20/09/2020. [En ligne]

[4] ASTM International, 2013, p. 2.

[5] https://www.sculpteo.com/fr/impression-3d/technologies-dimpression-3d/, site consulté le 20/09/2020. [En ligne]

[6] http://www.primante3d.com/materiaux/, Site consulté le 21/09/20. [En ligne]

[7] https://www.3dnatives.com/materiaux-impression-3d-ceramiques-bois/, Site consulté le 21/09/2020. [En ligne]

[8] norme ISO, 17296-2:2015.

[9] https://all3dp.com/fr/1/imprimante-3d-maison-construction/, Site consulté le 21/09/2020. [En ligne]

[10] http://www.chantiersdefrance.fr/marches/materiaux-deversoir-beton-imprime-3d/, Site consulté le 21/09/2020. [En ligne]

[11] https://www.fabulous.com.co/blog/vivre-sur-mars-dans-un-habitat-en-impression-3d-avec-le-projet-francais-sfero/, Site consulté le 21/09/2020. [En ligne]

[12] DEVELOPMENTS OF 3D CONCRETE PRINTING PROCESS par Yeşim Tarhan et Remzi Şahin, de l'université ATATURK.

[13] Formulation et caractérisation chimique et rhéologique des mortiers imprimables en 3D à base de mélanges de ciments portland et sulfoalumineux, D'après Noura KHALIL.

[14] Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., and Salet, T. (2016) 'Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing', Virtual and Physical Prototyping. Taylor & Francis, 11(3), pp. 209–225.

[15] Wolfs, R. J. (2015) '3D PRINTING OF CONCRETE STRUCTURES GRADUATION THESIS R.J.M. Wolfs', Thesis of Eindhoven Univaersity of Technology.

[16] Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N. and Hamzeh, F. (2015) '3D Concrete Printing: Machine and Mix Design', International Journal of Civil Engineering and Technology, 6(April), pp. 14–22.

[17] Khoshnevis, B. (2004) 'Automated construction by contour crafting – Related robotics and information technologies', Automation in Construction, 13(1), pp. 5–19.

[18] Lim, S., Buswell, R., Le, T., Wackrow, R., Austin, S., Gibb, A. and Thorpe, T. (2012) 'Developments in construction-scale additive manufacturing processes', Automation in Construction, 21(1), pp. 262–268.

[19] Johnston, D. (2008) 'Design and construction of concrete formwork', Concrete construction engineering handbook. Edited by N. E. G. New Jersey, USA: Boca Raton: CRC Press.

[20] Gosselin, C. et al. (2016) 'Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders', Materials and Design, 100, pp. 102–109.

[21] Wu, P., Wang, J. and Wang, X. (2016) 'A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry', Automation in Construction. Elsevier B.V., 68, pp. 21–31.

[22] Panda, B. and Tan, M. J. (2018) 'Experimental study on mix proportion and fresh properties of fl y ash based geopolymer for 3D concrete printing', Ceramics International, 44(9), pp. 10258–10265.

[23] Zhang, Q., Sharma, G., Wong, J. P., Davis, A. Y., Black, M. S., Biswas, P., & Weber, R. J. (2018). Investigating particle emissions and aerosol dynamics from a consumer fused deposition modeling 3D printer with a lognormal moment aerosol model. Aerosol Science and Technology, 52(10), 1099-1111

[24] https://d-shape.com/houses/ [En ligne]

[25] TRAN, Bao. 3D printer. U.S. Patent No 9,968,437, 15 mai 2018.

[26] Marchment, T., & Sanjayan, J. (2018, September). Method of enhancing interlayer bond strength in 3D concrete printing. In RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (pp. 148-156). Springer, Cham.

[27] Bong, S. H., Nematollahi, B., Nazari, A., Xia, M., & Sanjayan, J. G. (2018, September). Fresh and hardened properties of 3D printable geopolymer cured in ambient temperature. In RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (pp. 3-11). Springer, Cham.

[28]https://3dprinthuset.dk/wp-content/uploads/2018/05/gantry-versus-robot-arm-3d-construction-printers.pdf/, Site consulté le 05/11/2020. [En ligne]

[29] Karthick Manikandan et al, Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing, Manufacturing Letters 24 (2020) 33–37.

[30] Kruger, PJ, van den Heever, M., Cho, S., Zeranka, S., van Zijl, GPAG 2019. Béton imprimable 3D haute performance amélioré avec des nanomatériaux. Matériaux, systèmes et structures durables (SMSS) - Nouvelle génération de matériaux de construction, RILEM S.

[31] Kruger, PJ, van Zijl, GPAG, Cho, S., Zeranka, S. 2018. Approche multi-physique pour une meilleure thixotropie des matériaux à base de ciment pour 3DPC. Proceedings 3DCP, 26-28 novembre 2018, Melbourne, Australie.

[32] van Zijl, GPAG, Kruger, PJ, Cho, S., Zeranka, S. 2018. Impression 3D de béton de fibre polymère. In: Proceedings of the International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference, 23-26 octobre 2018, Cape Town, Afrique du Sud, p. 5-14.

[33] Paul, SC, Van Zijl, GPAG, Tan, MJ, Gibson, I. 2018. Un examen des systèmes d'impression 3D du béton imprimant du béton - État actuel et perspectives de recherche futures. Journal de prototypage rapide, 24/4 (2018) 784-798.

[34] Björn, A., de La Monja, PS, Karlsson, A., Ejlertsson, J. & Svensson, BH 2012. Caractérisation rhéologique, biogaz. S. Kumar (éd.). InTech.

[35] Kruger, PJ, van Zijl, GPAG, Zeranka, S. 2019. Impression de construction 3D: Un modèle analytique de limite inférieure pour la quantification des performances de constructibilité. Automatisation dans la construction. 106 (octobre 2019) 102904, 14 pp.

[36] Weng, Y., Li, M., Tan, MJ, Qian, S. 2018. Concevoir des matériaux en béton d'impression 3D via Théorie de Fuller Thompson, Construction et matériaux de construction, 163: 600–610.

[37] Nerella, VN, Krause, M., Näther, M., Mechtcherine, V. 2016. Étude de l'imprimabilité du béton frais pour la technologie d'impression 3D sur site du béton sans coffrage (CONPrint3D), en cours pour la 25e conférence sur la rhéologie des matériaux de constru.

[38] Le, T., Austin, S., Buswell, S., Gibb, G., Thorpe, A. 2012. Propriétés durcies de hautebéton d'impression de performance. Recherche sur le ciment et le béton. 42: 558–566.

[39] Fuller, WB, Thompson, SE 1907. Les lois du dosage du béton, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 57: 67–143, [En ligne], Disponible: archives. org / détails / transactionsofam59amer.

[40] Roussel, N. 2006. Un modèle de thixotropie pour les bétons fluides frais: théorie, validation et applications, Cement and Concrete Research, 36 (2006) 1797–1806.

[41] Russell, HG 1999. ACI définit le béton haut performance, Concrete International, 21: 56-57.

[42] Bester, FA, van den Heever, M., Kruger, PJ, van Zijl, GPAG 2019. Papier ID 395Structures de référence pour l'impression 3D du béton. Symposium fib Cracovie, Pologne, 27 29 mai 2019.

[43] Comparative economic, environmental and productivity assessment ofa concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach.

[44] Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., Hague, R., 2016. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. Technol. Forecast. Soc. Change 102, 193e201.

[45] ISO14040, 2006. Environmental Management: Life Cycle Assessment-dPrinciplesand Frameworkment. International Standards Organization, Geneva,Switzerland, p. 23.

[46] Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G., 2009. Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA. Construct. Build. Mater.23,28-39.

[47] Pachauri, R.K., Reisinger, A., 2007. IPCC Fourth Assessment Report. IPCC, Geneva, 2007.

[48] Bribian, I.Z., Capilla, A.V., Uson, A.A., 2011. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. Build. Environ. 46, 1133e1140.

[49] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A., Ventura, A., 2010b. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. Resour. Conserv. Recycl. 54, 1231e1240.

[50] Prusinski, J.R., Marceau, M.L., VanGeem, M.G., 2004. Life Cycle Inventory of Slag Cement Concrete, Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. American Concrete Institute Farmington Hills.

[51] Ecoinvent, 2014. The Life Cycle Inventory Data. Swiss Centre for Life Cycle Inventories,Duebendorf, Switzerland.

[52] IDEMAT, 2001. In: Technology, D.U.o. (Ed.), Life Cycle Inventory Database.

[53] ETH-ESU, 1996. Okoinventare von Energiesystemen. ESU Group, ETH Technica University of Zürich.

[54] Ruffo, M., Hague, R., 2007. Cost estimation for rapid manufacturing'simultaneous Manufact. 221, 1585e1591. production of mixed components using laser sintering. Proc. IME B J. Eng.

[55] Wu, P., Low, S.P., Jin, X., 2013. Identification of non-value adding (NVA) activities in precast concrete installation sites to achieve low-carbon installation. Resour.Conserv. Recycl. 81, 60e70.

[56] Xia, M., Sanjayan, J., 2016. Method of formulating geopolymer for 3D printing forconstruction applications. Mater. Des. 110, 382e390.

[57] Atzeni, E., Salmi, A., 2012. Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 62, 1147e1155.

[58] Di Angelo, L., Di Stefano, P., 2011. A neural network-based build time estimator for layer manufactured objects. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 57, 215e224.

[59] Attar, A., Gupta, A., Desai, D., 2012. A study of various factors affecting labourproductivity and methods to improve it. IOSR J. Mech. Civ. Eng. 1, 11e14.

[60] Kayali, O., 2008. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete.Construct. Build. Mater. 22, 2393e2399.