

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Potentialités de l'impression 3D pour la rénovation du patrimoine en béton

Auteur : Collignon, Théo

Promoteur(s) : de Boissieu, Aurélie; Courard, Luc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23294>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège
Faculté des sciences appliquées

POTENTIALITÉS DE L'IMPRESSION 3D POUR LA RÉNOVATION DU PATRIMOINE EN BÉTON

COLLIGNON Théo

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :
Ingénieur Civil Architecte

Co-promoteurs :
COURARD Luc
DE BOISSIEU Aurélie

Année académique 2024-2025

Remerciements

Tout d’abord, je souhaite remercier ma promotrice, Madame de Boissieu, et mon promoteur, Monsieur Courard, pour leur encadrement, leur disponibilité et leurs conseils tout au long de la réalisation de mon travail de fin d’études. Leur expertise a été pour moi d’une grande aide et ils ont toujours été présents pour répondre à mes questions et me guider. Je les remercie sincèrement pour l’intérêt qu’ils ont porté à mon travail.

Je tiens également à remercier Madame Muy et Monsieur Minh Phuong, qui m’ont accompagné et aidé dans l’utilisation de l’imprimante 3D béton. Ils m’ont apporté des suggestions dans la réalisation de mes essais et des remarques sur les aspects techniques de mon travail.

Je souhaite également remercier Romain Libert et Amaury Daras pour leur aide précieuse au sein du laboratoire de béton, où ils m’ont accompagné lors des différentes étapes pratiques de mon travail.

Mes remerciements vont également à l’équipe du Fab52, Antoine Desiron, Antonio Martinez et Mathieu Torfs, pour m’avoir aidé et conseillé dans les parties pratiques de mon TFE, ainsi que pour m’avoir permis d’utiliser le matériel de scan et d’impression. Merci à eux pour le temps et l’accompagnement qu’ils m’ont consacrés tout au long de la réalisation de mon travail.

De même, je tiens à remercier Xavier Garnavault pour ses conseils sur l’impression béton, ainsi que sur les bonnes pratiques pour la réalisation de G-code et d’échantillons béton. Son expérience dans le domaine m’a été d’une aide précieuse.

Je remercie également Monsieur Attia et Monsieur Paquet, membres de mon jury, pour le temps qu’ils ont consacré à la lecture et à l’évaluation de mon travail.

Enfin, j’aimerais remercier ma famille, ainsi que mes amis, avec qui j’ai partagé ces cinq années d’études, pour leur soutien et leur solidarité.

L’intelligence artificielle a été utilisée comme outil d’assistance à la correction orthographique et à l’amélioration de la clarté du texte. L’ensemble du travail de recherche et de rédaction demeure cependant entièrement personnel.

Résumé

Le patrimoine en béton du XX^e siècle présente souvent des formes complexes et ornementées. Aujourd’hui, ces structures subissent des dégradations qui nécessitent des restaurations spécifiques. Les méthodes traditionnelles s’avèrent souvent coûteuses et complexes pour reproduire fidèlement ces éléments.

Ce travail explore le potentiel de l’impression 3D, en béton et en polymère, comme alternative à la rénovation de ce patrimoine. La méthodologie adoptée combine la numérisation 3D d’éléments dégradés (utilisant la photogrammétrie, le LiDAR et le scanner laser), la modélisation 3D des parties manquantes, et une approche expérimentale comparant deux techniques de fabrication : l’impression en béton et le moulage à l’aide de coques imprimées en polymère.

Des cas d’étude concrets, un chapiteau de colonne et la main d’une statue, ont servi de base à cette expérimentation. Les résultats mettent en évidence les avantages et limites de chaque méthode de numérisation en termes de précision et d’accessibilité. La comparaison des techniques de fabrication révèle que le moulage via impression polymère offre une meilleure qualité de surface et une capacité supérieure à gérer les formes complexes et les porte-à-faux, au prix d’un temps d’impression du moule plus long. L’impression béton, bien que rapide, est limitée par la taille des cordons et les contraintes liées à la gestion d’une pompe à débit continu, nécessitant le développement d’un script de post-traitement du G-code.

Ce travail démontre que l’impression 3D, particulièrement via la fabrication de moules polymères, présente un potentiel significatif pour la restauration d’éléments patrimoniaux en béton, ouvrant de nouvelles perspectives pour la reproduction de géométries complexes tout en soulevant des questions sur l’intégration esthétique et la maîtrise technique requise.

Mots-clés : Impression 3D béton, Impression 3D polymère, Restauration patrimoine, Numérisation 3D, Modélisation 3D, Béton du XX^e siècle.

Abstract

Twentieth-century concrete heritage often features complex and ornate forms. Today, these structures suffer from degradation requiring specific restoration. Traditional methods often prove costly and complex for faithfully reproducing these elements.

This work explores the potential of 3D printing, in both concrete and polymer, as an alternative for renovating this heritage. The adopted methodology combines 3D scanning of degraded elements (using photogrammetry, LiDAR, and laser scanning), 3D modeling of missing parts, and an experimental approach comparing two manufacturing techniques : direct concrete printing and molding using polymer-printed shells.

Concrete case studies, a column capital and a statue's hand, served as the basis for this experimentation. The results highlight the advantages and limitations of each scanning method in terms of precision and accessibility. The comparison of manufacturing techniques reveals that molding via polymer printing offers better surface quality and a superior ability to manage complex shapes and overhangs, at the cost of longer mold printing time. Direct concrete printing, although rapid, is limited by bead size and the constraints of managing a continuous flow pump, necessitating the development of a G-code post-processing script.

This work demonstrates that 3D printing, particularly through the fabrication of polymer molds, presents significant potential for the restoration of concrete heritage elements, opening new perspectives for reproducing complex geometries while raising questions about aesthetic integration and the required technical mastery.

Keywords : 3D Concrete Printing, Polymer 3D Printing, Heritage Restoration, 3D Scanning, 3D Modeling, 20th Century Concrete.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
1 Introduction	1
2 Méthodologie	4
3 État de l'art	7
3.1 L'impression 3D béton 3DCP	7
3.1.1 Définition	7
3.1.2 Historique	7
3.1.3 Principes et technologies	8
3.1.4 Propriétés du mix imprimable	10
3.1.5 Applications possibles	13
3.1.6 Avantages et limites du procédé	14
3.2 La restauration du patrimoine en béton	18
3.2.1 L'importance du patrimoine béton	18
3.2.2 Durabilité et pathologies types du béton	19
3.2.3 Approches et interventions de restauration	21
3.3 Recherches sur la restauration à l'aide de l'impression 3D béton et polymère	22
3.4 Numérisation 3D	24
3.4.1 Photogrammétrie	24
3.4.2 Numérisation Lidar 3D	24
3.4.3 Numérisation Laser 3D	25
4 Recensement de monuments en béton du XX^e siècle aux environs de Liège	26
4.1 Méthodologie de la collecte de données	26
4.2 Listing des monuments	26
4.3 Choix de cas d'étude	29
4.3.1 Cas du laboratoire de Thermodynamique de l'ULiège	29
4.3.2 Statue de la Dame blanche du Mémorial Walthère Dewé	30
5 Approche expérimentale et résultats obtenus	32
5.1 Dispositif et protocole d'impression 3D	32
5.1.1 Matériel et configuration	32
5.1.2 Matériaux et essais préliminaires	36
5.2 Numérisation 3D des éléments	43
5.3 Modélisation 3D des éléments	55
5.4 Moulage d'échantillons en béton	64
5.5 Impression 3D d'échantillons en béton	74
6 Comparaisons des résultats et discussions	86
6.1 Comparaison des différentes méthodes de numérisation 3D photogrammétrique - Li- DAR - Laser	86

6.2	Comparaison élément imprimé - élément moulé	89
7	Conclusions et perspectives	96
8	Bibliographie	98
9	Annexes	102
9.1	Script Python de post-traitement de G-Code pour l'impression 3D béton continue . .	102
9.2	Problèmes survenus durant l'utilisation de l'imprimante	105

Table des figures

1	Méthodologie générale	4
2	Méthode du Concrete Printing	8
3	Méthode du Contour Crafting	9
4	Méthode du D-Shape	10
5	Comparaison de la résistance à la compression entre un élément imprimé et un élément coulé (Panda et al., 2018)	12
6	Le Radiolaria Pavilion & la maison Ferreri (Rollakanti et al., 2022)	13
7	Maison Winsun, Chine (Panda et al., 2018)	14
8	Pont cyclable imprimé en 3D, Gemert (Baigarina et al., 2023)	14
9	Gravure du dôme de 43 mètres du Panthéon	18
10	Hall du centenaire (Breslau, Pologne, 1912) (Simonnet., 2005)	18
11	Désagrégation du béton (Jesus et al., 2023)	20
12	Fissuration du béton (Jesus et al., 2023)	20
13	Béton carbonaté - église St Vincent, Liège	20
14	Pied de colonne imprimé en béton (Xu et al., 2017)	23
15	Patch en mortier moulé (Yeon et al., 2018)	23
16	Principe de la photogrammétrie : multiples photos d'un objet sous différents angles.	24
17	Lidar sur les iPad et iPhone Pro (Abbas & Abed, 2024)	25
18	Scanner Laser FreeScan UE Pro	25
19	Ordinateur lié au scanner	25
20	Institut Gramme	28
21	La passerelle Mativa	28
22	Église Saints Pierre et Paul	29
23	Église Sainte-Vierge Marie	29
24	Laboratoire centre de thermodynamique de l'ULiège	31
25	Statue de la Dame blanche	31
26	Imprimante béton StoneFlower	33
27	Schéma d'une imprimante 3D 3 axes (Ma et al., 2018)	33
28	Buse d'impression StoneFlower	34
29	Mélangeur à l'intérieur de la buse	34
30	Vis hélicoïdale en acier	34
31	Stator de la pompe	34
32	Pompe mobile Powermat PM-AGT-3000M	35
33	Panneau de contrôle	35
34	Test première impression	36
35	Hauteur de couche 1er test	36
36	Table à secousses	37
37	Mesure du diamètre d'étalement	37
38	Nouveaux Nozzles imprimés 20/15/10 mm	38
39	Coupe du nouveau nozzle de 20 mm	38
40	Calculateur de débit conseillé par le fabricant	39
41	Test d'impression de cordon 20/10	40
42	Test d'impression nozzle 34 mm	42
43	Test d'impression nozzle 20 mm	42
44	Élément de test en béton, Eglise Saint Vincent	44
45	Placement de l'élément	44

46	Liste des photos	44
47	Élément de test dans Blender 4.4	45
48	Élément isolé du contexte	46
49	Surface manquante de l'élément	46
50	Interface de Kiri Engine	47
51	Élément isolé, scanner par Lidar	47
52	Modèle obtenu à l'aide d'un scan laser	48
53	Colonne dégradée	48
54	Colonne décapée	48
55	Scan photogrammétrique du chapiteau en .fbx	49
56	Maillage isolé de la colonne	49
57	Scan lidar du coin gauche du chapiteau en .obj	50
58	Scan lidar du coin droit du chapiteau en .obj	50
59	Scan lidar du chapiteau	50
60	Scan laser du chapiteau	51
61	Main de la statue de la Dame blanche	51
62	Séparation du maillage	52
63	Scan photogrammétrique statue	52
64	Précision du scan photogrammétrique sur les doigts inférieurs	52
65	Précision du scan lidar sur le pouce	53
66	Précision du scan lidar sur l'auriculaire et l'annulaire	53
67	Séparation du maillage	53
68	Scan lidar statue	53
69	Surface extérieure du maillage	56
70	Maillage fermé après les étapes de modélisation	56
71	Mesh et triangle visible de la main	57
72	Différence d'opérations d'offset	58
73	Parallélépipède entourant le maillage	58
74	Création de la coque avec l'outil "offset"	58
75	Modèle du moule de la main	59
76	Orientation du haut de colonne	59
77	Séparation du maillage	60
78	Volume de la dégradation et de l'élément de base	61
79	Modèle de la réparation du haut de colonne	62
80	Partie du chapiteau choisi	62
81	Parallélépipède entourant le maillage	62
82	Création de la coque avec l'outil "offset"	63
83	Modèle du moule du chapiteau	63
84	Cube de test d'élément moulé	64
85	Modèle du cube de test	64
86	Coque du moule de test	64
87	Huilage et fixation de la coque	64
88	Démoulage de l'échantillon test	65
89	Rendu de l'échantillon test	65
90	Malaxeur avec le mix de mortier	66
91	Impression en une seule fois de la coque	67
92	Analyse de dépouille de la main	68
93	Découpe numéro 5 du moule	68

94	Trou de goujon et goujon	68
95	Impression de 3 éléments du moule	69
96	Orientation d'impression & supports	69
97	Assemblage de la coque	69
98	Jonction de la coque	69
99	Moulage du mortier dans le moule	70
100	Poussée du mortier sur les jonctions	70
101	Démoulage des premières parties de la coque	71
102	Démoulage de la dernière partie & résultat final	71
103	Vue avant de la main moulée	71
104	Vue arrière de la main moulée	71
105	Démoulage théorique de la coque	72
106	Coque subdivisée en 7 parties	72
107	Caisson de maintien pour la coque	72
108	Moulage du mortier au sein de la coque	72
109	Élément de colonne démoulé	72
110	Ergot bloqué dans le mortier	72
111	Élément de restauration du chapiteau placé sur l'élément dégradé	73
112	Exemple de cordon sans modification de G-Code	76
113	Exemple de cordon avec modification de G-Code	77
114	Slicing de la main de la Dame blanche	78
115	Slicing du chapiteau de colonne	78
116	Premier test 80 mm/s & 600 rpm	79
117	Deuxième test 80 mm/s & 500 rpm	79
118	Troisième test 120 mm/s & 500 rpm	80
119	Quatrième test 120 mm/s & 400 rpm	80
120	Ancien et nouveau mix d'argile	81
121	Test d'étalement du second mix	81
122	Première couche d'impression du chapiteau	82
123	Fin d'impression du chapiteau	82
124	Impression finale en argile du coin de chapiteau	83
125	Première couche d'impression de la main	83
126	Fin d'impression de la main	83
127	Impression finale en argile de la main de la statue	84
128	Vue avant du coin de chapiteau en mortier	85
129	Vue de côté du coin de chapiteau en mortier	85
130	Texture de surface en impression béton	91
131	Texture de surface en moule polymère	91
132	Joint à double lèvre	105
133	Joint mal placé	105
134	Joint dans le bon sens	105
135	Écoulement avec le joint correctement mis	105
136	Écoulement avec le joint mal placé	105
137	Roulement rouillé	106
138	Pièce de séparation	106
139	Pièce d'accouplement en aluminium	107
140	Lamelle en aluminium	107
141	Vis pointeau et axe modifié	108

142	Nouvel usinage de la pièce d'accouplement	108
-----	---	-----

Liste des tableaux

1	Compositions de mix imprimables (Panda et al., 2018)	11
2	Compositions de mix d'argile	37
3	Compositions de mix béton	38
4	Éléments scannés et nombre de facettes	54
5	Composition du mortier de moulage	65
6	Composition du second mix d'argile	81
7	Synthèse du nombre de facettes pour chaque élément	86
8	Comparatif des différentes méthodes de numérisation 3D utilisées	86
9	Comparatif pour la main de la statue	89
10	Comparatif pour le chapiteau de colonne	90

1 Introduction

Aujourd'hui, de nombreux monuments édifiés au cours du XX^e siècle ont besoin d'être restaurés. Une grande partie de ces bâtiments ont été réalisés en béton armé, un matériau largement employé après la Seconde Guerre mondiale. Il était choisi pour sa résistance, son faible coût, sa rapidité de mise en œuvre et la possibilité qu'il offrait de réaliser de grandes portées et des formes architecturales complexes. Cette période a vu naître différents styles architecturaux utilisant le béton comme matériau phare, tels que le modernisme et le brutalisme, qui ont marqué durablement le paysage urbain et culturel belge. Encore aujourd'hui, le béton est le deuxième matériau de construction le plus utilisé au monde après l'eau, avec près de deux milliards de tonnes coulées chaque année (Baigarina et al., 2023).

Après un siècle d'existence, bon nombre de ces bâtiments montrent des signes de vieillissement et nécessitent des travaux de restauration et de rénovation. Leur conservation constitue donc un enjeu patrimonial majeur. De nombreuses structures présentent de riches ornements et des formes géométriques complexes, souvent difficiles à entretenir, qui, une fois dégradées, exigent l'intervention de main-d'œuvre qualifiée pour être restaurées (Tiry-Ono et al., 2023). Si la préservation de leur valeur historique est essentielle, les méthodes traditionnelles de restauration s'avèrent souvent complexes à mettre en œuvre. Ce travail de fin d'études explore une approche innovante pour la restauration de ce patrimoine, en examinant le potentiel de l'impression 3D béton pour sa rénovation.

L'impression 3D béton est un sujet devenu populaire dans le domaine de la construction au cours des vingt dernières années. Cette technique de mise en œuvre du béton, encore relativement récente, suscite un intérêt croissant dans la recherche et dans le secteur professionnel. L'impression 3D béton a aujourd'hui dépassé le stade expérimental et commence à être utilisée dans des projets de construction. Cela n'empêche pas l'émergence, chaque année, de nombreuses innovations et avancées techniques (Jesus et al., 2023).

Il s'agit d'une méthode de fabrication additive qui consiste à superposer des couches successives de béton afin de permettre la formation d'une coque d'une forme souhaitée. Le mélange (ou "mix") doit posséder des propriétés rhéologiques précises, permettant au matériau de conserver sa forme sans affaissement jusqu'à sa prise (Panda et al., 2018). Cette technique se distingue par la flexibilité et la précision des formes qu'elle permet d'imprimer. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux techniques de construction traditionnelles, notamment en termes de temps de réalisation, de réduction des déchets et de réduction potentielle des coûts de fabrication. La possibilité de se passer de coffrage pour réaliser des géométries complexes constitue également l'une des principales raisons pour lesquelles l'impression 3D béton est de plus en plus utilisée (Kamhawi & Meibodi, 2024).

L'impression 3D polymère, ou fabrication additive de plastiques, est une technologie qui a une plus grande maturité. Cette méthode a révolutionné de nombreux secteurs grâce à sa capacité à produire des pièces en plastique de haute précision à un coût relativement faible. Ces avantages en font un outil utile pour la conception de pièces complexes dans des domaines variés tels que l'aérospatiale, la médecine ou l'automobile (Agócs et al., 2024). Le succès et l'évolution constante de l'impression 3D polymère ont d'ailleurs servi de modèle et d'inspiration pour le développement et l'adoption de l'impression 3D dans d'autres matériaux, y compris le béton (Jesus et al., 2023).

Mon étude porte sur la restauration d'édifices culturels en béton, aujourd'hui dégradés par le temps, et l'utilisation potentielle de l'impression 3D polymère et béton dans ce processus. Je propose deux approches : l'intégration directe d'éléments imprimés en béton pour la restauration de l'édifice, ou

l'utilisation de moules en polymère imprimés en 3D, destinés au coulage des éléments à restaurer. L'objectif est d'évaluer si l'impression 3D offre des perspectives prometteuses dans le domaine de la restauration et quelle approche s'avère la plus appropriée dans les différents cas de figure.

La question de recherche qui guide ce travail est donc la suivante : "L'impression 3D peut-elle apporter des potentialités dans la rénovation du patrimoine béton?". C'est un sujet encore très peu exploré aujourd'hui, qui ouvre plusieurs axes de recherche. L'impression 3D béton et polymère apparaissent comme des technologies innovantes qui pourraient offrir de nouvelles solutions en matière de restauration et de reproduction d'éléments architecturaux.

Afin d'y répondre, plusieurs sous-questions peuvent être formulées selon deux thèmes :

1. L'application concrète dans le domaine de la rénovation :

- L'impression 3D béton et polymère peut-elle faciliter la reproduction d'éléments architecturaux complexes (ornements, façades, panneaux décoratifs) ?

La restauration des bâtiments en béton du XX^e siècle implique souvent la reproduction fidèle d'éléments architecturaux spécifiques, tels que des ornements, des façades sculptées ou des panneaux décoratifs. Ces éléments, souvent réalisés avec des techniques artisanales ou des coffrages complexes, pourraient bénéficier des avancées de l'impression 3D, qui permet une fabrication plus rapide et précise. L'étude de cas concrets et d'essais pourrait apporter des éléments de réponse quant à la faisabilité technique et aux bénéfices potentiels de cette approche.

2. Les enjeux patrimoniaux :

- Quelles sont les capacités de l'impression 3D béton à s'intégrer, tant sur le plan technique qu'esthétique, aux bétons historiques du XX^e siècle et aux ouvrages existants ?

Il est essentiel de s'interroger sur la compatibilité de cette technologie avec les exigences de conservation et de mise en valeur du bâti existant. Les bétons utilisés au cours du XX^e siècle ont évolué en fonction des techniques et des matériaux disponibles à chaque époque. Ainsi, leur composition chimique, leur texture et leur vieillissement naturel varient d'un bâtiment à l'autre. L'impression 3D est-elle capable de reproduire ces caractéristiques et de garantir une continuité esthétique avec le bâti ancien ? L'intervention doit rester réversible et identifiable, afin de respecter l'intégrité et l'histoire de l'ouvrage.

Ce travail de fin d'études est structuré en trois parties. La première consiste en une revue de littérature qui traite des thématiques suivantes : l'impression 3D béton (3DCP), ses principes, ses technologies, les applications possibles dans le domaine de la construction, ainsi que les avantages et les limites de cette méthode. Elle abordera également l'impression 3D polymère (FDM), en détaillant ses principes, ses avantages et ses limites. Cette section présentera également l'histoire du béton, avant de se concentrer sur l'importance du patrimoine en béton du XX^e siècle et les pathologies typiques affectant ce matériau. Ensuite, les approches de restauration actuelles seront discutées. De plus, l'accent sera mis sur des exemples d'utilisation de l'impression 3D béton et polymère pour la réparation de bâtiments en béton. Enfin, une brève revue sera consacrée aux différentes technologies de numérisation 3D, ce procédé étant utilisé dans la méthodologie de restauration.

La deuxième partie de ce travail sera consacrée au recensement des monuments en béton du XX^e siècle, aux environs de Liège, inscrits sur la liste du patrimoine belge. Elle présentera la méthodologie

de collecte des données et proposera un inventaire des bâtiments étudiés. Une attention particulière sera portée au choix des cas d'étude, en s'appuyant sur des exemples concrets de restauration, tels que le laboratoire de Thermodynamique et la statue de la Dame blanche du mémorial Walthère Dewé. Ces exemples permettront d'illustrer la pertinence de l'impression 3D dans la restauration du patrimoine et d'en évaluer l'efficacité en comparaison avec les méthodes traditionnelles.

Enfin, la troisième partie présente différents essais réalisés à partir des deux méthodes de fabrication additive. Des échantillons imprimés et moulés seront comparés afin d'évaluer les différences de qualité entre les deux méthodes. Cette section inclura aussi une discussion des résultats obtenus, en vue de déterminer les potentialités et les limites actuelles de l'impression 3D dans le cadre de la restauration patrimoniale de monuments en béton.

2 Méthodologie

La section suivante décrit la méthodologie que j'ai suivie au cours de mon travail de recherche. Un schéma expliquant les différentes étapes par lesquelles je suis passé pour réaliser ce travail est présenté à la Figure 1.

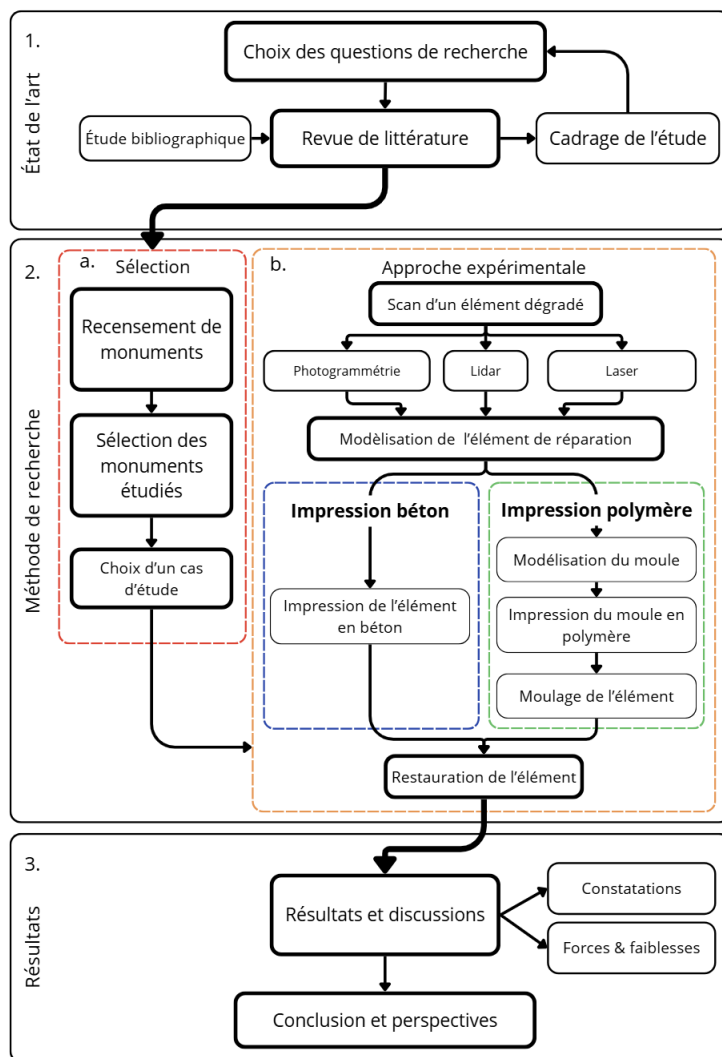


FIGURE 1 – Méthodologie générale

Voici une explication détaillée des différentes étapes présentées dans ce schéma :

1. Le travail théorique débute par un état de l'art de la littérature existante. Cette revue se concentre sur plusieurs thématiques : l'impression 3D (et plus particulièrement l'impression béton et polymère), le patrimoine en béton du XX^e siècle, ainsi que les méthodes de numérisation 3D les plus courantes.

Les informations récoltées lors de cette revue de littérature ont permis de cadrer l'étude et d'orienter les questions de recherche.

Cette étape du travail de fin d'études a également permis de regrouper de nombreux docu-

ments utiles pour la suite des travaux et de constituer une bibliographie solide sur les sujets abordés.

2. La partie suivante est consacrée à la méthode de recherche, subdivisée en deux sections : une première, plus théorique, qui consiste en un recensement des monuments en béton aux alentours de Liège, et une seconde, pratique, où deux méthodes de restauration d'un élément en béton sont expérimentées.

- a. Dans cette première section, la démarche débute par un recensement des monuments réalisés en béton, en s'appuyant sur l'Inventaire Régional du Patrimoine Culturel Immobilier, accessible en ligne. Celui-ci référence les biens classés et inventoriés, et permet de les filtrer selon des critères précis, en l'occurrence le mot-clé "béton".

Une fois ces monuments répertoriés, une sélection a été opérée pour retenir ceux dont les façades présentent des dégradations importantes. Une attention particulière a été portée aux éléments dégradés présentant des géométries complexes, car ils sont considérés comme les plus pertinents pour une restauration à l'aide de l'impression 3D béton.

Plusieurs cas d'étude ont ensuite été sélectionnés et analysés plus en détail lors de visites sur site. Ces visites ont compris la prise de photographies, l'établissement d'une description détaillée du monument et la réalisation d'un diagnostic préliminaire des pathologies l'affectant.

- b. La seconde section, consacrée à l'approche expérimentale, s'est efforcée de conserver une logique similaire à celle adoptée dans l'état de l'art, notamment dans l'utilisation successive des différents scanners sur un même élément. La même démarche a été adoptée pour l'impression : d'abord l'impression béton, suivie de la reproduction du même élément à l'aide d'un moule obtenu par impression polymère.

Le processus a débuté par la numérisation de l'élément dégradé identifié sur le monument choisi lors de l'étape précédente. Cette étape constitue le point de départ du processus de restauration envisagé dans ce travail. Pour ce faire, la numérisation a pu être réalisée de trois manières différentes : par photogrammétrie, à l'aide d'un scanner LiDAR ou d'un scanner laser. Ces trois méthodes produisent des modèles numériques de qualités différentes.

L'étape suivante a consisté à modéliser l'élément manquant. Le modèle numérique issu des différents scans a pu être retravaillé de plusieurs façons afin d'être pleinement exploitable. Ainsi, il a été possible soit de se baser sur la géométrie de l'élément existant pour interpoler et recréer la partie manquante, soit de s'appuyer sur d'anciennes photographies de l'élément avant sa dégradation, ou encore d'exploiter des éléments symétriques ou répétitifs présents sur le monument. Plusieurs opérations de modélisation ont ainsi permis de reconstituer un modèle numérique utilisable pour les phases d'impression.

Deux techniques de restauration sont envisagées :

La première consiste à imprimer directement en béton l'élément manquant à l'échelle 1 : 1 en faisant varier différents paramètres : taux de remplissage, épaisseur des couches, gestion des parties en porte-à-faux, ainsi que d'autres caractéristiques techniques.

La deuxième approche consiste à imprimer un moule en polymère. Elle débute par la

modélisation d'un moule de l'élément manquant, divisé en plusieurs parties pour faciliter le démoulage. Ces parties sont ensuite imprimées en 3D par procédé FDM (Fused Deposition Modeling), puis assemblées pour constituer le moule complet. Enfin, un mortier dont la formulation aura été préalablement définie est coulé dans ce moule pour obtenir l'élément souhaité.

L'élément de réparation est ensuite placé à l'endroit de la dégradation et fixé à l'aide d'un mortier-colle ou d'une colle époxy spécifique pour le béton.

3. Enfin, la dernière partie concerne la présentation des résultats. Elle reprend la structure du point 2.b consacré à l'expérimentation. Cette section débute par une discussion et une comparaison des différentes méthodes de numérisation 3D appliquées à divers éléments en béton. Ensuite, les deux méthodes d'impression (impression directe de l'élément en béton et fabrication via un moule imprimé en polymère) sont comparées. Elle se termine par une conclusion sur l'ensemble du procédé.

3 État de l’art

Cette section se concentre sur l’élaboration d’un état de l’art concernant plusieurs thématiques principales :

- l’impression 3D en béton
- les autres types d’impression (polymère et céramique)
- la restauration du patrimoine béton
- une analyse des travaux déjà réalisés sur la combinaison de ces trois premiers domaines
- les méthodes de numérisation 3D

Ces thématiques permettront d’établir les bases théoriques et le vocabulaire technique nécessaires à la bonne compréhension des étapes de l’approche expérimentale.

3.1 L’impression 3D béton 3DCP

3.1.1 Définition

Au cours des dernières décennies, diverses technologies d’automatisation, telles que l’impression 3D béton (3DCP : 3D Concrete Printing), ont émergé dans le secteur de la construction avec l’objectif d’automatiser les processus constructifs. L’impression 3D béton est une méthode de fabrication qui part d’un modèle numérique pour créer un élément physique. Le procédé consiste à déposer des couches successives de matériau pour former une structure solide, on parle alors de fabrication additive. Un mélange cimentaire spécifique est pompé et extrudé de manière précise par une buse, elle-même guidée par un bras robotique ou une imprimante à portique (Prasad, 2022). Cette méthode est particulièrement adaptée à la réalisation de formes complexes, difficiles à obtenir avec les techniques traditionnelles, et présente des avantages et des limites qui seront détaillés par la suite.

3.1.2 Historique

L’impression 3D a vu le jour dans les années 1980 et s’est rapidement développée au cours des 40 dernières années. Initialement appliquée aux polymères, dont les propriétés se prêtaient bien à ce procédé, cette technologie a trouvé des applications dans une multitude de domaines tels que la médecine, l’automobile et l’aérospatiale (Prasad., 2022). D’abord utilisée pour la fabrication de petits objets, l’évolution des méthodes, des machines et des modèles numériques a permis son intégration dans le secteur de la construction. Ce domaine, initialement basé sur des plans 2D, a progressivement adopté les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) pour la modélisation 3D des bâtiments, créant un terrain favorable à l’impression 3D (Panda et al, 2018). Ces informations numériques peuvent être transmises à une machine sous forme de coordonnées pour chaque point du modèle, ce qui lui permet de le reproduire elle-même, sans intervention humaine. L’impression 3D béton se développe donc au début des années 2000 avec les premières recherches menées par des universités et des instituts spécialisés en construction additive. L’une des premières réalisations notables est celle de l’Université de Loughborough au Royaume-Uni, qui a développé un système d’impression 3D béton dès 2006 (Bos et al., 2016).

Dans les années 2010, plusieurs entreprises et startups, telles que Winsun 3D ou XtreeE 3D, ont commencé à expérimenter l’impression de structures en béton à grande échelle. En 2015, en Chine, les premières maisons imprimées en 3D, réalisées en moins de 24 heures, ont marqué un tournant dans l’adoption de cette technologie (Sesetti et al., 2022).

Depuis, l'évolution de l'impression 3D béton s'est accélérée, portée par l'amélioration des techniques d'impression, des formulations de mélanges imprimables et l'approfondissement des connaissances techniques. De nombreux laboratoires et entreprises investissent désormais dans cette technologie pour répondre aux nouveaux enjeux de construction rapide et durable. L'ensemble de ces recherches contribue à faire progresser cette technologie, qui continue d'évoluer et offre encore de nombreuses perspectives d'amélioration. Ses limites, bien que toujours présentes, sont repoussées d'année en année (Prasad, 2022).

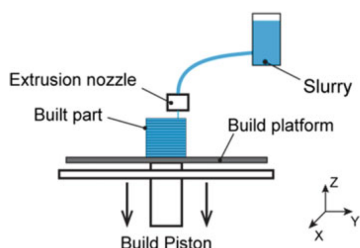
3.1.3 Principes et technologies

Il existe différentes méthodes d'impression 3D béton, qui ont évolué au fil du temps avec l'apparition de nouveaux principes et de technologies innovantes. Celles-ci sont principalement basées soit sur l'extrusion de matière, soit sur la solidification d'un lit de matière poudreuse à l'aide d'un liant (Prasad, 2022).

Impression 3D béton par extrusion (E-3DCP ou Concrete Printing)

L'impression 3D béton par extrusion, ou E-3DCP (Extrusion 3D Concrete Printing), repose sur le dépôt successif de couches d'un mélange cimentaire pour former une structure (Figure 2a). Cette technique est similaire à l'impression FDM (Fused Deposition Modeling) dans son principe, mais au lieu d'un polymère fondu, c'est un béton spécialement formulé qui est extrudé par une buse (ou nozzle en anglais) (Prasad, 2022).

Le processus d'impression est généralement piloté par un bras robotique ou une imprimante à portique (trois axes), ce qui permet une grande flexibilité dans la fabrication des structures. La taille des imprimantes varie en fonction des besoins : certaines sont conçues pour produire de petits échantillons avec une surface d'impression d'environ $0,6 \times 0,6$ mètre, tandis que d'autres, bien plus imposantes, sont capables de réaliser des bâtiments entiers (Panda et al., 2018). La structure 3D imprimée est alors autoportante et présente un aspect nervuré dû à la superposition des couches (Figure 2b). Le mélange imprimable utilisé dans le cas du Concrete Printing est un béton à haute performance, composé de fins agrégats et de fibres de renforcement. Ce type de mélange présente généralement de meilleures propriétés que celui utilisé pour la technique du Contour Crafting, décrite ci-après (Sesetti et al., 2022).



(a) Schéma E-3DCP (Sesetti et al., 2022)



(b) Concrete Printing (Bos et al., 2016)

FIGURE 2 – Méthode du Concrete Printing

Impression 3D de coffrage perdu pour le béton (Contour Crafting CC)

Cette méthode consiste à réaliser un coffrage perdu imprimé en 3D, qui est ensuite rempli de béton. Elle a été développée à l'Université de Southern California par le Dr. Behrokh Khoshnevis au début des années 2000 (Khoshnevis, 2003) ; (Prasad, 2022). Le procédé repose sur l'impression de deux parois verticales à l'aide d'une imprimante 3D béton. Celles-ci sont espacées d'une certaine distance, correspondant à l'épaisseur du futur mur. Un contour fermé est ainsi imprimé afin de créer un moule destiné à accueillir un matériau de remplissage, le plus souvent du béton. Pour éviter que le coffrage imprimé ne cède sous la pression exercée par le béton frais, des renforts peuvent être intégrés afin d'absorber les futures contraintes de traction (Figure 3b). De plus, pour réduire les contraintes internes induites par le remplissage, celui-ci est réalisé par phases : une première couche de béton est coulée, puis, après un temps de séchage (environ une heure), une nouvelle couche est ajoutée, et ainsi de suite jusqu'au remplissage total de la structure (Khoshnevis, 2003). Une truelle peut être utilisée pour lisser les surfaces extérieures du mur (Figure 3a). Celle-ci est directement fixée à la buse d'impression et se déplace en même temps que cette dernière. Cette méthode est principalement utilisée pour la construction de maisons, où les parois principales sont réalisées à l'aide du CC. Elle permet un gain de temps considérable et une réduction des déchets, rendant ainsi la construction plus efficace (Jesus et al., 2023).

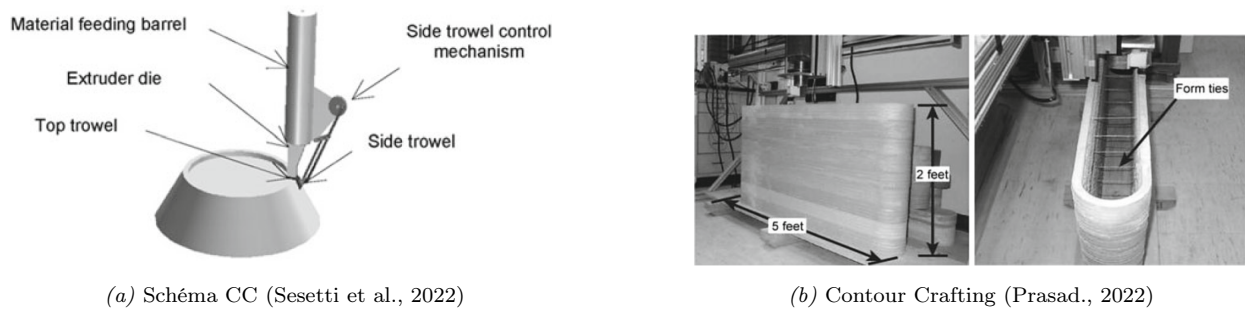


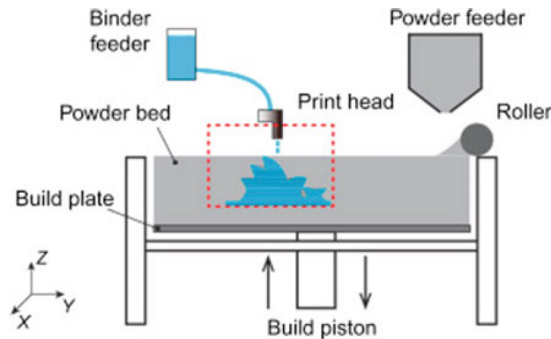
FIGURE 3 – Méthode du Contour Crafting

Impression par projection de liant (D-Shape)

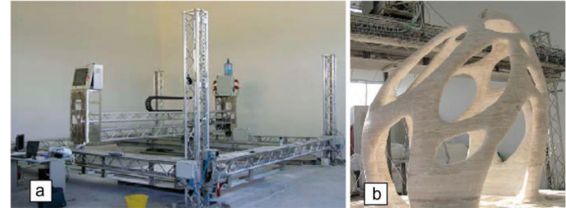
L'impression par projection de liant, aussi appelée D-Shape ou technique à base de poudre (Powder-Based Technique), consiste à projeter sélectivement un liant sur un lit de matériau granulaire (sable ou poudre) pour former des couches solides. Le durcissement se fait de manière localisée, couche après couche. La poudre peut être préalablement combinée avec un activateur (par exemple, un oxyde métallique) pour favoriser la réaction avec le liant fluide appliqué par la tête d'impression. Dans cette méthode, la tête d'impression, équipée d'une rangée de buses, ne se déplace généralement que sur un axe (X ou Y) pour appliquer le liant sur la surface de la poudre. Après chaque couche, une nouvelle épaisseur de poudre est étalée, et le processus est répété. Certaines machines peuvent comporter jusqu'à 300 buses (Prasad, 2022).

Cette méthode permet d'atteindre des formes complexes et organiques Figure 4b, car la contrainte liée aux supports pour les parties imprimées dans le vide est moindre. La poudre non utilisée dans les couches inférieures soutient celles en surface. L'impression se faisant couche par couche, la forme se retrouve ensevelie sous la poudre non utilisée, qui aura permis à la structure de se maintenir

Figure 4a. Tout le matériau qui n'a pas été utilisé, c'est-à-dire qui n'a pas été en contact avec le liant, peut être réutilisé. La poudre est ainsi récupérée et réutilisée telle quelle pour une future impression (Hamidi & Aslani, 2019).



(a) Schéma D-Shape (Sesetti et al., 2022)



(b) D-Shape (Sesetti et al., 2022)

FIGURE 4 – Méthode du D-Shape

3.1.4 Propriétés du mix imprimable

Le mélange (ou "mix") utilisé pour l'impression 3D béton diffère d'un béton traditionnel ; il doit posséder des propriétés spécifiques pour être adapté à ce procédé de mise en œuvre.

On trouve différentes compositions de mélanges dans la littérature scientifique (Panda et al., 2018).

- Les mélanges imprimables sont constitués d'une base de ciment, souvent du CEM I (R) ou du CEM II (R), choisis notamment pour leur rapidité de prise. À ce ciment peuvent être ajoutées des cendres volantes ou des fumées de silice.
- Du sable est ensuite ajouté avec un ratio de 1 à 1,5 par rapport à la quantité de ciment. Celui-ci doit avoir une granulométrie inférieure à 2mm dans la plupart des cas.
- De l'eau est ajoutée au mélange avec des proportions variant entre 0,5 et 0,2 par rapport à la quantité de ciment.
- Des additifs sont utilisés pour atteindre les propriétés spécifiques souhaitées, tels que des superplastifiants ou des activateurs de prise.
- Finalement, différents mélanges expérimentaux peuvent être réalisés en ajoutant des produits plus spécifiques, tels que des fibres ou des matériaux recyclés, comme du sable recyclé.

Compositions de mix imprimables

Panda et al. (2018) proposent la composition de trois mélanges pour l'impression 3D béton. Le premier est développé par l'Université de Caroline du Sud, le deuxième par la TU Dresden et le troisième par l'Université de Loughborough (Tableau 1.)

TABLEAU 1 – Compositions de mix imprimables (Panda et al., 2018)

/	Université de Caroline du sud	TU Dresden	Université de Loughborough
Liant (L)	CEM II : C/L : 1	CEM I : C/L : 0,55 Cendres volantes/L : 0,23 Fumée de silice/L : 0,22	CEM I : C/L : 0,7 Cendres volantes/L : 0,2 Fumée de silice/L : 0,1
Aggregats	sable S/L : 1,105	sable S/L : 1,5897	sable normalisé 0-2 : S/L 1,5
Eau (E)	E/L : 0,505	E/L : 0,23	E/L : 0,26
additif	SP/L : 0,084	SP/L : 0,0128	SP/L : 0,01 Retardateur/L : 0,005

Le mélange imprimable, extrudé à l'état fluide par la buse, doit durcir suffisamment vite pour pouvoir supporter le poids de la couche suivante. Le matériau doit posséder une limite d'élasticité adéquate pour résister à la contrainte induite par son propre poids et celui des couches ultérieures.

De plus, la couche doit pouvoir conserver la forme souhaitée, notamment en termes d'épaisseur et de largeur. Les couches doivent également bien adhérer entre elles, ce qui implique que la prise du béton ne soit pas trop rapide à la sortie de la buse (Sesetti et al., 2022). Il est donc nécessaire d'étudier deux phases du matériau : ses propriétés à l'état fluide (état frais) et celles qu'il présente une fois durci.

Propriétés du mix imprimable à l'état frais

Quatre propriétés clés sont à prendre en compte pour caractériser un mélange d'impression 3D : la pompabilité, l'extrudabilité, la constructibilité et le temps ouvert. Ces critères essentiels permettent de comparer les différents mélanges (Le et al., 2012).

- La **pompabilité** : Le mélange imprimable doit être suffisamment fluide pour être pompé sans difficulté depuis le réservoir jusqu'à la buse. Il ne doit pas contenir d'agrégats trop gros, afin d'éviter qu'ils ne bouchent la pompe ou ne se bloquent dans les tuyaux. Un bon malaxage et un matériau homogène sont donc importants pour éviter tout phénomène de ségrégation (Panda et al., 2018).
- L'**extrudabilité** est la capacité du béton frais à être extrudé sous forme de filament continu et régulier. Si une discontinuité ou un manque de matière se forme pendant l'impression, cela crée un point faible dans l'élément. Pour garantir une bonne extrudabilité sans risque de bouchage, une règle courante stipule que le diamètre des plus gros agrégats ne doit pas dépasser 10 % du diamètre intérieur de la buse (Le et al., 2012).
- La **constructibilité** (ou ouvrabilité au jeune âge) désigne la capacité du mélange à conserver sa forme une fois déposé et à supporter le poids des couches suivantes sans s'affaisser ni se déformer excessivement. Pour évaluer cette propriété, une analyse rhéologique permet de caractériser le comportement du béton (modélisé comme un fluide de Bingham), en mesurant notamment sa contrainte d'écoulement (ou seuil de cisaillement) et sa viscosité plastique. Cela permettra de déterminer si les couches peuvent être superposées sans risque d'effondrement (Le et al., 2012).
- Le **temps ouvert** désigne l'intervalle de temps durant lequel le mélange cimentaire conserve ses propriétés d'extrusion et de constructibilité avant que la prise ne devienne trop importante. Il est crucial que le béton frais reste suffisamment maniable pendant toute la durée de l'impression. Pour les impressions de longue durée, il peut être nécessaire de maintenir une

agitation du mélange dans le réservoir de la pompe pour empêcher une prise prématurée (Le et al., 2012).

L'obtention de ces propriétés passe par un ajustement précis de la formulation du mélange (granulométrie des constituants, type et dosage des adjuvants), suivi d'une optimisation de leur combinaison afin d'obtenir un matériau imprimable de qualité (Panda et al., 2018).

Propriétés du mix imprimable à l'état durci

Concernant les propriétés du mélange une fois durci, l'impression couche par couche engendre une pièce aux propriétés anisotropes. Les interfaces entre les couches influencent les propriétés mécaniques de l'élément, selon que la charge est appliquée perpendiculairement ou parallèlement aux couches. Cette différence par rapport au béton moulé peut être caractérisée à l'aide de tests.

Des essais de compression peuvent ainsi être réalisés dans différentes directions afin de mettre en évidence les variations des propriétés du matériau selon l'orientation des couches.

Des échantillons coupés au sein d'un élément imprimé en 3D peuvent être analysés. Pour établir une comparaison, un échantillon de référence peut être confectionné en coulant le même mélange dans un moule traditionnel lors de l'impression. Cet échantillon permettra des comparaisons directes avec un béton de composition similaire mais mis en œuvre différemment.

Dans l'étude menée par (Panda et al., 2018), des tests sont réalisés sur des échantillons après 28 jours de cure, sur des sections d'impression de 50×50 mm. Cette étude montre que la résistance à la compression des échantillons imprimés en 3D est supérieure à celle de l'échantillon coulé lorsque l'effort est appliqué perpendiculairement aux couches, mais inférieure si l'effort est appliqué parallèlement à celles-ci. Ce résultat s'explique par le fait que l'interface entre les couches constitue une zone de moindre résistance (Figure 5).

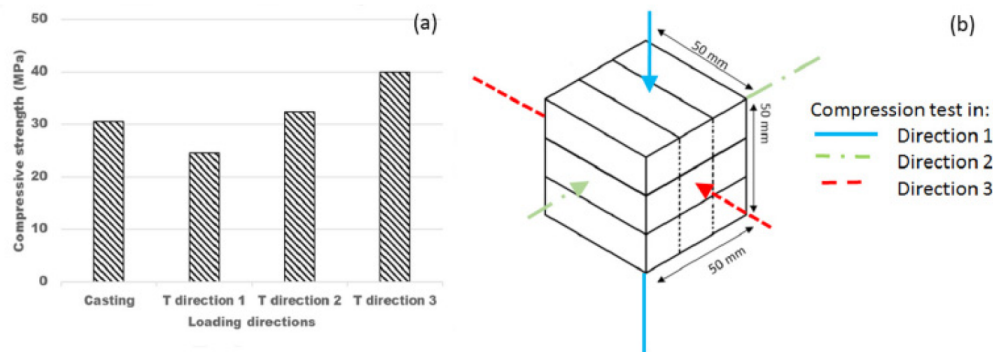


FIGURE 5 – Comparaison de la résistance à la compression entre un élément imprimé et un élément coulé (Panda et al., 2018)

La résistance d'un élément en béton imprimé en 3D peut être influencée par de multiples facteurs, tels que la présence de vides entre les couches, une mauvaise adhérence inter-couches ou une discontinuité dans le dépôt de matière. De nombreux autres paramètres, non directement liés au mélange lui-même, peuvent également affecter ses propriétés à l'état durci : la vitesse d'impression, les conditions ambiantes (température, humidité) pendant l'impression et durant la phase de cure. Tous ces éléments ont un impact sur les propriétés finales de la pièce. Il est très complexe d'obtenir deux fois

exactement le même résultat si l'environnement d'impression n'est pas parfaitement contrôlé. Ces différents paramètres affectent la résistance de la pièce. C'est lors de la phase de conception que l'on pourra intégrer un facteur de sécurité prenant en compte ces paramètres éventuels (Panda et al., 2018).

3.1.5 Applications possibles

Les premières applications de l'impression 3D béton concernaient la fabrication de petits objets, avec des imprimantes de dimensions comprises entre 0,5 et 1 mètre. Celles-ci étaient détenues par des laboratoires de recherche ou des institutions éducatives. Les premières applications étaient donc purement scientifiques et à but expérimental. Elles ont permis de montrer les possibilités qu'offrait l'impression 3D béton.

Des applications à plus grande échelle ont ensuite vu le jour, sous forme de projets pilotes (Bos et al., 2016). Ceux-ci permettent d'étudier le comportement de cette méthode sur des impressions à plus grande échelle et de montrer le champ des possibles. Ce sont donc des entreprises et des universités qui ont réalisé ces projets de démonstration. Certains de ceux-ci, ayant eu un impact sur l'avancée du procédé, sont présentés ci-après :

- L'un des éléments emblématiques de la méthode D-Shape est le "Radiolaria Pavilion" (Figure 6), réalisé par Enrico Dini. D'une hauteur de 1,5 mètre, il a été fabriqué sur une imprimante à portique de 6 × 6 mètres. Ce projet démontre la capacité de cette technique à produire des volumes complexes et ajourés (Prasad, 2022). Une maison, la "Ferreri House" (Figure 6), mesurant environ 2,4 mètres de hauteur pour une emprise de 4 mètres, a également été réalisée avec cette méthode (Figure 6). Son impression, effectuée en une phase continue sur trois semaines, illustre les formes architecturales réalisables (Rollakanti et al., 2022).



FIGURE 6 – Le Radiolaria Pavillon & la maison Ferreri (Rollakanti et al., 2022)

- En 2014, la société WinSun a réalisé une série de maisons en utilisant l'impression 3D béton (Figure 7), totalisant 200 mètres carrés de surface imprimée. Cette application a démontré une réduction du temps de construction d'environ 30% par rapport aux méthodes traditionnelles, ainsi qu'une diminution des déchets de matériaux de 30 à 60%. Néanmoins, les fondations et les armatures ont dû être mises en œuvre selon des techniques conventionnelles (Baigarina et al., 2023).



FIGURE 7 – Maison Winsun, Chine (Panda et al., 2018)

- L'Université technique d'Eindhoven a réalisé un pont cyclable en 2017 (Figure 8). Ouvert au public, il permet de franchir un cours d'eau. Le projet a été mené en collaboration entre l'université et le groupe BAM Infra. Cependant, le processus de construction du pont n'ayant pas été certifié selon les normes en vigueur, il ne peut être généralisé sans validations supplémentaires (Baigarina et al., 2023).



FIGURE 8 – Pont cyclable imprimé en 3D, Gemert (Baigarina et al., 2023)

3.1.6 Avantages et limites du procédé

Ces dernières années, l'impression 3D béton a révélé un potentiel croissant dans le secteur du bâtiment, notamment grâce aux nombreux avantages qu'elle offre. Elle permet de réaliser des formes complexes qui nécessiteraient des coffrages coûteux en matériaux et en main-d'œuvre. Elle offre également une réduction de la main-d'œuvre, du temps de travail, de la quantité de déchets produits, et du risque d'erreurs sur chantier (Panda et al., 2018). Plusieurs de ces avantages sont détaillés ci-dessous :

- **Formes complexes :**

L'impression 3D béton offre une plus grande liberté dans la conception des formes. La création de courbes et de géométries complexes, souvent recherchée par les architectes, devient plus accessible. L'architecture biomorphique, caractérisée par des formes organiques non standard, peut ainsi être explorée plus aisément avec le béton mis en œuvre par impression 3D. Ces formes, difficiles et coûteuses à obtenir avec des coffrages traditionnels (qui impliquent

souvent un travail complexe du bois ou la fabrication de moules spécifiques en polymère), deviennent plus facilement réalisables (Panda et al., 2018) ; Lim et al., 2011). Des éléments sur mesure peuvent alors être produits tout en limitant le temps et les coûts de fabrication de l'élément (Kamhawi & Meibodi, 2024).

- **Réduction des déchets**

Le modèle permet d'estimer précisément la quantité de matière nécessaire à la réalisation de l'élément, ce qui réduit les déchets potentiels liés à un surplus (Al-Raqeb & Ghaffar, 2024).

Les coffrages, peu réutilisables, génèrent plus de déchets que l'impression 3D pour un même élément. Ce qui est bénéfique pour l'environnement, le secteur de la construction générant déjà une grande quantité de déchets (Baigarina et al., 2023).

- **Réduction du temps**

Le temps de réalisation est relativement court : une fois l'imprimante mise en place, les petits éléments sont imprimés en très peu de temps (5 à 30 min), et les grandes structures, comme les maisons, peuvent être produites en une seule journée par des sociétés spécialisées (Baigarina et al., 2023).

Comme les imprimantes sont montées sur des portiques, il est souvent inutile d'installer des échafaudages, ce qui permet d'éviter un processus à la fois coûteux et chronophage.

- **Réduction de main-d'œuvre**

L'imprimante peut souvent être montée par une équipe réduite et l'utilisation de celle-ci peut être commandée par un seul conducteur. La réduction de la main-d'œuvre présente un autre avantage : la diminution des erreurs potentielles d'origine humaine (Panda et al., 2018).

- **Utilisation de matériaux recyclés**

Des matériaux écologiques ou recyclés peuvent partiellement remplacer le ciment ou le sable dans le mélange imprimable, comme par exemple les cendres volantes ou des sables issus du recyclage (Hamidi & Aslani, 2019).

- **Réduction du coût**

Cet avantage découle des autres : en mobilisant moins de main-d'œuvre pour obtenir un résultat comparable à celui des méthodes traditionnelles, le coût associé s'en trouve réduit. L'absence de coffrage réduit les coûts, en évitant une étape généralement coûteuse en main-d'œuvre qualifiée, en matériaux et génératrice de déchets (Panda et al., 2018). La réduction de matière utilisée entraîne une réduction du coût de fabrication : la matière n'est placée que là où elle est structurellement ou fonctionnellement nécessaire (Lim et al., 2011). Ceci est optimisé en amont grâce à la modélisation 3D. En outre, cet aspect est à nuancer, car l'impression 3D béton requiert souvent une proportion importante de ciment dans les mélanges. Comme mentionné précédemment (tableau 1), le ciment est la composante la plus coûteuse du béton par rapport aux granulats et au sable. Il convient de comparer la réduction globale de matériau par rapport à son coût pour déterminer si une diminution effective du coût total est atteinte.

La réduction des coûts doit être évaluée en tenant compte de l'ensemble des facteurs, en com-

paraïson avec une méthode traditionnelle.

- **Utilisation dans des zones isolées**

Dans les zones touchées par des catastrophes naturelles, comme des tremblements de terre ou des ouragans, l'impression 3D béton constitue une solution efficace pour reconstruire les bâtiments détruits. La capacité à produire rapidement des éléments, avec peu de main-d'œuvre et une machine facilement déployable, constitue un atout majeur.

La société Apis Cor a mis au point une imprimante à l'aspect d'une grue installée à l'arrière d'un camion, qui peut être déployée sur site en une trentaine de minutes (Jesus et al., 2023). Grâce à cette technologie, un camion équipé de l'imprimante et un camion toupie permettraient d'imprimer rapidement des abris dans les zones sinistrées.

L'utilisation de cette technologie sur des sites extraterrestres, comme Mars ou la Lune, a été envisagée par la NASA, en exploitant les matériaux présents sur place comme composants du mélange imprimable (Prasad, 2022).

En termes de limites, bien que cette technologie ait émergé il y a une vingtaine d'années, de nombreux défis restent à relever. Voici quelques-unes des principales limites de l'impression 3D béton :

- **Capacité structurelle des impressions**

Les éléments imprimés sans armature sont souvent limités à des applications non structurelles ou faiblement sollicitées, ne reprenant que leur propre poids. Il s'agit alors le plus souvent d'éléments à vocation esthétique ou de remplissage. Néanmoins, l'intégration d'armatures est une technique en développement (Panda et al., 2018). Les armatures peuvent être placées avant l'impression, la buse déposant alors le béton autour d'elles. Alternativement, les armatures peuvent être insérées pendant ou après l'impression dans des réservations prévues lors de la phase de conception. Ce procédé est notamment compatible avec la méthode du Contour Crafting.

- **Défauts de matière dans le vide**

Comme mentionné précédemment, des formes complexes peuvent être réalisées, mais certaines géométries posent encore des défis techniques. Trois types de géométries sont particulièrement critiques : les porte-à-faux, les surplombs (débordements de matière dans le vide) et les éléments de franchissement (comme les linteaux au-dessus des ouvertures). Dans ces cas, la matière est déposée partiellement ou totalement dans le vide, ce qui peut engendrer une instabilité et un effondrement (Kamhawi & Meibodi, 2024). Des recherches ont montré la possibilité d'imprimer des surplombs avec des angles allant jusqu'à 25° par rapport à la verticale, notamment en utilisant des buses chauffantes ou des mélanges à prise très rapide. Au-delà de cette limite, des renforts intégrés ou des supports temporaires (par exemple, des billes de verre) deviennent nécessaires (Kamhawi & Meibodi, 2024).

- **Discontinuité d'impression :**

Si le débit de matière à la sortie de la buse n'est pas correctement maîtrisé, un excès de dépôt peut survenir, affectant la qualité de surface de la pièce. À l'inverse, une extrusion insuffisante peut provoquer la formation de vides ou de discontinuités. Ces défauts constituent des points

faibles dans la structure de l'élément, susceptibles de favoriser sa dégradation (par exemple, sous l'effet du retrait du béton ou de vibrations) (Panda et al., 2018). Une phase de contrôle, voire de post-traitement, peut alors s'avérer nécessaire pour vérifier et assurer l'intégrité de l'élément.

- **Manque de normes pour l'impression béton** Pour être utilisé en construction, le béton doit respecter des normes précises garantissant sa performance et sa durabilité. En tant que technologie émergente, le béton imprimé en 3D doit encore démontrer un niveau de fiabilité et de reproductibilité suffisant pour une utilisation généralisée dans des applications structurelles courantes. À ce jour, peu de normes spécifiques encadrent les procédés et les produits issus de l'impression 3D béton. Les projets réalisés relèvent souvent de démonstrations expérimentales ou de constructions d'exposition. L'élaboration de référentiels techniques et normatifs, à l'image de ce qui existe pour la construction préfabriquée (par exemple, dans l'Eurocode 2), est une étape nécessaire pour l'intégration plus large de cette technologie (Panda et al., 2018).

3.2 La restauration du patrimoine en béton

3.2.1 L'importance du patrimoine béton

L'histoire du béton remonte à l'Antiquité, lorsque les Romains utilisaient un mélange d'agréats nommé "opus caementitium". Il était composé de chaux, de sable, de pierres et de pouzzolane, et servait à ériger des structures encore visibles aujourd'hui, telles que le Panthéon (Figure 9) (Gillard et al., 2011). Après la chute de l'Empire romain, l'usage du béton a progressivement décliné, au point d'en perdre la recette, avant de réapparaître au XIX^e siècle avec l'invention du ciment moderne par Louis Vicat (vers 1818), puis par Joseph Aspdin (vers 1824) avec le ciment Portland.

Le XX^e siècle marque l'âge d'or du béton et du béton armé, rendu possible grâce à l'intégration d'armatures métalliques, qui augmentent la résistance à la traction du matériau. Cette avancée technique a permis la construction d'ouvrages monumentaux et de bâtiments aux formes géométriques complexes, tels que le Hall du Centenaire à Breslau, en Pologne, construit en 1912, un projet montrant les possibilités qu'offre un système constructif en béton armé (Figure 10). Le béton devient un matériau emblématique de l'architecture moderne et contemporaine. On peut notamment penser à de grands architectes tels que Le Corbusier (1887-1965) et Auguste Perret (1874-1954), qui ont fait de ce matériau un élément phare de leur art (Simonnet., 2005).

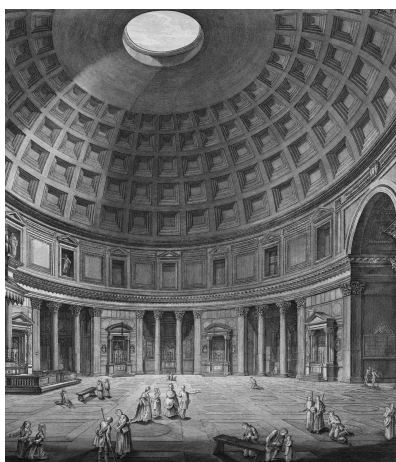


FIGURE 9 – Gravure du dôme de 43 mètres du Panthéon

Source :
([https://fr.wikipedia.org/wiki/Panthéon_\(Rome\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Panthéon_(Rome)))

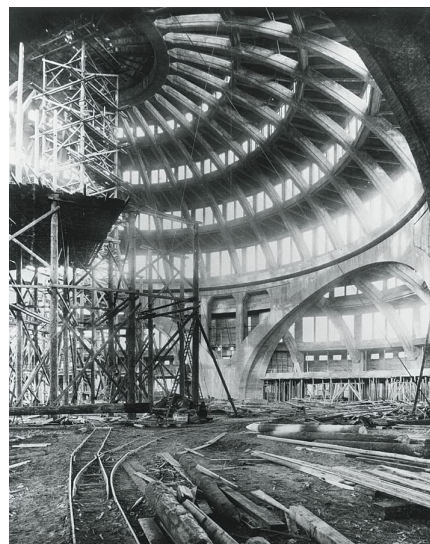


FIGURE 10 – Hall du centenaire (Breslau, Pologne, 1912) (Simonnet., 2005)

Après la Seconde Guerre mondiale, le béton armé s'est imposé pour la construction de tous types de bâtiments, partout dans le monde et notamment en Europe. Cela s'expliquait notamment par le besoin urgent de reconstruire les villes détruites par la guerre. Cette technique s'est démarquée des méthodes traditionnelles utilisées avant le conflit en raison de sa rapidité de mise en œuvre et par la facilité d'approvisionnement en matériaux nécessaires à la composition du béton (sable, ciment et agrégats) à proximité des chantiers. Elle comportait d'autres avantages, tels que la possibilité d'atteindre de plus grandes portées, des structures plus hautes et des formes plus libres que celles permises par la pierre et la brique. Son coût attractif tenait également au faible prix des matériaux, de la main d'œuvre réduite et de la possibilité de préfabrication (Licordari., 2015).

Le patrimoine en béton en Europe atteint aujourd'hui un certain âge, celui-ci ayant connu son essor à la fin du XIX^e et tout au long du XX^e siècle. Cette période de croissance a conduit à une

multiplication des bâtiments, ponts et monuments, dont certains sont aujourd’hui fortement dégradés. L’utilisation croissante du béton et de l’acier a entraîné un changement radical des pratiques constructives et des conceptions architecturales. Une architecture plus rationnelle et plus fonctionnelle a été recherchée, accompagnée d’une réduction des ornements sur les nouveaux édifices (Jesus et al., 2023). En réponse à cette situation, des initiatives sont lancées pour préserver et restaurer ces monuments. L’inscription de ceux-ci sur les listes du patrimoine permet de les protéger. La question de la restauration et de la conservation des monuments en béton peut être posée. Plutôt que de démolir ces ouvrages, dont la construction a déjà entraîné un impact écologique important, ne serait-il pas préférable de les rénover afin de leur offrir une seconde vie ? Ils témoignent aussi des évolutions techniques dans le domaine de la construction et de l’architecture du XX^e siècle. Certains de ces monuments architecturaux sont des bâtiments emblématiques de courants tels que le modernisme, le brutalisme ou le constructivisme.

Cependant, ce patrimoine architectural reste encore méconnu et insuffisamment reconnu, pour diverses raisons telles que le manque de recul historique ou encore la difficulté, dans l’imaginaire collectif, d’associer production de masse et valeur patrimoniale (Tiry-Ono et al., 2023).

3.2.2 Durabilité et pathologies types du béton

Lors de la réalisation d’éléments en béton, les concepteurs pensent avant tout aux caractéristiques de résistance du matériau, mais ils portent aussi une attention particulière à la durabilité de ce béton. Bien que les bétons soient correctement constitués et la composition respectée, des cas de détérioration prématurée de structures en béton se produisent. De nombreux facteurs peuvent être responsables de ce manque de durabilité. L’eau est très souvent impliquée dans les formes de détérioration, le béton étant un matériau poreux, l’eau peut pénétrer le solide et y causer des dégradations. La perméabilité du béton est donc un facteur auquel les concepteurs doivent porter une attention particulière lors de la phase de conception (Mehta et al., 2014). Lorsque l’on parle de durabilité d’un élément, on doit généralement décrire l’environnement (exposition à des agents chimiques, aux intempéries, à l’eau de mer, etc.) auquel il va être exposé.

Il y a des effets physiques qui influencent la durabilité du béton, entraînant (Mehta et al., 2014) :

- l’usure de la surface et la perte de matière

→ produites par des phénomènes : $\left\{ \begin{array}{l} \text{d’abrasion (usure sèche)} \\ \text{d’érosion (usure hydraulique)} \\ \text{de cavitation (implosion de bulles de vapeur)} \end{array} \right.$

- la fissuration du béton

→ produite par des phénomènes : $\left\{ \begin{array}{l} \text{de cristallisation des sels dans les pores} \\ \text{de surcharge structurelle (fatigue, impact/accident)} \\ \text{de variation de température (cycle gel-dégel, incendie)} \end{array} \right.$

Et il y a des effets chimiques qui influencent la durabilité du béton, entraînant (Mehta et al., 2014) :

- la perte de compacité et l'augmentation de la porosité et perméabilité

→ produites par des phénomènes :

- de dissolution des composés solubles (comme la chaux $Ca(OH)_2$ ou d'autres hydrates solubles sous l'effet d'eaux agressives ($pH < 6$))
- de substitution d'ions dans le C-S-H (par exemple des ions Mg^{2+} remplaçant les ions Ca^{2+} , affaiblissant la matrice)
- la lixiviation des produits hydratés (notamment en eau douce ou faiblement minéralisée)

- la fissuration et la déformation du béton

→ produites par des phénomènes :

- d'attaques de sulfates (formation d'ettringite différée qui provoque des gonflements internes)
- de réactions alcali-silice (gonflement dû à la réaction entre les alcalis du ciment et certaines silices réactives des granulats)
- d'augmentation des contraintes internes (par formation de produits expansifs ou de pertes de cohésion)

- la corrosion des armatures (gonflement puis éclatement du béton)

→ produite par des phénomènes :

- de carbonatation (baisse du pH du béton petit à petit ($13 \rightarrow 9$) autour des armatures suite à la réaction du CO_2 contenu dans l'air, avec la chaux libre $Ca(OH)_2$)
- de pénétration de chlorures (qui détruisent la couche passive protégeant l'acier et déclenchent la corrosion)

En pratique, plusieurs processus chimiques et physiques de détérioration agissent simultanément et peuvent même se renforcer mutuellement (Mehta et al., 2014). Parmi les pathologies qui affectent les monuments en béton, celles entraînant une perte de matière en surface semblent particulièrement adaptées à une réparation par impression 3D. Selon (Jesus et al., 2023), les dégradations impliquant des éclats et des pertes de matière sont particulièrement pertinentes pour le développement de l'impression 3D béton.



FIGURE 11 – Désagrégation du béton (Jesus et al., 2023)



FIGURE 12 – Fissuration du béton (Jesus et al., 2023)



FIGURE 13 – Béton carbonaté - église St Vincent, Liège

3.2.3 Approches et interventions de restauration

Deux philosophies de restauration du patrimoine ont marqué l'histoire de la conservation en Europe. Ces deux approches s'opposent sur certains aspects : on parle de l'approche dite "à la française" et celle dite "à l'italienne". Ces principes ont été exposés lors du cours de Monsieur Paquet (Paquet, 2023-2024).

- L'intervention à la française, aussi appelée la restauration stylistique, a été portée par Mérimée, Ruskin et Viollet-le-Duc au XIX^e siècle, ce dernier étant un architecte célèbre pour ses restaurations de Notre-Dame de Paris, du château de Carcassonne et du château de Pierrefonds. La philosophie de cette approche est de restaurer un édifice en le ramenant à un état complet, potentiellement idéalisé, qui pourrait ne jamais avoir existé sous cette forme à un instant précis. L'architecte reconstruit donc le monument tel qu'il imagine qu'il aurait dû être dans son état idéal, parfois en recréant des éléments disparus, inachevés ou qui n'ont jamais existé. La personne en charge de la restauration dispose ainsi d'une certaine liberté d'interprétation de l'histoire de l'édifice. Cette approche peut ainsi aboutir à des restaurations idéalisées, qui ne reflètent pas forcément l'état historique réel du bâtiment. On peut prendre l'exemple du château de Carcassonne, fortement remanié par Viollet-le-Duc avec des toits en ardoise sur les tours du château, un type de toiture non caractéristique de la région à l'époque.
- L'intervention à l'italienne, aussi appelée la restauration conservatrice ou philologique, a été portée par Camillo Boito et les théoriciens du patrimoine à la fin du XIX^e siècle et prolongée par la Charte de Venise (1964). Sa philosophie est de respecter toutes les strates historiques du bâtiment et d'intervenir le moins possible. L'idée est donc de préserver l'authenticité de l'édifice dans son état actuel, avec ses marques du temps et ses transformations successives. Ainsi, une distinction claire est faite entre les parties originales et les ajouts (principe de distinctibilité), l'objectif étant d'éviter toute mystification historique ou la création d'une fausse ancienneté. L'intervention doit être aussi réversible que possible et faire l'objet d'une documentation exhaustive.

La Charte de Venise de 1964 est un document adopté par des experts du patrimoine lors du Deuxième Congrès international des architectes et techniciens des monuments historiques, visant à fixer les principes éthiques et techniques pour la conservation et la restauration des monuments historiques (ICOMOS, 1965).

Cette Charte est composée de plusieurs grands principes :

1. Le respect de la valeur historique et artistique des monuments
2. La conservation doit précéder toute restauration (elle ne doit pas dénaturer le caractère historique de l'édifice)
3. Les restaurations doivent se distinguer de l'original sans nuire à l'harmonie d'ensemble
4. Utilisation de matériaux appropriés (la priorité doit être mise sur l'utilisation de matériaux traditionnels, mais possibilité d'utiliser des techniques modernes si elles garantissent la pérennité de l'ouvrage)
5. La protection du cadre environnemental
6. Importance de la documentation (plans, relevés, rapports avant et après travaux)

Dans la mesure du possible, la réhabilitation ou la rénovation d'un bâtiment appartenant au patrimoine devrait respecter les principes clés de la Charte de Venise (1964) (Jesus et al., 2023 ; CIB, 2010).

3.3 Recherches sur la restauration à l'aide de l'impression 3D béton et polymère

Différentes études ont été menées sur l'utilisation de l'impression 3D (béton ou polymère) pour la restauration du patrimoine, y compris pour des éléments qui ne sont pas initialement en béton. Voici une brève présentation de trois d'entre elles :

- Une étude a été menée à l'université de Gand sur les possibilités offertes par l'impression 3D béton pour la reproduction de fragments de bâtiments historiques. Cette étude portait sur des constructions plus anciennes que celles composant le patrimoine en béton du XX^e siècle. Elle illustre comment l'impression 3D béton peut être utilisée dans le cadre de la rénovation des façades historiques de la ville de Gand. L'étude a été dirigée par une professeure d'université encadrant un groupe de 16 étudiants, répartis en sous-groupes travaillant chacun sur différents aspects liés à l'impression 3D (les jeux de lumière, les joints et connexions, les motifs, le matériau de support et l'assemblage) (Bekkering et al., 2020).

Leur étude s'est organisée en deux phases : une première, théorique, portant sur la manière dont l'impression 3D béton pourrait être mise en œuvre pour réaliser ce type de restauration, et une seconde, plus pratique, consacrée à la réalisation de prototypes en laboratoire (Bekkering et al., 2020).

L'aboutissement de leur année de recherche a été la fabrication de trois colonnes en impression 3D béton. Ces trois réalisations concrètes leur ont permis de présenter les résultats de leurs travaux. Ils ont notamment démontré que des formes libres, issues de modèles paramétriques conçus sur le logiciel Rhino, avec l'aide de l'extension Grasshopper, pouvaient être imprimées (Bekkering et al., 2020). Pour l'impression de ces colonnes, l'université a fait appel à la société Vertico, équipée d'un bras robotique à 6 axes capable d'imprimer du béton. Au cours de leurs séances de laboratoire, les étudiants ont mené plusieurs expérimentations : par exemple, des impressions sans matériau de support ou avec des supports de différentes natures, allant des perles de verre aux graines, afin d'observer leur impact sur la texture de l'impression finale et sur la facilité de retrait de ces supports (Bekkering et al., 2020).

- Une deuxième étude est présentée dans l'article intitulé "The potential of 3D printing in building pathology : rehabilitation of cultural heritage" (Jesus et al., 2023). Cet article est également utilisé dans d'autres sections de cet état de l'art.

L'impression 3D y est présentée comme une innovation permettant de maximiser la rapidité d'exécution et de réduire les coûts de construction, tout en offrant l'avantage de pouvoir être réalisée hors site. L'article s'appuie notamment sur l'étude de (Lim et al., 2011), également citée dans la section de cet état de l'art consacrée aux avantages et inconvénients de la méthode.

Un rappel est fait sur la définition du patrimoine culturel, décrit comme un secteur sensible en raison des nombreuses complexités et des variations propres à chaque élément qui le compose. De nombreuses techniques de rénovation existent déjà pour ce type de patrimoine. L'article souligne également le manque de réglementation encadrant à ce jour l'impression 3D béton et identifie ce vide comme un frein au développement de cette technologie (Jesus et al., 2023).

L'article cite la numérisation 3D par scanner laser comme une méthode particulièrement adaptée à la restauration du patrimoine. Il indique également que, pour démontrer le potentiel de l'impression 3D dans ce domaine, il est nécessaire de réaliser des exemples concrets (Jesus et al., 2023). Le manque de littérature sur le sujet est également souligné, et les auteurs insistent sur l'importance de développer la recherche afin d'enrichir les connaissances et d'orienter les

travaux futurs. L'article présente ensuite la réalisation d'une pièce ornementale moulée dans une coque en plastique. Cette technologie permet de produire des moules destinés à remplacer de petits éléments dégradés sur des bâtiments patrimoniaux.

L'article présente ensuite les travaux de Xu et al. (2017), considérés comme pionniers dans le domaine du scan 3D et de la restauration d'éléments endommagés. Ces chercheurs ont notamment réalisé la reconstruction d'une base de colonne en impression 3D béton, réplique d'une colonne en pierre appartenant à un site historique. Cette étude sera présentée plus en détail à la fin de cette section (Jesus et al., 2023).

Les auteurs mentionnent également une seconde étude menée par Yeon et al. (2018), qui porte sur l'utilisation de patches de réparation réalisés à l'aide d'impression 3D (Figure 15). Dans ce cas, il ne s'agit pas d'impression directe de béton, mais de la fabrication de moules en plastique imprimés en 3D, dans lesquels le béton est ensuite coulé pour obtenir la forme souhaitée (Yeon et al., 2018 ; Jesus et al., 2023). Une difficulté se présente également pour les éléments verticaux, où il est crucial d'empêcher le matériau coulé de se détacher ou de s'écouler le long de la surface. Un adhésif spécifique au béton est ensuite appliquée pour assurer la fixation de la pièce réparée (Yeon et al., 2018).

- La troisième étude est celle de Xu et al. (2017). Dans cet article, les auteurs réalisent la reproduction d'un pied de colonne d'un temple chinois (Xu et al., 2017) (Figure 14).

Les chercheurs ont suivi quatre étapes dans leur processus de fabrication :

1. La réalisation d'un scan de l'élément, afin d'obtenir un nuage de points (point cloud data, PCD) de l'élément existant, servant de base à la création d'un modèle numérique 3D.
2. La modélisation et le traitement du modèle numérique, enregistré sous la forme d'un fichier .stl. Ce fichier est ensuite traité à l'aide d'un slicer qui décompose l'élément en couches successives et génère les commandes destinées à l'imprimante pour la fabrication de la pièce.
3. L'impression de la pièce à partir du fichier G-code généré par le slicer, contenant les informations relatives aux déplacements, à la quantité de matériau à extruder et aux vitesses de déplacement de l'imprimante.
4. L'installation de l'élément sur la partie endommagée du bâtiment, suivie si nécessaire d'un post-traitement pour la finition de surface.

En utilisant un mélange cimentaire spécifique, Xu et al. (2017) sont parvenus à obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles de la pierre utilisée à l'origine dans le bâtiment (Xu et al., 2017).

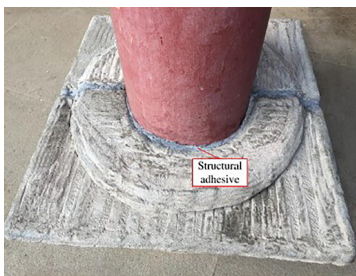


FIGURE 14 – Pied de colonne imprimé en béton (Xu et al., 2017)



FIGURE 15 – Patch en mortier moulé (Yeon et al., 2018)

3.4 Numérisation 3D

Cette section présente un bref état de l’art des trois méthodes de numérisation 3D les plus couramment utilisées. Elle se concentre sur ces technologies, car elles permettent d’extraire des informations géométriques précises et complètes des bâtiments et des éléments de construction, en mettant en évidence les zones détériorées. Coupler cette technologie à l’impression 3D béton pour la restauration du patrimoine bâti en béton permet de reproduire des éléments endommagés avec une haute fidélité.

Les outils numériques de numérisation 3D ont introduit de nouvelles techniques d’enregistrement 3D, permettant d’améliorer les procédés traditionnels dans les réparations et restaurations d’éléments du patrimoine. Les techniques traditionnelles nécessitent souvent un contact physique avec les éléments endommagés, tandis que le LiDAR, la photogrammétrie et la numérisation laser 3D offrent des solutions non invasives (Weigert et al., 2019).

3.4.1 Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technologie permettant la reconstitution automatique d’un modèle 3D à partir d’une série de photos qui se chevauchent, en variant la position de la caméra (Figure 16). C’est une méthode très populaire, utilisée dans de nombreux domaines. Elle est également assez flexible en termes de matériel requis : un appareil photo reflex, un gsm, une tablette ou un drone peuvent tous être utilisés pour réaliser un modèle 3D à l’aide de la photogrammétrie (Weigert et al., 2019). La photogrammétrie a connu une évolution considérable ces dernières années, notamment grâce aux progrès en puissance de calcul et en algorithmes, offrant désormais des résultats comparables à ceux d’un scanner laser pour de petites pièces (Skladan et al., 2024).

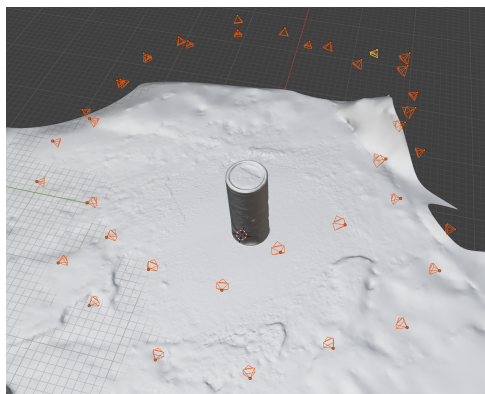


FIGURE 16 – Principe de la photogrammétrie : multiples photos d’un objet sous différents angles.

3.4.2 Numérisation Lidar 3D

La numérisation 3D Lidar est une technologie qui utilise un radar à lumière par déphasage (LiDAR - Light Detection and Ranging), qui permet d’enregistrer une géométrie en haute résolution. C’est une alternative abordable par rapport aux scanners laser présentés ci-après. Cette technologie est présente sur les iPhones Pro et les iPads Pro (Abbas & Abed, 2024) (Figure 17). Ils sont équipés d’un capteur LiDAR et offrent une solution économique pour visualiser des nuages de points en couleur. Leur portée est toutefois limitée à 5 mètres. De nombreuses applications permettent d’exploiter le LiDAR des appareils Apple ; la plupart sont gratuites dans leur version de base. Elles permettent de mesurer des éléments plus rapidement qu’avec des outils conventionnels, comme un mètre ou un pied

à coulisse, tout en conservant une précision satisfaisante (Skladan et al., 2024). Il existe également des scanners LiDAR professionnels (par exemple, de marques Faro, Leica, Riegl) coûtant plusieurs dizaines de milliers d'euros, qui offrent des capacités de portée, de précision et de robustesse bien supérieures.



FIGURE 17 – Lidar sur les iPad et iPhone Pro (Abbas & Abed, 2024)

3.4.3 Numérisation Laser 3D

La numérisation laser 3D est une méthode plus précise, reposant sur l'utilisation d'un instrument de haute technologie capable de réaliser une multitude de mesures par seconde, permettant ainsi de générer un nuage de points. Appelée en anglais "mobile laser scanning" (MLS) (Figure 18) et, si le dispositif est fixé sur un trépied et immobile, on parle de "laser scanning statique" (TLS, acronyme de l'anglais Terrestrial Laser Scanning) (Skladan et al., 2024). La numérisation 3D laser consiste à émettre un faisceau laser, par impulsions, afin de mesurer des distances. Ce sont les capteurs laser, qui calculent le temps écoulé entre l'émission et la réception du faisceau réfléchi, qui permettent de déterminer ces distances et ainsi de créer un nuage de points (Weigert et al., 2019).

Toutefois, leur coût reste élevé : il s'agit de scanners professionnels valant plusieurs milliers d'euros. L'usage de ces appareils est souvent destiné à des sociétés spécialisées. Le temps de collecte et de traitement des données est assez long. Les besoins en ressources informatiques et en stockage sont importants, Les importants volumes de données générés peuvent ainsi rendre le traitement pour de très grandes surfaces particulièrement exigeant. Il est nécessaire d'avoir un ordinateur lié au scanner pour le traitement et l'enregistrement des données (Figure 19). Les logiciels nécessaires au fonctionnement du scanner sont souvent vendus avec celui-ci et fonctionnent sous forme de licence (Skladan et al., 2024).



FIGURE 18 – Scanner Laser FreeScan UE Pro



FIGURE 19 – Ordinateur lié au scanner

4 Recensement de monuments en béton du XX^e siècle aux environs de Liège

Cette section présente un recensement de certains monuments en béton construits au cours du XX^e siècle et situés dans Liège ou en périphérie.

4.1 Méthodologie de la collecte de données

Pour réaliser un inventaire des bâtiments construits en tout ou en partie en béton, une méthodologie a été mise en place. Le recensement s'est basé sur les monuments situés dans la commune de Liège et dans les communes avoisinantes. Voici les différentes étapes suivies pour cette partie du travail :

1. Listing des bâtiments classés à l'aide de l'Inventaire Régional du Patrimoine Culturel Immobilier, en utilisant le mot-clé « béton » et en appliquant comme filtre géographique la commune de Liège ainsi que ses communes limitrophes.
2. Analyse des fiches patrimoniales existantes pour chaque bâtiment recensé.
3. Analyse de l'état actuel du bâtiment à partir de documents disponibles en ligne : photos, Google Street View, articles, etc.
4. Sélection des bâtiments présentant un intérêt particulier pour l'étude.
5. Inspection générale des bâtiments sélectionnés, en se concentrant principalement sur leur aspect extérieur (généralement le plus exposé aux dégradations en raison des conditions environnementales), et, si possible, sur leur aspect intérieur, selon l'accessibilité. L'objectif de cette étape est d'évaluer l'état de conservation du bâtiment, les matériaux employés, et de déterminer la présence éventuelle de dégradations.

4.2 Listing des monuments

(Service Public de Wallonie - Direction de l'Aménagement du Territoire, s.d.)

Liège et ses alentours possèdent un riche patrimoine en béton, témoignant de l'évolution des techniques et des styles architecturaux au cours du dernier siècle. Ce listing reprend les bâtiments ayant attiré mon attention sur le site du patrimoine.

Les premiers critères d'intérêt ont été leur ancienneté, car plus un bâtiment est ancien, plus il est susceptible de présenter des dégradations. J'ai également tenu compte de l'importance et de la taille des édifices : une maison individuelle retiendra moins mon attention qu'un monument historique, une église ou un bâtiment public.

Un autre critère important est la place qu'occupe le béton dans la description de l'ouvrage. Certains bâtiments sont signalés comme utilisant du béton uniquement pour leur structure porteuse, tandis que leurs façades sont habillées d'un autre matériau. Ces bâtiments sont moins intéressants pour mon recensement, car le béton étant protégé par ce revêtement, il est moins exposé aux agressions extérieures et donc moins susceptible d'être dégradé.

- **Bains de la Sauvenière ou Cité Miroir.** Inauguré en 1938, cet édifice est un exemple notable d'architecture moderniste en béton. Il se distingue par ses façades, sa toiture voûtée et son grand hall qui à l'époque abritait les piscines. C'est aujourd'hui un lieu culturel nommé la Cité Miroir. Le bâtiment est classé depuis 2005. Les voûtes du hall des bassins sont faites en béton armé, la façade est elle aussi réalisée avec des éléments en béton.

- **Théâtre de Liège.** Construit en 1934, la structure du bâtiment est en béton armé mais la façade est composée d'éléments en pierre. Le théâtre est classé depuis 1998. Une réhabilitation a été menée par les architectes Pierre Hebbelinck et Pierre de Wit. Aujourd'hui, le théâtre combine une façade historique richement ornée avec des extensions modernes en béton.
- **Maison Art Nouveau Rue Ernest de Bavière.** Commanditées par le docteur A. Focroule, ces maisons construites au début du XX^e siècle présentent des façades ornées caractéristiques de l'Art Nouveau. La structure du bâtiment est en béton. En façade, on retrouve des éléments décoratifs en pierre, tels que les motifs floraux et les lignes courbes.
- **Immeuble de la rue de Chestret.** L'immeuble faisant le coin avec la place de Bronckart est repris sur le site du patrimoine immobilier classé de Liège depuis 1985. Il a été construit en 1912 par l'architecte Arthur Snyers. Des ornements en pierre et des détails décoratifs se trouvent sur la façade extérieure, qui repose sur une structure en béton. Cet immeuble témoigne aussi de l'influence de l'Art Nouveau dans l'architecture liégeoise.
- **Mémorial Interallié.** Érigé après la Première Guerre mondiale, ce monument commémoratif situé sur la colline de Cointe est un symbole de reconnaissance envers les alliés. Il a été reconstruit après la Seconde Guerre mondiale suite à un bombardement. Sa structure est en béton et en brique. On retrouve l'utilisation de béton apparent reflétant l'esthétique Art Déco de l'édifice. La tour offre une vue panoramique sur la ville. Le mémorial est également classé au patrimoine immobilier de la Région wallonne.
- **Institut Gramme.** Fondé en 1906, cet établissement d'enseignement technique présente une architecture en béton ornée de détails Art Nouveau. La façade est décorée de motifs géométriques caractéristiques de ce style (Figure 20).
- **CHU de Liège.** L'hôpital est conçu autour d'un bâtiment central en forme de pyramide tronquée, autour duquel s'articulent cinq tours, toutes faites en grande partie de béton brut. On y retrouve aussi une grande verrière faite d'acier et de verre, classée au patrimoine.
- **Maison Comblen.** Conçue par l'architecte Paul Jaspar en 1898, cette maison est un chef-d'œuvre de l'Art Nouveau à Liège. Bien que principalement en brique, elle intègre des éléments en béton ornés de motifs et de ferronneries artistiques. La maison est classée au patrimoine immobilier de la Région wallonne.
- **La passerelle Mativa.** Construite elle aussi pour l'exposition universelle de Liège en 1905. Elle est construite selon le système structurel inventé par l'ingénieur François Hennebique, qui a donné son nom à la méthode structurelle. C'est donc un type de béton armé, permettant de réaliser une passerelle fine et sans appui intermédiaire.
- **Station de pompage numéro 14 à Sclessin.** Station de pompage construite en béton en 1936. De nombreuses autres stations de pompage sont reprises au patrimoine, toutes situées dans le bassin de la Meuse et pour la plupart construites en béton (Figure 21).
- **Palais des Fêtes de la Ville de Liège,** conçu par l'architecte Jean Moutschen, est un exemple notable d'utilisation innovante du béton armé, permettant d'atteindre de très grandes portées et d'obtenir un espace utile maximal.
- **La maison-sculpture,** située à Angleur, cette maison aux formes non standard a été conçue par l'architecte Jacques Gillet. Elle est conçue sur un grand ferrailage sur lequel a été projeté du béton. Le matériau brut est laissé tel quel pour le mettre en valeur.



FIGURE 20 – Institut Gramme



FIGURE 21 – La passerelle Mativa

Source :

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Passerelle_Mativa)

L'article "Churches and Concrete in Liège District : History, Architecture and Pathologies" (Gillard et al., 2011) présente une liste de neuf églises situées dans les alentours de Liège construites en majeure partie en béton. Sur chacun de ces monuments, une inspection avait été réalisée pour déterminer si leur état était dégradé. Pour ce recensement, chacune de ces neuf églises a été analysée. Voici la liste de ces neuf églises :

- **L'église Saint-Vincent de Liège**, est un édifice construit en 1930 selon les plans de l'architecte liégeois Robert Toussaint. L'ossature de l'église est réalisée en béton armé, choisie pour des raisons d'économie, de rapidité de construction et de sécurité. Elle se distingue par son imposant dôme central recouvert de cuivre, accompagné de plusieurs coupôles secondaires. Les façades sont constituées de pierres armées Pauchot. Cette construction est de style néobyzantin. Le béton de façade subit des éclatements dans des zones sensibles dus à la carbonatation du béton et à la rouille des armatures. Un élément de cette façade sera utilisé dans ce travail pour la partie numérisation.
- **Église du Sacré-Coeur de Cointe**, se trouvant à côté de la tour du Mémorial Interallié. La fin de la construction de l'église date de 1936. Les matériaux utilisés pour sa construction sont le béton, la brique et la pierre. L'église a été classée au patrimoine wallon en 2011 et est aujourd'hui en très mauvais état.
- **Église Saint-Hubert**, qui se trouve dans l'ouest de Liège, construite en 1960 par le même architecte que l'église Saint-Vincent. La structure de l'église est essentiellement faite en béton laissé apparent. L'utilisation du béton lavé par l'architecte donne un caractère brut à l'édifice et met en valeur le matériau. Des châssis en béton sont aussi présents pour la réalisation des vitraux. L'église est aujourd'hui touchée par un certain nombre de dégradations.
- **L'église Sainte-Julienne**, construite dans les années 1940. Elle est construite en grande partie en béton. On retrouve des ornements de croix en façade et des châssis en béton tenant les vitraux. Les dalles de parement en façade sont en béton laissant apparaître les granulats ronds utilisés. L'église ne présente pas de dégradation majeure au niveau du vieillissement du béton.
- **L'église Saint-Georges**, fondée en 1960. Elle est très sobre dans sa conception, avec une structure en béton et des briques rouges comme parement. Elle ne présente pas de dégradation majeure. Un vitrail avec des châssis en béton est aussi présent sur la façade avant et arrière.
- **Église Saints Pierre et Paul**, construite en 1972, dans le quartier de Droixhe, par le bureau d'architecture EGAU. L'église est reprise à l'inventaire du patrimoine culturel immobilier. La structure de l'église est composée de deux parties, toutes deux faites de béton : une partie soutenant la toiture sous forme de colonnes en V, et les murs intérieurs ne portant que leur

propre poids et percés par endroits pour laisser entrer la lumière. Un plan d'eau se trouve sur la façade nord, délimité par des bornes en béton. Certaines parties de béton sont touchées par des éclatements et des fissures, la partie de la structure en contact avec le plan d'eau étant dans un état de dégradation plus avancé que les autres (Figure 22).

- **Église Saint-Martin** située à Seraing, construite en 1977. C'est une église ayant une volumétrie complexe. Elle est entièrement construite en béton, en façade, on retrouve des blocs clivés donnant un aspect de briques. L'église est fortement touchée par des dégradations affectant le béton, tels que des éclatements et des fissures, visibles sur les façades extérieures.
- **Église Saint François de Sales**, construite en 1989 dans le Laveu. Elle est faite en grande partie de briques, mais l'on retrouve des éléments en béton notamment pour la structure venant soutenir la toiture. L'église est toujours en très bon état, aucune pathologie ne touche les éléments en béton.
- **Église Sainte-Vierge Marie** de Vaux. Construite entre 1959 et 1968, elle est en grande partie faite en béton. Son état avant 2013 comportait de nombreuses dégradations, notamment dues à des éclatements de parties du béton. Une phase de rénovation a été réalisée vers 2013 sur ces dégradations. L'église ne présente plus de trace visible de dégradation aujourd'hui (Figure 23).



FIGURE 22 – Église Saints Pierre et Paul



FIGURE 23 – Église Sainte-Vierge Marie

Source :

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Passerelle_Mativa)

4.3 Choix de cas d'étude

Le choix de l'étude de cas se porte sur un édifice fait principalement en béton, avec des éléments de géométrie complexe présents en façade qui auraient subi des dégradations, et dont la réparation serait complexe à réaliser à l'aide de coffrages traditionnels. Le but de la recherche étant de montrer l'efficacité de l'impression 3D béton par rapport à une technique traditionnelle. Trouver une géométrie complexe est donc l'objectif. Le choix du cas d'étude se tourne alors vers des éléments en béton dégradés principalement par des éclatements dus à la carbonatation du béton suivie de la rouille des armatures.

4.3.1 Cas du laboratoire de Thermodynamique de l'ULiège

Laboratoire de thermodynamique de l'ULiège (Centre de technologies nouvelles : énergie)

Le bâtiment de l'Institut de Thermodynamique de l'Université de Liège, aussi nommé B49, est implanté sur le campus du Sart Tilman, dans le quartier POLYTECH 1. Il se situe à l'adresse suivante : Chemin des Chevreuils 7, Liège (Ougrée).

De style contemporain, le bâtiment a été construit en 1981. Les plans ainsi que les calculs structurels ont été réalisés par le bureau d'ingénierie Greisch. Sa structure est en béton armé, un matériau

largement utilisé pour les infrastructures universitaires du campus à l'époque de sa construction. Les murs sont constitués de blocs de béton, choisis pour leur durabilité et leur efficacité dans le contexte du développement rapide du Sart Tilman.

Ce bâtiment, avant tout fonctionnel, ne se distingue pas particulièrement par une qualité architecturale poussée. Une colonnade longe la façade et vient supporter la toiture de la partie centrale du laboratoire (Figure 24). Celle-ci, anciennement couverte d'ardoises, possède aujourd'hui une couverture métallique et est encadrée par des pignons en escalier faits de blocs de béton recouverts de tôles. La seconde toiture, au-dessus de la partie bureau du bâtiment, qui ne s'étend pas jusqu'à la colonnade, est quant à elle constituée de tôles ondulées.

Le bâtiment est classé au patrimoine depuis 2004, à la suite d'une prospection réalisée par Bénédicte Dewez et Flavio Di Campli. Ils ont rédigé une fiche reprenant les informations et les caractéristiques de l'édifice (Service Public de Wallonie - Direction de l'Aménagement du Territoire, s.d.).

En ce qui concerne son état de conservation, le bâtiment est âgé de 44 ans. Il présente aujourd'hui déjà plusieurs signes de dégradation. Le béton a subi des altérations dues à son contact avec l'extérieur. On peut supposer une carbonatation du béton sur une certaine profondeur, atteignant localement les armatures. Ce phénomène entraîne des éclatements du béton, provoqués par la corrosion des armatures, notamment au niveau des colonnades. Le chapiteau des colonnes, étant une zone particulièrement sensible, est le premier endroit affecté.

Pour ce qui est du reste du bâtiment, les menuiseries extérieures en bois ont fortement vieilli, en grande partie à cause de l'environnement humide. Cette humidité est entretenue par la situation du bâtiment, construit dans un léger renfoncement en contrebas de la rue longeant le B52. Les murs en blocs de béton ne présentent pas de dégradations majeures. Toutefois, on observe par endroits des efflorescences là où la maçonnerie est plus exposée à l'humidité.

4.3.2 Statue de la Dame blanche du Mémorial Walthère Dewé

La statue de la Dame blanche, située derrière la Chapelle Saint-Maurice, aussi nommée Mémorial Walthère Dewé. Derrière l'abside de la chapelle se dresse une monumentale statue en béton, due au sculpteur Jules Brouns. Cette statue fait référence à un réseau de renseignement clandestin, nommé « La Dame blanche », mené par Walthère Dewé pendant la Première Guerre mondiale. La statue est sculptée avec un doigt sur la bouche, symbolisant le secret des services de renseignement.

La statue est placée sur un socle fait de briques puis recouvert d'un parement de ciment. Elle se compose de 7 éléments en béton placés les uns sur les autres. La statue est reprise au petit patrimoine populaire wallon (Figure 25).

La statue ne présente pas de dégradation majeure, si ce n'est des traces d'efflorescences dues à l'écoulement de l'eau à certains endroits. La statue a été repeinte et le socle refait après que des morceaux de celui-ci se soient décrochés.



FIGURE 24 – Laboratoire centre de thermodynamique de l’ULiège



FIGURE 25 – Statue de la Dame blanche

Note : Le site de l’Inventaire Régional du Patrimoine Culturel Immobilier a été indisponible pendant une partie de la période de ce recensement, suite à une attaque informatique ayant visé les serveurs du SPW. Il n’est toujours pas disponible à l’heure où j’écris ces lignes.

5 Approche expérimentale et résultats obtenus

5.1 Dispositif et protocole d'impression 3D

5.1.1 Matériel et configuration

L'imprimante

L'imprimante 3D béton utilisée dans le cadre de mon travail est une imprimante 3D béton assemblée et réalisée par Anatoly Berezkin qui gère la société StoneFlower3D. Sa taille est de 120 cm de long pour 80 cm de large et 1 mètre de haut. La surface d'impression utile est de 98 cm de long sur 49,5 cm de large et 50 cm de haut (Figure 26).

Les dimensions d'impression mentionnées ci-dessus sont théoriques, car l'encombrement du tuyau acheminant le mix imprimable vers la buse réduit la surface imprimable. Il est donc essentiel de surveiller non seulement la course de la buse dans les limites de la zone d'impression, mais aussi le déplacement du tuyau d'alimentation, afin d'éviter tout contact avec le châssis en aluminium. Le tuyau est en effet décalé d'une dizaine de centimètres par rapport à la buse et n'arrive pas verticalement, contrairement au filament plastique des imprimantes polymères.

Voici les différentes pièces composant l'imprimante et utiles à son utilisation (les numéros des éléments correspondent aux numéros placés sur la Figure 26) :

1. Un châssis en aluminium, réalisé à partir de profilés en croix de 5 centimètres de côté. Il permet de rigidifier la structure.
2. Des moteurs pas-à-pas : deux pour l'axe X, un pour l'axe Y, un pour l'axe Z et un pour le mélangeur.
3. Une buse d'impression qui est fixée sur l'axe Z.
4. L'imprimante est contrôlable à l'aide d'un écran tactile.
5. La carte contrôleur de l'imprimante se trouve dans la partie fermée du châssis. Il s'agit d'une Duet 3 Mainboard de la marque Duet3D, un contrôleur haute puissance conçu pour les imprimantes 3D. Elle permet de piloter 6 moteurs pas-à-pas haute intensité. La carte SD est insérée directement dans le port dédié sur la carte de contrôle. Elle contient les fichiers de configuration de la machine et peut être utilisée sur un ordinateur pour y importer des fichiers G-code.
6. Le plateau d'impression est une planche en contreplaqué marin surélevée offrant une surface lisse permettant de décoller l'impression 3D béton ou céramique. Celle-ci a des dimensions de 100 cm de long et 50 cm de large.

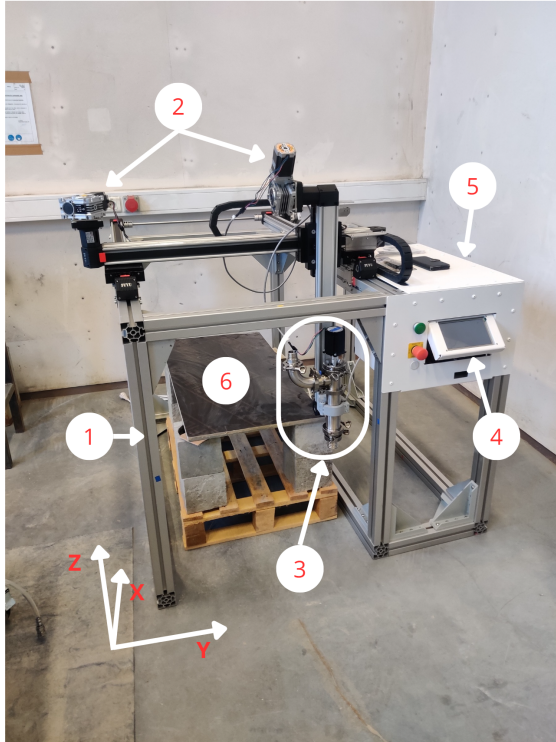


FIGURE 26 – Imprimante béton StoneFlow

La buse

La buse est un des éléments particuliers de l'imprimante, elle est composée de plusieurs parties comme l'illustre le schéma de la Figure 27 (Ma et al., 2018). La Figure 28 montre les différentes pièces composant la buse d'impression (les numéros des éléments correspondent aux numéros placés sur la Figure 28).

1. Pièce coudée d'arrivée de matière : c'est sur le haut de cette pièce que l'on vient brancher le tuyau relié à la pompe.
2. Le moteur pas-à-pas du mélangeur.
3. La pièce d'accouplement entre l'arbre du moteur et l'axe du mélangeur.
4. Le mélangeur se trouvant à l'intérieur de la buse (Figure 29). Il permet au mix d'être homogène en sortie de buse. Il est également possible d'introduire un activateur dans la buse pour que le béton prenne plus vite en sortie de nozzle, le mélangeur permet alors de répartir cet activateur.
5. La pièce de confinement de la buse.
6. La pièce de maintien entre la buse et l'axe Z.
7. Le nozzle, qui peut être changé, pour faire varier son diamètre.

Les différentes pièces sont reliées entre elles par des attaches circulaires, serrées à l'aide de vis papillon. Entre chaque pièce se trouve un joint torique semi-rigide. Toutes les pièces de la buse sont en acier inoxydable, à l'exception de la pièce d'accouplement entre l'arbre moteur et le mélangeur.

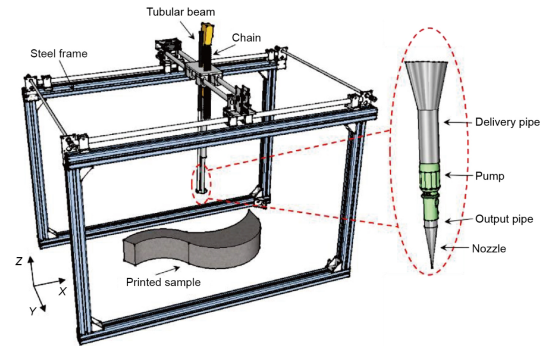


FIGURE 27 – Schéma d'une imprimante 3D 3 axes (Ma et al., 2018)

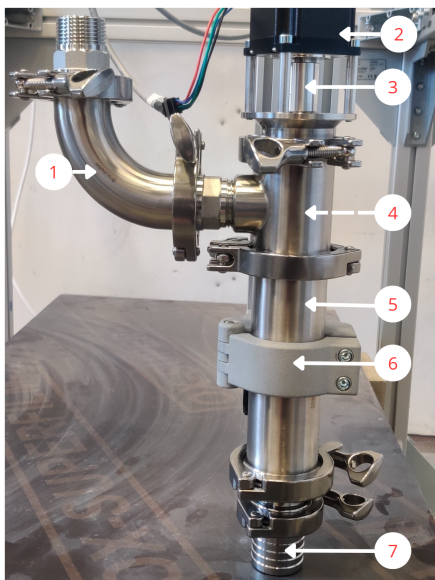


FIGURE 28 – Buse d'impression StoneFlow



FIGURE 29 – Mélangeur à l'intérieur de la buse

La pompe

La pompe est un modèle Powermat PM-AGT-3000M, vendu par le fournisseur en même temps que l'imprimante 3D béton (Figure 32). Cette dernière est montée sur 4 roues, ce qui permet une meilleure manipulation. Elle peut être déplacée à proximité du malaxeur pendant le mélange du mix, puis rapprochée d'une source d'eau et d'un caniveau pour le nettoyage de la machine.

En ce qui concerne ses caractéristiques, le réservoir arrière a une capacité de 50 litres. C'est une pompe à cavité progressive, qui garantit un débit constant, une caractéristique primordiale pour assurer une impression 3D béton de qualité. La pompe fonctionne grâce à un rotor qui est une vis hélicoïdale en acier (Figure 30), placée dans un stator qui permet de créer une aspiration constante du mix imprimable (Figure 31). L'espace entre le rotor et le stator forme des cavités fermées de volume constant, dans lesquelles le mélange est piégé puis progressivement poussé vers l'avant. Il progresse le long du stator à chaque rotation de la vis excentrée. L'un des avantages d'une pompe à cavité progressive par rapport à d'autres types de pompes est que son débit est directement proportionnel à la vitesse de rotation du rotor. Cela permet un contrôle du débit de manière plus précise. La pompe a un débit pouvant varier de 1,5 l/min à 10 l/min.



FIGURE 30 – Vis hélicoïdale en acier



FIGURE 31 – Stator de la pompe

Pour régler la pompe, un panneau de commande se trouve à l'arrière de celle-ci (Figure 33). Un potentiomètre permet de régler le nombre de tours par minute souhaité. Cette option manquant de précision, il est difficile d'atteindre une valeur exacte lors du réglage. Le panneau de commande permet aussi d'inverser le sens de rotation du rotor.

Le tuyau d'alimentation entre la pompe et l'imprimante est de 3 mètres de long. Celui-ci doit être placé le plus droit possible pendant l'impression pour que le flux du mix soit le plus constant possible. Les déformations du tuyau, telles que les plis, peuvent engendrer des bouchons et perturber la continuité du flux.



FIGURE 32 – Pompe mobile Powermat PM-AGT-3000M



FIGURE 33 – Panneau de contrôle

Configuration et G-Code

Lors du démarrage de l'imprimante et du lancement d'une impression, la machine s'initialise en prenant une position de référence, souvent appelée « origine machine » ou « point zéro machine (point 0 0) ». Cette position peut ensuite être modifiée via l'interface de l'écran tactile en saisissant de nouvelles coordonnées. L'impression commencera à partir de cette nouvelle position de référence.

Le déplacement du nozzle se fait par incréments, ce qui permet à la machine de connaître sa position relative par rapport au point d'origine (0,0) à tout moment de l'impression. Ces différentes opérations peuvent aussi être réalisées via un logiciel de contrôle de mouvement installé sur un ordinateur. L'imprimante est configurable pendant l'impression d'un élément. À l'aide d'un terminal de commandes, il est possible de configurer : la vitesse des moteurs, leur accélération, une position cible, une quantité de matière à extruder, etc. Toutes ces instructions peuvent être transmises à l'imprimante sous forme de commandes G-code, afin d'effectuer différents types de manipulations.

L'imprimante prend principalement en charge les fichiers au format G-code. Les modèles peuvent être réalisés sur tout type de logiciel de modélisation 3D, tel que Fusion 360, SolidWorks, Rhino, etc. Une fois la modélisation terminée, un fichier au format .stl peut être exporté depuis ces logiciels, puis importé dans un logiciel de découpe (slicer). Le slicer permet alors de subdiviser le modèle en couches et de générer un fichier .gcode. Une fois le G-code transmis à l'imprimante, celle-ci est en mesure d'exécuter les opérations nécessaires.

Le G-code est donc un langage de commande utilisé pour contrôler des machines à commande numérique, comme les imprimantes 3D, les fraiseuses CNC ou encore les découpeuses laser. Il fonctionne

en envoyant à la machine une série d'instructions ligne par ligne. Chaque ligne indique un ordre à exécuter. Les commandes commencent par une lettre (comme G ou M) suivie d'un nombre (par exemple G1 pour un déplacement linéaire). Des paramètres précisent l'action : positions (X, Y, Z), vitesses (F), etc. Par exemple, la commande "G1 X50 Y25 F1500" déplace la buse à la position relative (50,25) à une vitesse de 1500 mm/min. Pour les imprimantes, la commande E est aussi ajoutée après les informations X et Y pour indiquer à la machine combien de millimètres de matière il faut extruder. Par exemple, si après la première commande citée juste avant, on donne la commande "G1 X50 Y50 E20", alors la buse se déplace à la position relative (50,50), donc parcourt 25 mm selon l'axe Y, et sur ce déplacement l'imprimante extrude 20 mm de filament (si l'on est dans le cas d'une bobine par exemple). Si nous ne sommes pas avec un filament polymère et qu'il n'y a pas de bobine mais un mélangeur, cette commande E20 va faire tourner notre mélangeur de 20 pas.

5.1.2 Matériaux et essais préliminaires

L'imprimante a été installée le 25 mars 2025 au laboratoire béton du B52. Cette machine étant toute nouvelle, elle était inconnue du personnel du laboratoire et des doctorants. J'ai donc dû réaliser une série de tests, à la fois sur la composition du mix et sur l'utilisation de l'imprimante pour des impressions en argile et en béton. J'ai rencontré différentes difficultés expliquées ci-après.

Première réalisation d'impression d'échantillon-test

Une impression test est d'abord réalisée pour vérifier le bon fonctionnement de l'imprimante. La pièce réalisée est une forme basique d'un rectangle à extrémités semi-circulaires (Figure 34). Une forme qui semble simple au premier abord, mais qui serait complexe à réaliser à l'aide d'un coffrage en bois en raison de l'arrondi des deux côtés transversaux.

Lors de cette impression test, les options définies dans le slicer indiquaient une hauteur de couche de 15 mm et une largeur de couche de 35 mm. Après impression, la couche s'est tassée de 15 à 11 mm (Figure 35) et la largeur de couche est passée de 35 à 40 mm sur la pièce séchée. La vitesse d'impression utilisée était de 60 mm/s.

Lors de ce test, ainsi que pour les suivants, la commande "M92 E2000" est ajoutée dans le G-code pour que le moteur du mélangeur conserve une vitesse de rotation suffisante, assurant ainsi un mélange homogène en sortie de buse.



FIGURE 34 – Test première impression



FIGURE 35 – Hauteur de couche 1er test

Matériaux utilisés et compositions des mix

Pour les tests, un mélange d'argile, de sable et d'eau a été utilisé. Celui-ci nous a permis de réutiliser la matière une fois celle-ci imprimée. Le mix ayant une viscosité similaire à un mix béton en sortie de buse, il peut garder la forme du cordon que l'on souhaite lui donner et être pompé. Voici la composition de base du mix réalisé lors du premier test :

TABLEAU 2 – Compositions de mix d'argile

Composant	Proportion (en masse)
Poudre d'argile (Liant, L)	1 (part de référence)
Sable recyclé (S)	$S/L = 1$
Eau (E)	$E/L = 0,5$

Une fois l'échantillon sec, nous le trempions dans l'eau pour lui redonner une consistance malléable. Un test d'écoulement est alors effectué afin de maintenir une ouvrabilité similaire d'un test à l'autre. Ce test est réalisé à l'aide d'une table à secousses pour mesurer la valeur d'écoulement (diamètre d'étalement) de notre mix. On place le moule tronconique au centre du plateau de la table à secousses. On introduit le mix en deux couches, chacune étant compactée par dix petits coups de pilon pour obtenir un remplissage uniforme du moule (Figure 36). Une fois le moule rempli, on le retire lentement à la verticale. Le plateau réalise 15 secousses à un rythme d'une retombée par seconde. Trois mesures du diamètre du cône de matière sont prises sous des angles différents (Figure 37). Une moyenne de ces trois valeurs nous donne alors l'écoulement de notre mix. L'objectif est d'obtenir un écoulement identique entre chaque test, garantissant ainsi une ouvrabilité constante du mix utilisé.



FIGURE 36 – Table à secousses

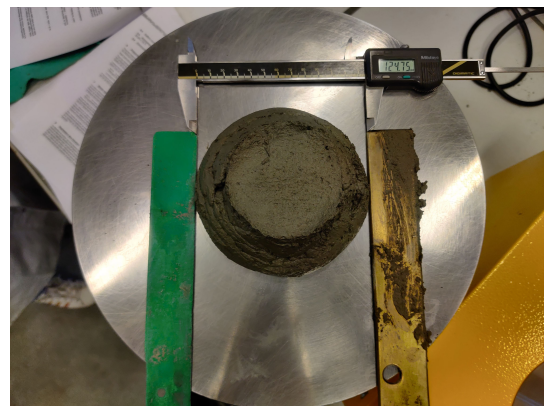


FIGURE 37 – Mesure du diamètre d'étalement

En ce qui concerne l'impression béton, les matériaux ont été sélectionnés afin d'obtenir un mortier facilement imprimable et de haute qualité, adapté à l'impression 3D béton. Ce mortier doit répondre aux exigences de pompabilité, d'extrudabilité et de constructibilité telles que définies dans l'état de l'art.

TABLEAU 3 – Compositions de mix béton

Composant	Proportion (en masse)
Ciment CEM I 52.5 N (Liant, L)	1 (part de référence)
Sable recyclé de béton 0-2 (S)	$S/L = 1$
Eau (E)	$E/L = 0,5$
superplastifiant (Sp)	$SP/L = 0,02$
viscosant (V)	$V/L = 0,01$

Réalisation de nouveaux nozzles de différents diamètres

Comme vu dans l'état de l'art à travers les exemples présentés, une caractéristique importante de l'impression 3D béton est la texture des pièces imprimées. Cette contrainte s'explique en partie par la taille de la buse, bien plus large que celles utilisées en impression 3D de polymères, où les hauteurs de couche avoisinent généralement 0,2 mm. Il est donc possible de moduler cette texture en faisant varier le diamètre de la buse.

En impression 3D béton, le diamètre de la buse peut être réduit, mais seulement jusqu'à un certain point. Le risque, au-delà d'un certain rétrécissement de la buse, est que les grains de sable ou les granulats fins puissent s'accumuler et former un bouchon, bloquant l'écoulement du mix. Un conseil fréquemment formulé dans la littérature scientifique sur l'impression béton est que le diamètre de la buse doit être au minimum dix fois supérieur à celui du plus gros grain présent dans le mix. Pour un nozzle de 10 mm, il faut donc utiliser un sable normalisé 0-1.

En plus de la buse d'origine, j'ai modélisé et conçu trois autres nozzles pour l'imprimante. Tous sont imprimés par impression 3D polymère (Figure 38). Une épaisseur plus importante est donnée aux parois pour pouvoir reprendre la pression exercée par le mix en sortie de buse (Figure 39). Le premier nozzle a un diamètre de 20 mm, le second fait 15 mm et le dernier 10 mm. La jonction de la buse avec le nozzle est toujours dessinée de la même manière pour pouvoir accueillir le joint (creux visible sur le haut de la Figure 39).



FIGURE 38 – Nouveaux Nozzles imprimés 20/15/10 mm

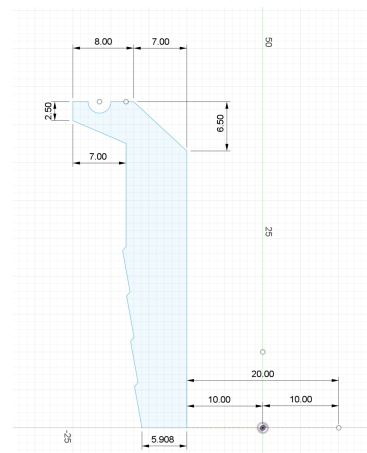


FIGURE 39 – Coupe du nouveau nozzle de 20 mm

Vitesse d'impression

Un mot peut être dit sur la vitesse d'impression des tests réalisés. En impression béton, des vitesses

d'impression de 100 à 200 mm/s sont souvent choisies. Pour les gros éléments, cette vitesse peut être augmentée jusqu'à 300 mm/s, comme pour la création de murs de maisons. Dans le cas des impressions réalisées dans ce travail, la vitesse varie entre 90 et 120 mm/s, ce qui est une vitesse plutôt lente pour de l'impression béton. Mais dans ce cas, où mes pièces sont petites et du fait d'avoir utilisé des buses de diamètres plus fins, il faut diminuer cette vitesse d'impression.

Une autre spécificité de l'impression béton est que la première couche d'impression peut être réalisée à la même vitesse que les couches supérieures. Ce qui n'est pas le cas pour l'impression 3D polymère. Dans ce dernier cas, la première couche est imprimée plus lentement pour assurer une bonne adhésion au lit d'impression. Le danger avec l'impression polymère est d'avoir un décrochage de la pièce à un moment de l'impression. Dans le cas de l'impression 3D béton, la première couche n'a pas besoin d'avoir une adhésion forte avec le lit d'impression. L'élément est trop lourd pour être emporté par la friction du nozzle avec la pièce.

Impression de cordon de test 2 avec changement de buses

L'objectif était de réaliser des tests afin d'observer le comportement du cordon d'impression en fonction du diamètre du nozzle. La première impression a été réalisée à l'aide d'un nozzle de 34 mm. Le but de ce second test est d'essayer un nozzle plus petit, d'un diamètre de 20 mm. L'un des objectifs est de vérifier si la pompe peut maintenir un débit suffisamment constant à faible nombre de rotations par minute (rpm). Le débit conseillé, par le fabricant, pour un nozzle de 20 mm avec une hauteur de couche de 10 mm et une vitesse d'impression de 120 mm/s est de 1,44 l/min (Figure 40). Cette valeur étant très proche du débit minimum que la pompe peut maintenir, des problèmes peuvent apparaître. Il est difficile pour la pompe de fonctionner de manière stable à une vitesse de rotation aussi basse que 432 rpm. Lors du test, celle-ci varie entre 420 et 500 rpm poussant trop de matière hors de la buse.

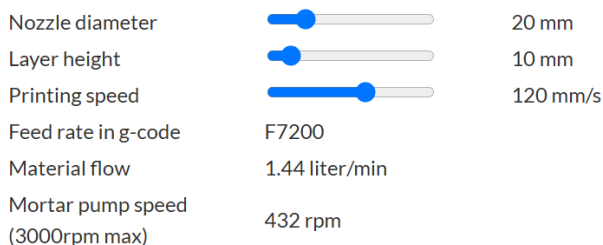


FIGURE 40 – Calculateur de débit conseillé par le fabricant

Le test consiste à imprimer des rectangles aux extrémités semi-circulaires. Cette forme a été choisie car les périmètres arrondis évitent à la buse de s'arrêter brutalement dans un angle. Le but en impression béton, et en impression 3D en général, est de ne pas avoir d'accélération et de décélération trop brusques. C'est pourquoi la création de forme contenant des angles droits est déconseillée en impression béton. Lorsque la buse atteint un angle et doit changer de direction, sa vitesse devient nulle à ce point. Comme la buse ralentit à cet endroit et donc y reste plus de temps, un excès de matière peut s'y accumuler, entraînant un dépôt trop important. C'est l'une des raisons pour lesquelles on chanfreine ou arrondit les bords des pièces imprimées en 3D.

Ces tests permettront d'identifier quelle largeur de couche assure un dépôt sans espaces entre les cordons, ni superposition de ceux-ci. Dans le premier cas (espaces), des vides pourraient se former dans la pièce, compromettant sa stabilité jusqu'à la fin de l'impression. Dans le second cas (superposition), cela entraînerait un excès de matière, qui n'aurait plus de place pour être déposé.

correctement et déformerait la pièce finale. Il faut donc trouver, en fonction de la viscosité du mix, le bon écart entre les cordons pour que ceux-ci se juxtaposent de la meilleure manière.

Le test met en évidence que la pompe débite trop de matière et n'arrive pas à rester constante en termes de débit à une vitesse de rotation aussi faible. Trop de matière est extrudée, ce qui entraîne un écrasement des cordons sur la plaque d'impression (Figure 41). Il est donc nécessaire soit d'augmenter l'épaisseur de couche, soit le nombre de rotations par minute de la pompe, afin d'atteindre une valeur plus stable pour celle-ci.

Le début de l'impression montre également qu'il serait préférable de commencer en dehors du lit d'impression, afin d'éviter une accumulation de mix au démarrage. Ce test met aussi en évidence que le tuyau amenant le mix à la buse occupe beaucoup d'espace, ce qui est un point important à surveiller. Le tuyau réduit l'espace d'impression d'une dizaine de centimètres du côté où il est fixé à la buse. Si le tuyau bloque le mouvement de l'imprimante, cela fausse sa position estimée, entraînant un décalage dans la suite de l'impression.



FIGURE 41 – Test d'impression de cordon 20/10

Impression de cordon de test 3

Pour remédier à ces différents problèmes, une nouvelle approche est adoptée pour les tests. Mon premier objectif est de stabiliser la pompe à une vitesse constante (un certain nombre de rpm) afin d'assurer un débit régulier en sortie de buse, avant de lancer l'impression.

En effet, le test précédent a montré qu'au cours des premières secondes d'impression, le débit en sortie de buse n'est pas encore stable, en raison du démarrage de la pompe et de son réglage. Il faut donc extruder de la matière en continu pendant une trentaine de secondes avant de lancer mon impression. Mais si de la matière passe dans la buse durant ces 30 secondes, il faut faire tourner le mélangeur. Dans le cas contraire, la matière débitée par la pompe s'accumule dans la buse et exerce une force sur l'axe du mélangeur pendant ce temps d'attente. Cette pression sur l'axe pourrait entraîner un moment de flexion et abîmer la pièce d'accouplement, le moteur ou l'axe lui-même.

Il me faut donc placer une commande de mouvement très longue sur l'extrudeur (E) au début de mon G-code d'impression. Elle va démarrer le mélangeur et le faire tourner sans interruption pendant 30 secondes. De cette manière, je m'assure d'avoir un débit constant avant le début effectif

de l'impression de la pièce, et ce temps me permet d'ajuster le potentiomètre afin d'atteindre un nombre de rotations par minute le plus précis possible pour la pompe.

Une autre solution consisterait à faire tourner le mélangeur en continu pendant toute la durée de l'impression, indépendamment du reste du système. C'est d'ailleurs souvent le cas en impression béton : on préfère que la pompe et le mélangeur fonctionnent en continu tout au long de l'impression, sans nécessairement les synchroniser avec la distance extrudée via la commande E du G-code. Malheureusement, en G-code pur sur des imprimantes classiques utilisant des firmwares comme Marlin ou Duet, comme celle utilisée dans ce travail, il n'existe pas de commande permettant de faire tourner un moteur indéfiniment. En effet, avec ces firmwares et les moteurs pas-à-pas, les mouvements sont déclenchés par des commandes de type "G1", qui indiquent une position ou un déplacement cible. Les moteurs effectuent donc des séries de pulses et puis s'arrêtent et attendent la prochaine commande, mais une commande ne peut pas avoir lieu durant toute les autres (comme faire tourner le mélangeur indépendamment pendant une série de mouvement).

Pour pallier cela, le point de départ de l'impression est décalé d'une dizaine de centimètres selon l'axe X par rapport au bord du plateau. Cela laisse un espace où placer un seau de récupération du mix au point d'origine machine (0,0). Ainsi, en lançant l'impression, la pompe est activée et le matériau extrudé tombe dans le seau pendant la phase de stabilisation du débit (environ trente secondes). La matière ainsi récupérée pourra, après le début de l'impression de la pièce, être remise dans la cuve de la pompe et réutilisée, évitant le gaspillage. Cette opération sera répétée pour toutes les impressions à venir. Quant à la rotation du mélangeur pendant l'impression, celle-ci devra être contrôlée à chaque ligne de commande G-code avec une valeur d'extrusion (E) appropriée après chaque déplacement (X, Y).

Deuxièmement, je n'imprime plus de formes avec des cordons adjacents serrés, mais plutôt des cordons individuels espacés, afin d'évaluer leur géométrie et leur comportement à différentes hauteurs de couche. Le nouveau test consiste donc à imprimer des cordons séparés les uns des autres, avec des hauteurs de couche variables. Une partie des cordons sont uniques (une seule couche) et l'autre partie comporte des cordons superposés (deux couches). De cette manière, j'observe la déformation de mes cordons avec et sans superposition de couches.

Pour réaliser mon test de tracé, je génère le G-code manuellement. Comme il ne s'agit que de simples lignes, il m'est plus facile de l'écrire moi-même que d'utiliser un slicer. Je m'appuie sur un G-code précédemment généré avec PrusaSlicer lors des essais d'échantillons antérieurs pour tout de même avoir une structure de fichier. Je nettoie le G-code de toutes les informations inutiles, comme les réglages de température ou de ventilation, qui ne sont pas utiles dans le cadre de l'impression 3D béton.

Deux tests ont été réalisés :

- Le premier avec le nozzle original de 34 mm de diamètre. Sept cordons ont été imprimés successivement, chacun avec une hauteur de couche différente. Les hauteurs de couche étaient donc (Figure 42, en partant de la droite vers la gauche) de 10, 15, 16, 17, 18, 19 et 20 mm. Les hauteurs de couche inférieures ou égales à 17 mm étaient trop aplaties et déformées sous la pression exercée par la buse et le nozzle. La hauteur de couche de 20 mm ne permet pas de souder correctement les couches les unes aux autres. Les deux hauteurs de couche convenables sont donc 18 et 19 mm. Ce test a été réalisé avec un nombre de rotations par minute de 1000 rpm pour la pompe.
- Le second test a été réalisé avec le nouveau nozzle imprimé en polymère de 20 mm de diamètre (Figure 43). Dans ce test également, sept cordons ont été imprimés, en faisant varier la hauteur

de couche de la même manière que précédemment. Les cordons imprimés avec une hauteur de couche de 10, 15 et 16 mm sont trop aplatis par le nozzle. Les trois hauteurs de couche adaptées sont celles de 17, 18 et 19 mm. On obtient pour ces cordons une largeur de 20 mm. Ces tests ont été réalisés avec un nombre de rotations par minute de 600 rpm pour la pompe.

Lors de cette impression test, plusieurs problèmes ont été rencontrés :

Un problème de buse : le joint original devant empêcher la matière de remonter au niveau du mélangeur n'était pas placé dans le bon sens, c'est-à-dire de manière à ce qu'il soit compressé lorsque la matière remonte. La matière a poussé le joint vers l'axe et a laissé passer de l'argile. L'axe s'est donc bloqué, puis s'est détaché de la pièce d'accouplement. En conséquence, l'impression a eu lieu sans activation du mélangeur. Cela a induit des discontinuités dans l'impression, comme on peut le voir sur les Figures 42 et 43. Ce problème est détaillé dans les annexes, avec des explications complémentaires et des schémas illustratifs (Annexe 9.2).

Un second problème s'est produit lors de l'impression des cordons avec la buse de 20 mm. Les moteurs se sont bloqués lors de l'impression des cordons de la seconde couche. Cela a conduit à un décalage de tous les cordons suivants, comme on peut le voir sur la Figure 43. Ce blocage est probablement lié à une contrainte mécanique exercée par le tuyau mal positionné, ou à un défaut de fonctionnement des moteurs.



FIGURE 42 – Test d'impression nozzle 34 mm



FIGURE 43 – Test d'impression nozzle 20 mm

5.2 Numérisation 3D des éléments

Pour cette section, j'adopterai la même structure que celle utilisée dans mon état de l'art. J'utilise différents types de scans sur des éléments en béton, qu'ils soient dégradés ou non. Il s'agit de la première étape du processus de restauration défini dans ce travail de fin d'études.

Reconstruire ou remplacer une partie manquante ou endommagée d'un bâtiment du patrimoine est une tâche délicate pour plusieurs raisons :

Les bâtiments, étant relativement anciens, généralement âgés de cinquante à cent ans, disposent de très peu de plans ou de schémas permettant de les documenter. Lorsque de tels plans existent, ils ne rentrent pas dans des détails fins et ne donnent pas ou peu de cotes sur les éléments de détails. Une solution pour pallier l'absence de plans consiste souvent à réaliser un relevé de l'état existant du bâtiment. On s'appuie alors sur des mesures de terrain pour reconstituer les plans de l'existant. Il s'agit d'une tâche complexe, souvent longue et qui peut comporter des erreurs. Dans ce contexte, l'utilisation de scans sur les parties endommagées peut représenter une solution pertinente qui a pour avantage d'être efficace et de limiter les erreurs. De même, lorsque le bâtiment présente des ornements, des moulures, des finitions ou des courbes complexes, l'utilisation d'un scanner permet de reproduire ces éléments bien plus rapidement qu'un relevé manuel ou une modélisation schématique.

L'utilisation d'un scanner 3D constitue une méthode simple et efficace pour relever les éléments manquants d'un bâtiment, perdus à la suite d'un phénomène de dégradation du béton ou d'un incident. L'usage d'un drone peut être envisagé pour les éléments en hauteur, car installer un échafaudage est plus long et plus coûteux.

Ces trois méthodes présentent un avantage important : elles sont non destructives et, puisqu'elles n'impliquent aucun contact direct avec la structure, elles ne risquent pas de détériorer davantage le bâtiment.

Élément de test (Église Saint Vincent)

En premier lieu, une pièce test va être numérisée, c'est un élément en béton de l'église Saint-Vincent située à Liège. En raison des dégradations affectant le béton en façade de l'église, notamment la carbonatation et l'éclatement, j'ai pu prélever un élément de béton déjà décroché. Cet élément, issu de la partie inférieure d'une baie, mesure 15 cm de long et 10 cm de large (Figure 44).

J'ai numérisé cet élément à trois reprises, avec un scanner différent à chaque fois, afin d'obtenir trois modèles de qualité différente. Les modèles obtenus sont exportés sous différents formats de fichiers : soit .fbx, soit .obj, soit .stl. Les fichiers .fbx et .obj sont convertis en .stl avant d'être utilisés. Aucune modification n'est apportée aux fichiers .fbx ou .obj, ceux-ci n'étant pas des maillages modifiables dans Fusion 360. Il n'y a pas de compression de fichier, juste une modification de type de fichier de .fbx ou .obj vers .stl. La qualité du modèle n'en est donc pas impactée. Une fois tous les fichiers convertis au format .stl, Fusion 360 me permet d'analyser le nombre de points et de facettes générés par chacune des trois méthodes. Ces données serviront à mesurer le niveau de précision fourni par chaque méthode de scan. L'analyse du nombre de facettes permet d'avoir une première idée de la densité du maillage et donc potentiellement de la finesse des détails capturés.

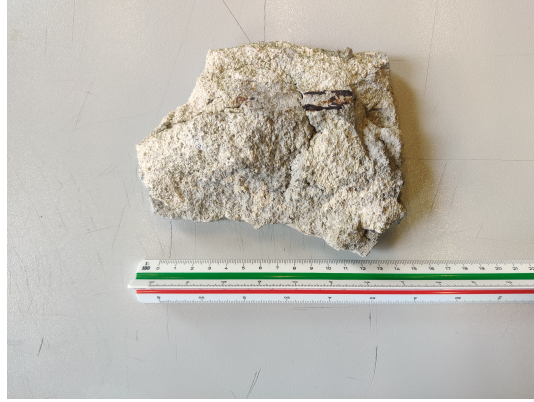


FIGURE 44 – Élément de test en béton, Eglise Saint Vincent

• Photogrammétrie

Le premier scan de cet élément a été réalisé par photogrammétrie. Il s'agit d'une méthode de scan qui repose sur l'utilisation de multiples images haute résolution pour reconstituer un élément en 3D.

Je commence par positionner le bloc de façon à maximiser la visibilité de toutes ses faces. Je m'aide d'un bloc de frigolite pour le maintenir dans une position verticale. De cette manière, je peux tourner autour de l'objet et prendre une série de photos (Figure 45). L'objectif est de prendre les photos à des intervalles angulaires réguliers, afin de faciliter le repérage du logiciel entre les différentes prises de vue. Les photos sont prises avec un OnePlus 7, sorti en 2019. L'appareil photo principal de ce téléphone est composé d'un capteur de 48 mégapixels (Sony IMX586).

Je place mes 59 photos de l'élément dans le logiciel Autodesk ReCap, qui reconstruit un modèle 3D en identifiant les points communs entre les images à partir de l'analyse des pixels (Figure 46). Pour aider ReCap à se repérer dans l'espace entre les différentes photos, je place une série de gommettes sur l'élément et sur la base (points bleus visibles sur la photo). Ainsi, le logiciel peut s'appuyer sur des points de repère clairement visibles (les pixels bleus contrastent avec l'élément) pour reconstituer les déplacements entre chaque photo.



FIGURE 45 – Placement de l'élément

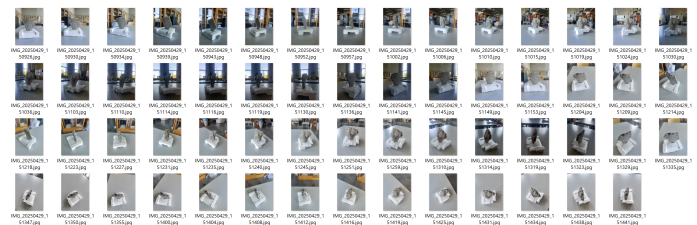


FIGURE 46 – Liste des photos

Pour donner plus d'explications sur Autodesk ReCap, c'est un logiciel développé par la suite Autodesk qui permet de créer des modèles numériques 3D à partir de données de capture du réel. Dans le cadre de mon travail, les données proviennent d'un assemblage de photos prises sous différents angles. Les photos sont placées sur le cloud Autodesk pour que Recap puisse y avoir accès.

ReCap est principalement utilisé pour traiter, visualiser et préparer des nuages de points et des modèles photogrammétriques à intégrer dans des logiciels de modélisation comme AutoCAD, Revit, Fusion ou 3ds Max. Il est fréquemment utilisé par des architectes, des géomètres ou des ingénieurs pour réaliser des relevés d'éléments, de sites, de bâtiments, etc.

Autodesk ReCap est normalement un logiciel disponible par abonnement, sauf pour les étudiants, qui peuvent bénéficier d'une version gratuite. Ce logiciel permet d'atteindre une précision élevée pour la modélisation et l'analyse d'éléments et sa prise en main est relativement accessible.

Le résultat obtenu est au format .fbx, que j'importe dans Blender 4.4 afin de l'exporter ensuite au format .stl. Fusion 360 ne permet pas directement d'ouvrir des fichiers .fbx, il me faut passer par l'intermédiaire de Blender. Blender me permet aussi d'observer les angles de prise de vue de chaque photo, repositionnées dans l'espace par Autodesk ReCap, comme on peut le voir sur la Figure 47.

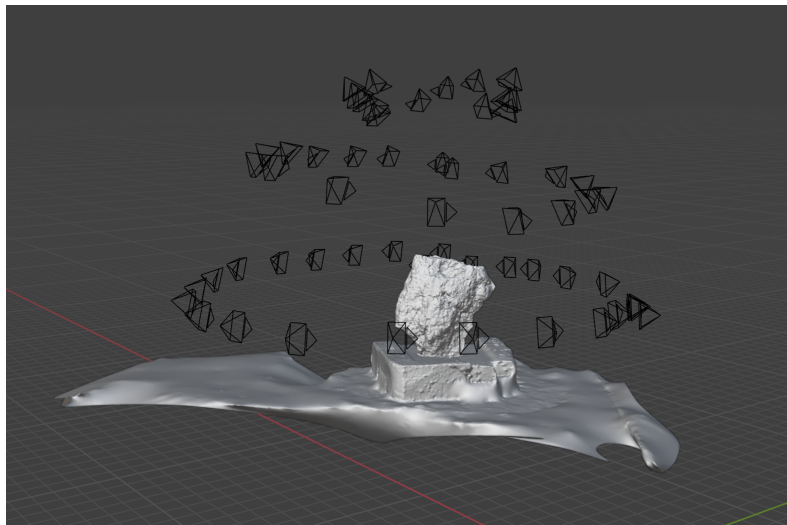


FIGURE 47 – Élément de test dans Blender 4.4

Lorsque ReCap crée le maillage de scan, il ne différencie pas la pièce et le contexte environnant. En plus de l'élément désiré, le logiciel a modélisé la pièce de frigolite supportant l'élément et une partie de la table sur laquelle était posé l'ensemble. Ces éléments parasites peuvent être retirés une fois le maillage importé au format .stl dans Fusion 360. Il ne reste alors que la pièce désirée (Figure 48). Elle est composée de 255 831 facettes, ce qui en fait un maillage de haute précision, qui pourra être comparé à la pièce réelle. Cela permettra de vérifier si cette précision est représentative de la réalité. Les détails sont visibles avec une bonne netteté, notamment au niveau des creux (éléments complexes du scan) ainsi qu'à l'endroit où se trouvait l'armature. Les détails de surface atteignent une précision inférieure au millimètre, visible sur la Figure 49. Le seul inconvénient avec cette méthode est la partie de l'élément qui était en contact

avec le support en frigolite. Autodesk Recap n'a pas pu créer cette surface, celle-ci n'étant pas visible sur les photos. Si l'élément avait été déplacé pour rendre cette partie visible, le modèle aurait perdu ses points de repère et n'aurait pas pu générer le maillage. Pour résoudre ce problème, il aurait fallu effectuer un second scan, indépendant du premier, en retournant l'élément afin de rendre visible la partie qui était auparavant cachée. Il aurait ensuite fallu combiner les deux scans durant l'étape de modélisation.

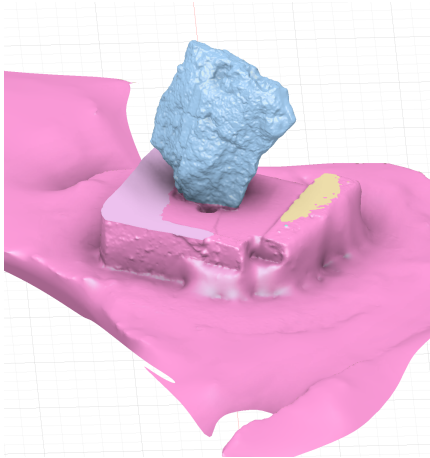


FIGURE 48 – Élément isolé du contexte

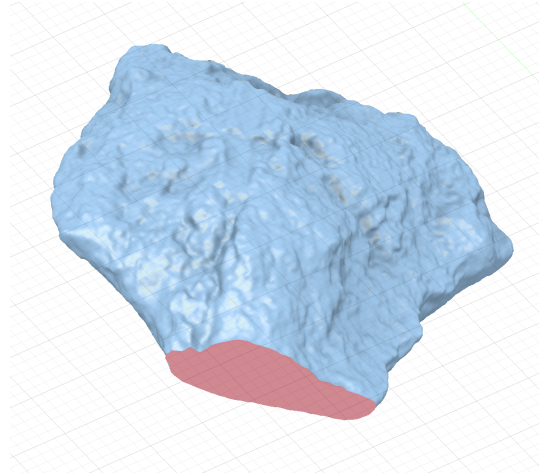


FIGURE 49 – Surface manquante de l'élément

• Numérisation 3D Lidar

Je réalise un deuxième scan de cet élément à l'aide d'un scanner Lidar. Les LiDAR émettent des impulsions de lumière infrarouge et mesurent le temps que celles-ci mettent à revenir, ce qui permet d'estimer la distance des objets. Cela permet de créer une carte de profondeur de l'environnement qui peut ensuite être convertie en nuage de points ou en maillage.

J'utilise un iPad Pro 12,9 pouces de cinquième génération (modèle 2021), qui comprend un capteur de profondeur de type ToF (Time of Flight) intégré à l'arrière de l'appareil. Il émet des impulsions infrarouges afin de mesurer la distance entre l'iPad et les objets environnants, jusqu'à une portée d'environ 5 mètres. Le LiDAR fonctionne en combinaison avec le module photo situé à l'arrière de la tablette, qui est composé de deux caméras 12 mégapixels.

Pour la réalisation du scan, j'utilise l'application KIRI Engine. C'est une application mobile qui permet de créer des modèles 3D à partir de photos ou de scans LiDAR, en utilisant la photogrammétrie ou la capture de profondeur. Elle est gratuite sur l'App Store et est aussi disponible pour les appareils Android. Sa prise en main est très simple. Les indications sont affichées tout au long du scan. Il suffit de réaliser un tour de l'élément tout en balayant les zones indiquées (Figure 50). L'opération doit être répétée trois fois, après quoi le logiciel produit directement le maillage 3D. Une fois exporté, le fichier .obj peut être importé dans Fusion 360.

Dans ce cas également, KIRI Engine inclut une partie du support en frigolite, que l'on retire ensuite dans Fusion 360. Le maillage finalement obtenu est composé de 24 300 facettes. La précision obtenue est également très satisfaisante, avec des détails de l'ordre du millimètre sur les aspérités et une surface bien définie dans les zones en creux (Figure 51).

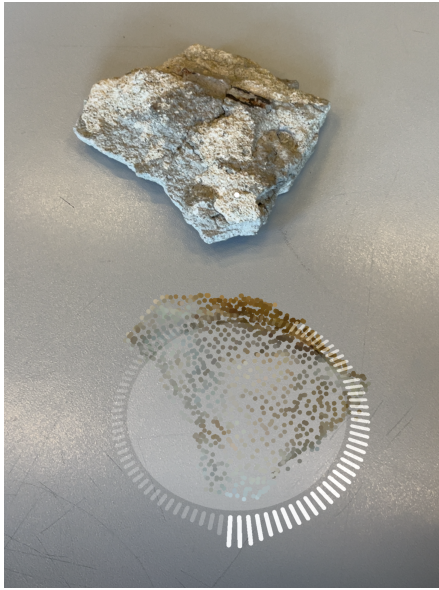


FIGURE 50 – Interface de Kiri Engine

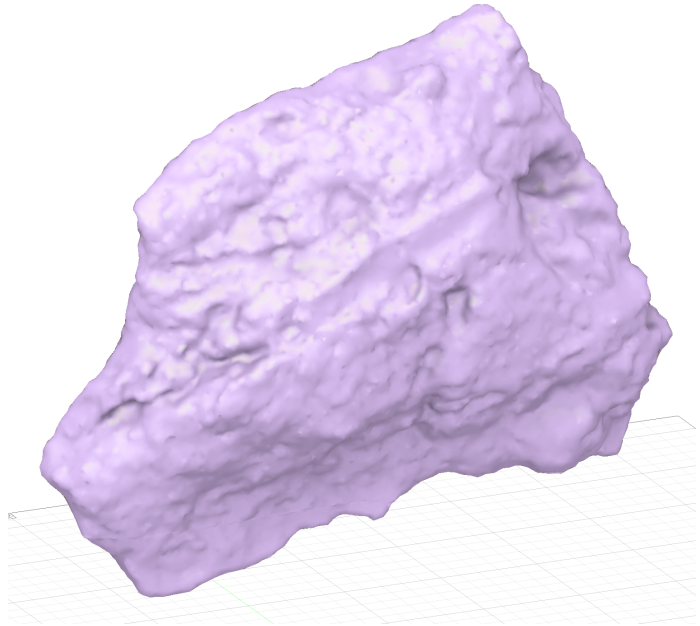


FIGURE 51 – Élément isolé, scanner par Lidar

• Numérisation 3D Laser

Le troisième et dernier scan de l'élément est réalisé à l'aide d'un scanner Laser. Le système émet des faisceaux laser qui balaient une surface, et mesure le temps où l'angle de retour du signal réfléchi pour reconstituer la forme et la position de l'élément en 3D.

Cette technologie nécessite un équipement professionnel spécifique. J'utilise donc le scanner laser du Fab52, un scanner FreeScan UE Pro (modèle 2024). Ce scanner permet d'atteindre une précision maximale de 0,02 mm et d'enregistrer 1 850 000 points/s. Le scanner est ensuite connecté au logiciel Shining 3D.

Pour la réalisation du scan, il faut d'abord calibrer la machine à l'aide d'une plaque sur laquelle sont placées des lignes de pastilles. Celles-ci permettent au scanner d'avoir des points d'accroche et de se calibrer.

Une fois le scanner calibré, l'élément peut être scanné. L'élément est placé sur l'un de ses côtés de manière à exposer un maximum de surface, puis balayé par des faisceaux laser visibles sous forme de quadrillage projeté. L'ordinateur traite en temps réel les parties de l'élément qui ont été scannées. De cette manière, il est possible de voir les zones plus critiques, tels que les creux ou les surfaces complexes, nécessitant un balayage complémentaire. Une fois la première face scannée, on peut enregistrer cette première partie, puis retourner la pièce pour entamer le scan de l'autre face.

Une fois les deux faces scannées, on fournit des points d'accroche au logiciel Shining 3D afin qu'il puisse les assembler correctement. On obtient alors un modèle entier. Le logiciel permet de corriger automatiquement les défauts, tels que les trous ou les jonctions mal réalisées. Une fois toutes ces opérations terminées, un fichier .stl peut être exporté.

Dans le cas du scan laser, on obtient un maillage de 8 754 226 facettes. C'est un modèle extrêmement précis (Figure 52). Pour ce scan, une précision de quasiment 0,05 mm a été atteinte. Le modèle génère un fichier très lourd, ce qui nécessite un ordinateur suffisamment

puissant pour assurer une utilisation fluide.

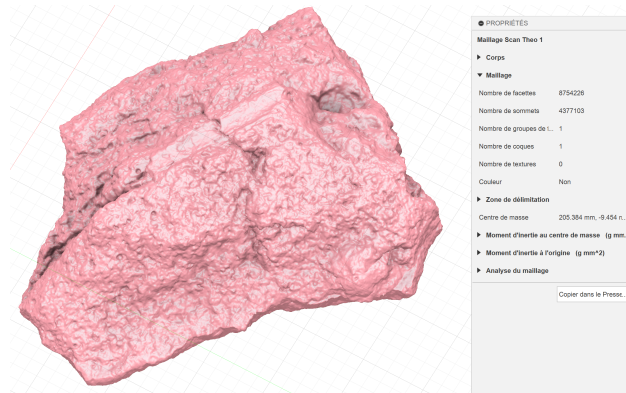


FIGURE 52 – Modèle obtenu à l'aide d'un scan laser

Coin de colonne (Laboratoire de Thermodynamique)

En second lieu, j'ai effectué un scan d'un élément en béton dégradé : un chapiteau de colonne situé à côté du laboratoire de thermodynamique de l'ULiège. Certains chapiteaux présentent des dégradations dues à la carbonatation du béton, un phénomène qui entraîne la corrosion des armatures, suivie de l'éclatement du béton (Figure 53).

Les morceaux de béton qui ne sont plus solidaires de la structure principale sont retirés, puis le béton de surface est légèrement décapé. Le décapage du béton est une opération couramment réalisée dans les projets de rénovation. Cela consiste en une préparation de surface avant application de nouveaux revêtements. On vient enlever la couche superficielle d'un béton (poussières, laitance, salissures ou même une fine couche de béton) afin de retrouver une surface propre et adhérente à la partie saine du béton.

Pour décaper la surface, on commence par utiliser un marteau afin de retirer les parties les plus volumineuses qui ne sont plus solidaires, puis on termine par un ponçage à l'aide d'une ponceuse à béton (disqueuse) afin de lisser ou d'enlever une fine couche de surface et d'obtenir un support propre (Figure 54).



FIGURE 53 – Colonne dégradée



FIGURE 54 – Colonne décapée

- **Photogrammétrie**

Je commence par la numérisation photogrammétrique pour cet élément. J'utilise une escabelle pour me placer de manière à ce que chacune des faces soient le plus accessible possible. Cela me permet de tourner à la bonne hauteur autour de la colonne pour prendre la série de photos.

Je prends un ensemble de 168 photos pour cet élément. La limite de photos que l'on peut importer dans Autodesk ReCap est de 100, je garde donc une photo sur 2 de l'ensemble et je les importe dans Autodesk ReCap. Pour aider le logiciel ReCap à se repérer dans l'espace entre deux photos, je place une série de marqueurs (gommettes) sur la colonne. Ainsi, le logiciel dispose de points clés bien visibles pour déterminer les déplacements du téléphone entre deux photos successives.

Après le traitement d'Autodesk ReCap, on obtient un fichier .fbx (Figure 55) qui est exporté dans Blender afin de générer un fichier .stl. Les éléments inutiles du scan, comme la poutre en béton de la toiture ou le fût de la colonne, peuvent être isolés. Il ne reste alors que la pièce désirée dans Fusion 360 (Figure 56). Elle est composée de 2 662 882 facettes, ce qui en fait un maillage d'une haute précision.



FIGURE 55 – Scan photogrammétrique du chapiteau en .fbx

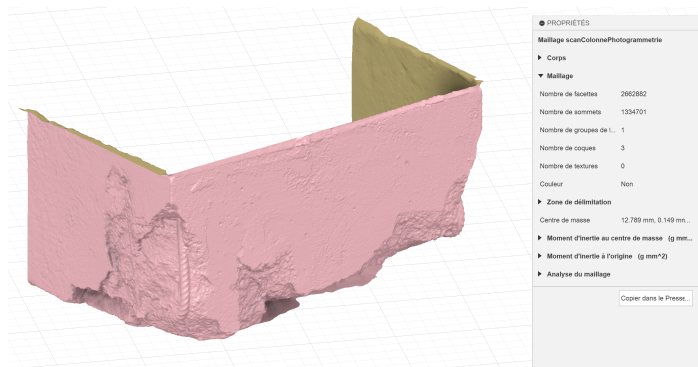


FIGURE 56 – Maillage isolé de la colonne

- **Numérisation 3D Lidar**

Le second scan est fait à l'aide du Lidar d'un iPad Pro. Pour plus de précision, le coin gauche est d'abord scanné, puis le coin droit, dans deux fichiers séparés (Figure 57 et 58). L'encombrement de la tablette limite les déplacements, et des mouvements trop rapides, comme la descente de l'escabelle, posent problème au logiciel Kiri Engine. La réalisation du scan en deux parties demandera une étape de jonction lors de la modélisation. La colonne faisant 80 cm de bord à bord et les deux scans ayant des points communs sur la partie de jonction, cette fusion n'est pas très complexe. Kiri Engine guide le balayage de l'élément en indiquant les zones oubliées ou moins bien scannées. Cette opération étant réalisée sur une surface et non sur un élément en volume, le scan peut être effectué en une seule prise, et non en trois. Le logiciel sort le maillage 3D directement sous un format de fichier .obj que l'on peut importer dans Fusion 360.

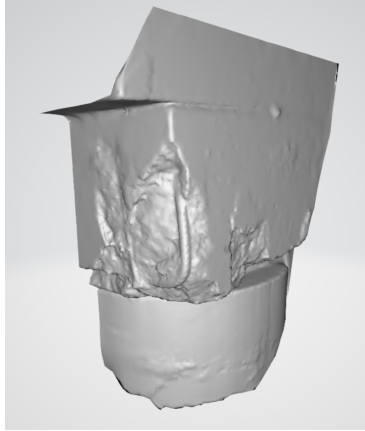


FIGURE 57 – Scan lidar du coin gauche du chapiteau en .obj

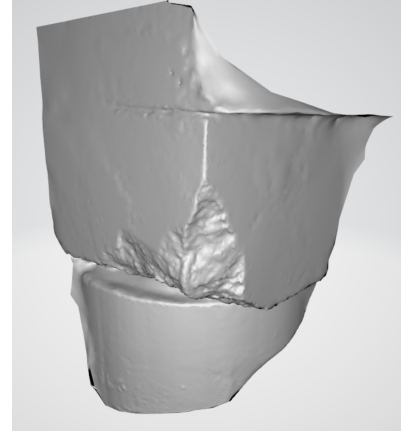


FIGURE 58 – Scan lidar du coin droit du chapiteau en .obj

Comme en photogrammétrie, le logiciel inclut une partie du fût de la colonne et de la poutre, éléments que l'on isole par la suite dans Fusion 360. Le maillage finalement obtenu est composé de 30 011 facettes (15 194 pour la partie de droite et 16 817 pour la partie de gauche). La précision est moins élevée que le scan fait par photogrammétrie, mais reste d'une bonne qualité pour un élément de cette taille. On retrouve, sur le scan, des détails de l'ordre de 2-3 millimètres, comme on peut le voir au niveau des barres d'armatures (Figure 59).

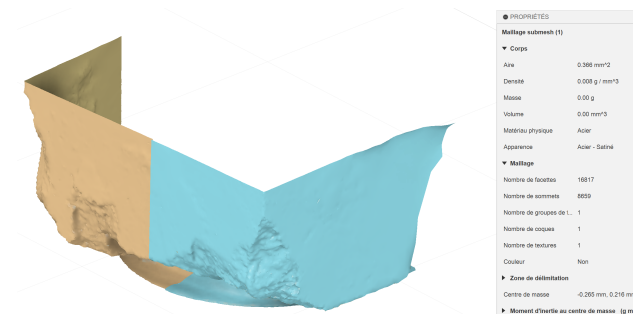


FIGURE 59 – Scan lidar du chapiteau

• Numérisation 3D Laser

Le dernier scan du chapiteau a été réalisée à l'aide d'un numérisation 3D laser. Un technicien du Fab52 était présent pour veiller au bon fonctionnement de l'équipement et à sa bonne utilisation. J'utilise donc le scanner FreeScan UE Pro. Les pastilles collées précédemment pour le scan de photogrammétrie sont également utilisées pour ce scan. Celles-ci vont permettre au scan de se repérer dans l'espace durant les mouvements de balayage. Le scanner est connecté au logiciel Shining 3D, durant toute la durée du scan, ce qui permet de savoir quelles zones on déjà été scannées. Après calibration de l'appareil, le scan peut être lancé. L'escabelle a été déplacée deux fois en mettant le scan en pause, ce qui permettait de réaliser des mouvements plus confortables avec le scanner.

Une fois le scan terminé, le logiciel corrige les défauts restants et enregistre un fichier .stl sur l'ordinateur. Le nuage de points formé est de 1 154 439 sommets (ou 2 244 505 facettes) et, une fois celui-ci converti en un maillage et nettoyé des parties inutiles, comme pour les autres scans, un total de 1 333 798 facettes est obtenu (Figure 60). Le maillage généré est donc très

précis. Une précision de 0,5 mm a été retenue pour éviter un modèle trop lourd et lent à manipuler sur un ordinateur standard.

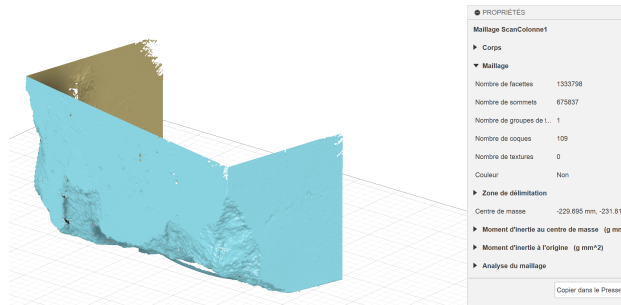


FIGURE 60 – Scan laser du chapiteau

Main de la statue de la Dame blanche (Mémorial Walthère Dewé)

J'ai troisièmement réalisé un scan de la main d'une statue non dégradée. Il s'agit d'une statue en béton représentant la Dame blanche, reprise dans le recensement. Elle est située à l'arrière du Mémorial Walthère Dewé. La statue ne présente pas de dégradations majeures, à l'exception de quelques efflorescences (Figure 61).



FIGURE 61 – Main de la statue de la Dame blanche

• Photogrammétrie

Je réalise un scan photogrammétrique de la main et du parchemin qu'elle tient. Comme l'élément est situé en hauteur, une escabelle est également utilisée afin d'atteindre une position de travail optimale pour effectuer le scan.

Parmi les 195 photos prises, une sur deux est retenue pour l'importation dans Autodesk ReCap. Pour aider le logiciel ReCap à se repérer dans l'espace entre deux photos, des marqueurs de couleur vive sont placés sur et à côté de la main. De cette manière, le logiciel a des points clés très visibles pour déterminer les déplacements entre deux photos successives.

Après traitement, le fichier .fbx est exporté dans Blender afin d'en générer un fichier .stl. Les éléments inutiles du scan peuvent être isolés et supprimés (Figure 62). Il ne reste alors que la pièce désirée dans Fusion 360 (Figure 63). Elle est composée de 2 700 699 facettes, ce qui en fait un maillage d'une haute précision.

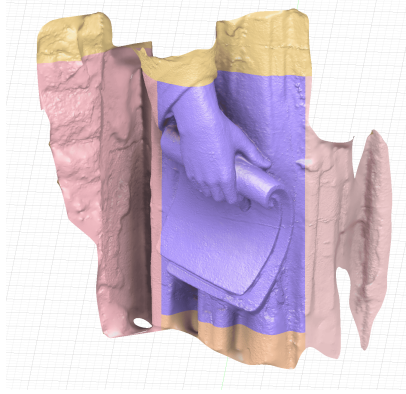


FIGURE 62 – Séparation du maillage

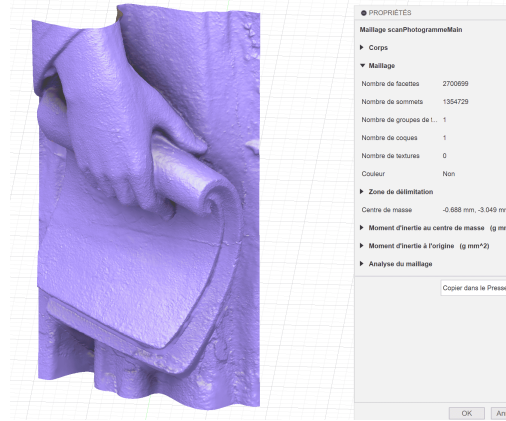


FIGURE 63 – Scan photogrammétrique statue

Un manque de précision est observé sur la partie inférieure de la main, au niveau de l'auriculaire, en raison d'une mauvaise exposition de cette zone lors de la prise des photos (Figure 64).

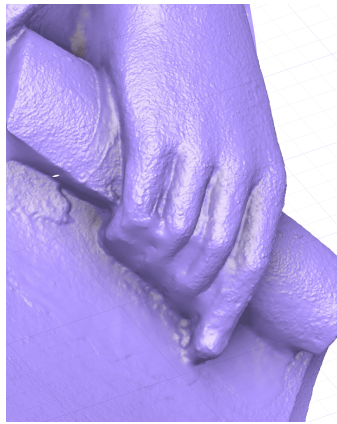


FIGURE 64 – Précision du scan photogrammétrique sur les doigts inférieurs

• Numérisation 3D Lidar

Le scan a aussi été effectué avec le LiDAR d'une tablette Apple, comme les précédents. Le scan présente une bonne précision par endroits, notamment au niveau du pouce longeant le parchemin, visible sur la Figure 65. Lors du scan, la luminosité était optimale grâce à un temps clair et ensoleillé, sans couverture nuageuse. La précision du dessus de l'auriculaire et de l'annulaire est moins bonne, comme on le voit sur la Figure 66. Cet endroit étant moins facilement accessible lors du scan du fait de la position de l'escabelle. Cette zone, moins bien éclairée que les parties de la main exposées au soleil, a rendu le repérage plus difficile pour le scanner. En raison de ces deux facteurs, la zone présente moins de points, ce qui a généré un maillage plus grossier, moins fidèle à la forme réelle de la main.

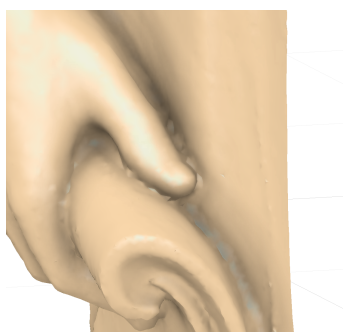


FIGURE 65 – Précision du scan lidar sur le pouce



FIGURE 66 – Précision du scan lidar sur l'auriculaire et l'annulaire

La partie de la main qui nous intéresse est isolée (Figure 67) du reste, ce qui donne un maillage composé de 27 759 facettes (Figure 68). La précision est moins élevée que le scan fait par photogrammétrie, mais reste d'une bonne qualité pour l'usage que l'on souhaite en faire. On retrouve, sur le scan, des détails de l'ordre de 2-3 millimètres, visibles au niveau des doigts de la main ou du parchemin.

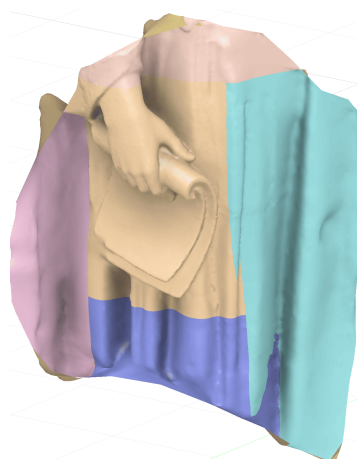


FIGURE 67 – Séparation du maillage

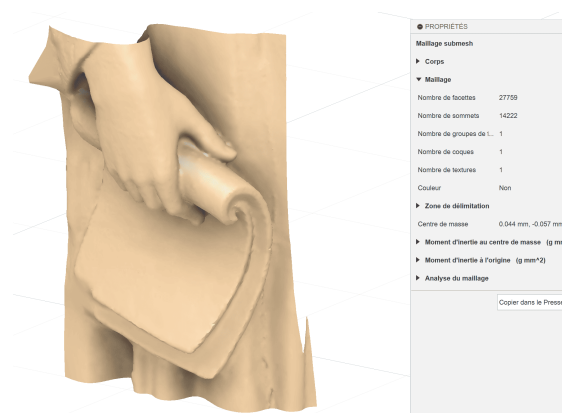


FIGURE 68 – Scan lidar statue

• Numérisation 3D Laser

Le scan laser de la main n'a pas été réalisé, le matériel nécessitant un membre du Fab52 et la statue étant éloignée de l'université. Le choix a donc été fait de se limiter aux deux autres méthodes.

Récapitulatif des scans et choix

Voici un récapitulatif des scans réalisés sur les différents éléments étudiés (Tableau 4). Ce tableau servira de base à la discussion des résultats, en comparant les avantages, les inconvénients et la qualité des scans selon les méthodes utilisées.

TABLEAU 4 – Éléments scannés et nombre de facettes

Élément	Numérisation 3D photogrammétrique	Numérisation 3D Lidar	Numérisation 3D Laser
Bloc de test St Vincent	255 831	24 300	8 754 226
Coin de colonne Labo Thermo	2 662 882	30 011	1 333 789
Main de la Dame blanche	2 700 699	27 759	/

Pour la suite de mon étude, j’ai choisi d’utiliser le maillage obtenu par numérisation 3D laser pour l’élément de colonne, et celui obtenu par numérisation 3D LiDAR pour la main de la Dame blanche. Cela me permettra de comparer comment la précision du scan influence la modélisation des pièces.

5.3 Modélisation 3D des éléments

Pour le traitement des fichiers .stl, obtenus après les scans, l'utilisation d'un logiciel de modélisation 3D est nécessaire. Beaucoup d'alternatives existent telles que Fusion 360, Rhino 8, SolidWorks, SketchUp, etc. Le choix s'est porté sur Fusion 360 pour la réalisation de ce travail. C'est un programme qui permet de manipuler facilement des fichiers .stl et d'y apporter de nombreuses modifications. Pour pouvoir imprimer, que ce soit en béton ou en polymère, il est nécessaire de fournir un fichier .stl au logiciel de découpe (slicer). Celui-ci décomposera le modèle en couches successives correspondant aux cordons d'impression. Le fichier .stl constitue ainsi l'aboutissement des étapes de modélisation décrites dans l'approche expérimentale.

Une fois dans Fusion 360, un nouveau projet peut être créé sous la forme d'un fichier au format .f3d, propre à cet environnement de modélisation. Dans ce projet, il est possible d'importer des fichiers .stl ou .obj préalablement exportés depuis Blender, Kiri Engine ou Shining 3D. Lors de l'importation, Fusion 360 génère automatiquement un maillage (ou mesh), qui constituera le point de départ des étapes de modélisation décrites ci-après.

Avant de poursuivre avec la modélisation des différents éléments, il est essentiel de définir les deux types d'entités manipulées dans Fusion 360, chacune ayant des fonctions et des usages distincts. Il s'agit des maillages (ou mesh en anglais) et des corps (body ou B-Rep pour Boundary Representation) :

Maillage (mesh) :

Un maillage est un ensemble de facettes (généralement des triangles) approximant une forme 3D. Il est formé d'une multitude de triangles générés à partir d'un nuage de points. Chacun de ces points, appelés sommets, est relié à ses voisins les plus proches de manière à former des facettes triangulaires, fermant ainsi le nuage de points pour générer une surface continue. C'est une représentation de surface très utilisée dans l'impression 3D et le scan 3D, notamment via des fichiers .stl. Le maillage a l'avantage d'être léger à traiter informatiquement : même lorsqu'il contient un grand nombre de facettes, il reste facile à manipuler et s'affiche rapidement, ce qui le rend bien adapté aux étapes de visualisation ou de prétraitement. Les modifications applicables aux maillages sont cependant limitées (par exemple, découpe par rapport à un plan, fusion de deux maillages, création de coques simples, etc.). On parle alors davantage de prétraitement que de modélisation fine, car il n'est généralement pas possible de contrôler précisément une facette individuelle ou de modifier des sommets un par un comme on le ferait en modélisation paramétrique.

Corps (body - B-Rep)

Un corps (body ou B-Rep, pour Boundary Representation) est un objet solide ou volumique défini par des surfaces mathématiques précises (paramétriques). Il est généralement créé à partir d'esquisses (dessins 2D) suivies d'opérations de modélisation telles que l'extrusion, la révolution, le perçage, etc. L'avantage principal des corps est qu'ils sont modifiables avec précision grâce à un large éventail d'outils. Un sommet d'un corps peut être supprimé ou déplacé, une arête chanfreinée, une surface extrudée ou modifiée. L'inconvénient est que si un corps comporte un très grand nombre de faces (par exemple, après conversion d'un maillage très détaillé), les opérations de modélisation peuvent devenir gourmandes en ressources et ralentir considérablement le logiciel.

Il est possible de passer de l'un à l'autre à l'aide des outils "Tesseller" ou "Body to mesh" pour passer d'un corps à un maillage. Cet outil revient à exporter le corps sous forme de maillage au format (.stl ou .obj). Dans l'autre sens, l'outil "Convertir le maillage" permet de transformer un

mesh en corps (B-Rep). Cependant, il faut veiller à la taille du maillage d'origine : s'il contient plus de 10 000 facettes, la conversion peut entraîner des ralentissements importants dans le modèle.

Main de la statue de la Dame blanche (Mémorial Walthère Dewé)

1. Modélisation du modèle principal

Le maillage brut issu du scan LiDAR est importé dans Fusion 360. Seule la zone d'intérêt (la main) est conservée afin de ne pas surcharger inutilement le modèle. Des opérations de déplacement et de rotation sont ensuite appliquées au maillage pour l'orienter correctement et l'aligner avec les axes du repère cartésien du logiciel. À ce stade, le maillage de la main comporte 27 759 facettes.

L'étape suivante consiste à refermer le maillage pour obtenir un volume fermé, car initialement, il ne représente qu'une surface ouverte (Figure 69). Pour ce faire, quatre surfaces de fermeture sont créées sur les côtés de la pièce, en s'appuyant sur les plans de coupe utilisés précédemment pour isoler la main. Les contours de ces surfaces de fermeture sont esquissés pour épouser au mieux les bords du maillage existant. Ces surfaces, initialement des corps (B-Reps), sont ensuite converties en maillages afin de pouvoir être fusionnées avec le maillage principal de la main. Après fusion, une simplification du nombre de facettes est appliquée pour réduire la complexité du modèle sans dégrader significativement sa géométrie.

Un unique maillage global est ainsi obtenu. Celui-ci peut encore présenter des défauts tels que des trous, des triangles mal orientés (parasites) ou des arêtes non connectées aux jonctions avec les nouvelles faces. Une phase de réparation est donc nécessaire pour corriger ces imperfections. Une fois la simplification et la réparation achevées, le maillage représente un volume fermé, prêt pour l'impression 3D. Le résultat est illustré à la Figure 70. À ce stade, le maillage finalisé du modèle principal compte 21 018 facettes et peut être exporté vers un logiciel de découpe (slicer).

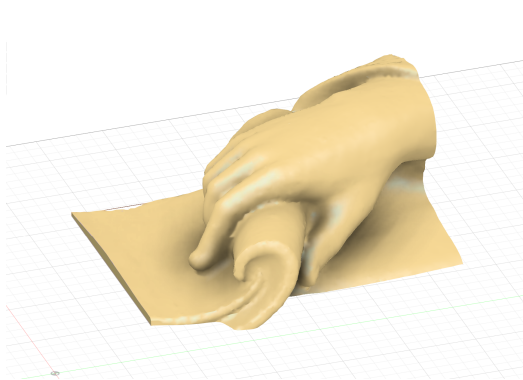


FIGURE 69 – Surface extérieure du maillage

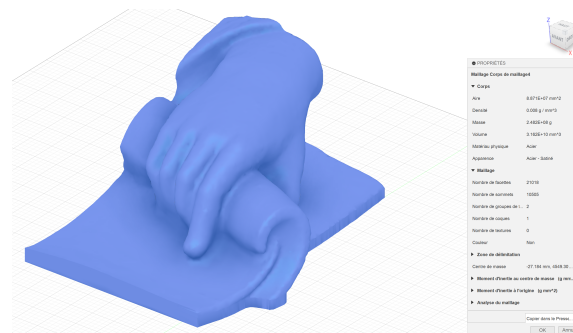


FIGURE 70 – Maillage fermé après les étapes de modélisation

Comme mentionné dans la section consacrée au scan de la main de la statue, une différence de précision est marquée entre le pouce (Figure 71a) et les autres doigts de la main. Le maillage y est visiblement moins dense (Figure 71b), ce qui se traduit par une perte de précision à cet endroit. Ce manque de précision aurait pu être évité si j'avais eu plus de liberté de mouvement lors du scan. Un travail du maillage pour venir remodeler correctement ces doigts est un travail complexe. Cette étape pourrait être réalisée sur Blender, par exemple, mais cela sort du cadre de mon travail.

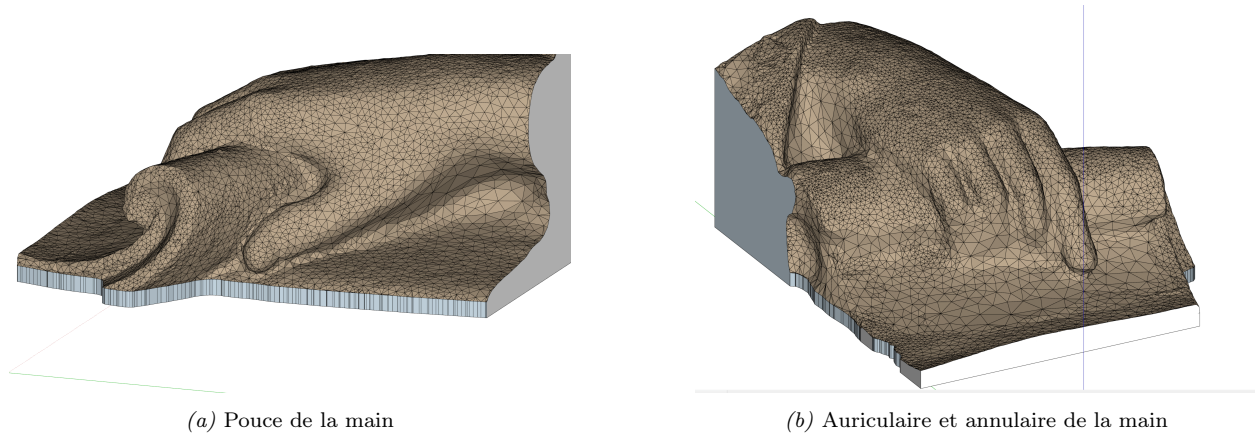


FIGURE 71 – Mesh et triangle visible de la main

2. Modélisation de la coque

La deuxième opération de modélisation consiste à réaliser une coque de notre élément. Cette coque sera un moule, réalisé en plusieurs parties, qui pourront être assemblées.

On utilise ici le maillage du modèle principal (la main fermée et réparée). Pour cet exemple, la décision a été prise de réduire de moitié les dimensions du modèle principal afin d'obtenir un moule d'une taille compatible avec les capacités d'impression et les contraintes de temps et de matériaux du Fab52. Sans ces limitations, le moule de la main à l'échelle 1 :1 aurait pu être envisagé, potentiellement en plusieurs sections pour faciliter l'impression et le démoulage. Des imprimantes polymère de grand format, comme la MASSIVit 3D (capacités d'impression jusqu'à 120x150x180 cm), permettraient de réaliser de tels moules plus rapidement et en moins de parties.

La première étape dans Fusion 360 consiste à décaler la surface du modèle principal afin de créer la coque.

L'objectif est de créer une coque (le moule) autour du modèle de la main. L'outil "Décalage" (Offset) de Fusion 360 permet de décaler une surface d'une certaine distance. Cependant, appliqué directement à un maillage plein comme celui de la main, ce décalage s'effectue par défaut vers l'intérieur de l'objet, ce qui ne convient pas pour créer un moule externe. Fusion 360 ne permet pas nativement un décalage de surface vers l'extérieur sur un maillage de cette manière (Figure 72a).

Par conséquent, il faut faire en sorte que la main soit considérée comme creuse et que ce qui l'entoure soit considéré comme plein.

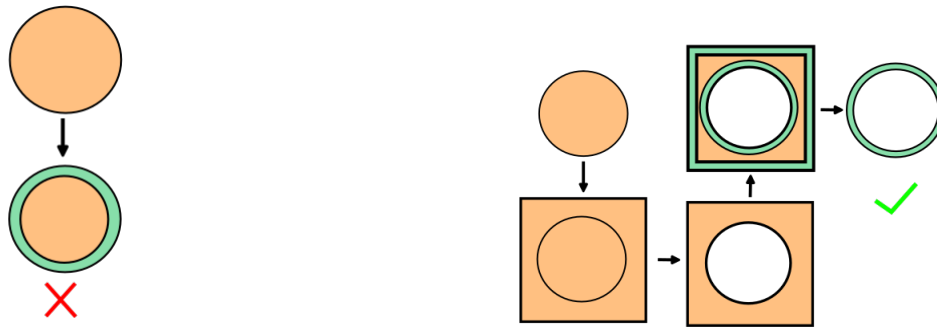
Pour contourner cette limitation, une astuce consiste à inverser la notion de "plein" et de "vide".

Un parallélépipède rectangle englobant complètement le maillage de la main est d'abord créé (Figure 73). Ce parallélépipède, qui est initialement un corps (B-Rep), est converti en maillage. Ensuite, le maillage de la main est soustrait (opération booléenne) du maillage du parallélépipède. Le résultat est un nouveau maillage où l'espace précédemment occupé par la main est désormais un vide, tandis que l'espace entre cette empreinte de la main et les limites du parallélépipède est considéré comme plein (en vert sur la Figure 74).

Sur ce nouveau maillage "inversé", l'outil de décalage (offset) peut être appliqué aux surfaces qui correspondent à l'empreinte de la main (Figure 72b). En décalant ces surfaces vers l'intérieur de cette nouvelle zone pleine (la partie verte), on génère en réalité une coque qui se forme autour de l'emplacement original de la main, donc vers l'extérieur par rapport à la main elle-même (Figure 74). Le décalage produit ainsi l'effet désiré pour la création du moule.

Sans cette technique du parallélépipède et de la soustraction, l'outil de décalage aurait créé un épaississement vers l'intérieur de la main, et non une coque externe. Cette méthode alternative est donc employée car Fusion 360 ne propose pas d'option directe pour un décalage de surface vers l'extérieur sur un maillage.

Fusion 360 permet néanmoins de réaliser cette opération de coque vers l'extérieur, mais uniquement sur des corps (B-Rep). Cependant, comme spécifié plus haut, notre maillage étant composé de plus de 10 000 facettes, si cette opération avait été effectuée sur la main sous forme de corps, le calcul aurait été extrêmement long. Il était donc plus simple et plus rapide de passer par cette étape intermédiaire et de travailler uniquement avec des maillages.



(a) Opération d'offset non correcte

(b) Opération d'offset non correcte

FIGURE 72 – Différence d'opérations d'offset

Ce décalage forme une coque extérieure de l'élément d'une certaine épaisseur. En fonction de la taille de l'élément, l'épaisseur peut varier entre 6mm et 20mm afin de pouvoir reprendre la pression que va exercer le béton sur la paroi du moule et que la coque ne soit pas trop fragile.

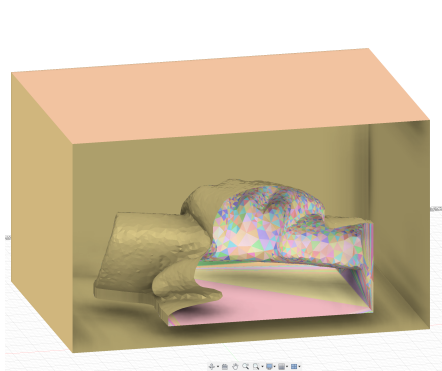


FIGURE 73 – Parallélépipède entourant le maillage

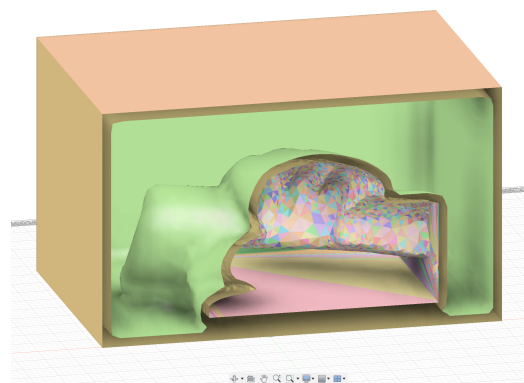


FIGURE 74 – Création de la coque avec l'outil "offset"

Après la création de la coque, les parties du parallélépipède excédentaires, qui entourent la coque de la main, sont supprimées à l'aide d'outils de découpe de maillage. Pour cet élément, qui possède de grandes faces planes, une de ces faces peut être retirée. Cela permet d'économiser du matériau et du temps d'impression pour cette face, et elle servira d'ouverture pour le coulage du béton (Figure 75). La coque ainsi formée a une épaisseur de 8 mm, lui conférant une rigidité suffisante. Le fichier .stl du moule est alors prêt à être exporté.

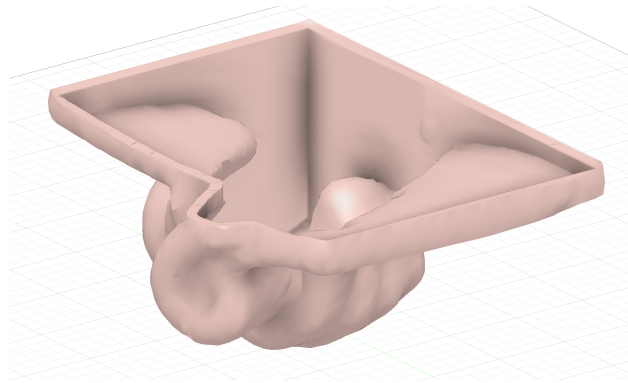


FIGURE 75 – Modèle du moule de la main

Coin de chapiteau d'une colonne (Laboratoire de Thermodynamique)

1. Modélisation du modèle principal

Le maillage importé du chapiteau de colonne (Figure 76a) inclut des éléments adjacents (parties de la poutre, fût de la colonne) qui, bien que non désirés pour la pièce finale, sont utiles pour son orientation correcte dans l'espace de modélisation. Par exemple, la sous-face de la poutre, supposée horizontale, est alignée avec le plan XY du repère. De même, deux faces verticales et perpendiculaires du chapiteau sont alignées avec les plans XZ et YZ. La Figure 76b montre le maillage réorienté.

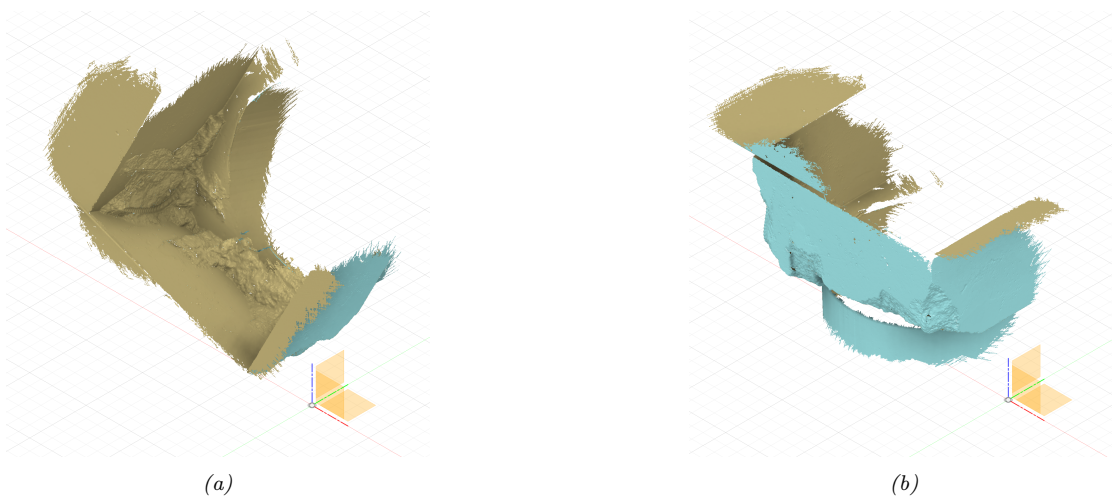


FIGURE 76 – Orientation du haut de colonne

Une fois le maillage correctement orienté, les parties non pertinentes (comme les éléments de la

poutre) sont supprimées pour ne conserver que la zone endommagée du chapiteau. Des plans de coupe horizontaux et verticaux sont utilisés avec l'outil "Coupe de plan" pour sectionner le maillage. Cette méthode permet d'obtenir des arêtes de coupe nettes et précises. La Figure 77a illustre la netteté de la jonction entre la partie conservée du chapiteau (en bleu) et la partie supprimée de la poutre (en vert), comparée aux bords irréguliers du maillage principale. Après ces découpes successives, seule la portion dégradée du chapiteau subsiste (Figure 77b).

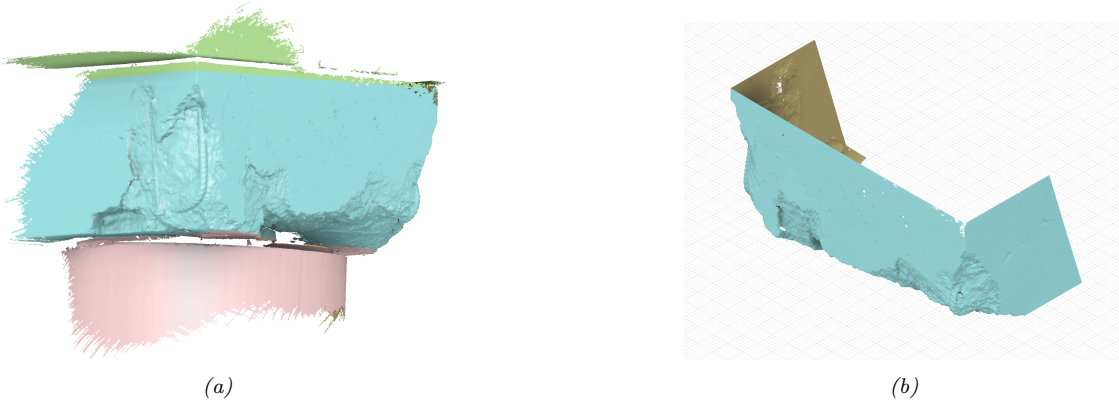


FIGURE 77 – Séparation du maillage

Le maillage résultant est une surface ouverte. Il est nécessaire de le refermer pour en faire un volume. Des surfaces de fermeture sont donc modélisées en s'appuyant sur les plans de coupe précédemment définis. Comme les bords du maillage coïncident avec ces plans, la création et la jonction des nouvelles faces sont facilitées. Ces faces de fermeture sont d'abord créées comme des corps (B-Reps), puis converties en maillages pour pouvoir être fusionnées avec le maillage principal du chapiteau (voir Figure 78a pour le résultat après fermeture et réparation).

À ce stade, une première simplification du maillage est effectuée pour réduire le nombre de triangles. La numérisation 3D ayant été réalisée avec un scanner laser, la densité initiale du maillage est élevée. Une réduction du nombre de facettes (ici, d'environ un quart) n'altère donc pas significativement la qualité géométrique pour l'application visée. Le maillage simplifié du chapiteau est ensuite fusionné avec les maillages des trois faces de fermeture. Un maillage unique est ainsi généré, mais il peut encore comporter des défauts tels que des trous, des triangles mal orientés, ou des arêtes non connectées aux jonctions.

Une opération de réparation et de soudage est alors réalisée. L'outil "Coudre et supprimer" est utilisé. Il combine des fonctionnalités telles que "Boucher les perçages" (Fill Holes), la correction des triangles inversés, la suppression des faces dupliquées ou dégénérées, et la suppression des petites coques parasites. La simplification préalable du maillage contribue à réduire le temps de calcul de cette opération. Les arêtes des triangles en bordure du maillage original sont soudées à celles des faces de fermeture. Cette opération, gourmande en calculs, a nécessité environ quarante minutes sur un ordinateur standard pour cet exemple.

Une fois la simplification effectuée et le soudage terminé, le maillage n'est plus une simple surface, mais devient un volume fermé. Le résultat de ces opérations est visible sur la Figure 78a. Une fois le volume de l'élément dégradé obtenu, il faut modéliser l'élément de réparation. Il faut modéliser le chapiteau de la colonne tel qu'il était à l'origine, sans dégradation. L'élément est simple à modéliser, le haut de la colonne étant un parallélépipède rectangle, mais Fusion

360 permettrait aussi de modéliser des formes plus complexes, comme des motifs ou des surfaces courbes. Toutes ces géométries auraient pu être modélisées avec le logiciel. L'élément de réparation est modélisé à partir d'une esquisse 2D, extrudée pour obtenir un corps ayant la géométrie souhaitée, comme le montre la Figure 78b. Il faut encore transformer ce corps en maillage afin de pouvoir interagir avec celui de l'élément dégradé.

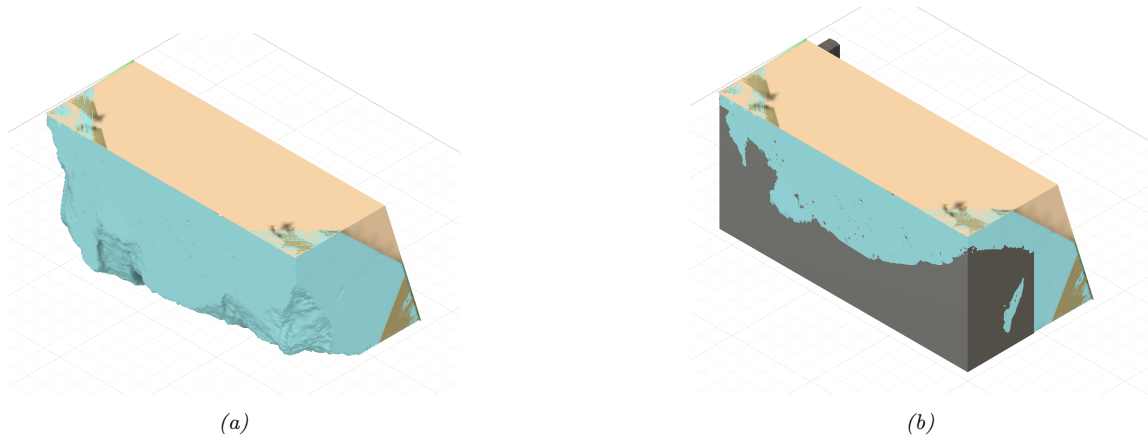


FIGURE 78 – Volume de la dégradation et de l'élément de base

Pour modéliser un élément manquant plus complexe, il aurait été possible de s'appuyer sur la symétrie des formes, d'anciennes photos ou un scan antérieur. Si des éléments similaires sont en bon état, ils peuvent être scannés pour une comparaison booléenne avec l'élément endommagé.

Une opération booléenne est ensuite effectuée entre le maillage du volume dégradé et le maillage du chapiteau reconstitué. L'outil "Combiner" avec l'option "Couper" permet d'isoler le volume manquant, c'est-à-dire l'élément de réparation. Le maillage résultant n'est pas encore exploitable tel quel, il peut contenir des éléments inutiles, tels que des parois très fines, des petites cavités ou des éléments non connectés au corps principal. Une étape de post-traitement est donc indispensable. Celle-ci peut être réalisée dans Fusion 360, par exemple en convertissant le maillage de l'élément de réparation en corps solide (B-Rep) pour faciliter les modifications. Alternativement, le maillage peut être exporté (par exemple au format .skp) et retouché dans un logiciel comme SketchUp, qui offre une manipulation aisée des faces et arêtes pour ce type de nettoyage. Durant cette phase, les surfaces de moins de 5 mm d'épaisseur sont supprimées, ainsi que les éléments flottants ou parasites. Une fois nettoyé, le maillage de l'élément de réparation est réimporté dans Fusion 360 pour vérifier son bon ajustement avec la partie endommagée (Figure 79). Il est alors prêt pour l'impression 3D.

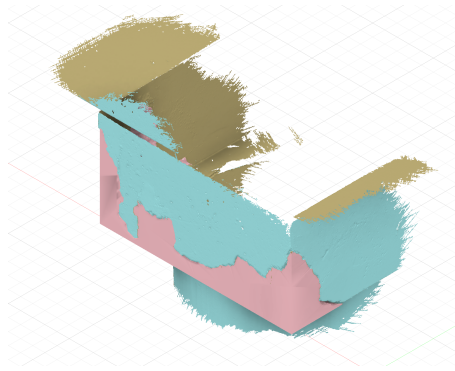


FIGURE 79 – Modèle de la réparation du haut de colonne

2. Modélisation de la coque

La création du moule pour l'élément de réparation du chapiteau suit une démarche similaire à celle employée pour la main. On part du maillage final de l'élément de réparation. Ici, seule la moitié droite du chapiteau (en mauve sur la Figure 80) est utilisée pour créer le moule, toujours pour des raisons de dimensions d'impression, de temps et de monopolisation de machines.

Afin d'assurer un bon ajustement de la pièce de réparation sur la structure existante et de laisser un l'espace nécessaire à une couche de mortier-colle, un jeu de 3 mm est modéliser. Ceci est réalisé en concevant la cavité du moule légèrement plus grande que les dimensions nominales de la pièce de réparation. Ce jeu permet de compenser d'éventuels défauts mineurs liés au processus de moulage ou à la modélisation initiale.

La première étape concrète dans Fusion 360 est la création d'un parallélépipède rectangle englobant le maillage de la pièce de réparation (Figure 81).

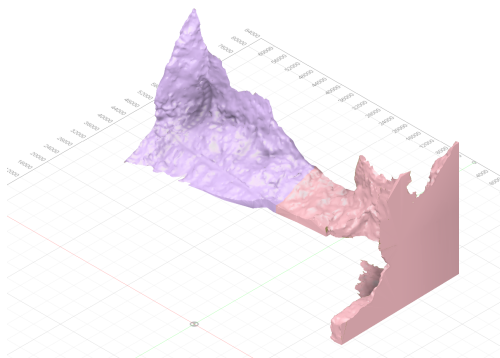


FIGURE 80 – Partie du chapiteau choisi

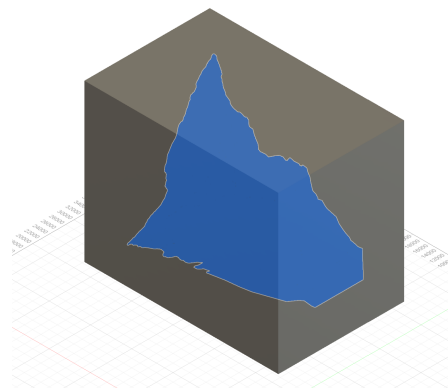


FIGURE 81 – Parallélépipède entourant le maillage

Ce parallélépipède, initialement un corps (B-Rep), est converti en maillage. Ensuite, le maillage de la pièce de réparation du chapiteau est soustrait (opération booléenne "Couper") du maillage du parallélépipède. Comme pour la main, cette opération inverse la perception de "plein" et de "vide" : l'espace entre les limites du parallélépipède et l'empreinte du chapiteau devient la zone "solide" pour l'étape suivante.

Sur ce nouveau maillage "inversé", un décalage (offset) est appliqué aux surfaces qui formaient

l’empreinte du chapiteau. En décalant ces surfaces vers l’intérieur de cette nouvelle zone pleine, on génère la coque du moule, avec l’épaisseur souhaitée (Figure 82).

Ce décalage forme une coque extérieure, constituant le moule, d’une épaisseur de 8 mm, suffisante pour résister à la pression du béton lors du coulage. Les parties excédentaires du parallélépipède sont ensuite supprimées. La surface plane supérieure du moule peut être retirée pour servir d’ouverture de coulée et économiser du matériau d’impression (Figure 83). Le fichier .stl du moule est alors prêt à être exporté.

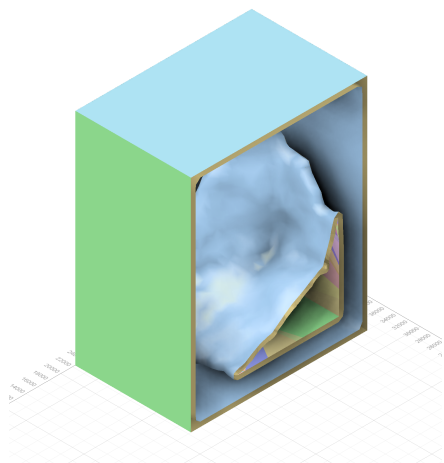


FIGURE 82 – Création de la coque avec l’outil "offset"

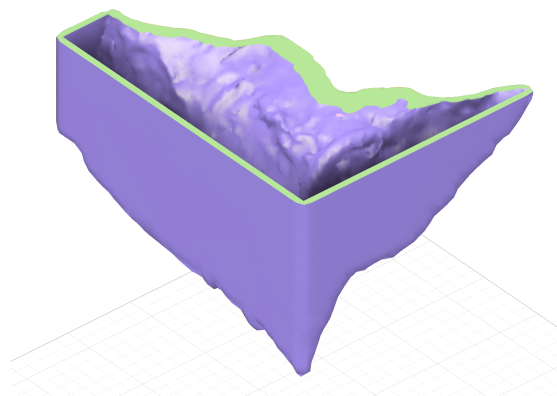


FIGURE 83 – Modèle du moule du chapiteau

5.4 Moulage d'échantillons en béton

Moulage d'un échantillon test

Pour valider le processus de moulage, un premier test est réalisé avec une coque simple : un cube de 4 cm de côté. Ce cube présente deux formes en relief (extrusions) sur ses faces intérieures (Figure 84). Ces formes, l'une avec un angle vif (saillant) et l'autre arrondie, sont conçues pour évaluer les défis potentiels lors du démoulage (Figure 85). Ce test est réalisé avec une coque en PLA d'une épaisseur de 5 mm.



FIGURE 84 – Cube de test d'élément moulé

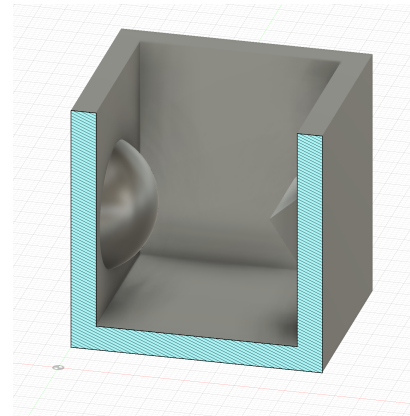


FIGURE 85 – Modèle du cube de test

La coque est modélisée de manière à être séparable en deux parties (Figure 86). Cela permettra d'observer le comportement du mortier au niveau de la jonction des deux parties du moule, zone potentiellement la plus critique en termes d'étanchéité et de finition. Pour faciliter cet assemblage, des ergots sont intégrés au design du moule via le slicer, assurant un emboîtement précis des deux parties.

De l'huile de démoulage est appliquée sur les faces intérieures du moule et sur les faces de jonction entre les deux parties. Les jonctions sont ensuite scellées à l'aide d'une toile étanche adhésive (Figure 87). Il faut veiller à ne pas appliquer d'huile sur les zones de contact où la toile adhésive sera posée, afin de ne pas réduire son adhérence.



FIGURE 86 – Coque du moule de test



FIGURE 87 – Huilage et fixation de la coque

Le mortier, composé de ciment, de sable normalisé et d'eau, est ensuite coulé à l'intérieur du moule. Le mortier utilisé pour l'ensemble des pièces moulées de ce travail est identique. Sa composition et sa méthode de préparation seront précisées après la description du moule test.

Une fois le mortier coulé, le moule est laissé au repos pendant 24 heures pour permettre une première prise du matériau. Après cette période de cure initiale, l'échantillon peut être démoulé. Le démoulage s'effectue sans difficulté (Figure 88). Le moule en PLA reste intact, peut être nettoyé et est donc réutilisable pour d'autres échantillons. Les détails des formes géométriques sont fidèlement reproduits sur l'échantillon en mortier. Les fines strates d'impression du moule en polymère sont légèrement visibles à la surface de l'échantillon (Figure 89).

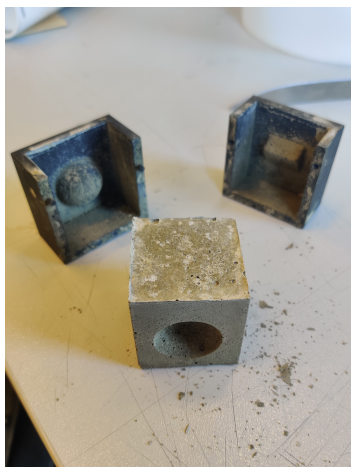


FIGURE 88 – Démoulage de l'échantillon test



FIGURE 89 – Rendu de l'échantillon test

La réussite de cet échantillon test confirme la faisabilité du moulage de mortier dans une coque en polymère imprimée en 3D. Ce test étant concluant, l'impression des moules pour les pièces plus complexes peut être envisagée en suivant une méthodologie similaire.

Composition et réalisation du mortier

Afin d'assurer une cohérence dans le rendu de surface, la couleur et le comportement mécanique entre les différents éléments moulés, la même composition de mortier est utilisée pour tous les échantillons. Voici sa composition :

TABLEAU 5 – Composition du mortier de moulage

Matériaux	Spécificité	Proportion massique
Ciment (C)	CEM III A 52,5 N LA	1 (référence)
Sable (S)	normalisé 0-2 CEN, EN 196-1	3
Eau (E)	Eau	0,5
Superplastifiant (SP)	SikaCem	0,01

La première étape consiste à mélanger le ciment avec l'eau durant 30 secondes à l'aide d'un malaxeur d'une capacité de 5 litres (Figure 90). Le sable est ensuite ajouté progressivement pendant 30 secondes, tout en continuant le malaxage. Le mélange est ensuite poursuivi pendant 30 secondes supplémentaires. Ensuite, à l'aide d'une raclette en caoutchouc, le mortier adhérent aux parois et

au fond du bol du malaxeur est ramené au centre et réincorporé au mélange. Le superplastifiant est alors ajouté, et le mélange est relancé pour 30 secondes. Le temps total de malaxage est ainsi de deux minutes. Le mortier est alors prêt à être coulé dans les moules, dont les surfaces intérieures auront été préalablement huilées.



FIGURE 90 – Malaxeur avec le mix de mortier

Moulage de la main de la statue de la Dame blanche

Le maillage du moule, au format .stl (obtenu à l'étape de modélisation précédente), est importé dans un slicer. Pour ce projet, PrusaSlicer a été utilisé, car les moules sont imprimés avec les imprimantes 3D Prusa disponibles au Fab52 (modèles Prusa XL et Prusa MK3S).

Le moule doit être découpé en plusieurs parties pour plusieurs raisons :

- Premièrement, ses dimensions excèdent les capacités d'impression en une seule fois, même sur la Prusa XL. De plus, une impression monolithique d'une telle taille durerait plusieurs jours. Plus une impression est longue, plus le risque de problèmes (décollement de la pièce, etc.) augmente. La quantité de filament nécessaire impliquerait un ou plusieurs changements de bobine en cours d'impression, augmentant le risque de défauts ou d'échec de l'impression.
- Deuxièmement, si l'on tentait d'imprimer la coque en une seule pièce avec l'orientation montrée à la Figure 91 (visant à minimiser les supports sur la surface interne en contact avec le mortier), cette orientation nécessiterait une quantité énorme de supports externes, car de larges portions de la coque seraient imprimées dans le vide. Les supports sont des structures temporaires, générées par le slicer, indispensables pour soutenir les parties en surplomb lors de l'impression (visibles en vert sur la Figure 91). Pour obtenir une qualité de surface optimale sur la pièce moulée, l'objectif est de ne pas placer de support sur la face intérieure du moule.
- Troisièmement, un objectif clé est de pouvoir démouler l'élément en béton sans l'endommager et, si possible, sans détruire le moule afin de le réutiliser.

Plusieurs raisons motivent ce choix :

1. Concevoir un moule en plusieurs parties facilite grandement le démoulage, réduisant ainsi le risque d'abîmer la pièce en béton et permettant de préserver le moule.

Si le moule était monolithique, son retrait nécessiterait des méthodes potentiellement destructrices pour la pièce ou le moule. Chauffer le moule en PLA (température de fusion entre 180 et 200°C) avec un décapeur thermique pour le ramollir et l'extraire risquerait de déformer ou d'endommager la surface de la pièce en béton. Découper le moule, par exemple avec un outil rotatif de type Dremel, présenterait un risque élevé d'entailler la pièce en béton.

2. La réutilisabilité du moule est un avantage majeur, par exemple si un premier moulage présente des défauts (dus à une mauvaise vibration, une ségrégation du mortier, ou la formation de petites bulles d'air). Elle est également pertinente lorsque plusieurs exemplaires d'un même élément architectural doivent être restaurés (par exemple, des gargouilles identiques sur une façade). Le moule peut alors servir à produire plusieurs pièces de remplacement.
3. Enfin, si l'élément restauré est susceptible de subir de nouvelles dégradations à l'avenir, le moule, étant démontable et donc facile à stocker, peut être conservé pour des interventions futures.

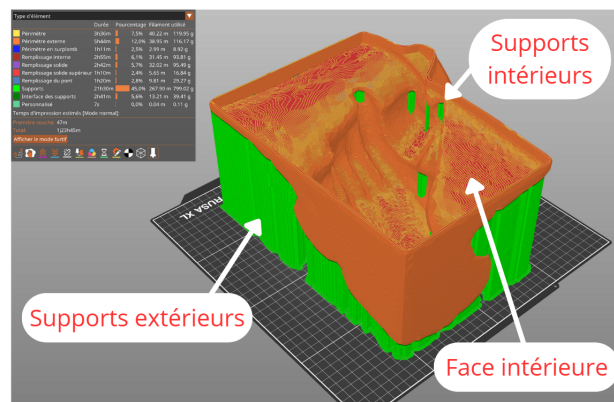


FIGURE 91 – Impression en une seule fois de la coque

Il est donc crucial d'analyser la géométrie de la pièce pour s'assurer qu'elle peut être démoulée. L'outil 'Analyse de dépouille' (Draft Analysis) de Fusion 360 est alors utilisé. Cet outil colore les faces du modèle en fonction de leur angle par rapport à une direction de démoulage choisie, mettant en évidence les contre-dépouilles (zones qui accrocheraient le moule). L'analyse est effectuée selon une direction de démoulage spécifique. Dans l'exemple de la Figure 92a, la direction de démoulage simulée est verticale (axe Z). Les facettes apparaissant en bleu foncé sur la Figure 92a signalent les zones qui poseraient problème pour un démoulage simple selon l'axe Z (correspondant à un moule d'une seule pièce comme celui schématisé sur la Figure 92b). Il est par conséquent impératif de concevoir le moule en plusieurs parties pour permettre un démoulage aisé, sans endommager ni la pièce ni le moule.

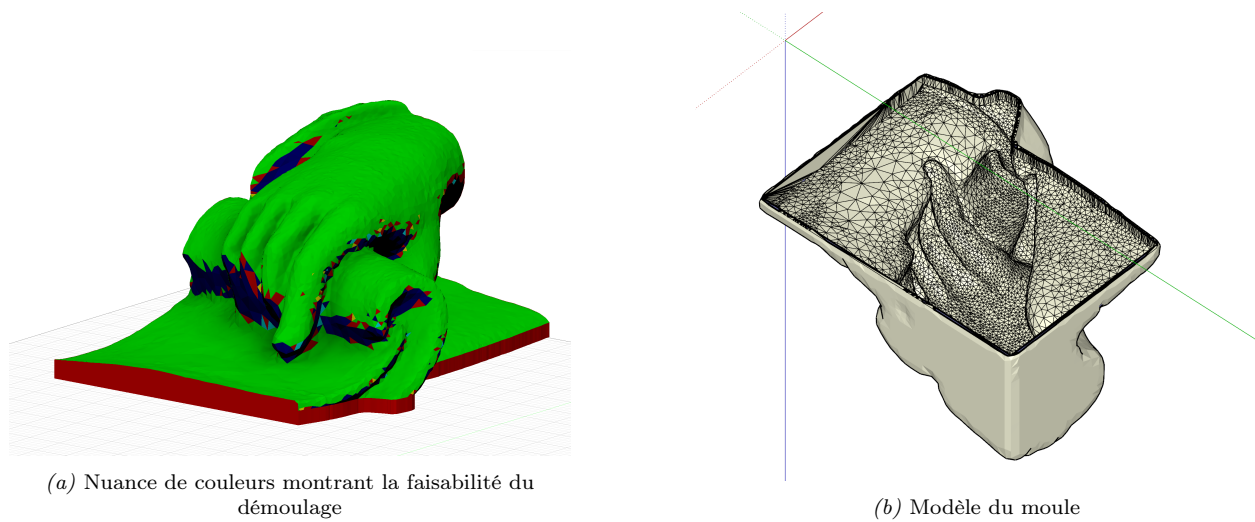


FIGURE 92 – Analyse de dépouille de la main

Pour le moule de la main, celui-ci a été divisé en six parties (résultant de cinq plans de coupe). Ces plans de coupe sont définis de manière à suivre approximativement les transitions entre les zones avec et sans contre-dépouille (identifiées par l'analyse précédente). La Figure 93 illustre l'une de ces coupes, au niveau supérieur des doigts. Ces opérations de découpe du modèle 3D du moule sont réalisées directement dans PrusaSlicer. Le logiciel permet aussi d'ajouter, au niveau des plans de coupe, des logements pour des goujons qui assureront un positionnement correct des différentes parties du moule lors de l'assemblage (Figure 94). Bien que ces goujons puissent être imprimés en 3D, le choix s'est porté sur l'utilisation de goujons standards en acier, pour leur meilleure résistance et précision.

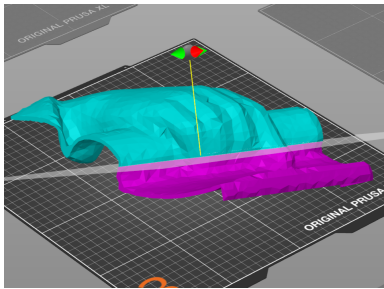


FIGURE 93 – Découpe numéro 5 du moule

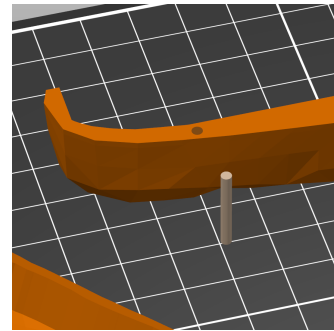


FIGURE 94 – Trou de goujon et goujon

Chacune des six parties du moule est ensuite imprimée, tous à l'aide de la Prusa XL (Figure 95). L'impression de l'ensemble des pièces a été répartie en trois sessions, d'une durée respective de 9h23, 16h38 et 17h23, soit un temps total d'impression d'environ 1 jour, 19 heures et 24 minutes. L'orientation des pièces sur le plateau d'impression est choisie de manière à ce que les supports nécessaires soient générés prioritairement sur la face externe du moule, dont l'état de surface est moins critique que celui de la face interne (en contact avec le mortier). De manière générale, les pièces sont orientées pour minimiser la quantité de supports requis (Figure 96).

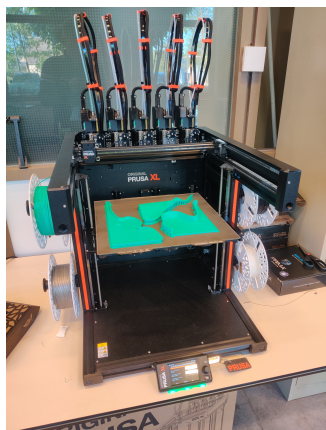


FIGURE 95 – Impression de 3 éléments du moule

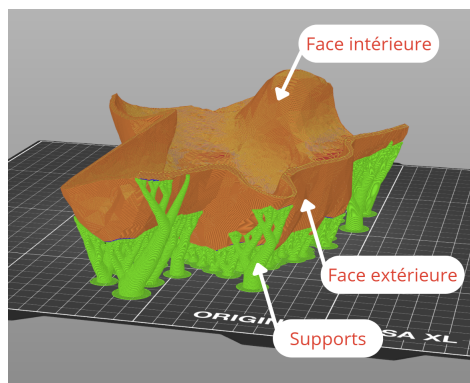


FIGURE 96 – Orientation d'impression & supports

Une fois toutes les parties imprimées, le moule est assemblé en respectant l'ordre des découpes. Les goujons métalliques sont placés dans les trous prévus. Comme pour le cube de test, les jonctions entre les différentes parties sont rendues étanches à l'aide d'une toile adhésive résistante (Figure 97). Les structures de support d'impression situées à proximité immédiate des jonctions sont retirées pour faciliter l'application de la toile adhésive. Les autres supports, situés sur les faces externes du moule, peuvent être laissés en place, ils ne gênent pas le processus de moulage et peuvent même contribuer à la rigidité de la coque. Certains goujons métalliques, s'ils sont situés à l'intérieur du volume à mouler et risquent d'être noyés dans le béton, sont retirés avant le coulage. La toile adhésive, correctement appliquée, suffit généralement à maintenir les parties du moule solidement assemblées et à assurer l'étanchéité. Au final, des jonctions présentant un jeu inférieur au millimètre sont obtenues, ce qui est suffisant pour contenir le mortier sans fuites significatives (Figure 98).



FIGURE 97 – Assemblage de la coque



FIGURE 98 – Jonction de la coque

De l'huile de démoulage est appliquée sur toutes les faces intérieures du moule, y compris les faces de jonction entre les différentes parties. Le moule assemblé est ensuite placé dans une caisse remplie de sable. Ce bain de sable a pour but de stabiliser le moule durant le coulage du mortier et sa phase de prise (cure). De plus, le sable aide à contenir la pression exercée par le mortier frais sur les parois du moule. Après le coulage du mortier, l'ensemble (caisse, sable et moule rempli) est soumis à des vibrations pour favoriser un bon remplissage des zones complexes de la géométrie et l'évacuation des bulles d'air (Figure 99). La présence de superplastifiant dans le mortier améliore sa fluidité, ce qui facilite également son écoulement et son placement homogène dans tout le volume du moule.

Fusion 360 permet de calculer le volume interne du moule. Pour la main, qui a été modélisée à une échelle de 1 :2 pour l'impression du moule, le volume de mortier requis est d'environ 3,3 litres.

Après la phase de cure et lors du démoulage, il est constaté que la pression du mortier a provoqué un léger déplacement relatif des différentes parties du moule. Cet écart, de l'ordre de 1 à 3 mm par endroits, se traduit par de fines bavures ou des petits décalages sur la pièce moulée (Figure 100). L'augmentation du nombre de goujons et/ou un renforcement du maintien par bandes adhésives pourraient atténuer ce problème.



FIGURE 99 – Moulage du mortier dans le moule

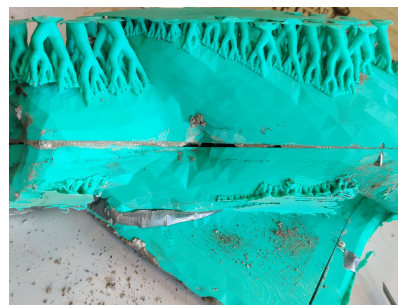


FIGURE 100 – Poussée du mortier sur les jonctions

La dernière étape est le démoulage de la pièce en béton, en essayant de préserver l'intégrité du moule pour une éventuelle réutilisation. Plusieurs parties du moule ont pu être retirées sans difficulté (Figure 101). Cependant, la partie la plus grande et la plus enveloppante du moule, couvrant une large portion de la main et du parchemin, s'est avérée impossible à démouler sans intervention. Idéalement, cette section du moule aurait dû être subdivisée davantage (en 3 ou 4 sous-parties) lors de la phase de conception dans le slicer. Une telle subdivision aurait facilité son retrait sans l'endommager. Pour extraire cette partie, il a d'abord fallu découper une section du moule (au niveau du parchemin) à l'aide d'un outil Dremel. Ensuite, un décapeur thermique a été utilisé pour ramollir le PLA, permettant ainsi de déformer et de retirer le reste de cette section du moule (Figure 102).

L'examen de la pièce finale en béton révèle la présence de nombreuses bulles en surface. Ce défaut est probablement dû à l'incorporation d'air lors du coulage du mortier. Un manque de précaution lors de cette étape a pu favoriser l'emprisonnement de l'air. De plus, il est probable que la vibration appliquée à l'ensemble n'ait pas été suffisante pour chasser toutes les bulles d'air piégées. Néanmoins, la qualité géométrique globale de la pièce est très satisfaisante. Les détails de la forme sont bien reproduits, et la texture striée laissée par les couches d'impression du moule devient peu perceptible à une certaine distance (Figures 102 103 104).



FIGURE 101 – Démoulage des premières parties de la coque



FIGURE 102 – Démoulage de la dernière partie & résultat final



FIGURE 103 – Vue avant de la main moulée



FIGURE 104 – Vue arrière de la main moulée

Moulage du coin de chapiteau d'une colonne

Le processus de moulage du coin de chapiteau suit les mêmes étapes générales que celui de la main. Le fichier .stl du moule du chapiteau (modélisé précédemment) est importé dans PrusaSlicer. Aucune modification d'échelle n'est appliquée : le moule du coin droit du chapiteau est imprimé à taille réelle. L'imprimante Prusa XL est utilisée pour sa capacité à produire des pièces de grande dimension.

La géométrie de cet élément étant moins complexe que celle de la main, la subdivision du moule et le démoulage s'annoncent plus aisés. L'analyse de dépouille le confirme : en simulant un démoulage principal selon l'axe Y (après retrait d'une face d'extrémité), peu de zones problématiques (contre-dépouilles) sont identifiées (Figure 105). Le moule est donc divisé en sept parties, connectées par des goujons dont les logements sont définis dans PrusaSlicer (Figure 106). L'impression de ces sept parties a été réalisée en trois sessions, d'une durée respective de 16h22, 10h12 et 18h16, soit un temps total d'impression d'environ 1 jour, 20 heures et 50 minutes.

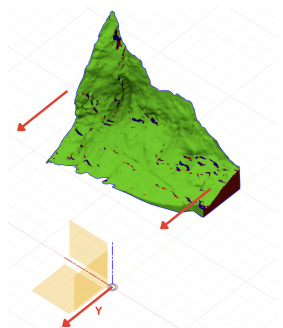


FIGURE 105 – Démoulage théorique de la coque

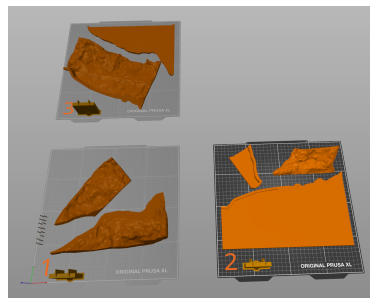


FIGURE 106 – Coque subdivisée en 7 parties

Comme pour la main, le moule assemblé est placé dans un caisson rempli de sable pour assurer sa stabilité et son maintien durant le coulage (Figure 107). Après huilage des surfaces internes, le mortier est coulé. Le volume de mortier nécessaire, préalablement calculé avec Fusion 360, a permis de préparer la bonne quantité, évitant ainsi un gaspillage de matière (Figure 108). Les vibrations ont été appliquées plus méthodiquement pour cet élément, dans l'espoir d'obtenir un meilleur état de surface que pour la main.



FIGURE 107 – Caisson de maintien pour la coque



FIGURE 108 – Moulage du mortier au sein de la coque

Après la période de cure, l'élément en béton a été démoulé sans difficulté majeure (Figure 109). La pression exercée par le mortier étant moins importante (volume coulé plus faible), les différentes parties du moule sont restées mieux alignées. Un décalage maximal d'environ un millimètre a été observé entre certaines parties. Le moule est resté quasiment intact et pourrait être réutilisé. Seul un goujon métallique, resté prisonnier dans le mortier, a causé une petite cassure sur la partie du moule qui le logeait lors du démoulage (Figure 110).



FIGURE 109 – Élément de colonne démoulé



FIGURE 110 – Ergot bloqué dans le mortier

La dernière étape de cette étude de cas consiste à positionner l'élément de réparation moulé sur la partie dégradée du chapiteau original (Figure 111). Ce positionnement permet d'évaluer visuelle-

ment l'adéquation du procédé pour la restauration d'éléments patrimoniaux en béton. Pour cette démonstration, l'élément est maintenu en place manuellement. Dans une situation réelle de restauration, il serait fixé à l'aide d'un mortier-colle ou d'un scellement chimique à prise rapide. Pour des éléments plus lourds nécessitant une fixation renforcée, des ancrages métalliques pourraient être intégrés à l'interface entre l'élément de réparation et le support existant.

Le mortier-colle servirait également à combler le joint entre la pièce de réparation et l'existant, ainsi que les éventuelles petites imperfections ou manques de matière dus à des zones trop fines pour être correctement formées par le moule. L'élément serait ainsi restauré, avec pour objectif des surfaces continues et lisses après finition. Cette mise en situation est illustrée par les trois Figures suivantes :



FIGURE 111 – Élément de restauration du chapiteau placé sur l'élément dégradé

5.5 Impression 3D d'échantillons en béton

Explication d'un slicer pour l'impression béton

Pour qu'une imprimante 3D puisse fabriquer un objet, le modèle numérique 3D doit d'abord être traité par un logiciel de découpe, appelé "slicer". Ce dernier convertit le modèle en une série d'instructions compréhensibles par le logiciel de contrôle de l'imprimante. Un slicer "découpe" virtuellement la forme 3D en une multitude de couches horizontales et génère un fichier d'instructions, généralement au format G-code, que l'imprimante peut lire et exécuter.

Plusieurs slicers peuvent être compatibles avec une même imprimante, à condition qu'ils produisent un G-code interprétable par le firmware (le logiciel interne) de l'imprimante. Par exemple, CuraSlicer est souvent recommandé par les fabricants d'imprimantes, il existe aussi PrusaSlicer qui est un logiciel gratuit et open-source populaire. PrusaSlicer, bien qu'initialement conçu pour les imprimantes de la marque Prusa, est souvent utilisé pour sa facilité d'utilisation et ses fonctionnalités complètes. Il peut être configuré pour d'autres types d'imprimantes, y compris celles utilisant des matériaux non polymères comme le béton, à condition de renseigner correctement leurs caractéristiques techniques.

La compatibilité repose souvent sur le type de firmware utilisé par l'imprimante. Si l'imprimante utilise un firmware de type RepRap/Sprinter (ce qui est le cas de l'imprimante du laboratoire), PrusaSlicer peut générer des commandes G-code pour contrôler les moteurs, l'extrusion, et d'autres paramètres. Une configuration précise des caractéristiques de l'imprimante dans le slicer est donc essentielle pour obtenir un fichier G-code fonctionnel.

L'imprimante béton du laboratoire utilise RepRapFirmware, un firmware spécifiquement développé pour les cartes de contrôle Duet (Duet 2, Duet 3, etc.), fréquemment rencontrées sur les imprimantes 3D plus avancées. Lors de la configuration d'une nouvelle imprimante dans le slicer, le type de firmware est l'un des premiers paramètres à définir. Il faut ensuite spécifier la forme et les dimensions du plateau d'impression, ainsi que le diamètre de la buse (ce dernier pouvant être ajusté ultérieurement). Des paramètres tels que la température de la buse ou du plateau chauffant, pertinents pour l'impression polymère, ne s'appliquent pas à l'impression béton et n'ont donc pas besoin d'être configurés.

Problème de déplacement sans dépôt de matière lors de l'impression

Un défi majeur se présente avec les slicers conventionnels : ils sont principalement conçus pour l'impression de polymères. À ma connaissance et d'après mes recherches, il n'existe pas encore de slicers spécifiquement dédiés à l'impression 3D béton qui soient largement répandus. Les praticiens de l'impression 3D béton ou céramique recourent donc souvent à la génération de G-code personnalisé, soit via des scripts (par exemple en Python), soit en utilisant des outils de conception paramétrique offrant une grande flexibilité, comme Grasshopper (un plugin pour le logiciel Rhino 8). Pour des géométries simples, certains slicers proposent un "mode vase" (Vase Mode). Ce mode est conçu pour imprimer des objets à paroi unique (comme des vases ou des colonnes creuses) en générant un G-code avec un cordon d'impression continu, sans interruption. Ce mode est l'une des rares fonctionnalités natives des slicers grand public qui puisse s'approcher des besoins de l'impression céramique ou béton. Cependant, pour des modèles volumiques complexes, comme ceux envisagés dans ce travail, et non de simples surfaces, les slicers classiques ne sont généralement pas adaptés pour générer des trajectoires d'impression continues sans modifications.

Avec l'imprimante 3D béton du laboratoire, tout déplacement de la buse doit impérativement être

accompagné d'une extrusion de matière. Un déplacement "à vide" (sans extrusion) entraînerait le dépôt indésirable d'un cordon de béton. Ceci est dû au fait que la pompe à béton fonctionne en continu. Elle est indépendante du système de contrôle de l'imprimante et ne possède pas de mécanisme pour démarrer ou arrêter l'extrusion sur commande du G-code. Par conséquent, pour obtenir une pièce correctement imprimée, le cordon de béton doit être déposé de manière continue tout au long du processus. Or, les slicers grand public, tels que PrusaSlicer, ne sont pas nativement conçus pour générer des parcours d'impression totalement continus, en particulier lors des transitions entre les périmètres ou les couches, ce qui limite leur utilisation directe dans ce contexte. Ces slicers génèrent typiquement des fichiers G-code qui incluent des déplacements de la buse sans extrusion. Cette approche est standard pour l'impression de polymères, où l'extrusion peut être stoppée et reprise sans affecter significativement la qualité de la pièce.

Trois solutions sont alors envisageables pour régler ce problème :

1. La première option serait de modifier manuellement le fichier G-code pour assurer la continuité du dépôt. Cela impliquerait d'éditer directement les lignes de code. Bien que la structure du G-code soit relativement simple, cette tâche deviendrait extrêmement longue et fastidieuse pour des fichiers comportant des dizaines de milliers de lignes.
2. Une deuxième solution serait d'utiliser Grasshopper, un plugin de modélisation paramétrique pour Rhino 8. Cette approche est courante en impression 3D béton car elle offre une grande liberté dans la conception des trajectoires d'outil. Un plugin pour Grasshopper, Silkworm2 (qui s'inspire de Slic3r ; l'un des premiers logiciels de slicing open source, dont PrusaSlicer est le successeur), permet de générer des parcours de polygones continus, adaptés à des formes surfaciques simples comme des vases. Cependant, pour les volumes fermés et complexes des éléments de ce travail, Silkworm2 ne propose pas de fonctionnalités de slicing automatique équivalentes à celles des slicers classiques. Bien qu'une solution plus élaborée impliquant d'autres plugins ou des développements spécifiques dans Grasshopper aurait pu être envisagée, cette option n'a pas été retenue dans le cadre de ce travail.
3. La troisième solution, et celle retenue pour ce travail, consiste à développer un script Python. Ce script prend en entrée le G-code généré par un slicer standard et le traite pour corriger les discontinuités dans les trajectoires d'impression.

Script de post-traitement de G-Code pour l'impression 3D béton continue

Le script Python développé est un post-processeur de G-code. Il est spécifiquement conçu pour adapter les fichiers G-code standards à l'impression 3D béton continue, où le système d'extrusion (comme une pompe à béton) ne permet pas d'interruptions d'extrusion de matière. Son rôle principal est de modifier l'ordre d'impression des périmètres (les contours extérieurs et intérieurs de chaque couche) afin d'optimiser la trajectoire de la buse. L'objectif est d'éviter les dépôts de matière non désirés qui surviendraient lors de déplacements normalement "à vide" dans un G-code standard.

Pour rappel, dans un G-code typique pour l'impression polymère, les déplacements de la buse sans extrusion (mouvements de voyage) sont généralement codés par des instructions G1 X... Y... (sans valeur pour le paramètre E d'extrusion). À l'inverse, une instruction G1 X... Y... E... (avec une valeur pour E) commande un déplacement avec dépôt de matière. Avec une pompe à béton qui extrude en continu, ces déplacements G1 X... Y... sans E entraîneraient inévitablement des coulées de matière. Il est donc impératif de les éliminer ou de les transformer en déplacements avec extrusion pour assurer un dépôt contrôlé.

Les slicers standards génèrent souvent un G-code où, pour chaque couche, les périmètres sont imprimés soit de l'extérieur vers l'intérieur, soit de l'intérieur vers l'extérieur, de manière constante. Cela signifie que :

1. La buse commence le premier périmètre (souvent l'externe) d'une couche.
2. Elle imprime les périmètres successifs, par exemple de l'extérieur vers l'intérieur (illustré par le dégradé de couleur sur la Figure 112a).
3. Une fois tous les périmètres de la couche N imprimés, la couche est considérée comme terminée.
4. La buse s'élève verticalement (mouvement en Z) pour atteindre la hauteur de la couche N+1.
5. Elle effectue ensuite un déplacement horizontal (mouvement de voyage) pour se repositionner au point de départ du premier périmètre de la couche N+1 (à l'extérieur, comme pour la couche N) (Figure 112b).
6. Elle imprime alors les périmètres de la couche N+1, de nouveau de l'extérieur vers l'intérieur (Figure 112c).
7. Ce cycle (étapes 4, 5 et 6) se répète jusqu'à la fin de l'impression.

Le problème réside dans l'étape 5 (Figure 112b) : ce déplacement horizontal est normalement effectué sans extrusion. Cependant, avec une pompe à débit continu, du béton sera inévitablement déposé durant ce trajet. Ce cordon parasite peut ensuite interférer avec les cordons suivants, causant des défauts d'impression (Figure 112c).

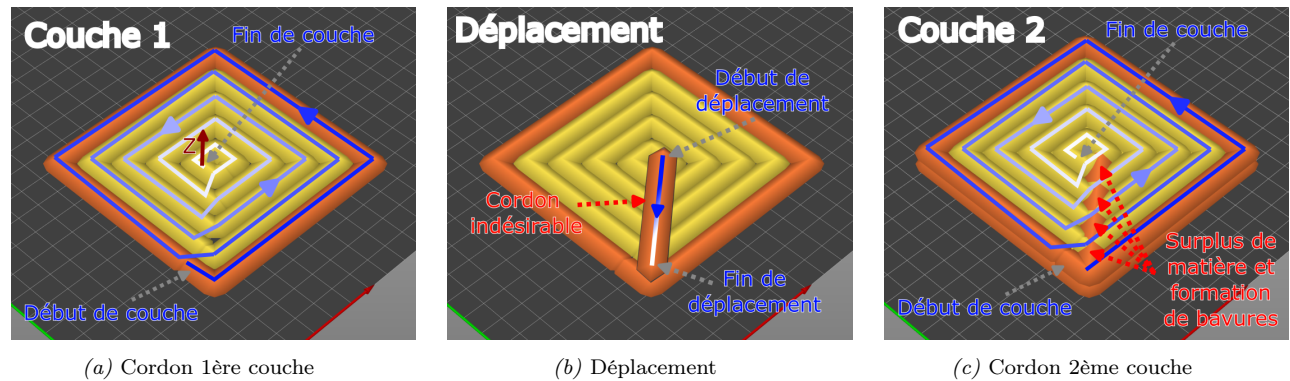
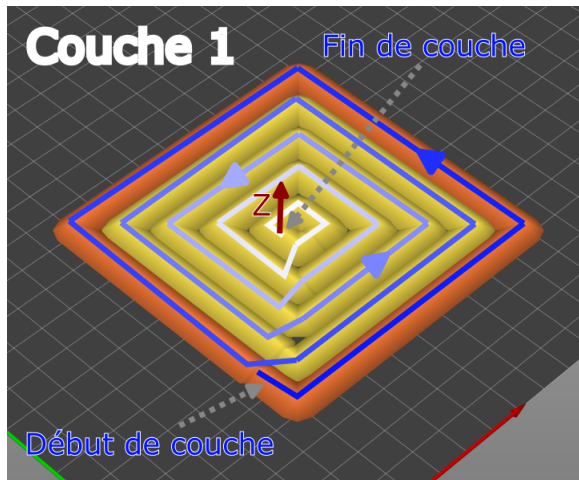
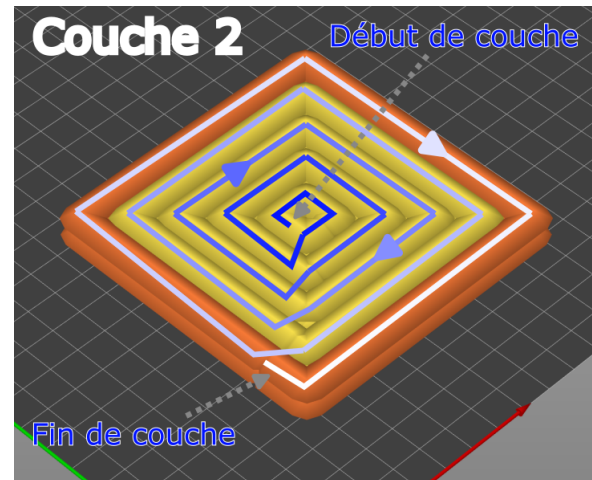


FIGURE 112 – Exemple de cordon sans modification de G-Code

Le script Python résout ce problème en alternant la direction d'impression des périmètres : pour les couches impaires (1, 3, 5, etc.), l'ordre original (par exemple, extérieur vers intérieur) est conservé (Figure 113a). Pour les couches paires (2, 4, 6, etc.), l'ordre d'impression des périmètres est inversé (par exemple, intérieur vers extérieur) (Figure 113b). De cette manière, la buse termine le dernier périmètre d'une couche (N) à proximité du point de départ du premier périmètre de la couche suivante (N+1). Le déplacement de transition devient minime et direct, idéalement juste une montée en Z. Cela permet un cheminement continu, évitant les longs déplacements "à vide" au-dessus de la matière fraîchement déposée, réduisant ainsi les défauts et assurant une impression plus propre et fiable avec une pompe à débit continu.



(a) Cordon 1ère couche et déplacement verticale



(b) Cordon 2ème couche

FIGURE 113 – Exemple de cordon avec modification de G-Code

Le script inclut également un mode de débogage optionnel qui annote le G-code modifié avec des commentaires indiquant les couches et les différents périmètres, facilitant la vérification.

Les seuls prérequis pour utiliser ce script correctement sont :

- Le G-code initial doit être généré avec PrusaSlicer (ou un slicer produisant un G-code similaire en structure).
- La pièce doit être définie dans le slicer pour être imprimée uniquement avec des périmètres (pas de remplissage interne de type "infill" comme les motifs en nid d'abeille). Ceci est généralement obtenu en configurant un nombre suffisant de périmètres pour que la pièce soit pleine ou en utilisant des options spécifiques pour les parois.
- Les points de départ et de fin des périmètres (les "jointures" ou "seams") doivent être alignés verticalement d'une couche à l'autre. Cette option est configurable dans la plupart des slicers. Cet alignement est crucial pour que la buse se trouve au bon endroit pour commencer la couche suivante après l'inversion de l'ordre des périmètres, minimisant ainsi les déplacements horizontaux lors de la transition de couche.

Le code source du script Python est disponible en Annexe 9.1 et est également publié en open source sur GitHub : <https://github.com/theco10/3D-Concrete-Continuous-Printing>.

Réalisation des G-Codes de la main de la statue de la Dame blanche et de l'élément de chapiteau

Disposant des informations issues des tests d'impression préliminaires (Section 5.1.2), les hauteurs de couche optimales peuvent être déterminées en fonction des buses et des réglages de la pompe. Par exemple, pour une buse de 34 mm avec une vitesse de pompe de 1000 rpm, les tests ont montré que des hauteurs de couche entre 18 et 19 mm sont les plus adaptées. Pour une buse de 20 mm et une vitesse de pompe de 600 rpm, des hauteurs de couche de 17, 18 ou 19 mm ont donné les meilleurs résultats.

Les paramètres saisis dans le slicer sont les suivants :

- Diamètre de la buse : 20 mm.
- Hauteur de couche : 19 mm (valeur retenue suite aux tests préliminaires concluants).

- Largeur d'extrusion (largeur de couche) : 24 mm (choisie car les cordons obtenus lors des tests avec une hauteur de 19 mm avaient une largeur effective entre 20 et 24 mm).
- Vitesse d'impression : 120 mm/s.

Avec ces paramètres, les fichiers .stl des modèles (main et chapiteau, modélisés dans la Section 5.3) sont slicés.

- Pour le modèle de la main, PrusaSlicer génère 11 couches. Le temps d'impression estimé est de 13 minutes (Figure 114a). Les jointures sont configurées pour être alignées verticalement (Figure 114b).

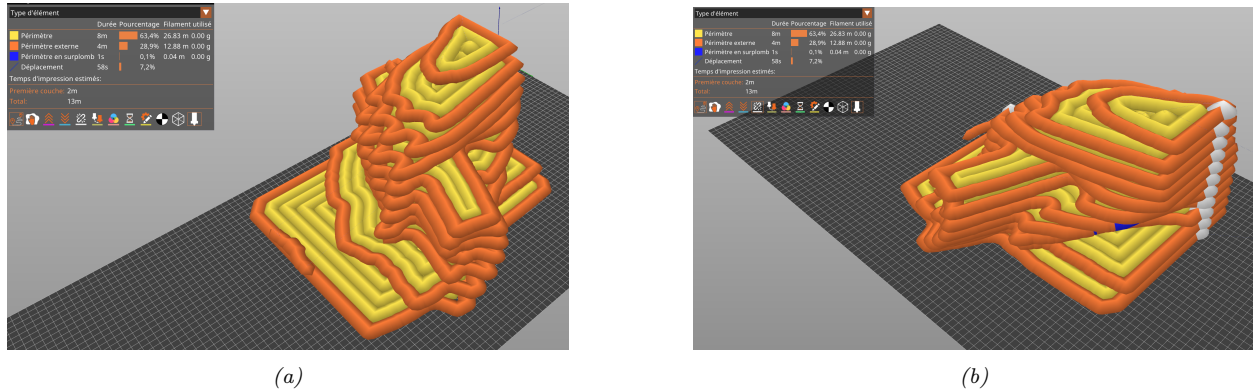


FIGURE 114 – Slicing de la main de la Dame blanche

- Pour l'élément de chapiteau, le modèle est découpé en 14 couches, avec un temps d'impression estimé à 5 minutes (Figure 115a). L'aperçu du découpe révèle que certaines parties de l'élément sont constituées de périmètres très étroits et superposés sur une hauteur importante, ce qui risquerait de provoquer un effondrement lors de l'impression. Ces zones non imprimables sont donc identifiées et virtuellement retirées du modèle avant de générer le G-code final (Figure 115b).

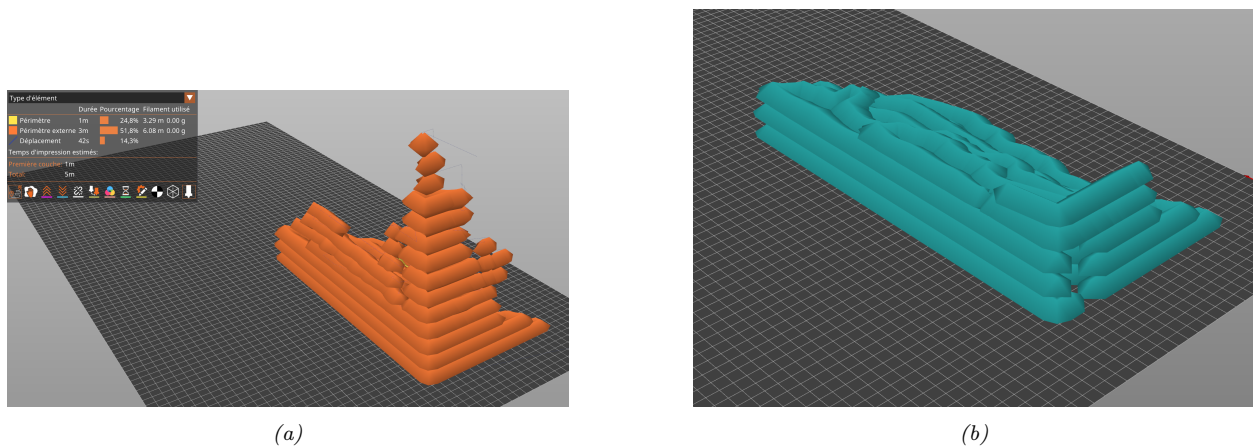


FIGURE 115 – Slicing du chapiteau de colonne

Les fichiers G-code résultants sont ensuite exportés de PrusaSlicer puis traités par le script Python pour inverser l'ordre d'impression des périmètres sur les couches paires. Après le post-traitement

par le script Python, des commandes G-code spécifiques sont ajoutées manuellement au début du fichier. La commande 'M92 E2000' est utilisée pour régler la vitesse du mélangeur de la pompe afin d'assurer une bonne homogénéisation du mélange. De plus, les commandes G1 X150 Y100 et G1 E4000 F5000 sont insérées. La première déplace la buse à la position (X150, Y100), au-dessus d'un seau de récupération. La seconde commande une extrusion d'une quantité définie de matière à une vitesse spécifiée. Cette séquence permet d'amorcer la pompe et de stabiliser le débit pendant environ une minute avant le début effectif de l'impression de la pièce.

Le positionnement initial à (X150, Y100) facilite également le raccordement du tuyau d'alimentation à la buse, cet emplacement étant plus accessible que la position d'origine (0,0) qui est proche de la structure de l'imprimante.

Les fichiers G-code finaux sont alors prêts à être transférés sur la carte SD de l'imprimante.

Première impression de la main de la Dame blanche

Lors d'une première séance dédiée à l'impression de la main, quatre tentatives ont été effectuées en utilisant un mélange à base d'argile. L'avantage de l'argile pour ces tests est qu'elle ne durcit pas immédiatement (contrairement au béton), ce qui permet de la récupérer et de la réutiliser pour plusieurs essais successifs en la remplaçant simplement dans la trémie de la pompe.

Ces quatre essais ont tous utilisé le même fichier G-code, celui correspondant au modèle de la main. Après vérification de la consistance du mélange d'argile (avec un test d'étalement sur table à secousses), celui-ci est versé dans la trémie de la pompe. Une fois le niveau du plateau d'impression ajusté (Z0) et la buse positionnée correctement, l'impression peut démarrer.

Un premier essai est réalisé à une vitesse d'impression de 80 mm/s, avec une vitesse de rotation de la pompe de 600 tr/min, pour observer le comportement du cordon. Le cordon est extrudé de manière continue, mais le débit de matière est excessif. Les cordons sont trop larges et se chevauchent, la matière étant repoussée par les cordons adjacents. Il devient difficile de distinguer les cordons individuels. Le nozzle se recouvre de matière, qu'il entraîne lors de son déplacement, créant des bavures (Figure 116).

Après avoir récupéré l'argile et l'avoir replacée dans la trémie, un deuxième essai est lancé. La vitesse d'impression est maintenue à 80 mm/s, mais la vitesse de la pompe est réduite à 500 tr/min. Les cordons sont légèrement moins larges et moins collés, mais le débit reste trop important (Figure 117). On observe sur la deuxième couche que le nozzle continue de pousser la matière au-delà du périmètre théorique.



FIGURE 116 – Premier test 80 mm/s & 600 rpm



FIGURE 117 – Deuxième test 80 mm/s & 500 rpm

Pour le troisième essai, l'argile est de nouveau récupérée. La vitesse d'impression est augmentée

à 120 mm/s, tandis que la vitesse de la pompe est maintenue à 500 tr/min. L'augmentation de la vitesse d'impression, pour un même débit, devrait théoriquement réduire la section du cordon déposé. Les cordons sont plus distincts, mais un excès de matière est toujours visible (Figure 118). Leur largeur reste supérieure aux 24 mm visés. Le nozzle pousse encore un léger surplus de matière. On note également que le porte-à-faux nécessaire pour imprimer le pouce commence à montrer des signes d'affaissement dès la troisième couche.

Un quatrième essai est effectué. La vitesse d'impression reste à 120 mm/s, mais la vitesse de la pompe est réduite à 400 tr/min. Cette vitesse de rotation est proche de la limite inférieure de fonctionnement stable de la pompe, qui requiert un débit minimal d'environ 1,5 l/min (correspondant à 400-450 tr/min, plage où la régularité du débit peut être difficile à maintenir). Cet essai s'avère concluant. Les cordons sont bien définis et distincts (Figure 119). Leur hauteur est correcte (19 mm) et leur largeur se situe entre 22 et 24 mm. L'impression a pu atteindre la quatrième couche avant d'être interrompue par manque de mélange. Les paramètres de vitesse d'impression et de rotation de la pompe étant désormais optimisés, il suffit de préparer un nouveau mélange avec les mêmes propriétés pour reproduire ce résultat et imprimer la pièce complète.



FIGURE 118 – Troisième test 120 mm/s & 500 rpm



FIGURE 119 – Quatrième test 120 mm/s & 400 rpm

La durée totale de ces quatre essais a été d'environ 40 minutes. L'évolution de la teneur en eau du mélange d'argile (et donc de sa consistance) sur cette période est considérée comme négligeable. Idéalement, un test d'étalement aurait pu être réalisé sur le reste de mélange pour vérifier cette hypothèse, mais cela n'a pas été fait.

La réalisation de ces tests d'impression requiert idéalement trois personnes, ou au minimum deux opérateurs expérimentés :

1. Un opérateur lance l'impression depuis l'interface de contrôle, surveille le bon déroulement du cheminement du tuyau d'alimentation (éviter les contraintes sur la buse, les pliures) et arrête l'imprimante en fin de processus.
2. Un deuxième opérateur est responsable du démarrage de la pompe, de l'ajustement du débit via le potentiomètre si nécessaire pendant l'impression, et de l'arrêt de la pompe.
3. Une troisième personne assure l'alimentation continue de la vis sans fin de la pompe en poussant le mélange vers le fond de la trémie.

Les tâches des deuxième et troisième opérateurs peuvent être combinées par une seule personne expérimentée.

Réalisation d'un deuxième mix

Un second mélange a dû être préparé, la quantité initiale s'étant avérée insuffisante pour imprimer toutes les pièces prévues, notamment à cause des pertes de matière lors des nettoyages successifs

de la pompe et du tuyaux. Ce second mélange est également à base d'argile. Il s'agit d'une argile plastique sans chamotte (granulats d'argile cuite), de couleur orangée (Figure 120).

Les composants ont été dosés pour obtenir une ouvrabilité similaire à celle du premier mélange, c'est-à-dire un matériau facilement pompable et capable de maintenir la forme du cordon après extrusion. Voici la composition de base de ce mélange :

TABLEAU 6 – Composition du second mix d'argile

/	Ratio
Liant (L)	Argile plastique L/L : 1 (référence)
Agrégats (S)	Sable recyclé de béton 0-2 mm S/L : 1
Eau (E)	Eau E/L : 0,5

Un test d'étalement à la table à secousses est réalisé pour vérifier que ce nouveau mélange présente une consistance comparable au précédent (Figure 121).



FIGURE 120 – Ancien et nouveau mix d'argile



FIGURE 121 – Test d'étalement du second mix

Un calcul approximatif du volume de matière nécessaire est effectué. Le tuyau reliant la pompe à la buse (diamètre 35 mm, longueur 3 mètres) contient à lui seul environ 2,88 litres de mélange. Initialement, un tuyau de 5 mètres était fourni, mais sa longueur excessive (induisant un volume mort important et des pertes de charge) a conduit à son remplacement par le tuyau de 3 mètres. Le volume de matière contenu dans la buse est estimé à 0,3 litre, et celui dans la trémie et le corps de pompe à environ 3 litres. Au total, il faut donc prévoir environ 6 litres de "volume mort" ou de matière nécessaire pour amorcer le système, en plus du volume net de la pièce à imprimer (calculé par Fusion 360).

Impression du coin de chapiteau d'une colonne

Les deux impressions suivantes (le chapiteau puis la main) sont réalisées consécutivement, en suivant le protocole établi lors des tests précédents. La hauteur de la buse est ajustée. Le point d'origine de l'impression est configuré pour que la phase d'amorçage se fasse au-dessus du seau de récupération. L'élément de chapiteau est imprimé sur une plaque de contreplaqué marin amovible. Cela permet de libérer rapidement le plateau principal de l'imprimante pour l'impression de la main, plus volumineuse. Le mélange d'argile est testé à la table à secousses avant de commencer. Le diamètre d'étalement obtenu (123 mm) est jugé comparable à celui des mélanges précédents et servira de référence pour les deux impressions à venir.

Les réglages pour l'impression du coin de chapiteau de colonne sont :

- Buse de diamètre 20 mm
- Hauteur de couche de 19 mm
- Largeur de couche de 24 mm
- Vitesse d'impression de 120 mm/s
- Rotation par minute de la pompe de 400 rpm

L'impression débute correctement, le nouveau mélange se comportant de manière identique au précédent. Durant la phase d'amorçage (environ 30 secondes au-dessus du seau), le cordon extrudé est régulier et homogène. Pendant l'impression de la pièce, les cordons sont déposés avec précision, sans chevauchement excessif ni surplus de matière (Figure 122). Ils conservent leurs dimensions cibles (19 mm de hauteur, 24 mm de largeur). La structure reste stable, les couches inférieures supportant adéquatement le poids des couches supérieures (Figure 123).



FIGURE 122 – Première couche d'impression du chapiteau

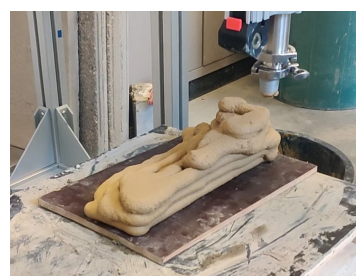


FIGURE 123 – Fin d'impression du chapiteau

Le résultat final est examiné sous différents angles (Figure 124). La vue de face (Figure 124a) révèle un excès de matière dans les angles, où la buse doit effectuer des changements de direction brusques (angles droits ou quasi demi-tours). Le ralentissement de la buse dans ces zones, combiné à un débit de matière constant, provoque une accumulation locale de matière, formant des boursouflures. Par conséquent, les faces qui devraient être planes perdent de leur planéité à cause de ces angles surchargés.

Bien que la géométrie globale soit respectée, la taille relativement importante des cordons (comparée à la finesse de certains détails) conduit à un rendu assez grossier des courbures fines, notamment dans la zone de réparation (visible à droite sur la Figure 124b). Cet effet était d'ailleurs anticipable d'après la prévisualisation du slicing dans PrusaSlicer.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 124 – Impression finale en argile du coin de chapiteau

Seconde impression de la main de la statue de la Dame blanche

L'impression de la main est lancée immédiatement après celle du chapiteau, avec le même mélange. La hauteur de la buse est ajustée (abaissée de 10 mm) pour compenser le retrait de la plaque de contreplaqué utilisée pour le chapiteau, afin de retrouver la bonne distance par rapport au plateau d'impression principal. La phase d'amorçage (environ 1 minute à X150, Y100 au-dessus du seau) est répétée. Ce positionnement initial spécifique (X150, Y100) est motivé par deux raisons : premièrement, stabiliser le débit de la pompe, comme expliqué précédemment. Deuxièmement, gérer l'orientation du tuyau d'alimentation. Si le tuyau arrive parallèlement à l'axe Y, il risque d'entrer en collision avec le châssis de l'imprimante, car le modèle de la main occupe quasiment toute la largeur du plateau (étendue maximale en Y). Le tuyau est donc orienté selon l'axe X. Cette configuration rend cependant difficile la connexion du tuyau si la buse est à sa position d'origine (0,0). Le déplacement initial à (X150, Y100) offre donc un meilleur accès pour le branchement.

Les paramètres d'impression (vitesse, hauteur et largeur de couche, vitesse de pompe) sont identiques à ceux utilisés pour le chapiteau. La première couche s'imprime correctement, confirmant le bon réglage de l'espacement entre les cordons (Figure 125). Sur les couches suivantes, les dimensions des cordons restent constantes. Cependant, les périmètres extérieurs présentant des porte-à-faux importants (notamment pour le pouce) tendent à s'affaisser par endroits.

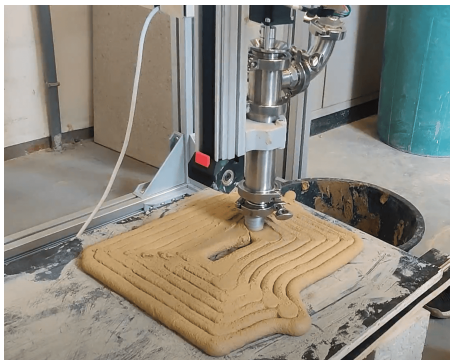


FIGURE 125 – Première couche d'impression de la main



FIGURE 126 – Fin d'impression de la main

Le résultat final est examiné sous différents angles (Figure 127). La vue de face (Figure 127a) permet

de distinguer la forme générale des doigts enroulés autour du parchemin. La vue arrière (Figure 127c) montre clairement que le pouce, qui nécessitait un porte-à-faux conséquent, s'est affaissé car les cordons n'étaient pas suffisamment soutenus par les couches inférieures. Similairement au chapiteau, un surplus de matière est visible dans un coin arrière de la main (à droite sur la Figure 127c). Ce coin correspond à l'emplacement des jointures où la buse s'élève pour passer à la couche suivante. Un léger temps d'arrêt ou un ralentissement excessif à cet endroit a pu causer ce dépôt excédentaire.

Comme pour le chapiteau, la forme globale est reconnaissable, mais la résolution limitée par la taille des cordons ne permet pas de restituer les détails fins. La forme individuelle des doigts, par exemple, est à peine esquissée. La prévisualisation dans le slicer laissait présager cette limitation.

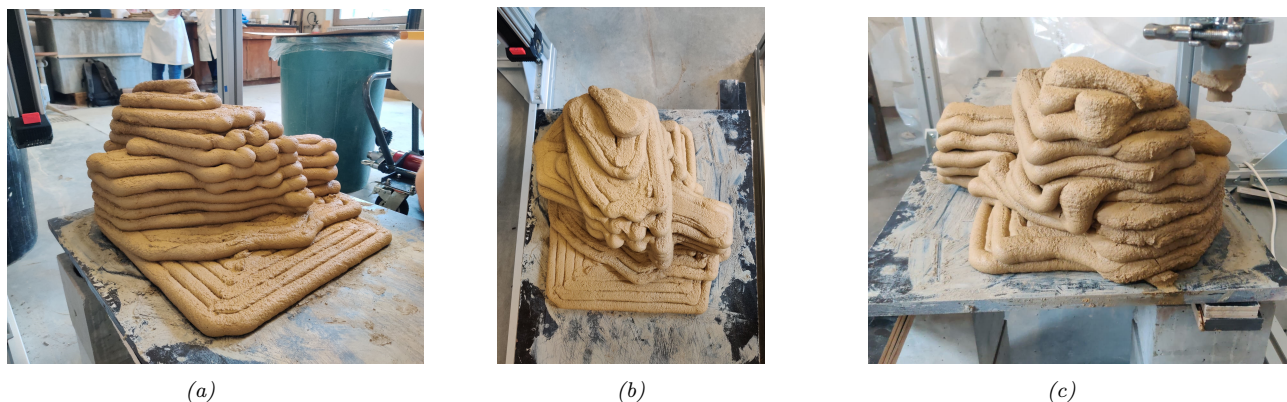


FIGURE 127 – Impression finale en argile de la main de la statue

Impression béton du coin de chapiteau d'une colonne en utilisant du mortier de ciment

Une dernière impression test est réalisée, cette fois avec un mortier à base de ciment. L'élément de chapiteau est choisi pour cet essai afin de limiter la quantité de mortier à préparer. L'objectif est d'ajuster la formulation du mortier de ciment pour obtenir une ouvrabilité (consistance et pompabilité) similaire à celle du mélange d'argile. Si nécessaire, un agent modificateur de viscosité (viscosant) pourrait être ajouté pour atteindre le comportement rhéologique désiré. Les paramètres d'impression et le fichier G-code sont identiques à ceux utilisés pour l'impression en argile du chapiteau.

Le résultat obtenu avec le mortier de ciment est géométriquement similaire à celui obtenu avec l'argile (Figures 128 129). L'impression s'est déroulée de manière stable, et le mortier a fait sa prise en environ trente minutes. Ce test confirme que les paramètres et la méthodologie développés avec l'argile sont transposables à l'impression avec un mortier de ciment, du moins en ce qui concerne la faisabilité géométrique. L'utilisation de l'argile pour les tests préliminaires et la mise au point du processus a été motivée par plusieurs avantages : facilité de nettoyage des équipements, possibilité de réutiliser la matière, faible coût, et simplicité d'ajustement de son ouvrabilité (principalement par ajout d'eau). Le mortier de ciment, en revanche, présente un coût plus élevé, un temps de prise court (ne permettant pas la réutilisation immédiate ou les essais multiples avec une même gâchée), et un nettoyage des équipements (surtout la pompe) plus contraignant. Il n'a donc été utilisé que pour cette validation finale.



FIGURE 128 – Vue avant du coin de chapiteau en mortier



FIGURE 129 – Vue de côté du coin de chapiteau en mortier

6 Comparaisons des résultats et discussions

6.1 Comparaison des différentes méthodes de numérisation 3D photogrammétrique - LiDAR - Laser

On peut tout d'abord se référer au tableau synthétisant les différents scans réalisés sur les éléments étudiés. Il permet de se faire une idée de la précision apportée par chaque méthode (Tableau 7).

TABLEAU 7 – Synthèse du nombre de facettes pour chaque élément

Élément	Numérisation 3D photogrammétrique	Numérisation 3D Lidar	Numérisation 3D Laser
Bloc de test St Vincent	255 831	24 300	8 754 226
Coin de colonne Labo Thermo	2 662 882	30 011	1 333 789
Main de la Dame blanche	2 700 699	27 759	/

TABLEAU 8 – Comparatif des différentes méthodes de numérisation 3D utilisées

	Numérisation 3D photogrammétrique	Numérisation 3D Lidar	Numérisation 3D Laser
Prix	$\approx 250 - 550$ €	$\approx 1\,500$ €	$\approx 30\,000$ €
Temps de collecte des données	10-20 min	5-10 min	10-20 min
Précision & Erreurs	Précis (0,5-1 mm) Dépend du nombre de photos Dépend de l'exposition	Convenable (1-2 mm) Dépend de l'exposition	Très précis (0,1-1 mm) Dépend du nombre de balayage
Difficulté d'utilisation	Logiciel Recap simple simple photo	Logiciel Kiri ingine simple & intuitif	logiciel Shining 3D complexe expertise
Encombrement du scanner	Petit et léger	Tablette encombrante	Maniable fil de raccordement proximité de l'ordinateur proximité d'une prise

Chaque point de ce tableau sera discuté afin de mettre en évidence les avantages, les inconvénients, la pertinence d'utilisation et les difficultés rencontrées pour chacune de ces trois méthodes de numérisation 3D employées dans ce travail.

- **Prix**

En termes de prix, les deux premières méthodes sont très abordables. Concernant la photogrammétrie, les téléphones et tablettes étant aujourd'hui omniprésents, la plupart des gens disposent du matériel de base pour cette méthode. Dans le cadre de ce travail, l'application Autodesk Recap a été utilisée, celle-ci est payante, mais des applications gratuites, parfois directement intégrées aux appareils, peuvent suffire pour réaliser des modèles 3D. De plus, les nouveaux smartphones et tablettes étant équipés d'appareils photo de plus en plus performants, il est possible d'obtenir des scans de haute qualité.

Certains téléphones et tablettes haut de gamme, comme les iPhone Pro et les iPad Pro,

intègrent également des capteurs LiDAR. Cette méthode de scan est donc un peu plus coûteuse que la photogrammétrie pure, mais reste très accessible. Ces deux premières méthodes n'exigent ainsi quasiment aucun matériel que l'on pourrait qualifier de professionnel.

En revanche, la numérisation 3D par scanner laser est une méthode plus précise qui nécessite l'utilisation d'un appareil de haute technologie, nettement plus onéreux. De plus, le scanner laser doit être connecté à un ordinateur puissant, ce qui représente un coût supplémentaire. Le logiciel fourni avec le scanner fonctionne souvent sous forme de licence qu'il faut renouveler régulièrement. Enfin, l'utilisation d'un scanner laser demande un certain savoir-faire, nécessitant donc potentiellement de faire appel à une main-d'œuvre qualifiée, ce qui engendre également un coût.

- **Temps de collecte des données**

Le temps de collecte des données est pratiquement le même pour chacune des trois méthodes. Toutefois, si l'objet à numériser est de grande taille, cela impacte la durée de la collecte. Par exemple, lors du scan du chapiteau, l'escabelle a dû être déplacée plusieurs fois afin d'obtenir des angles de vue corrects, ce qui a prolongé le temps de prise de données. Cette manipulation a cependant été nécessaire quelle que soit la méthode employée.

Le scanner laser présente l'avantage d'indiquer en temps réel, via l'ordinateur, les zones présentant un manque de précision. Il est ainsi possible de repasser sur ces zones afin d'obtenir un balayage complet et précis de l'objet. Toutefois, cette étape n'allonge pas de manière significative la durée totale du scan.

- **Précision & Erreurs**

La précision des méthodes photogrammétriques et de scan laser est très élevée. Cela se vérifie notamment par le nombre de facettes obtenues avec ces deux techniques, qui dépasse généralement le million de faces par modèle, alors qu'avec la méthode LiDAR, ce nombre se situe plutôt autour de 20 000 à 30 000 facettes. Comme présenté dans la section 5.2, les illustrations montrent que tous les scans obtenus offrent une qualité suffisante au regard des objectifs de ce travail. Lors des opérations de modélisation, il est d'ailleurs nécessaire de réduire le nombre de facettes afin de limiter le temps de calcul, ce qui prouve que chacune des techniques de numérisation fournit une quantité de détails largement suffisante.

Le scan de la main, qui a servi de base au moule, illustre bien la finesse du détail capturé, notamment au niveau du pouce et du parchemin. Une comparaison avec l'élément réel montre que la précision du scan est apte à reproduire fidèlement la sculpture.

Un autre point à souligner concerne la nature du matériau. Le béton, n'étant ni réfléchissant ni trop clair, ne provoque pas de problème de réflexion des faisceaux lumineux ou des lasers, ce qui facilite les différents types de scans. À l'inverse, des surfaces réfléchissantes comme l'acier poseraient davantage de difficultés aux scanners.

Cependant, l'exposition de l'objet à la lumière du jour peut influencer la qualité du scan, en particulier pour les méthodes photogrammétrique et LiDAR. Par exemple, lors du scan de la main de la statue, un manque de précision a été constaté au niveau de l'auriculaire et de l'annulaire. Deux facteurs ont contribué à cette perte de qualité : la faible exposition lumineuse de cette zone, située à l'ombre en raison de la géométrie de la main, et la difficulté d'accès pour scanner cette partie par le dessous. Une exposition lumineuse plus uniforme ainsi qu'une plus grande liberté de mouvement lors du scan auraient sans doute permis d'améliorer le résultat final. L'utilisation d'un petit échafaudage mobile aurait pu faciliter cela.

- **Difficulté d'utilisation**

Les deux premières méthodes sont relativement simples d'utilisation. L'utilisation de Recap n'est pas compliquée, les étapes sont clairement indiquées et de nombreuses vidéos explicatives sont disponibles en ligne. La partie la plus importante consiste à maintenir un déplacement angulaire aussi constant que possible entre chaque photo, afin de faciliter les calculs de la machine. Il est également utile de placer des points de repère pour améliorer la précision du traitement.

De même, l'application KIRI Engine est très simple à prendre en main. Son interface graphique guide l'utilisateur à travers les étapes, la rendant accessible même aux novices.

En revanche, pour le scanner laser, une expertise plus poussée est nécessaire. Le logiciel Shining 3D est moins intuitif et propose un grand nombre de fonctionnalités, ce qui complexifie son utilisation. Des étapes d'étalonnage et de calibration de la machine sont indispensables avant de commencer la numérisation. De plus, pour la numérisation d'un élément de grande taille, il est souvent nécessaire de travailler à deux : une personne manie le scanner pendant qu'une autre surveille les données sur l'ordinateur. Cette seconde personne guide l'opérateur en lui indiquant les zones à balayer davantage pour garantir un relevé complet et précis.

- **Encombrement du scanner**

En ce qui concerne l'encombrement, lorsque les photos sont prises à l'aide d'un smartphone, comme cela a été le cas pour cette étude, la méthode de la photogrammétrie est très pratique et peu encombrante. Le smartphone est léger, peut être tenu à bout de bras ou fixé sur une perche, et son poids représente un avantage non négligeable : même après une longue session de prises de vues, la fatigue reste limitée.

Pour la numérisation 3D Lidar, si elle est réalisée avec un iPhone Pro, les conditions restent similaires à celles de la photogrammétrie. En revanche, si elle est effectuée à l'aide d'un iPad Pro, l'encombrement est plus important. La tablette doit être tenue à deux mains et son poids est plus conséquent. Si l'objet à scanner est de grande taille, il est préférable de procéder en plusieurs sessions de scan, comme cela a été fait pour le chapiteau.

Le scanner laser lui-même n'est pas particulièrement encombrant, étant conçu pour être tenu facilement à la main. Toutefois, son poids reste conséquent et peut devenir un facteur limitant lors d'une utilisation prolongée à bout de bras. L'encombrement vient surtout du matériel connecté au scanner : un câble de connexion, un ordinateur à proximité et une alimentation électrique sont indispensables pour faire fonctionner l'ensemble.

Si l'encombrement ou les conditions d'accès rendent le scan trop contraignant, voire dangereux, par exemple si l'opérateur travaille en hauteur, l'utilisation d'un drone devient alors la meilleure option. Cette technologie est aujourd'hui parfaitement maîtrisée et permet d'embarquer des capteurs LiDAR, des appareils photo haute définition ou même des scanners laser. Le recours à un drone facilite l'accès aux zones en hauteur ou difficilement accessibles, et permet également d'éviter l'installation d'un échafaudage, souvent chronophage et coûteux.

Toutes les technologies de numérisation évaluées se sont révélées suffisamment précises pour capturer la géométrie d'éléments détériorés. Le scan laser s'est avéré le plus performant en termes de densité de points et de rapidité de traitement combinée à une haute précision. Si le coût est un facteur limitant, le scan photogrammétrique représente le meilleur compromis entre prix, facilité et précision acceptable, bien que la luminosité et l'exposition de l'élément puissent jouer sur la qualité finale du

scan.

Une petite parenthèse peut être ouverte sur l'utilisation de la photogrammétrie. Lorsqu'un élément patrimonial a disparu, sa numérisation a posteriori n'est pas nécessairement impossible. Les monuments historiques et les statues sont fréquemment photographiés par les touristes, ce qui constitue une vaste banque d'images prises sous différents angles. Ces clichés peuvent être exploités pour réaliser une numérisation photogrammétrique. Cette technique a par exemple été utilisée pour reconstituer la Palmyra's Arch of Triumph (Jesus et al., 2023), une arche située en Syrie qui avait été détruite. Sa reconstitution a notamment été possible grâce à des photos d'époque et des clichés de touristes pris lorsque l'arche était encore debout. Cela prouve que la photogrammétrie a un rôle à jouer, notamment si aucun scan préalable n'a été réalisé.

6.2 Comparaison élément imprimé - élément moulé

TABLEAU 9 – Comparatif pour la main de la statue

	Impression béton	Impression polymère
Détail de surface (taille de cordons)	20 mm	0,2 mm
Temps d'impression	7 min	1j 19h 24min (mais échelle réduite x 2)
Modélisation	Traitement du maillage	Traitement du maillage + Réalisation de la coque
Slicing	Post traitement du G-Code	Découpe de la coque
Complexité de mise en œuvre	Nombreux réglages Nettoyage de l'imprimante	Facile Risques sur grandes pièces
Post-traitement	Aucun	Démoulage de la coque Complexe
Porte-à-faux Formes complexes	Affaissement	Réalisable
Itérations Adaptabilité	Réalisable avec l'argile Modification du G-Code rapide	Réutilisation du moule

TABLEAU 10 – Comparatif pour le chapiteau de colonne

	Impression béton	Impression polymère
Détail de surface (taille de cordons)	20 mm	0,2 mm
Temps d'impression	2 min	1j 20h 50min
Modélisation	Traitement du maillage + Reconstitution de l'élément manquant	Traitement du maillage + Reconstitution de l'élément manquant + Réalisation de la coque
Slicing	Post traitement du G-Code	Découpe de la coque
Complexité de mise en œuvre	Nombreux réglages Nettoyage de l'imprimante	Facile
Post-traitement	Aucun	Démoulage de la coque Simple
Porte-à-faux Formes complexes	Éléments trop petits Forme trop élancée	Réalisable
Itérations Adaptabilité	Réalisable avec l'argile Modification du G-Code rapide	Réutilisation du moule

Chaque point de ces deux tableaux sera discuté afin de mettre en lumière les avantages, les inconvénients, la pertinence d'utilisation et les difficultés rencontrées pour ces deux approches de restauration.

• Détail de surface

On peut tout d'abord comparer le niveau de détail de surface offert par les deux procédés. Les éléments réalisés par impression 3D directe, qu'ils soient en argile ou en béton, présentaient une hauteur de couche de 19 mm et une largeur avoisinant les 24 mm. C'est principalement la hauteur des couches qui demeure visible, car les flancs des cordons déposés marquent distinctement la surface des pièces. Le fait d'avoir des couches de près de 20 mm de hauteur les rend extrêmement perceptibles : chaque couche est clairement identifiable et le jeu de superposition laisse des strates très visibles à la surface (Figure 130).

En revanche, pour les éléments moulés, la texture due aux couches de la coque en polymère est bien plus fine. Il faut se rapprocher de l'objet pour distinguer les légères marques laissées par les couches issues du négatif du moule polymère (Figure 131). Au-delà d'un mètre de distance, ces détails deviennent invisibles. Ce procédé représente donc une excellente alternative aux coffrages en bois ou aux moules en silicone.



FIGURE 130 – Texture de surface en impression
béton

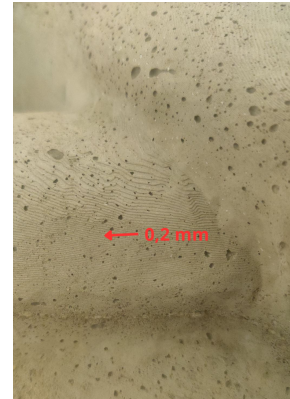


FIGURE 131 – Texture de surface en moule
polymère

La question des traces laissées par les cordons d'impression ou par les moules en polymère peut être soulevée. De la même manière qu'un coffrage en bois imprime son empreinte dans le béton qu'il contient, ces traces témoignent du processus de construction et de façonnage de l'ouvrage. Certains architectes, jouent volontairement avec ces empreintes de coffrage pour valoriser le travail de la matière et rendre visible le procédé de fabrication employé. Cyrille Simonnet évoque cette idée dans le dernier chapitre de son livre.

De la même façon, cette empreinte pourrait devenir un marqueur des éléments de restauration, qu'ils soient réalisés par impression béton directe ou par moulage à partir de coques imprimées en polymère. Pour éviter de produire du "faux vieux", il est essentiel qu'un élément restauré signale qu'une intervention a été réalisée. Le rendu des surfaces constitue alors un excellent moyen de distinguer les parties anciennes des parties rénovées. Cette marque peut ainsi indiquer qu'une opération de restauration a eu lieu sur le monument et révéler le procédé spécifique utilisé.

Dans le cas de l'impression béton, cette trace est d'autant plus marquée que les cordons déposés sont plus épais. La "patte" de la restauration devient alors davantage perceptible et participe à la lecture contemporaine du bâtiment. Même si une différence de texture aussi marquée peut se justifier dans certains cas, elle reste discutable lorsqu'une restitution plus fine ou une grande précision est requise, notamment pour des éléments comportant des ornements ou des détails tel que la main de la Dame Blanche. Dans ces situations, l'impression béton n'apparaît pas comme une méthode appropriée à utiliser, car elle ne permet pas d'atteindre la finesse nécessaire pour reproduire fidèlement ces détails. La création de moules par impression polymère offre, en revanche, des résultats bien adaptés.

- **Temps d'impression**

En termes de temps d'impression, la différence entre les procédés est considérable. L'impression béton ne nécessite que quelques minutes pour un élément de petite taille. Dans le cas de la colonne, une option aurait été de décaper toute sa surface, y compris les parties de béton encore en place, afin de réimprimer directement les 80 cm par 40 cm de surface. Cette opération n'aurait pas été particulièrement longue et l'intégralité de la forme aurait ainsi pu être réalisée en une vingtaine de minutes. De même, l'impression de la main, bien qu'il s'agisse d'un élément volumineux, n'a pris que 7 minutes au total.

À titre de comparaison, la réalisation d'éléments de moule en impression polymère nécessite

plusieurs jours d'impression. Par exemple, l'impression du moule pour cette même main, dont l'échelle avait pourtant été réduite de moitié afin de limiter la durée d'impression, a nécessité 1 jour et 19 heures. Ce temps reste cependant à relativiser, car la machine fonctionne de manière autonome et ne nécessite pas de surveillance constante, contrairement à une imprimante béton. Les imprimantes polymères peuvent également tourner de nuit, ce qui invite à s'interroger sur la façon de comptabiliser ce temps dans la charge de travail.

Par ailleurs, comme discuté dans ce travail, il existe des imprimantes de plus grand format, telles que la *Massivit 3000*, capables de réaliser des moules de très grande taille en seulement quelques heures.

- **Modélisation**

En ce qui concerne la modélisation, on retrouve la même première étape pour les deux procédés. Le traitement du maillage constitue l'étape la plus longue, car il est nécessaire de corriger les défauts et de garantir une précision suffisante pour les étapes suivantes. Vient ensuite la reconstitution de l'élément dégradé, qui, dans le cadre de ce travail, n'a été réalisée que pour la colonne. La difficulté de cette étape dépend directement de la complexité de l'objet à modéliser. Si le chapiteau avait comporté de nombreux motifs, courbes ou détails complexes, cette phase aurait nécessité davantage de temps et d'expérience en modélisation.

Pour ce travail, l'utilisation de Fusion 360 s'est révélée suffisante. Toutefois, si la reconstitution d'éléments ornementaux complexes avait été nécessaire, l'emploi complémentaire de Blender aurait été préférable.

L'opération booléenne effectuée entre l'élément existant et la pièce de réparation peut également se révéler délicate, en fonction de la géométrie de la surface de cassure. Enfin, l'impression polymère demande une étape supplémentaire : la conception de la coque destinée à mouler l'élément. Cette étape n'est pas particulièrement complexe en soi, mais elle exige une certaine puissance de calcul, surtout lorsque le maillage comporte un grand nombre de facettes. Un facteur limitant pouvant conduire à des erreurs de modélisation reste l'utilisation d'un ordinateur peu performant ou de logiciels inadaptés à la complexité des maillages.

- **Slicing**

La découpe des éléments dans le slicer constitue également un point important de ce travail, notamment en raison du post-traitement nécessaire pour les fichiers G-code destinés à l'impression béton. Dans le cadre de ce projet, l'impression de volumes pleins avec des formes complexes était requise. Aucun slicer disponible ne proposant nativement les fonctionnalités recherchées pour une impression continue de volumes pleins, la création d'un script Python spécifique s'est avérée nécessaire. Ce script a permis de générer des volumes imprimables, et ce de manière adaptable à n'importe quelle forme, résolvant ainsi le problème de gestion de la pompe qui n'était pas commandable.

Dans l'optique d'une application de cette méthode à des formes plus complexes ou à des éléments de plus grande taille, avec par exemple plusieurs périmètres distincts sur une même couche, l'utilisation d'une pompe pilotable et d'une imprimante montée sur un bras mécanique à 6 axes, plutôt que sur un portique à 3 axes, constituerait un réel avantage.

En ce qui concerne l'impression polymère, il est essentiel d'utiliser un slicer compatible avec les imprimantes disponibles, et que celui-ci permette la découpe des moules à imprimer. Cette opération nécessite également une étude préalable du démoulage de la pièce, particulièrement si sa géométrie est complexe, afin d'éviter d'endommager le moule lors du démoulage.

- **Complexité de mise en œuvre**

En ce qui concerne la complexité de mise en œuvre, l'impression béton nécessite une grande expertise, notamment pour l'utilisation de la machine. Avant même de gérer l'imprimante, la principale difficulté réside dans le réglage de la pompe, un point longuement discuté dans ce travail. Malheureusement, la pompe utilisée n'est pas pilotable automatiquement et son débit se règle manuellement via un potentiomètre indiquant une vitesse de rotation (en tours par minute). Comme elle ne maintient pas un débit parfaitement constant, obtenir des cordons homogènes devient complexe. Le réglage du débit doit être adapté au diamètre de la buse utilisée, et c'est généralement par essais et erreurs qu'on parvient à déterminer le bon débit à fournir à la pompe, en fonction du diamètre de la buse, de la vitesse d'impression et de la rhéologie du mélange. Tous ces paramètres rendent difficile la réussite d'une impression dès le premier essai.

Un autre aspect particulièrement contraignant du processus est le nettoyage de la pompe, du tuyau et de l'ensemble de la buse. Pour une impression de seulement quelques minutes, il faut compter environ une heure de nettoyage, nécessitant deux ou trois personnes. Le nombre de pièces à nettoyer étant très important, cette opération demande une grande rigueur, car tout résidu non nettoyé risque de durcir et, à terme, d'obstruer le système ou d'endommager le matériel.

Concernant les coques en polymère, le positionnement des goupilles et de la bande adhésive prend un certain temps mais ne présente pas de difficulté majeure. Comme évoqué dans la discussion du slicing, le moule est subdivisé en plusieurs éléments, ce qui permet de limiter la taille des pièces imprimées en polymère. Cette méthode est d'autant plus pertinente que l'impression de pièces volumineuses peut durer plusieurs jours. Or, des incidents peuvent survenir en cours d'impression, entraînant la perte de la pièce et du matériau utilisé. En optant pour de plus petites pièces, on limite les durées d'impression et donc les risques de décollement ou de problèmes matériels (hardware).

- **Post-traitement**

En ce qui concerne le post-traitement des éléments, seul l'élément moulé en nécessite un, à savoir le retrait du moule. Dans le cas du coin de chapiteau, étant une forme simple, le démoulage s'est effectué sans difficulté et le moule a pu être récupéré en bon état. En revanche, pour la main, cette opération s'est révélée plus complexe. Le moule n'ayant pas été suffisamment subdivisé, sa partie supérieure n'a pu être retirée sans être endommagée.

- **Porte-à-faux & Formes complexes**

Pour ce qui est des formes complexes incluant des porte-à-faux, le recours à un moule réalisé par impression polymère permet de contourner cette contrainte liée à la matière déposée dans le vide. Lors de l'impression de la coque en polymère elle-même, les slicers génèrent automatiquement des supports adaptés, permettant ainsi de réaliser quasiment n'importe quelle forme, même complexe. Le fait de placer la coque dans une boîte remplie de sable permet de reprendre les efforts que le mortier pourrait exercer sur les parties en porte-à-faux.

En revanche, pour les éléments imprimés directement à l'aide de l'imprimante béton, cela s'avère nettement plus délicat. Lors des tests réalisés avec de l'argile, dès qu'une couche n'était pas soutenue sur au moins les deux tiers de sa surface inférieure par la couche précédente, un affaissement du cordon se produisait. Pour l'impression béton, ce problème peut être limité de deux manières : soit en incorporant un accélérateur de prise à la sortie de buse via le mélangeur

intégré, soit en imprimant la pièce dans un caisson rempli de matériaux de support, comme des billes de verre.

- **Itérations & Adaptabilité**

L'impression préalable des éléments en argile, avant leur réalisation en béton, offre l'avantage de permettre plusieurs itérations. Comme observé pour la main de la Dame blanche, quatre tests successifs ont pu être réalisés lors de la même session d'impression. Cela est également possible grâce à l'adaptabilité du G-code : il est facile de modifier certains paramètres, comme la vitesse de déplacement, directement dans le fichier, sans avoir à le recréer entièrement. Cela permet d'itérer sans devoir relancer une impression complète pour chaque essai. Néanmoins, ce type de réglage itératif rapide est moins pertinent pour l'impression avec du mortier de ciment, en raison de son temps de prise (30 à 60 minutes selon le cas), qui ne permet pas de réutiliser le même mélange de matière pour plusieurs essais.

Comme évoqué dans ce travail, les moules subdivisés peuvent être récupérés et réutilisés pour reproduire l'élément autant de fois que nécessaire. Le fait d'avoir imprimé le moule en plusieurs parties permet également de réimprimer rapidement une section endommagée lors du démoulage. Si une pièce fissure, il suffit de l'isoler dans le fichier de découpe via PrusaSlicer, puis de réimprimer uniquement cette partie. Cela offre donc la possibilité de conserver et de réutiliser le moule pour plusieurs réalisations.

Les deux méthodes évaluées présentent donc chacune leurs points forts et leurs limites, en fonction du résultat recherché. L'impression de coques en polymère destinées à être remplies de mortier, apparaît comme la méthode la plus attrayante dans le cadre de la restauration du patrimoine, notamment pour la qualité de surface qu'elle permet d'obtenir. C'est d'ailleurs ce critère esthétique qui demeure le plus perceptible à l'issue du procédé.

Néanmoins, si l'impression béton directe est maîtrisée par des techniciens expérimentés et réalisée avec un équipement plus avancé que celui utilisé dans ce travail (par exemple, un bras robotisé à 6 axes, une pompe à débit contrôlé, un système d'ajout d'accélérateur, et l'utilisation de matériaux de support granulaires), et si l'élément à produire est de très grandes dimensions rendant la fabrication d'un moule irréalisable ou complexe, alors cette solution peut devenir pertinente. À condition également que le niveau de détail exigé soit compatible avec la résolution intrinsèque de l'impression béton. L'impression béton permettrait ainsi d'atteindre une précision acceptable en un temps record pour de tels éléments.

Dans le recensement restreint des bâtiments et sculptures réalisés pour ce travail, aucune dégradation d'une ampleur suffisante pour justifier la reconstitution d'un élément monolithique en béton n'a été relevée. Si ce recensement avait été mené à une échelle plus vaste, en intégrant des édifices de plus grande ampleur, certains cas de dégradation nécessitant des éléments de grandes dimensions auraient sans doute pu être trouvés.

Un point important à souligner concernant les éléments en béton armé est que l'épaisseur de la couche d'enrobage (la surface de béton protégeant les armatures) est souvent comprise entre 5 et 10 cm. C'est fréquemment cette couche de surface qui se dégrade. La réparation d'éléments de cette épaisseur (5-10 cm) par impression béton directe peut être envisagée, bien que cette technique soit souvent associée à des volumes plus importants. Dans le cas de la colonne étudiée, il aurait été envisageable de refaire l'intégralité de la surface extérieure en retirant le béton existant, celui-ci étant lui aussi à un stade avancé de carbonatation. Bien que cette opération puisse paraître longue, elle ne nécessiterait pas un temps d'impression si important et simplifierait la modélisation, puisqu'il

suffirait de réaliser une nouvelle couche de surface uniforme. Par ailleurs, produire un élément plus conséquent tend à améliorer la qualité finale de la pièce imprimée en béton.

Un autre aspect relevé lors de l'étape du slicing et de l'analyse du détail de surface est que le slicer indiquait déjà, via la vue en couches, que certains détails ne ressortiraient pas correctement. Dans le cas de la main de la Dame Blanche, par exemple, la forme des doigts restait à peine perceptible. La possibilité d'ajuster les hauteurs et largeurs de couche dans le slicer et de visualiser un aperçu permet de mieux anticiper le rendu final. Cela offre également la possibilité de visualiser le résultat que l'on obtiendrait avec des buses plus petites, comme celles de 10 mm qui avaient été modélisées, afin de gagner en précision. Toutefois, pour que cela soit possible, le système d'alimentation du mélange devrait être modifié afin de permettre un débit plus faible, adapté à ce diamètre de buse.

7 Conclusions et perspectives

Ce travail de fin d'études s'est penché sur le potentiel de l'impression 3D, tant béton que polymère, pour la restauration du patrimoine architectural en béton du XX^e siècle. L'objectif principal était d'évaluer si ces technologies pouvaient offrir des solutions viables et pertinentes face aux défis posés par la réparation d'éléments dégradés, souvent complexes et ornementés.

Synthèse des résultats et réponses aux questions de recherche

L'expérimentation menée, combinant numérisation 3D, modélisation et fabrication additive, a permis de répondre aux questions initiales.

Concernant la *capacité de l'impression 3D à faciliter la reproduction d'éléments architecturaux complexes*, les résultats sont nuancés. **L'impression 3D polymère pour la création de moules** s'est révélée particulièrement efficace. Elle permet d'obtenir une excellente qualité de surface, reproduisant fidèlement les détails des scans initiaux. La possibilité de segmenter le moule facilite la gestion du démoulage et la réutilisation de celui-ci. Cette méthode est donc bien adaptée à la reproduction d'ornements et d'éléments où la fidélité esthétique est importante. **L'impression 3D béton**, bien que rapide en termes de temps de fabrication de la pièce elle-même, présente des limites importantes pour ce qui est du détail de surface. La taille des cordons (environ 20 mm de hauteur dans cette étude) ne permet pas de restituer les détails précis. De plus, la gestion des porte-à-faux sans support se montre problématique, conduisant à des affaissements. Si cette technique peut être envisagée pour des éléments massifs et moins détaillés, elle n'est pas, dans sa configuration actuelle, adaptée à la reproduction fidèle d'éléments complexes.

Quant à *l'intégration esthétique de l'impression 3D béton aux bétons historiques*, plusieurs constats émergent. **Sur le plan esthétique**, la texture laissée par les cordons de l'impression béton est très marquée. Si cela peut être vu comme un signe de l'intervention contemporaine, conformément à certains principes de restauration (lisibilité de l'intervention), cette texture risque de trop contraster avec l'aspect d'origine. En revanche, les éléments moulés à partir de coques polymères présentent une texture de surface plus discrète, potentiellement plus en adéquation avec une recherche de continuité esthétique.

Difficultés rencontrées

- **Impression 3D béton** : La principale difficulté a résidé dans la gestion de la pompe à béton à débit non commandable. La nécessité d'un flux continu a imposé la création du script Python de post-traitement du G-code. L'optimisation des paramètres d'impression (vitesse, débit de la pompe) a nécessité de nombreux essais itératifs, initialement avec de l'argile pour limiter les coûts et faciliter la réutilisation. Le nettoyage de l'équipement s'est également avéré très contraignant.
- **Fiabilisation de l'équipement d'impression béton** : Des problèmes mécaniques sont survenus au niveau de la buse d'impression, notamment au niveau du mélangeur et de son joint d'étanchéité. Ces défauts ont nécessité des interventions de diagnostic, de démontage, et la conception ainsi que la création de pièces d'amélioration (détaillées en Annexe 9.2), dont certaines ont été réalisées par impression 3D polymère au Fab52, pour améliorer le fonctionnement de l'imprimante.
- **Impression 3D polymère** : Le démoulage de la main s'est avéré complexe, soulignant l'importance d'une conception soignée des plans de découpe. Le temps d'impression des moules, même pour des pièces à échelle réduite, a été relativement conséquent.

Apports du travail

Les apports de ce travail à l’exploration de l’impression 3D pour la restauration du patrimoine en béton sont notamment :

- **L’évaluation comparative des technologies de numérisation 3D** (photogrammétrie, LiDAR et scanner laser) pour la capture de géométries complexes d’éléments patrimoniaux, en termes de précision et de facilité de mise en œuvre.
- **La comparaison expérimentale de deux approches de fabrication additive : l’impression 3D directe en béton et le moulage de mortier dans des coques imprimées en polymère.** Ces approches ont été analysées sur des cas d’étude concrets (main de statue et chapiteau de colonne) pour évaluer leur pertinence en fonction des objectifs de restauration (fidélité, complexité, coût, temps).
- La mise au point d’un processus de **modélisation 3D de moules** adaptés à la restauration, incluant le traitement des données numérisées, la reconstruction des parties manquantes (pour le chapiteau) et la conception de moules en polymère pour les éléments étudiés (main et chapiteau).
- Le **développement de solutions techniques** spécifiques pour pallier les contraintes matérielles et optimiser l’équipement expérimental, comprenant :
 - La **conception et la fabrication de nouvelles buses** de différents diamètres (10, 15 et 20 mm) pour l’imprimante 3D béton.
 - Un script Python pour le post-traitement du G-code, assurant la **continuité de l’impression béton avec une pompe non pilotable.**
 - Des **améliorations apportées au système de mélangeur** de l’imprimante 3D béton, notamment au niveau de la pièce d’accouplement et du joint d’étanchéité.

Perspectives futures

Plusieurs pistes de recherche et de développement peuvent être envisagées :

- **Amélioration des matériaux et des équipements d’impression béton :** Des recherches sur des bétons imprimables plus fins, avec des granulométries réduites, couplées à des buses de plus petit diamètre et des systèmes de pompage plus précis et pilotables, pourraient améliorer significativement la résolution et la qualité de surface des pièces imprimées directement. L’intégration d’accélérateurs de prise pourrait mieux gérer les porte-à-faux.
- **Normalisation et durabilité :** Des études approfondies sur la durabilité à long terme des éléments restaurés par impression 3D (béton ou moulage) sont nécessaires, ainsi que l’établissement de normes et de protocoles spécifiques pour ces techniques dans le domaine patrimonial.
- **Aspects éthiques :** Poursuivre la réflexion sur la place de ces nouvelles technologies au regard des chartes et des doctrines de restauration, notamment concernant la lisibilité, la réversibilité et l’authenticité des interventions.

En conclusion, si l’impression 3D béton à grande échelle pour la restauration d’éléments finement détaillés du patrimoine semble encore limitée par les technologies actuelles, l’utilisation de l’impression 3D polymère pour la fabrication de moules sur mesure se présente comme une voie très prometteuse. Elle combine la précision de la fabrication numérique avec la robustesse du béton traditionnel, offrant une solution flexible et potentiellement économique pour la sauvegarde et la mise en valeur de notre héritage architectural en béton. La poursuite des recherches et des expérimentations sera cruciale pour lever les verrous technologiques restants et intégrer pleinement ces outils innovants dans la pratique de la restauration.

8 Bibliographie

- Abbas, S. F., & Abed, F. M. (2024). Revolutionizing depth sensing : A review study of Apple LiDAR sensor for as-built scanning applications. *Journal of Engineering*, 30(4).
<https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.04.11>
- Agócs, C., Hanon, M. M., & Zsidai, L. (2024). A comprehensive review of Fused Deposition Modeling (FDM) method using PLA, ABS, and PET-G polymers. *Gradus*, 11(1).
<https://doi.org/10.47833/2024.1.eng.007>
- Al-Raqeb, H., & Ghaffar, S. H. (2024). 3D Concrete Printing in Kuwait : Stakeholder Insights for Sustainable Waste Management Solutions. *Sustainability*, 17(1), 200.
<https://doi.org/10.3390/su17010200>
- Baigarina, A., E. Shehab et M.H. Ali (2023). “Construction 3D printing : a critical review and future research directions”. In : *Progress in additive manufacturing Volume 8*. doi : 10.1007/s40964-023-00409-8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-023-00409-8>
- Batikha, M., Jotangia, R., Baaj, M., and Mousleh, I. (2022). 3D concrete printing for sustainable and economical construction : A comparative study. *Automation in Construction*, 134(104087).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521005380via%3Dihub>
- Bayram, A. K. Ş., & Akyıldız, E. C. (2024). Clay 3D printing : Exploring the interrelations of materials and techniques. *Journal Of Design For Resilience In Architecture And Planning*, 5(3), 314-326.
<https://doi.org/10.47818/drarch.2024.v5i3134>
- Bekkering, J., Kuit, B., Biffi, A., and Ahmed, Z. (2020). Architectonic Explorations of the Possibilities of 3D Concrete Printing : The Historic Building Fragment as Inspiration for New Applications with 3D Concrete Printing in Architecture. *RILEM Bookseries*, 28 :1078–1090.
<https://www.researchgate.net/publication/342755172>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction : potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual And Physical Prototyping*, 11(3), 209-225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- CIB. (2010). Guide for the structural rehabilitation of heritage buildings (CIB Commission W023). CIB. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18446.pdf>
- ICOMOS. (1965). Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites (Charte de Venise, 1964). Conseil international des monuments et des sites.
<https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2025/03/VeniceCharterFR.pdf>

- Courard, L., Gillard, A., Darimont, A., Bleus, J., & Paquet, P. (2012). Pathologies of concrete in Saint-Vincent Neo-Byzantine Church and Pauchot reinforced artificial stone. *Construction And Building Materials*, 34, 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.070>
- Gillard, A., Courard, L., & Paquet, P. (2011). Churches and Concrete in Liège District : History, Architecture and Pathologies. *Restoration Of Buildings And Monuments*, 17(1), 3-14. <https://doi.org/10.1515/rbm-2011-6421>
- Hamidi, F., & Aslani, F. (2019). Additive manufacturing of cementitious composites : Materials, methods, potentials, and challenges. *Construction And Building Materials*, 218, 582-609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.140>
- Jesus, M., Guimarães, A. S., Rangel, B., & Alves, J. L. (2023). The potential of 3D printing in building pathology : rehabilitation of cultural heritage. *International Journal Of Building Pathology And Adaptation*, 41(3), 647-674. <https://doi.org/10.1108/ijbpa-03-2022-0053>
- Kamhawi, A., & Meibodi, M. A. (2024). Techniques and strategies in extrusion based 3D concrete printing of complex components to prevent premature failure. *Automation In Construction*, 168, 105768. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105768>
- Kampker, A., Triebs, J., Kawollek, S., Ayvaz, P., & Hohenstein, S. (2019). Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP*, 81, 815-819. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205>
- Khoshnevis, B. (2003). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation In Construction*, 13(1), 5-19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials And Structures*, 45(8), 1221-1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Licordari, M. (2015). Reinforced concrete in the concept of heritage to be preserved. *e-Phaïstos*, IV(2), 72-82. Mis en ligne le 29 novembre 2016. Consulté le 29 mars 2025. <https://doi.org/10.4000/ephaistos.792>
- Licordari, M. (2015). Reinforced concrete in the concept of heritage to be preserved. *e-Phaïstos*, IV(2), 72-82. <https://doi.org/10.4000/ephaistos.792>

- Lim, S., Buswell, R., Le, T., Austin, S., Gibb, A., & Thorpe, T. (2011). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation In Construction*, 21, 262-268.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- Ma, G. W., Wang, L., & Ju, Y. (2018). State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61(4), 475–495. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>
- Mehta, P., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete : Microstructure, Properties, and Materials : Microstructure, Properties, and Materials*. Fourth Edition. McGraw Hill Professional.
- Paquet, P. (2023-2024). *Conservation et restauration du patrimoine culturel immobilier : Module #1 [Diaporama de cours]*. Université de Liège.
- Panda, B., Tay, Y., Paul, S., and Tan, M. (2018). Current challenges and future potential of 3D concrete printing. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 49(5) :666–673.
<https://www.wiley-vch.de/home/muw>
- Prasad, C. V. S. R. (2022). 3D concrete printing technology current progress and future perspective : A state-of-the-art review. In P. G. Kumar et al. (Eds.), *Recent Advances in Civil Engineering (Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 233)*. Springer Nature Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-0189-8_3
- Rollakanti, C. R., Prasad, C. V. S. R., & Joe, A. (2022). Digital concrete for sustainable construction industry : A state-of-the-art review. In P. G. Kumar et al. (Eds.), *Recent advances in civil engineering (Vol. 233, pp. 183–198)*. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-0189-8_16
- Service Public de Wallonie – Direction de l’Aménagement du Territoire (SPW). (n.d.). *IPIC – Inventaire du Patrimoine Immobilier Culturel*. Service Public de Wallonie. Consulté le 14 mars 2025.
https://lampspw.wallonie.be/dgo4/site_ipic
- Sesetti, H., Lalithya, M. V., & Kumar, P. G. (2022). 3D Concrete Printing in Construction Industry—A State of the Art. Dans *Lecture notes in civil engineering* (p. 385-396).
https://doi.org/10.1007/978-981-19-0189-8_32
- Simonnet, C. (2005). *Le béton : Histoire d’un matériau*. Parenthèses Editions.
- Skladan, M., Chudá, J., Singh, A., Masný, M., Lieskovský, M., Pástor, M., Mokroš, M., & Vyboštok, J. (2024). Choosing the Right Close-range Technology for Measuring DBH in Fast-Growing trees Plantations. *Trees Forests And People*, 100747.
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100747>
- Tiry-Ono, C., Bertrand, I., & Masse, S. (2023). Valeurs patrimoniales de l’architecture du xxe siècle : quelle reconnaissance ? État des lieux critique et prospective internationale. In *Situ*, 49.

<https://doi.org/10.4000/insitu.37245>

- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., & Flatt, R. (2016). Digital Concrete : Opportunities and Challenges. RILEM Technical Letters, 1, 67-75. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>
- Weigert, A., Dhanda, A., Cano, J., Bayod, C., Fai, S., & Quintero, M. S. (2019). A REVIEW OF RECORDING TECHNOLOGIES FOR DIGITAL FABRICATION IN HERITAGE CONSERVATION. The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences/International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences, XLII-2/W9, 773-778. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w9-773-2019>
- Xu, J., Ding, L., & Love, P. E. (2017). Digital reproduction of historical building ornamental components : From 3D scanning to 3D printing. Automation In Construction, 76, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.010>
- Yeon, J., Kang, J., & Yan, W. (2018). Spall damage repair using 3D printing technology. Automation In Construction, 89, 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.003>

9 Annexes

9.1 Script Python de post-traitement de G-Code pour l'impression 3D béton continué

Voici le script python utilisé pour le post-traitement de G-Code, il est aussi posté sur Github : <https://github.com/theco10/3D-Concrete-Continuous-Printing>

```
1  import argparse
2
3  class GCodeSection:
4      def __init__(self, label=None, layer=None, perimeter=None, debug=False):
5          self.lines = []
6          self.debug = debug
7          self.label = label
8          self.layer = layer
9          self.perimeter = perimeter
10
11     def append(self, line):
12         if self.debug:
13             debug_info = []
14             if self.layer is not None:
15                 debug_info.append(f"Layer {self.layer}")
16             if self.perimeter is not None:
17                 debug_info.append(f"Perimeter {self.perimeter}")
18             if self.label:
19                 debug_info.append(self.label)
20             line = f"{line} ; {' | '.join(debug_info)}"
21         self.lines.append(line)
22
23     def __iter__(self):
24         return iter(self.lines)
25
26 class Perimeter:
27     def __init__(self, layer_number, index, debug=False):
28         self.move = GCodeSection("Move", layer_number, index, debug)
29         self.prints = GCodeSection("Print", layer_number, index, debug)
30
31 class Layer:
32     def __init__(self, number, debug=False):
33         self.number = number
34         self.header = GCodeSection("Header", number, None, debug)
35         self.move = GCodeSection("Move", number, None, debug)
36         self.perimeters = []
37
38 class GCodeParser:
39     def __init__(self, debug=False):
40         self.debug = debug
41         self.initial = GCodeSection("Initial", debug=debug)
42         self.final = GCodeSection("Final", debug=debug)
43         self.layers = []
44
45
46
47     def parse(self, lines):
48         current_layer = None
49         current_perimeter = None
50         mode = "initial"
```

```

51     g92_e0_seen = 0
52     after_g92_e0 = False
53
54     for i, line in enumerate(lines):
55         stripped = line.strip()
56
57         if stripped.startswith(";LAYER_CHANGE"):
58             if current_layer:
59                 if current_perimeter:
60                     current_layer.perimeters.append(current_perimeter)
61                     current_perimeter = None
62                 self.layers.append(current_layer)
63             current_layer = Layer(len(self.layers), self.debug)
64             current_layer.header.append(stripped)
65             g92_e0_seen = 0
66             after_g92_e0 = False
67             mode = "layer"
68             continue
69
70         if mode == "initial":
71             self.initial.append(stripped)
72             continue
73
74         if stripped.startswith("G92 E0"):
75             after_g92_e0 = True
76             if mode == "layer":
77                 g92_e0_seen += 1
78                 current_layer.move.append(stripped)
79                 if (current_layer.number == 0 and g92_e0_seen == 2) or \
80                     (current_layer.number > 0 and g92_e0_seen == 1):
81                     current_perimeter = Perimeter(current_layer.number, len(current_layer.perimeters), self.debug)
82                     mode = "perimeter"
83             elif mode == "perimeter":
84                 if current_perimeter:
85                     current_layer.perimeters.append(current_perimeter)
86                     current_perimeter = Perimeter(current_layer.number, len(current_layer.perimeters), self.debug)
87                     current_perimeter.move.append(stripped)
88                 continue
89
90         if after_g92_e0 and stripped.startswith("G1 Z"):
91             current_layer.move.append(stripped)
92             after_g92_e0 = False
93             continue
94         else:
95             after_g92_e0 = False
96
97         if mode == "layer":
98             current_layer.move.append(stripped)
99             continue
100
101         if mode == "perimeter":
102             if stripped.startswith(";TYPE:Custom"):
103                 if current_perimeter:
104                     current_layer.perimeters.append(current_perimeter)
105                     current_perimeter = None
106                 self.layers.append(current_layer)
107                 current_layer = None
108                 mode = "final"
109

```

```

110         self.final.append(stripped)
111         for remaining in lines[i+1:]:
112             self.final.append(remaining.strip())
113         break
114     elif current_perimeter and not current_perimeter.prints.lines and not stripped.startswith("G1 F"):
115         current_perimeter.move.append(stripped)
116     elif current_perimeter:
117         current_perimeter.prints.append(stripped)
118
119     if mode != "final" and current_layer:
120         if current_perimeter:
121             current_layer.perimeters.append(current_perimeter)
122         self.layers.append(current_layer)
123
124     def render(self, output_path):
125         with open(output_path, "w") as out:
126             for line in self.initial:
127                 out.write(line + "\n")
128             for layer in self.layers:
129                 for line in layer.header:
130                     out.write(line + "\n")
131                 for line in layer.move:
132                     out.write(line + "\n")
133
134                 # Reverse perimeters only for even-numbered layers (1, 3, 5, ...)
135                 perimeters = (
136                     list(reversed(layer.perimeters))
137                     if layer.number % 2 == 1
138                     else layer.perimeters
139                 )
140
141                 for perimeter in perimeters:
142                     for line in perimeter.move:
143                         out.write(line + "\n")
144                     for line in perimeter.prints:
145                         out.write(line + "\n")
146
147             for line in self.final:
148                 out.write(line + "\n")
149
150
151     def main():
152         parser = argparse.ArgumentParser(description="Parse and rewrite G-code with optional debug comments.")
153         parser.add_argument("input", help="Path to the input G-code file.")
154         parser.add_argument("output", help="Path to the output G-code file.")
155         parser.add_argument('--debug', action='store_true', help='Append debug comments to G-code lines.')
156         args = parser.parse_args()
157
158         gcode_parser = GCodeParser(debug=args.debug)
159         with open(args.input, "r") as f:
160             lines = f.readlines()
161         gcode_parser.parse(lines)
162         gcode_parser.render(args.output)
163
164     if __name__ == "__main__":
165         main()

```

9.2 Problèmes survenus durant l'utilisation de l'imprimante

Cette section présente deux problèmes survenus durant l'utilisation de l'imprimante béton du laboratoire de l'ULiège. Ce qui suit présente une description de ces problèmes ainsi qu'un avis personnel sur les solutions possibles. Par la suite, un design de pièces prototypes pourrait être modélisé afin d'améliorer l'imprimante.

Problème de placement du joint d'arbre au niveau de l'axe du mélangeur :

Premièrement, lors de l'installation de la machine, le joint d'arbre, à double lèvres (Figure 132), situé au niveau de la pièce de séparation entre le haut de la buse et le moteur du mélangeur avait été monté à l'envers (Figure 133). Il a donc été repositionné dans le bon sens, tel qu'indiqué sur la Figure 134.



FIGURE 132 – Joint à double lèvre

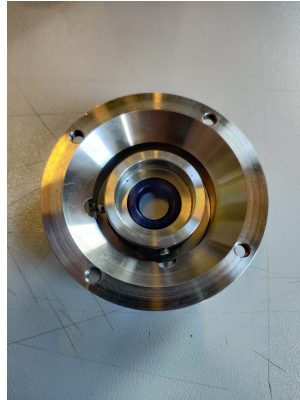


FIGURE 133 – Joint mal placé

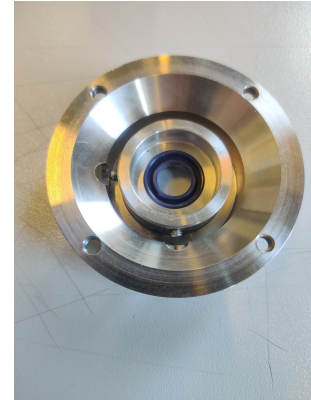


FIGURE 134 – Joint dans le bon sens

Les lèvres du joint doivent s'écarter sous l'effet de la pression du fluide. La lèvre intérieure du joint doit ainsi assurer un contact avec l'axe pour garantir l'étanchéité (flèches vertes de la Figure 135) et avec la pièce de séparation pour la lèvre extérieure (flèches rouges de la Figure 135). En cas de mauvais montage, la matière peut s'infiltrer de part et d'autre du joint, compromettant ainsi l'étanchéité (Figure 136). L'incident est survenu lors du premier test d'impression, et la pièce n'a pas été correctement nettoyée par la suite.

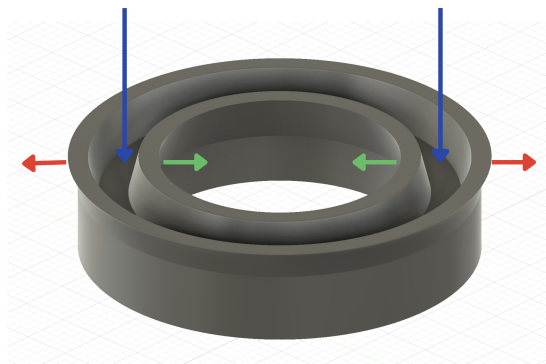


FIGURE 135 – Écoulement avec le joint correctement mis

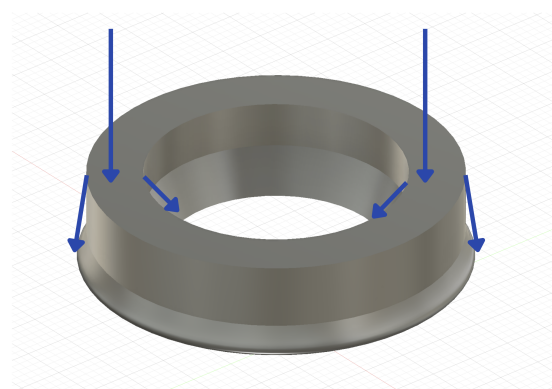


FIGURE 136 – Écoulement avec le joint mal placé

De la matière s'est alors placée entre le joint et le roulement, ce dernier ayant pour fonction de maintenir l'axe du mélangeur dans la bonne position et de reprendre les contraintes de flexion. Ce roulement s'est petit à petit corrodé suite au contact prolongé avec le mix chargé en eau (Figure

137). Le roulement a fini par ne plus tourner du tout, entraînant le blocage du moteur du mélangeur. Plusieurs tests ont été nécessaires avant de constater que le défaut était d'origine mécanique et non lié au G-code.



FIGURE 137 – Roulement rouillé

Il a donc été nécessaire de remplacer le roulement et de remettre le joint dans le bon sens, ce qui a impliqué le démontage de la pièce moteur du mélangeur. Une fois celle-ci remontée, le problème avait disparu. Pour les futurs utilisateurs de la machine, je conseillerais de faire une vérification régulière de cette pièce et de l'état du joint. Cet élément étant en contact avec le mix, il pourrait constituer une source de corrosion pour les pièces mobiles, telles que le roulement.

Une solution serait de venir usiner la pièce de séparation, visible sur la Figure 138, de façon à ce que le joint vienne buter sur cette pièce et non sur le roulement. Le joint serait alors en contact direct avec l'axe pour la lèvre intérieure et avec le renforcement de la pièce pour la lèvre extérieure.

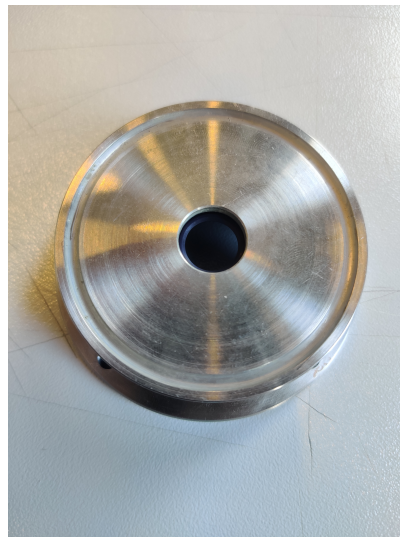


FIGURE 138 – Pièce de séparation

Problème de jeu au niveau de l'axe du mélangeur :

Un second problème est que l'axe du mélangeur est usiné trop finement pour venir être correctement fixé par la pièce d'accouplement du moteur (Figure 139). Ce jeu n'est que de 3 dixièmes de millimètre mais cela suffit pour engendrer un mouvement de l'axe lors de l'impression. De plus, l'axe n'étant pas solidaire avec la pièce d'accroche, celui-ci se détache durant l'impression et ne tourne plus. De surcroît, en se détachant et en tombant dans la buse, l'axe vient laisser un vide dans la partie supérieure de celle-ci, ce qui laisse la matière s'échapper par le haut de cette dernière durant l'impression.



FIGURE 139 – Pièce d'accouplement en aluminium

Dans un premier temps, j'ai inséré une lame d'aluminium flexible afin de réduire ce jeu (Figure 140). La pièce d'accouplement étant usinée en aluminium, un couple trop important ne devrait pas être exercé sur la vis de serrage, au risque d'endommager le pas de vis. Cette première méthode n'a pas fonctionné. L'axe n'était pas assez serré par la pièce d'accouplement, malgré l'ajout de la lamelle d'aluminium. L'axe du mélangeur continuait à tourner sot au sein de la buse, ne mélangeant pas le mix pour le rendre homogène en sortie de buse.



FIGURE 140 – Lamelle en aluminium

Une seconde solution a donc été mise en place pour régler ce problème. Dans ce second cas, la pièce d'accouplement a été usinée afin d'y ajouter deux emplacements destinés à accueillir des vis pointeau (Figure 142). Deux pas de vis ont donc été usinés dans la partie pleine de la pièce d'accouplement, à des cotes permettant à une vis pointeau de venir en appui sur l'axe, à 8 mm au-dessus du bord de la pièce et à la seconde vis pointeau de venir en appui du l'arbre moteur. On vient marqué l'axe par un léger creux, permettant à la vis pointeau de le caler en rotation et d'éviter qu'il ne se déloge de son emplacement (Figure 141).



FIGURE 141 – Vis pointeau et axe modifié



FIGURE 142 – Nouvel usinage de la pièce d'accouplement

Modélisation et usinage de nouvelles pièces

La pièce de séparation pourrait être usinée de manière à permettre au joint de venir en butée sur celle-ci, et non plus directement sur le roulement. Le joint serait davantage du côté du fluide, ce qui constituerait un avantage supplémentaire dans le design de la pièce.

Une nouvelle pièce d'accouplement pourrait aussi être usinée. Premièrement, en changeant la matière pour qu'elle ne soit plus en aluminium mais en acier inoxydable. Cela permettrait d'appliquer un couple plus important sur les vis de serrage. En modifiant l'usinage de cette pièce, le jeu entre l'axe et l'intérieur de celle-ci pourrait être réduit à un dixième de millimètre, ce qui constituerait un ajustement plus précis, facilement compensable par le serrage de la vis de serrage. L'axe serait alors solidaire de la pièce d'accouplement.

L'axe du moteur pourrait aussi être usiné de manière à avoir un plat tout comme l'arbre moteur. Ce plat permet à la pièce de ne pas tourner si la pièce d'accouplement est usinée en conséquence.

Toutes ces modifications constitueraient des améliorations potentielles de l'imprimante, réalisables soit au Fab52, soit par l'intermédiaire d'un fournisseur spécialisé dans l'usinage de pièces sur mesure.