

ENSAPLV 2021



Séminaire Activités et
Instrumentation de la conception

Sous la direction de F. GUENA / J. SILVESTRE / A. TUSCHER



RE - IMPRIMER LE MONDE

L'IMPRESSION 3D, VECTRICE D'UNE EFFICIENCE DURABLE ?

Mémoire par Franck Lopes

Remerciements

.....

Je souhaite remercier avant tout mes professeurs Anne Tüscher, François Guéna et Joaquim Silvestre pour leurs enseignements et leurs conseils tout au long du semestre. Je remercie également mes parents et ma soeur de m'avoir soutenu et encouragé dans mon parcours et durant ce travail.

Résumé

.....

La demande grandissante, en construction, de matériaux et la raréfaction de certains d'entre eux pose la question de la pérennité du secteur. L'impression 3D qui se démocratise de plus en plus tend à offrir des perspectives intéressantes dans l'architecture. Mais à l'heure actuelle, seul un nombre restreint de projets font état d'une réflexion sur l'usage de matériaux locaux. Afin d'être plus durable, le secteur de la construction doit donc trouver des manières de développer une **efficience** des procédés et de revaloriser les matériaux à sa porté. L'objectif de ce mémoire est donc d'évaluer la possibilité d'impression 3D de matériaux recyclables et à disposition environnementale dans l'optique de soutenir l'architecture de demain. Pour répondre à ce questionnement, des expérimentations ont été réalisées afin de mettre en lumière les potentialités et contraintes de l'utilisation de certains matériaux recyclables. A partir de ces conclusions, des recherches ultérieures permettront certainement d'envisager et de tester d'autres procédés ou matériaux recyclables capables d'être imprimés en 3D à grande échelle.

Mots-clés

.....

Impression 3D • Efficience • Construction • Environnement • Recyclage

Sommaire

_Problématique.....	p.5
_Hypothèses.....	p.6
_Méthodologie.....	p.7
_Annonce du plan.....	p.7
_Plan détaillé.....	p.8
_Introduction : Les enjeux de l'impression 3D	p.10
I _ Adaptabilité : L'appropriation des connaissances.....	p.12
II _ Durabilité : Un nouveau modèle pour une nouvelle ère.....	p.24
III _ Expérimentation : Concevoir avec le local.....	p.39
_Conclusion : Vers une nouvelle architecture.....	p.61
_Bibliographie.....	p.63
_Glossaire.....	p.65

Problématiques

La croissance démographique des hommes engendre d'énormes besoins en logements ainsi qu'en infrastructures abordables. Or, contrairement à d'autres domaines industriels, celui de la construction n'a pas connu d'essor considérable de la productivité au cours de ces dernières décennies.

Cependant, la consommation mondiale de béton bondit, principalement en raison de la demande dans les pays émergents. De nos jours, le béton reste le matériau le plus utilisé dans le monde. La consommation totale de béton représente ainsi plus du double du total des autres matériaux de construction tels que le bois ou l'acier. Tout cela rend le secteur de la construction responsable d'environ 30% des émissions mondiales annuelles de dioxyde de carbone.

A plus ou moins long terme, nous nous dirigeons inexorablement vers une réduction accrue des ressources naturelles disponibles sur notre planète. Il apparaît donc logique de trouver un certain équilibre entre nos besoins économiques et notre impact sur l'écosystème. Car les crises énergétiques, écologiques, et démographiques bouleversent notre rapport au monde ce qui sous entend une profonde mutation des champs de la conception et de la construction qu'il convient de reconsidérer en vue d'une nouvelle économie du vivant.

En cela, le recyclage peut-il permettre, dans l'optique de reconsidérer le déchet comme ressource, d'avoir une réelle incidence sur notre environnement ?

De même, l'utilisation de l'impression 3D, peut-elle soutenir l'architecture de demain en répondant à des enjeux de revalorisation de matériaux locaux ?

Hypothèses

Afin d'aborder ces problématiques, on peut alors considérer trois bras de leviers d'action. Le premier concerne celui des matériaux, afin de réduire l'impact environnemental de leur fabrication, le deuxième est celui des éléments de construction dans le but de construire de façon plus performante en consommant moins de matériaux, le troisième est l'écosystème c'est-à-dire l'interaction avec l'environnement.

En effet, si le béton est si largement choisi comme matériau de construction, cela est lié à ses nombreux avantages notamment son coût relativement faible, sa bonne durabilité et sa polyvalence. Il est également lié à des systèmes de construction efficaces qui garantissent avant tout des exigences de productivité.

Partant du principe que des éléments de construction peuvent être conçus pour réduire leur consommation globale grâce à la géométrie, l'impression 3D trouve sa place dans la création de structures légères à géométrie complexe. Ces réalisations plus difficilement concevables avec des méthodes de fabrication traditionnelles, deviennent accessibles par ce biais tout en minimisant le coût.

Cependant, allier productivité et impact environnemental sont loin d'être une préoccupation majeure dans le cadre d'un projet de construction. Ainsi, c'est tout l'écosystème de la construction qui doit prendre en compte le contexte avec ses variantes incluant la disponibilité des ressources, leur transport, les méthodes utilisées, leur durée de vie, leur recyclage et leur réutilisation. L'enjeu est de parvenir à un avenir durable de l'architecture.

Le lien entre le concepteur et ses ressources locales serait alors primordial dans la recherche d'une production architecturale capable de fabriquer des bâtiments durables en utilisant des techniques de construction **digitalisée**.

Méthodologie

Ce mémoire tentera de passer en revue les connaissances actuelles de l'impression 3D à travers des études de cas, afin de mettre en évidence les possibilités et les contraintes de l'utilisation de la **fabrication additive** dans le domaine architectural.

Il sera ensuite question d'appréhender l'utilisation de matériaux revalorisés et de leurs processus de fabrication nécessaires afin de formuler des principes de conception durable pour la fabrication additive.

Annonce du plan

Ce travail sera divisé en trois parties.

Dans la première partie, je m'attarderai à circonscrire un des éléments du sujet, à savoir l'impression 3D dans la construction en me basant sur un état de l'emploi des différentes techniques et matériaux d'impression 3D. De nombreuses stratégies sont envisageables pour imprimer des matériaux, et elles peuvent être très différentes en termes de phénomènes physiques en jeu dans le matériau ou dans la technologie.

Dans la deuxième partie, j'examinerai plus précisément et de façon critique l'utilisation des techniques d'impression 3D à grande échelle et à travers l'approche de la revalorisation de matériaux locaux. Je focaliserai mon attention sur les avantages et limites de l'impression 3D de matériaux durables.

Enfin, la troisième partie sera consacrée à l'exploration de la durabilité à travers l'expérimentation d'une revalorisation de matériaux locaux. Je mettrai en lumière les potentialités et contraintes de l'utilisation de matériaux combinés (qui peuvent être considérés comme déchets), tout en mesurant les impacts de ce choix dans le processus de conception.

Plan détaillé

Introduction

Les enjeux de l'impression 3D

Etat de l'art

Présentation du sujet

Annonce du plan

Partie I _ Adaptabilité

L'appropriation des connaissances

1 - Le développement de l'impression 3D

- a) Principes et techniques
- b) Matériel et matériaux
- c) La démocratisation de l'impression 3D
- d) La valeur de l'impression 3D

2 - L'impression 3D comme alternative constructive

- a) Potentialités, aller au-delà avec l'outil 3D ?
 - b) De nouveaux procédés
 - c) Conception à grande échelle
 - d) Construction et contraintes
-

Partie II _ Durabilité

Un nouveau modèle pour une nouvelle ère

1 - Impression 3D et revalorisation de l'environnement

- a) L'utilisation de matériaux in-situ
- b) Du déchet à matière
- c) Constructions durables

2 - Le matériau comme approche de conception

- a) Béton
- b) Terre
- c) Bois / Papier
- d) Plastique

3 - Imprimer local / Penser global

- a) La revalorisation des déchets, une nouvelle économie
 - b) Les limites du recyclage : normes et réglementations
 - c) Une nouvelle écologie pour un nouvel écosystème
-

Partie III _ Expérimentation

Concevoir avec le local

1 - Expérimenter à travers la conception

- a) Concevoir avec un logiciel de CAO
- b) La traduction de l'élément 3D

2 - Expérimenter à travers l'impression

- a) La question des ressources
- b) La configuration
- c) L'impression

3 - Synthèse de l'expérimentation

- a) Les limites de de l'expérimentation
 - b) L'optimisation de l'architecture imprimée
-

Conclusion

Vers une nouvelle architecture

Re-penser le monde ?

Introduction

Les enjeux de l'impression 3D

Etat de l'art

L'impression 3D s'est grandement popularisée à partir de la fin des années 2000, et elle s'est rapidement développée dans certains secteurs industriels du fait de la rapidité de mise en œuvre et de la rationalisation des coûts qu'elle pouvait offrir.

En architecture, l'impression 3D a notamment permis aux architectes de présenter de façon rapide les modèles physiques de leurs projets ou plus concrètement de réaliser des structures plus complexes.

Mais la technique de fabrication additive regroupe tout un ensemble de diverses méthodes de fabrication qui s'est rapidement développée en quelques années et qui n'en est qu'à ses prémisses. Bien qu'apparaissant encore comme secondaire dans le milieu architectural, les impacts de cette nouvelle technique commencent seulement à se ressentir dans l'industrie.

Car la fabrication additive ne se résume plus à l'usage de fil de plastique fondu mais elle a désormais recours à de nombreux procédés et à une très large gamme de matériaux : béton, aluminium, acier, titane, céramique, bois composite ou simplement de la terre.

Elle offre ainsi de nouvelles possibilités pour toute une mixité d'usages et de combinaisons. L'impression tridimensionnelle peut alors associer des formes complexes et une large gamme de matériaux dont peu de designers et d'architectes mesurent encore l'entièreté portée.

Par le fait que l'impression 3D tend à se démocratiser, elle sera probablement à terme de plus en plus utilisée dans le secteur de l'architecture. Mais le problème majeur auquel cette technique fait face aujourd'hui est son échelle. Car bien qu'on commence à entrevoir les possibilités plus vastes pour cette technique, elle se cantonne pour l'instant à remplacer l'acte manuel dans la construction des maquettes d'architecture ou de prototypes à petite échelle.

L'enjeu futur du secteur de la construction en impression 3D sera alors de permettre à cette technique de constituer une véritable alternative constructive à grande échelle afin de pouvoir répondre à certaines problématiques architecturales de demain.

En effet, l'impression 3D offre une méthode de fabrication digitale afin de déformer la matière et de la ré-agencer de façon beaucoup plus libre. Elle permet également aux architectes d'élargir leurs possibilités constructives. Il apparaît ainsi, à travers les récents projets, que la volonté principale de la fabrication additive est de prouver que cette technique peut représenter une alternative réaliste pour la construction.

Présentation du sujet

Comme de nombreuses nouvelles technologies avant l'impression 3D, celle-ci est vue par certains comme vectrice d'une possible nouvelle révolution. Ainsi, au vu des possibilités de plus en plus importantes de cette technologie dans notre quotidien, certains parlent alors d'une « quatrième révolution industrielle ».

Or, une nouvelle technologie n'agit rarement seule dans une révolution industrielle et elle fonctionne souvent en synergie avec les autres déjà existantes. Ainsi, on pourrait imaginer que la technologie de construction par fabrication additive, associée à une connaissance approfondie des matériaux et de leur réutilisation, pourrait avoir un impact décisif sur notre vision de construire le monde.

Les constats récents font apparaître comme menaçante la société consumériste et fonctionnaliste des derniers siècles, à travers l'exploitation sans limite des ressources, l'aménagement autoritaire de l'espace, la recherche ultime du profit et la tendance du monde vers une globalisation uniformisante.

Les bâtiments standards que cette société a déployés et le système qu'elle a développé autour ont souvent empêché l'homme d'agir librement sur son cadre de vie. Cela a notamment causé un affranchissement progressif de l'ensemble des contraintes territoriales, que l'on peut caractériser comme phénomène de "**déterritorialisation**". La conséquence a alors été l'ignorance croissante du lien entre l'établissement humain et son environnement, ce qui a entraîné la perte de pouvoir des habitants dans leur territoire. De la même manière, la délocalisation due au système productif globalisé a rompu le lien qu'entretenait la production avec la conception.

Ainsi, au regard des enjeux et des préoccupations écologiques récentes, la technique d'impression 3D pourrait, peut-être remettre en cause la manière de produire l'architecture ?

En effet, c'est dans le sens où le concepteur pourrait grâce à la connaissance de ses matériaux locaux, à travers l'utilisation de l'impression 3D, offrir une production architecturale qui soit spécifiquement adaptée à son utilisation et à ses environnements géographiques et physiques.

La question principale qui animera ce mémoire est donc la suivante : **L'impression 3D, peut-elle soutenir l'architecture de demain en répondant à des enjeux de revalorisation des matériaux ?**

Partie I _ Adaptabilité

L'appropriation des connaissances

1 - Développement de l'impression 3D

a) Principes et techniques

Au cours des dernières années, l'impression 3D est devenue de plus en plus présente, s'immisçant petit à petit dans notre quotidien. Aujourd'hui, la dénomination "fabrication additive" est principalement associée au monde industriel.

Bien qu'elle regroupe de nombreuses techniques telles que l'extrusion de matière, la projection de matière, la projection de liant, la photo-polymérisation ou encore la fusion par lit de poudre, celles-ci ont tendance à élargir les domaines d'actions de la fabrication additive.

Beaucoup plus récente, la formulation "impression 3D" a notamment été popularisée au travers des médias. Et elle est principalement employée par analogie avec son homologue qu'est l'impression 2D traditionnelle d'encre sur papier. Ainsi, l'impression 3D, tend à être attribuée de plus en plus aux applications grand public depuis la démocratisation de cette technique.

Pour simplifier, imprimer en 3D consiste donc à créer un objet en trois dimensions à partir de trois éléments indispensables : un fichier numérique, une machine, et un matériau adapté.

Le modèle imaginé et réalisé grâce à un logiciel de conception assisté par ordinateur (CAO) permet alors de passer, grâce à une machine adéquate, de l'immatériel au matériel. Il est ainsi possible, à condition d'adapter la machine, d'imprimer en utilisant toute une variété de matériaux comme les plastiques, les métaux ou encore de la terre.

Par ce procédé, un objet est mis en forme par l'ajout de couches successives de matière, contrairement à la fabrication soustractive qui consiste à mettre en forme un objet par enlèvement de matière tel que le fraisage, la sculpture, ou le moulage. Contrairement aux méthodes soustractive qui génèrent d'importantes pertes de matière, l'impression 3D à contrario n'emploie que la quantité de matériau nécessaire à la fabrication de l'élément désiré.

Il existe ainsi trois grandes catégories de technologies d'impression 3D que l'on définit ci-dessous.

Les 3 principaux types d'impression 3D



Technique de dépôt de fil fondu

Le Fused deposition modeling (FDM) ou Fused Filament Fabrication (FFF) est une technique consiste à chauffer un filament thermoplastique (notamment PLA) et à le déposer à l'aide d'une buse sur le plateau pour créer l'objet voulu, couche par couche.

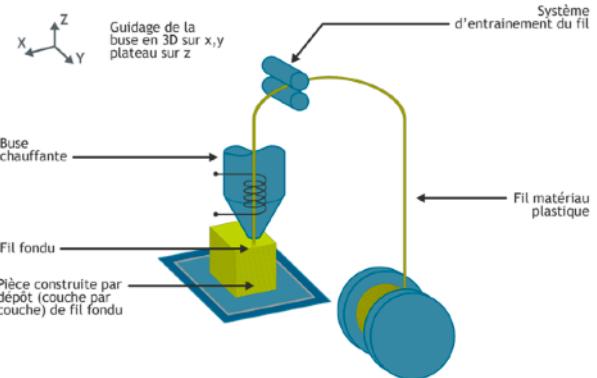


Figure 1. Schéma FFF - fabrication-additive.fr



Technique de stéréolithographie

La StereoLithography Apparatus (SLA) ou Digital Light Processing (DLP) sont des techniques utilisant une résine liquide photosensible est polymérisée (solidifiée) de manière très précise par un laser ou un projecteur, formant ainsi l'objet voulu directement dans le bac de l'imprimante 3D contenant la résine.

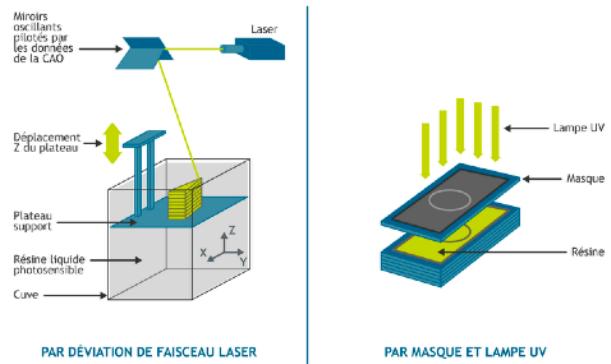


Figure 2. Schémas SLA/ DLP - fabrication-additive.fr



Technique de frittage de poudre

La Selective Laser Sintering (SLS) ou Selective Laser Melting (SLM) sont des techniques consistant à fusionner (frittage) de fines particules de poudre disposées dans le bac de l'imprimante 3D. Une fois la première couche créée, le plateau descend afin de permettre l'étalement de la couche suivante. Le processus est répété jusqu'à obtention de la pièce.

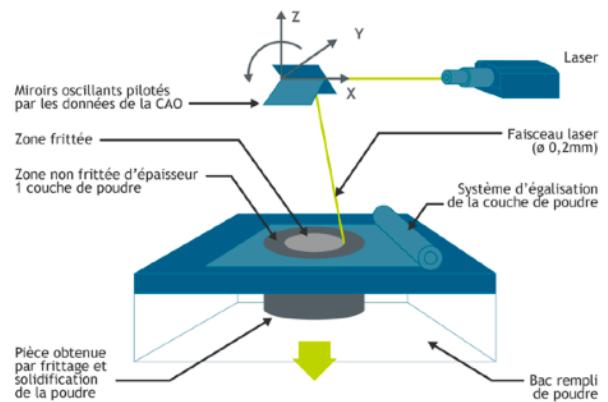


Figure 3. Schéma SLS - fabrication-additive.fr

b) Matériel et matériaux

Parmi ces trois grandes catégories d'impression 3D, la technique d'impression FDM est considérée comme la technologie la plus accessible du fait d'une composition relativement simple.

L'impression FDM repose sur trois éléments pour imprimer des objets : un plateau d'impression, une bobine de filament et une tête d'impression également appelée extrudeur. Cette technique fonctionne par dépôts successifs de couches d'un matériau plastique ou composite. Le matériau est chauffé, fondu et déposé par une tête d'impression, guidée par un moteur, en suivant un chemin défini par le fichier numérique. L'objet est donc construit couche après couche, de la base au sommet. Pour imprimer certaines pièces, il peut être nécessaire d'insérer des supports. Ceux-ci sont prédéfinis dans le fichier de conception.

La figure 4 représente la composition d'une imprimante FDM classique.

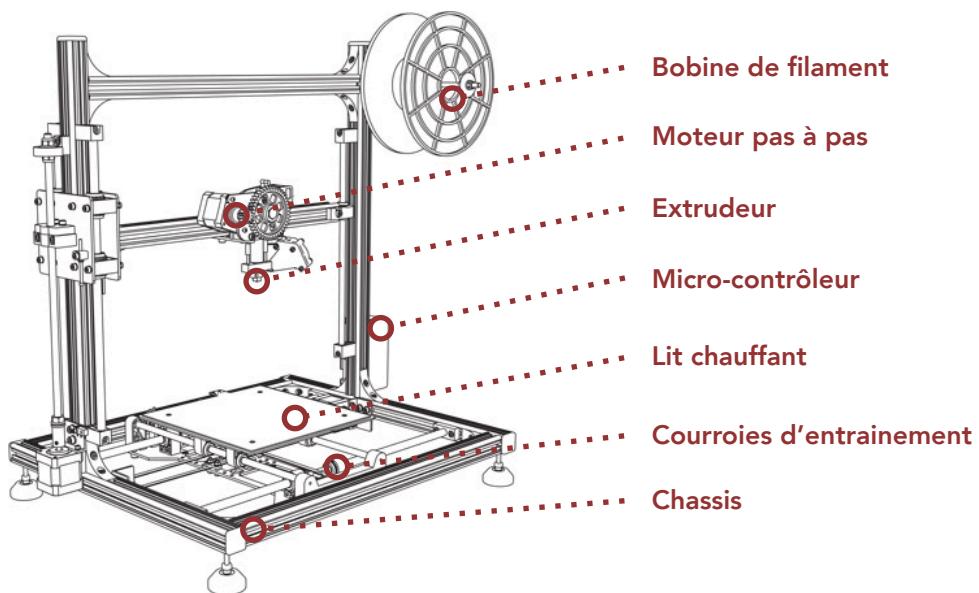


Figure 4. Composition d'une imprimante FDM

Les nombreuses innovations constantes en impression 3D continuent ainsi de repousser les limites dans ce domaine. Il est ainsi devenu plus facile d'imprimer avec des matériaux autres que les plastiques. Les matériaux présentés dans le Tableau 1 ci-dessous traduisent de la diversité d'impression 3D avec des filaments composites.

	ABS	Flexible	PLA	HIPS	PETG	Nylon	Carbon Fiber Filled	ASA	Polycarbonate	Polypropylene	Metal Filled	Wood Filled	PVA
	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More	Learn More
Compare Selected	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Ultimate Strength	40 MPa	26 - 43 MPa	65 MPa	32 MPa	53 MPa	40 - 85 MPa	45 - 48 MPa	55 MPa	72 MPa	32 MPa	20 - 30 MPa	46 MPa	78 MPa
Stiffness	5/10	7/10	7.5/10	10/10	5/10	5/10	10/10	5/10	6/10	4/10	10/10	8/10	3/10
Durability	8/10	9/10	4/10	7/10	8/10	10/10	3/10	10/10	10/10	9/10	4/10	3/10	7/10
Maximum Service Temperature	98 °C	60 - 74 °C	52 °C	100 °C	73 °C	80 - 95 °C	52 °C	95 °C	121 °C	100 °C	52 °C	52 °C	75 °C
Coefficient of Thermal Expansion	90 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	157 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	68 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	80 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	60 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	95 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	57.5 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	98 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	69 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	150 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	33.75 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	30.5 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	85 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$
Density	1.04 g/cm^3	1.19 - 1.23 g/cm^3	1.24 g/cm^3	1.03 - 1.04 g/cm^3	1.23 g/cm^3	1.06 - 1.14 g/cm^3	1.3 g/cm^3	1.07 g/cm^3	1.2 g/cm^3	0.9 g/cm^3	2 - 4 g/cm^3	1.15 - 1.25 g/cm^3	1.23 g/cm^3
Price (per kg)	\$10 - \$40	\$30 - \$70	\$10 - \$40	\$24 - \$32	\$20 - \$60	\$25 - \$65	\$30 - \$80	\$38 - \$40	\$40 - \$75	\$60 - \$120	\$50 - \$120	\$25 - \$55	\$40 - \$110
Printability	8/10	6/10	9/10	6/10	9/10	8/10	8/10	7/10	6/10	4/10	7/10	8/10	5/10
Extruder Temperature	220 - 250 °C	225 - 245 °C	190 - 220 °C	230 - 245 °C	230 - 250 °C	220 - 270 °C	200 - 230 °C	235 - 255 °C	260 - 310 °C	220 - 250 °C	190 - 220 °C	190 - 220 °C	185 - 200 °C
Bed temperature	95 - 110 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C	100 - 115 °C	75 - 90 °C	70 - 90 °C	45 - 60 °C	90 - 110 °C	80 - 120 °C	85 - 100 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C
Heated Bed	Required	Optional	Optional	Required	Required	Required	Optional	Required	Required	Optional	Optional	Optional	Required
Recommended Build Surfaces	Kapton Tape, ABS Slurry	PEI, Painter's Tape	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glass Plate, Glue Stick, Kapton Tape	Glue Stick, Painter's Tape	Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glue Stick, PEI	PEI, Commercial Adhesive, Glue Stick	Packing Tape, Polypropylene Sheet	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	PEI, Painter's Tape
Other Hardware Requirements	Heated Bed, Enclosure Recommended	Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended	Heated Bed, Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended, May Require All Metal Hotend	Part Cooling Fan	Heated Bed	Heated Bed, Enclosure Recommended, All Metal Hotend	Heated Bed, Enclosure Recommended, Part Cooling Fan	Wear Resistant or Stainless Steel Nozzle, Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Part Cooling Fan
Flexible	—	✓	—	—	—	✓	—	—	—	✓	—	—	✓
Elastic	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Impact Resistant	✓	—	—	✓	—	✓	—	✓	✓	—	—	—	—
Soft	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	✓	—	—	✓
Composite	—	—	—	—	—	—	✓	—	—	—	✓	✓	—
UV Resistant	—	—	—	—	—	—	—	✓	—	—	—	—	—
Water Resistant	—	—	—	—	✓	—	—	—	—	✓	—	—	—
Dissolvable	—	—	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	—	✓
Heat Resistant	✓	—	—	✓	—	✓	—	✓	✓	✓	—	—	—
Chemically Resistant	—	—	—	—	✓	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue Resistant	—	✓	—	—	✓	✓	—	—	✓	✓	—	—	✓

Tableau 1. Comparatif des filaments pour imprimante 3D - Simplify3D

c) La démocratisation de l'impression 3D

Depuis quelques années, l'impression 3D est devenue de plus en plus accessible au grand public et continue aujourd'hui de se démocratiser. Cela peut s'expliquer par de nombreuses raisons.

Tout d'abord, le mouvement **RepRap** a grandement contribué à développer la réplication d'imprimantes à grande échelle et ainsi certainement permis de baisser le coût des imprimantes 3D. Le prix a ainsi fortement chuté ces dernières années passant de l'ordre des milliers d'euros à quelques centaines d'euros aujourd'hui.

De même, la précision des impression 3D s'est largement améliorée et continue de s'améliorer. Les machines deviennent également de plus en plus faciles à prendre en main grâce à une ergonomie simplifiée. Il est aussi maintenant beaucoup plus facile de concevoir des modèles 3D grâce aux nombreux logiciels de CAO accessibles gratuitement. Enfin, il apparait que l'impression 3D offre un panel infini d'expérimentations qui semblent avoir peu de limitation.

La Figure 5 retrace ainsi brièvement la chronologie de l'impression 3D jusqu'à nos jours.

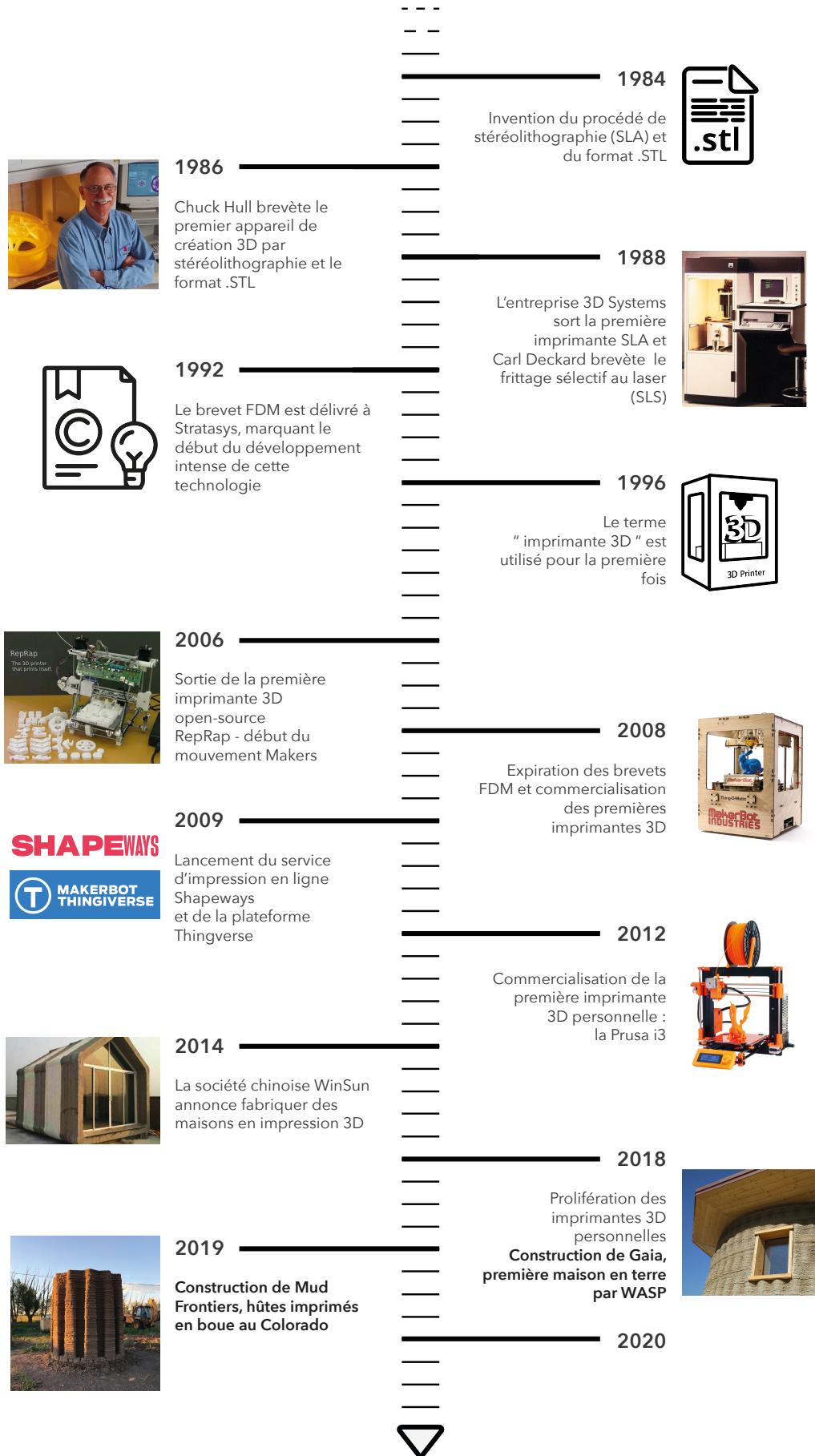


Figure 5. Mon historique synthétique des événements importants de l'impression 3D

d) La valeur de l'impression 3D

L'impression 3D est donc une technologie qui évolue rapidement. La croissance de la fabrication additive pourrait ainsi avoir un impact sur l'environnement. Car, contrairement à la fabrication traditionnelle, dans laquelle les pièces sont souvent découpées dans de plus gros blocs de matériaux, la fabrication additive produit les éléments couche par couche (Fig. 6) et imprime uniquement les pièces essentielles, utilisant beaucoup moins de matière et donc moins de déchets.

L'intérêt indéniable de l'impression 3D, dans le contexte actuel de raréfaction des matériaux, est donc de pouvoir permettre l'économie de matière à travers l'impression de ce qui est seulement nécessaire à la production.

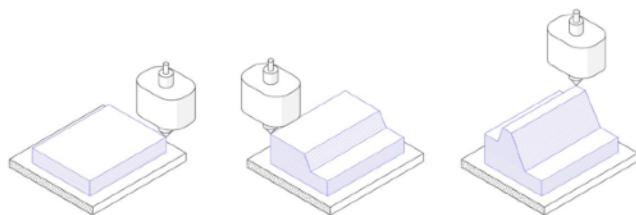


Figure 6. Schéma de la fabrication additive par dépôt de couches - 3dhubs.com

La fabrication additive offre donc les avantages suivants contrairement à la fabrication traditionnelle :

- Une complexité géométrique abordable

L'impression 3D permet de fabriquer facilement des formes complexes, difficilement produites par des méthodes traditionnelles. La nature additive de l'impression 3D signifie que la complexité géométrique n'engendre pas de coûts aussi élevés que dans la fabrication traditionnelle (Fig.7). Les pièces à géométrie complexe ou organique coûtent donc autant en impression 3D que les pièces plus simples conçues pour la fabrication traditionnelle, voir parfois moins car moins coûteuses en matériaux utilisés.

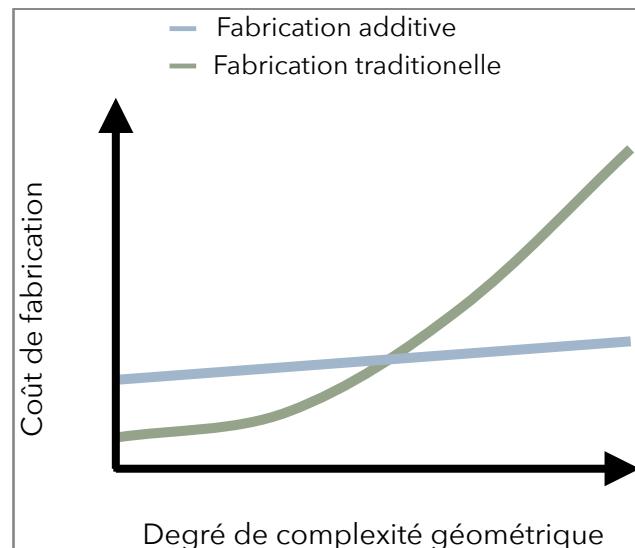


Figure 7. Graphique coût/complexité entre fabrication additive et fabrication traditionnelle

- Un coût de mise en route faible

Dans la fabrication par formage (injection et moulage) chaque pièce nécessite un moule unique, ce qui engendre un coût élevé. A contrario, le coût d'une pièce imprimée en 3D dépend uniquement de la quantité de matière utilisée, du temps nécessaire à l'impression par la machine ainsi que de la durée des opérations de post-traitement nécessaires pour obtenir la finition souhaitée.

- Une personnalisation

Contrairement à la fabrication traditionnelle, qui est moins coûteuse pour fabriquer des produits standardisés, l'impression 3D permet une personnalisation. Du fait de coûts de mise en route très bas, il suffit de modifier le modèle numérique 3D pour créer une pièce sur mesure. Chaque pièce peut donc être personnalisée pour répondre aux besoins spécifiques en ayant un faible impact sur les coûts de fabrication.



Image 1. Photo de la Cellular Loop Chair de Anke Bernotat imprimé par SLS

- Des délais d'exécution courts

L'une des principales utilisations de l'impression 3D aujourd'hui est le prototypage, tant pour la forme que pour la fonction. Cela se fait à une fraction du coût des autres procédés et à des vitesses qu'aucune autre technologie de fabrication ne peut égaler. La rapidité du prototypage accélère donc considérablement le cycle de production (conception, essais, amélioration, modifications de la conception).

Malgré cela, continuer à adopter la fabrication additive pose certaines problématiques annexes. En effet, bien que la fabrication additive réduise jusqu'à 90% les déchets du processus de fabrication soustractive, le processus de fabrication additive demande tout de même un apport en énergie qui n'est pas forcément négligeable lors de la construction à grande échelle.

Ainsi, il est intéressant de comprendre comment des matériaux directement prélevés sur site ou recyclés peuvent offrir un meilleur impact environnemental.

2 - L'impression 3D comme alternative constructive

a) Potentialités, aller au-delà avec l'impression 3D

Les matériaux d'impression 3D les plus couramment utilisés aujourd'hui sont les plastiques. L'impression 3D en métal trouve également un nombre croissant d'applications industrielles. Mais la palette de matériaux d'impression 3D comprend aussi des matériaux avec des propriétés adaptées à des applications spécifiques (Tabl. 1). Ainsi les pièces imprimées en 3D peuvent avoir une grande résistance à la chaleur, être très solides/rigides et même être biocompatibles.

Les matériaux composites se développent également de plus en plus dans l'impression 3D, en incorporant des particules de métal, de céramique, de bois, ou être renforcés de fibres de carbone. Il en résulte des pièces aux propriétés uniques adaptées à des applications spécifiques.

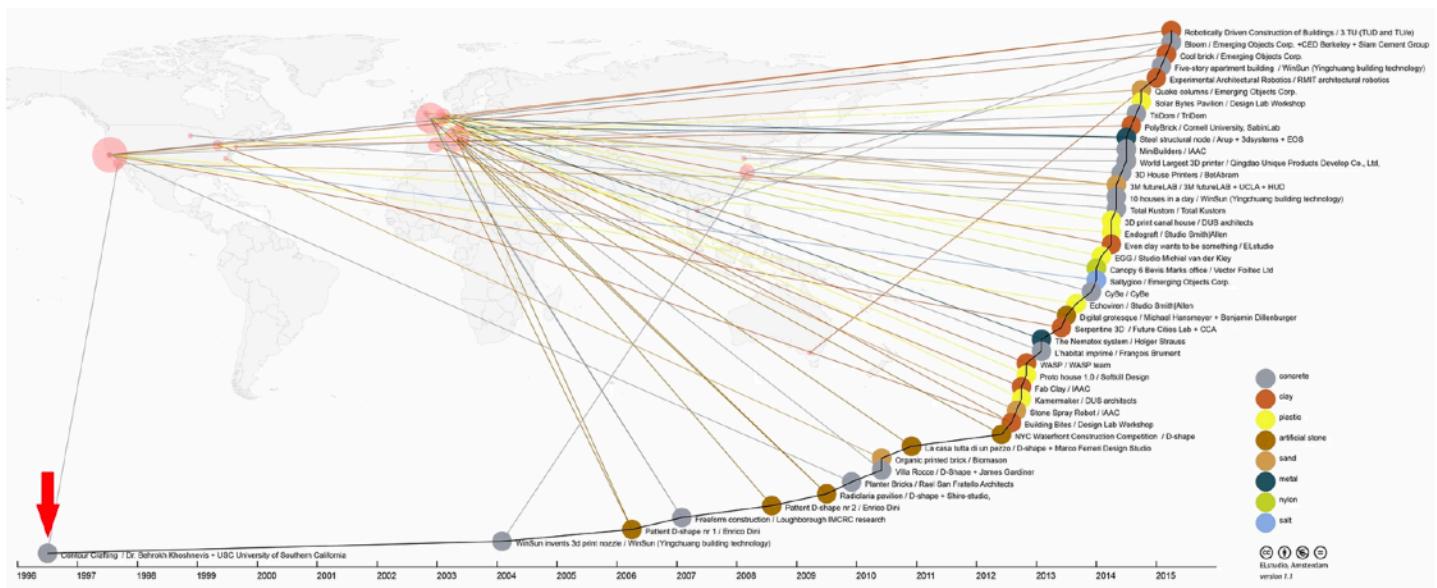


Figure 8. Chronologie de la fabrication additive par ELStudio - Lien

Concernant les potentialités de la fabrication additive avec une diversité de matériaux, de nombreuses initiatives dans le domaine de l'impression 3D liée à l'architecture ont eu lieu au cours des dernières années. La carte suivante (Fig.8), réalisée par ElStudio, liste une variété de projets d'impression 3D portant sur la fabrication directe d'éléments ou d'architectures en fonction du type de matériaux utilisés.

On peut donc discerner que de nombreux projets architecturaux d'impression 3D se sont développés ces dernières années. Nous verrons ainsi dans le chapitre suivant, de façon plus précise le déploiement de certains de ces projets.

b) Conception à grande échelle

Lorsque l'on parle d'impression 3D dans le secteur de la construction il n'est évidemment plus question de la même échelle de production. En effet, à grande échelle, se pose clairement la question du mode de fabrication sur site. Car, bien que la préfabrication soit prédominante dans la construction standard, l'impression 3D directe sur chantier apparaît plus pertinente.

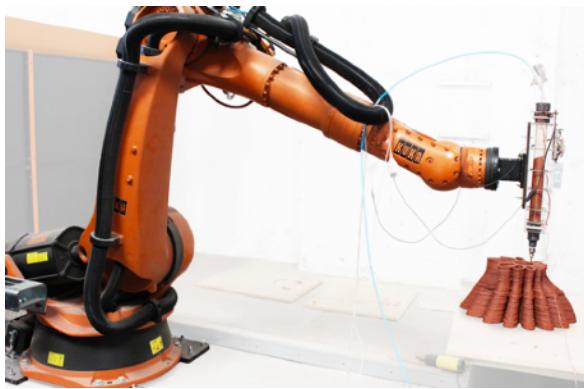


Image 2. Photo d'impression 3D avec bras robot - Fabclay IAAC



Image 3. Photo d'impression 3D avec portique - COBOD

François Ploye nous explique, dans un article du CTB¹, que l'enjeu à terme de l'impression 3D à grande échelle est de pouvoir fabriquer sur site. En ce sens, les solutions qui sont développées par les fabricants se classent en deux familles : le bras robotisé (Img.2) ou le portique (Img.3). Ces deux solutions offrent chacune leurs propres avantages et inconvénients du fait de leurs caractéristiques. L'avantage principal du bras robotisé est de permettre une grande mobilité quant au portique fixe, il offre aisément une très grande échelle d'impression.

Le tableau ci-dessus permet alors de comparer différents procédés d'impression 3D dans le cadre d'une application à grande échelle.

Ainsi, les recherches et les pratiques récentes telles que **Contour Crafting**², D-shape ou l'impression 3D béton ont décelé le potentiel de processus à grande échelle adoptant les techniques de la fabrication additive comme une autre manière de construire avec des composants de construction plus avantageux par rapport aux processus de construction conventionnels.

¹ François Ploye, *Imprimer en 3D sur site avec les robots mobiles*, Cahiers Techniques du Bâtiment , Oct. 2017, n°363

² Khoshnevis, B., *Mega-scale fabrication by Contour Crafting*, Int. J. Industrial and Systems Engineering, 2006

PROJET	LOCALISATION	ARCHITECTES	SUR SITE / PRÉFABRIQUÉ	MATÉRIAUX	SUPPORT	MÉTHODE	TAILLE	COÛT	TEMPS DE RÉALISATION
3D Print Canal House	Amsterdam	DUS Architects	Préfabriqué	Plastique	Bras robotisé	/	700m2	/	/
MX3D Bridge	Amsterdam	Joris Laarman	Préfabriqué	Métal	Bras robotisé	Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)	/	/	8 jours
Radiolaria Pavilion	Pontedera, Pise	Shiro Studio	Sur site	Sable	Portique	D-shape	9m2	/	24h
Maison Gaia	Massa Lombarda	WASP	Sur site	Base argile	Portique	Contour Crafting	20m2	1000 \$	10 jours
Projet Pylos	Barcelone	IAAC	Sur site	Argile	Bras robotisé	Impression	/	/	/
Bureaux	Dubai	Killa Design	Préfabriqué	Base ciment	Portique	Contour Crafting	250m2	150 000 \$	17 jours
Villaprint	Reims	XTREEE	Préfabriqué	Base ciment	Portique	Contour Crafting	/	2000 \$/m2	/
10 Maisons	Shanghai	WinSun	Préfabriqué	Base ciment	Portique	Contour Crafting	10 x 195m2	2M \$	24h/ maison
Maison	Austin, Texas	ICON	Sur site	Base ciment	Portique	Contour Crafting	60m2	4000 \$	12h-24h

Tableau 2. Comparaison de différents projets d'impression 3D à grande échelle

De nos jours, les architectes expriment de plus en plus leurs concepts à travers des géométries et des formes complexes. Cependant, les méthodes de construction conventionnelles, qui reposent principalement sur des moules et des coffrages, ont une capacité limitée, car elles restreignent la géométrie qui peut être réalisée en raison des limitations imposées par ses techniques. Ainsi, les procédés de fabrication additive peuvent désormais être une réelle alternative aux méthodes conventionnelles : la liberté géométrique engendre un grand potentiel pour introduire une personnalisation dans l'industrie de la construction, afin d'obtenir des géométries complexes envisagées pour contrôler notamment l'ombrage, le gain solaire et la ventilation.

c) De nouveaux procédés

Le Contour crafting est une technologie d'impression de bâtiment qui a été développée par Behrokh Khoshnevis de l'Institut des sciences de l'information de l'Université de Californie du Sud.

Cette technologie utilise une grue ou un portique contrôlés par ordinateur afin de construire des édifices plus rapidement et efficacement (Img.4), tout en faisant appel à moins de main d'oeuvre. Cette technique a été conçue originellement comme une méthode de construction de moulage pour pièces industrielles. Khoshnevis a, par la suite, décidé d'adapter cette technologie pour la construction rapide de maisons dans le but de reconstruire suite à des catastrophes naturelles, comme les tremblements de terre dévastateurs qui ont frappé son pays natal, l'Iran.



Image 4. Représentation d'un bâtiment construit par contour crafting - contourcrafting.com

À l'aide d'un matériau à prise rapide comme le béton, la création de contours forme les murs de l'architecture couche par couche jusqu'à ce qu'ils soient surmontés par des sols et des plafonds mis en place par le portique. Le concept théorique appelle ainsi à l'insertion de composants structurels, de plomberie, du câblage, et des services au fur et à mesure que les couches sont construites.

L'exemple ci-dessous (Img. 5 et 6) traduit de l'utilisation de la méthode de contour crafting en impression béton dans un contexte de construction rapide et abordable.



Image 5. Photographie du projet New Story Charity

New Story Charity
Fuseproject + ICON
Tabasco, Mexique,
2019

Réalisation de logements abordables et de qualité pour les familles vivant dans une communauté agricole appauvrie. Chaque logement est adaptable à différents besoins et programmes.

La construction à grande échelle de bâtiments imprimés en 3D offre ainsi de nombreux avantages par rapport à la construction traditionnelle. Parmi ceux-ci on note l'économie de matière réalisée par l'utilisation d'une moins grande quantité de matière.



Image 6. Représentation du processus d'impression du projet New Story Charity

L'automatisation de ces procédés permet également un gain de temps considérable puisque la durée du gros œuvre se trouve divisée par deux et que le temps de séchage est fortement réduit tout comme les nuisances sur le chantier. Enfin, ce procédé offre une grande liberté de création formelle pour l'architecte.

d) Construction et contraintes

Nous avons vu que le procédé d'impression 3D présente de multiples avantages. Mais affranchi de certaines contraintes liées à la construction classique, il en crée néanmoins d'autres qui sont inhérentes à l'utilisation de tels outils. En effet, la fabrication additive présente certaines limitations que l'on peut lister ci-dessous :

- De forme

L'impression 3D en couches par couches horizontales n'est peut-être pas la méthode la plus optimale pour imprimer des formes géométriques complexes comprenant des courbures.

Zones en porte-à-faux et supports : les imprimantes 3D ne peuvent pas déposer de la matière sans support. Les parois avec un angle supérieur à 45° nécessiteront un support, ce qui affectera la qualité de la surface.

- De rugosité

Le processus d'impression 3D produit une certaine rugosité de surface en fonction des matériaux utilisés. Pour la minimiser il faudrait donc prévoir un prétraitement numérique plutôt qu'un fastidieux post-traitement (finitions de surface).

- De taille

Les machines pour imprimer à grande échelle doivent souvent être aussi imposantes que le projet imprimé.

- De précision

L'éventail de détails qu'une imprimante 3D peut produire est directement lié à la taille de la buse d'extrusion.

- De coût

Le coût initial des machines et de leurs formations est plus important que dans la construction classique mais peut certainement être contrebalancé par l'économie réalisée par leurs utilisations successives.

- D'énergie

De même, l'utilisation de ces machines engendre une consommation d'énergie en électricité non négligeable.

Or ces limitations dans les procédés d'impression 3D à grande échelle peuvent possiblement être surmontées par de nouvelles approches ayant un impact environnemental plus faible par l'usage de matériaux directement prélevés sur site ou de matériaux recyclés.

Nous nous intéresseront donc dans la partie suivante à détailler l'application de ces nouveaux procédés dans un contexte de revalorisation de matériaux locaux et recyclés.

Partie II _ Durabilité

Un nouveau modèle pour une nouvelle ère

1 - Impression 3D et revalorisation de l'environnement

Le point de départ de cette recherche de revalorisation de matériaux locaux réside dans l'idée que la plupart des méthodes de construction vernaculaires ont peu d'impact sur l'environnement par rapport au mode de construction industrialisé, mais nécessitent en revanche un savoir-faire et des exigences de qualité (Img.7).

La question est alors de savoir si nous pouvons reproduire des bâtiments durables avec des matériaux locaux en utilisant des techniques de fabrication numérique en apprenant de l'architecture traditionnelle et des techniques de construction **high-eco-tech**.

Dans la tradition des recherches d'ingénieurs, en particulier de Buckminster Fuller et d'Otto Frei, l'ingénieur Werner Sobek tente, lui, d'optimiser la production industrielle de l'architecture selon des paramètres climatiques afin d'épargner les ressources naturelles.

Ces travaux reposent sur l'invention de nouveaux matériaux, l'étude des procédés et de nouvelles structures. Werner Sobek envisage la question écologique par un examen du poids matériel de l'architecture et de leur durabilité. Selon lui, il est ainsi nécessaire de développer des recherches sur l'économie des ressources et de s'interroger sur les déchets produits par le domaine de la construction du fait qu'ils représentent la grande majorité des déchets mondiaux.

Pour Werner Sobek, l'architecte aurait donc aujourd'hui la responsabilité de penser le processus de démontage et de recyclage au moment où il conçoit l'architecture.³

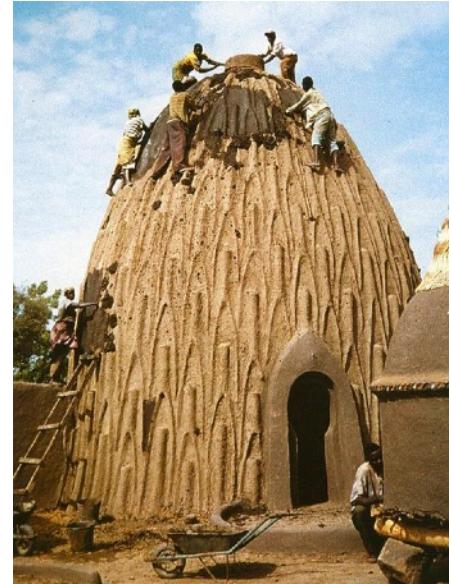


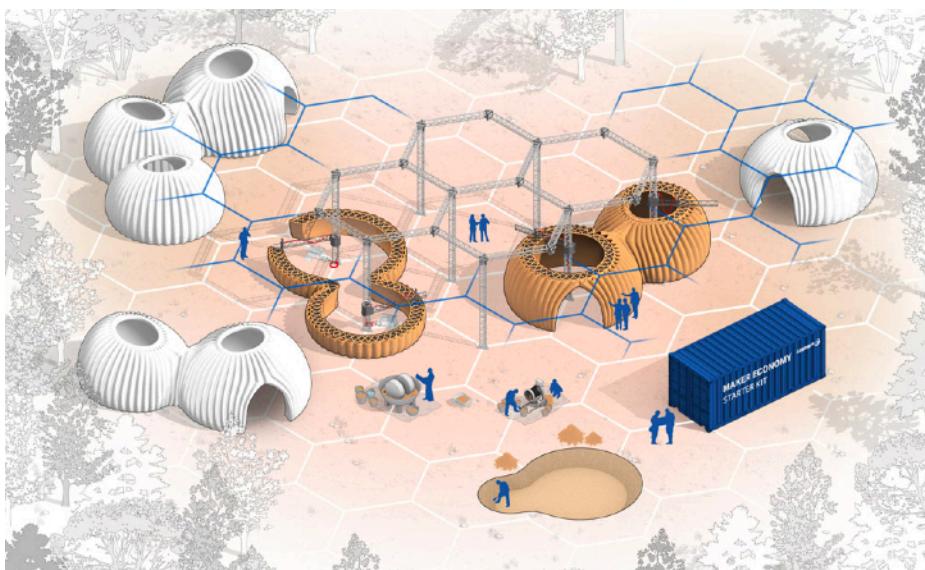
Image 7. Case Obus des Mousgoum, mélange de terre et d'herbe

En cela, il est apparaît que l'utilisation de matériaux **in-situ** relève d'une démarche durable.

³ MANDOUL, Thierry, *Climat(s) : Nouveau paradigme pour l'architecture ?*, Presses universitaires de Rennes, 2012

a) L'utilisation de matériaux in-situ

Dans cette optique, certains projets tentent d'utiliser des matériaux locaux. C'est notamment l'objectif principal de l'entreprise WASP d'utiliser de l'argile du simple fait que la terre est disponible partout dans le monde, elle est bon marché et facilement malléable. Outre l'argile, WASP s'intéresse également aux mélanges de bois en raison de la possibilité d'utiliser du papier et du carton recyclé. Leur dernière innovation consiste à utiliser des graines de certaines mauvaises herbes mélangées avec le matériau imprimable en 3D pour absorber l'humidité de l'argile et garantir qu'elle ne rétrécisse pas en séchant.



TECLA

WASP + Mario Cucinella
Massa Lombarda, Italie
2019

Pensé comme un habitat écodurable entièrement imprimé par l'imprimante Crane WASP. Ce nouveau modèle de logements circulaires est créé avec des matériaux réutilisables et recyclables, collecté sur site.

Image 8. Rendu de la construction d'habitats par WASP

Concernant l'utilisation des matériaux locaux, Massimo Moretti, fondateur de WASP exprime son inquiétude sur le potentiel "abus" de l'impression 3D dans la construction : « L'impression 3D est une technologie qui offre plusieurs avantages. Sa mise en œuvre avec des matériaux anciens et polluants comme le ciment traditionnel pourrait conduire à une dégénérescence exponentielle : des dizaines de maisons pourraient être construites en une seule journée et le potentiel de l'impression 3D pourrait être exploité à des fins spéculatives. Nous devons être très attentifs au type de recherche que nous voulons faire avancer. »



Image 9, 10 et 11. Photos d'impression de prototypes TECLA par WASP

b) Du déchet à matière

En France, en 2014, selon le Ministère de l'environnement, les entreprises du bâtiment et des travaux publics produisaient 227,5 millions de tonnes de déchets dont 80 % de ces déchets étaient des déchets inertes. La proportion des déchets inertes réutilisés ou valorisés dès leur sortie de chantier était de 61 % pour l'ensemble du secteur du BTP.⁴ Ainsi, une grande partie de ces déchets se retrouvent stockés sans revalorisation.

Une partie de ces déchets est composée de terre. Ce matériau de construction millénaire, est aujourd'hui de plus en plus considéré car il représente une ressource facilement disponible avec des qualités écologiques et économiques non négligeables pour le secteur du bâtiment. En effet, la terre crue nécessite très peu d'énergie de fabrication et de mise en œuvre, et affiche donc un faible bilan carbone. C'est un matériau réutilisable en tant que matière première. Elle permet en outre une régulation de l'humidité de l'air intérieur. Elle possède également une forte inertie, source de régulation de la température intérieure.

On constate d'autres atouts à souligner :

- Elle demande peu d'entretien, de réparations et les finitions peuvent rester intactes pendant des dizaines d'années.
- Elle s'associe parfaitement à d'autres matières premières naturelles comme la pierre, le bois et d'autres fibres végétales, autant d'un point de vue constructif qu'esthétique.
- C'est un matériau sain, sans COV (Composés Organiques Volatiles).
- Ce matériau local appelle à la création de filières de production de matériaux de construction locales et au développement d'un savoir-faire. Ainsi, construire en terre crue c'est aussi développer une économie circulaire locale et humaine.

Le chapitre suivant comprend alors deux exemples de constructions durables à travers l'utilisation de matières revalorisées.

⁴ Ministère de l'environnement, *Entreprises du BTP : 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014*. DATALAB Essentiel n° 96 - mars 2017.

c) Constructions durables

Le premier exemple de construction durable est celui de la maison Gaia de WASP.



Image 12. Photographie de la maison Gaia achevée

L'entreprise WASP utilise une extrudeuse basée sur un système pneumatique dans lequel une pompe envoie les matériaux céramiques/argiles en pâte à travers le bras de dépôt. Elle peut atteindre un niveau de précision très proche de celui des extrudeuses de polymères plastiques grâce à la combinaison d'une extrudeuse à vis sans fin et sous pression. Avec cette technologie, il est possible de contrôler avec précision le flux de matière et également d'utiliser la rétraction pour interrompre le dépôt. Le système élimine également les bulles d'air dans le mélange et fournit une pression vers l'extrudeuse pouvant aller jusqu'à 40 bars. Le mécanisme paraît fonctionner relativement bien, et des expérimentations doivent donc être menées concernant les matériaux et les formes imprimables par le procédé de Liquid Deposit Modeling (LDM).

Maison Gaia

A. Chiusoli + WASP
Italie, 2018

Imprimé en utilisant des matériaux prélevés sur place, ce projet exploite la terre crue et les déchets naturels de la production rizicole.



Image 13. Le procédé LMD



Image 14. Isolation des murs



Image 15. Impression à l'aide du contour crafting



Image 16. Photographie à mi-impression

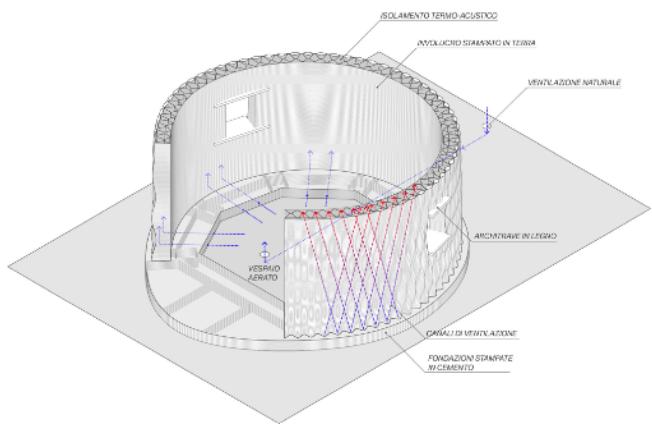


Figure 9. Axonométrie coupée de la maison Gaia

Pour la fabrication de ce prototype, WASP a utilisé une imprimante 3D suspendue et tournant autour d'un mât (Img. 15). Le mélange, composé à 25% de terre du chantier de construction, 40% de paille de riz hachée, 25% de cosses de riz et 10% de chaux hydraulique, a été déposé par couches successives en formant une série de cavités triangulaires. Enfin, pour isoler la structure, des cosses de riz ont été versées dans les cavités (Img. 14). En 10 jours, l'imprimante 3D "Crane WASP" a alors érigé cette structure architecturale éco-responsable d'une superficie totale de 30 m² et avec des murs de 40 cm d'épaisseur.

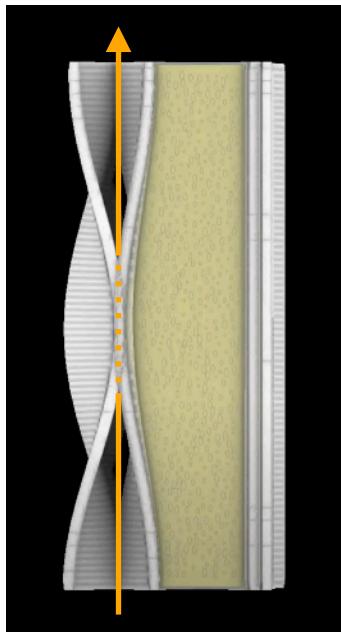


Figure 10. Vue en coupe de la ventilation des parois

Les matériaux qui composent ce projet en terre argileuse permettent de minimiser le rétrécissement du mélange lors du séchage et confèrent une résistance mécanique au mur stratifié. « Grâce à l'utilisation d'un broyeur par voie humide, le mélange brut a atteint une plasticité homogène intéressante qui a permis une bonne résolution de la texture imprimée. » explique Massimo Moretti, PDG de WASP.⁵

La société italienne a donc voulu développer à travers ce prototype, une construction à faible impact environnemental tout en étant capable d'y intégrer un système de ventilation des parois (Fig. 10), ne nécessitant donc aucun système de chauffage ou de climatisation.

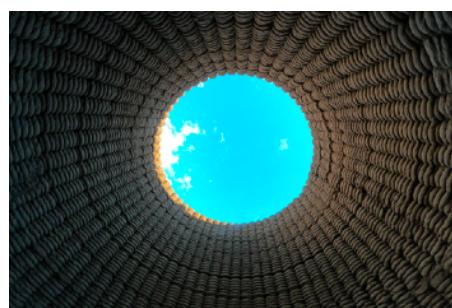
⁵ 3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/

Des essais similaires ont été produits par l'agence Emerging Objects qui a, en 2019, produite des huttes imprimées en 3D directement sur site (Img.17).



Mud Frontiers

Emerging Objects
Colorado, USA
2019



Projet consistant en 4 huttes imprimées à partir d'un matériau à base de boue, rappelant celles construites au bord du fleuve Rio Grande dans la vallée de San Luis, dans le Colorado jusqu'au 19ème siècle. L'objectif de ce projet est de démontrer, à travers l'exploration de l'artisanat traditionnel d'argile, que la construction à faible coût est accessible, économique et sûre.

Image 17. Regroupement de photographies des huttes imprimées par Emerging Objects

Le chapitre suivant détaillera ainsi le développement plus varié de matériaux dans une optique de conception en fonction de la matière choisie.

2 - Le matériau comme approche de conception

Afin de concevoir en fabrication additive, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des propriétés du matériau que l'on utilise. Il est également important de comprendre l'évolution du processus de la fabrication à l'assemblage. Il apparaît donc que penser en terme de matériaux est essentiel dans la conception. Car il ne s'agit pas d'assembler un bâtiment à partir de matériaux de construction standardisés et préfabriqués, mais de coordonner les principes, les matériaux et la fabrication dès le début. Cela nécessite alors une approche systémique.

a) Béton

De nombreuses entreprises travaillent sur l'impression 3D à grande échelle en utilisant le béton comme matériau de base.

Le marché mondial de l'impression 3D béton est ainsi dominé par des acteurs tels que WinSun (en Chine), XtreeE (en France), D-shape (au Royaume-Uni), Apis Cor (en Russie), Wasp (en Italie), CyBe Construction (aux Pays-Bas) et Sika (en Suisse).

L'une de ces sociétés XtreeE développe un écosystème d'impression 3D qui comprend le béton comme matériau d'impression 3D, un robot capable d'extruder le matériau et un logiciel spécialisé pour l'impression 3D béton. Pour développer sa solution de construction d'impression 3D, XtreeE a travaillé en collaboration avec un certain nombre de partenaires, dont l'un d'eux est la société de logiciels 3D Dassault Systèmes, avec laquelle ils ont conçu et imprimé un pavillon imprimé en 3D.



Image 18. Pavillon en béton imprimé par Xtreee et Dassault Systèmes

Le matériau qui est utilisé dans ce projet est un ciment expérimental développé par LafargeHolcim. Il s'agit d'un ciment conçu spécialement de manière à être jusqu'à 8 fois plus résistant que le ciment classique. Il a notamment été renforcé à l'aide de fibres métalliques, qui le rend plus résistant à d'éventuelles déformations et encaisse donc mieux les pressions extérieures. L'impression, quant à elle, a été effectuée avec un robot industriel multi-axes de la société suisse ABB baptisé IRB8700. L'utilisation de ce robot, a permis d'imprimer la toiture, un banc intégré, ainsi que les murs en une seule et même opération tout en optimisant la quantité de ciment utilisée afin d'obtenir une structure stable.

L'utilisation de la plateforme 3DEXperience de chez Dassault Systèmes a également permis d'optimiser l'impression et l'assemblage du pavillon, en réduisant le nombre d'éléments à imprimer et à acheminer et donc les coûts de transports et de fabrication.

Cette option devient ainsi de plus en plus viable pour les projets de construction de bâtiments du fait de la relative facilité et rapidité d'impression du béton. Elle pose néanmoins des questions au niveau de la composition de ces bétons et de leurs additifs.

Le potentiel du béton léger

Le béton léger est un matériau qui associe des capacités de portance à une isolation thermique renforcée. Ces deux fonctionnalités peuvent très certainement être optimisées en appliquant la technique de fabrication additive à la fabrication d'éléments en béton léger.

En imprimant des structures cellulaires dans les éléments imprimés, la conductivité thermique peut certainement être réduite et varier en fonction des densités plus élevées ou plus faibles, réagissant ainsi aux besoins locaux de la structure du bâtiment. De même, l'épaisseur des éléments peut être optimisée et ainsi varier en fonction des exigences fonctionnelles (Img. 19).



Image 19. Photo de la pose de la dalle en béton imprimé en 3D "The Smart Slab" par ETH Zurich

En sculptant la surface des éléments pour former des niches, des étagères ou des bancs, des mobiliers peuvent être directement intégrées. Les conduits techniques peuvent également imprimés sans effort supplémentaire.

En résumé, un mode de construction multifonctionnel et monolithique est rendu possible avec des avantages en terme d'économie des matériaux, de robustesse constructive et de recyclabilité.

b) Terre

Comme nous avons vu précédemment (Fig.8), de nombreux projets ont été traités par le biais de l'impression 3D en utilisant de l'argile.

Dans cette optique, le projet Pylos réalisé par Sofoklis Giannakopolous à l'IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) s'est concentré sur l'impression d'argile comme matériau de base pour la réalisation de colonnes complexes avec un bras robotisé. Ce projet s'est ensuite développé par la recherche de mélanges avec différents additifs, ce qui a conduit à la découverte d'argiles composites plus résistantes.



Image 20. Photo d'impression du projet Pylos

Sofoklis Giannakopoulos déclare alors que « l'argile peut être recyclée un nombre indéfini de fois » et qu'elle peut « être réutilisée après avoir été trempée dans l'eau et ne devient donc jamais un déchet qui nuit à l'environnement. »⁶



Image 21. Photo d'impression de colonnes en argile par bras robotisé - S. Giannakopolous à l'IAAC

⁶ archdaily.com/776261/iaac-researchers-pylos-3d-prints-with-soil

Le projet PaTerre+

De même, dans cette approche de recherche de terres composites, le projet PaTerre+ a permis de réaliser un inventaire des pratiques traditionnelles faisant appel à des interactions physico-chimiques entre les molécules constitutives des stabilisants organiques d'origine naturelle et les argiles de la terre.⁷

Ce projet a permis de mettre en évidence des tendances comportementales des stabilisants et des utilisations qui en découlent.

Il s'avère ainsi que les recettes à partir des **polysaccharides** sont les plus répandues. Ainsi, la cellulose, présente principalement dans les mélanges à base de fibres fermentées et de bouses de vaches, s'emploie sur tous les continents. De même, l'utilisation de colle d'amidon se répand de plus en plus, notamment en Europe ; l'amidon pur, de la féculle de pomme de terre ou du tapioca sont par ailleurs plus efficaces que l'emploi de farine de blé classique. Enfin, les gels ou gommes polysaccharides permettent généralement d'assouplir la consistance du mortier frais, ce qui facilite sa mise en œuvre.

Ce projet retrace également le patrimoine architectural de la terre et de ses stabilisants en offrant une classification des stabilisants naturels d'origine animale ou végétale. Il tente également de mesurer les performances, la durabilité et la compatibilité d'enduits de protection en terre stabilisée à l'aide de biopolymères. Ces pratiques permettent essentiellement d'améliorer la cohésion de la terre et/ou de diminuer sa sensibilité à l'eau, avec des résultats souvent très probants. En cela, ce projet présente un potentiel important pour les concepteurs d'aujourd'hui avec des possibilités d'applications à grande échelle.

En outre, des recherches hybrides sur des mélanges d'argile et de fibres de cellulose comme la "PaperClay" (terre papier - www.terrepapier.com) apparaissent également intéressantes.

⁷ VISSAC, A. & BOURGES, A. & GANDREAU, D. & ANGER, R. et FONTAINE, L., *Argiles et biopolymères - les stabilisants naturels pour la construction en terre*, Villefontaine, CRAterre, 2017.

c) Bois / Papier

L'utilisation de matériaux bio-sourcés comme le bois ou le papier à travers la récupération d'emballages cartons peuvent être des bonnes pistes pour appréhender la revalorisation des matériaux imprimés en 3D.

En effet, le designer Beer Holthuis a expérimenté, en 2018, l'impression 3D de papier recyclé en modifiant une imprimante RepRap et en y ajoutant un piston pour extruder la pâte (Img. 22). Il a donc développé une pâte à papier mélangée à un liant naturel, de sorte que les couches successives se collent les unes aux autres au fur et à mesure qu'elles sont déposées sur le plateau d'impression. Selon Beer Holthuis, la proportion de liant serait très minime, offrant la possibilité de recycler le matériau un grand nombre de fois.

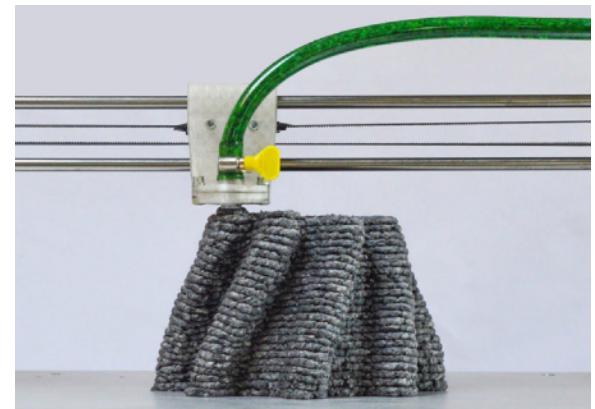


Image 22. Photographie du Paper Pulp Printer conçue par Beer Holthuis

La résistance de ces pièces imprimées en papier recyclé peut paraître limitée mais ces débuts sont encourageants dans l'intérêt d'une combinaison avec d'autres matériaux recyclables.

Combinaison Argile - Bois

Ce projet conçu par l'IAAC et réalisé par WASP dans le cadre de la recherche entreprise par l'Open Thesis Fabrication (OTF), vise à améliorer les possibilités de conception de systèmes d'impression 3D architecturaux polyvalents. WASP et l'IAAC ont ainsi collaboré sur un prototype d'un mur de 40 cm d'épaisseur fournissant un support pour les escaliers et les planchers en bois imbriqués. Ces travaux peuvent être considérés comme une première étape significative vers la réalisation de structures combinant l'utilisation du bois avec de la terre.



Image 23. Photographie du prototype de mur avec escalier imbriqué

À la lumière des résultats obtenus avec Gaia et ce projet, l'imprimante Crane WASP paraît être un outil utile pour transférer des logiques de conception dans des modèles de construction permettant facilement l'expérimentation de systèmes architecturaux innovants.

d) Plastique

Depuis 2015, plus de 6,9 milliards de tonnes de déchets plastiques ont été produits dans le monde et seulement 9 % ont été recyclés.⁸

Bien qu'il existe actuellement des méthodes de recyclage du plastique, ces méthodes sont souvent coûteuses et chronophages, ce qui entraîne le rejet de la majeure partie du plastique dans des décharges (79% du plastique selon National Geographic). Le plastique qui ne se dégrade pas complètement, finit bien souvent dans l'océan. Une solution pour réduire l'impact des déchets plastiques sur la nature serait de créer une méthode alternative de recyclage qui utilise la fabrication additive, pour créer un matériau de construction qui s'inscrit dans le concept de l'économie circulaire.

L'impression du PETG à partir de bouteilles plastiques ou d'autres sources, pourrait ainsi être utilisée pour élaborer des composants architecturaux fournit une preuve de concept de l'utilisation de plastique recyclé comme matériau de construction.

S'appuyant sur les expériences de MEAN dans la conception en impression 3D, le projet "Deciduous" (Img.24) est une exploration de la mise à l'échelle des processus vers le domaine architectural. Le pavillon est composé d'une hybridation de 3 matériaux différents: un parquet contreplaqué de bouleau fraisé CNC, une base en béton imprimée robotiquement en 3D et une série de tiges de PETG imprimées en 3D, un polymère plastique recyclé à partir de 30000 bouteilles d'eau jetées.



Deciduous
MEAN
Dubai
2020

Ce pavillon a été réalisé par fabrication additive en réutilisant 30 000 bouteilles d'eau en plastique. Il est exposé au Dubai International Financial Center et a pour objectif principal d'inviter les visiteurs à réfléchir sur la nature et la génération des déchets.

Image 24. Exposition du pavillon de Mean à Dubai

⁸ nationalgeographic.fr/le-plastique-en-10-chiffres

3 - Imprimer local / Penser global

a) La revalorisation des déchets, une nouvelle économie

Afin de faire face aux enjeux du changement climatique et de la surexploitation des ressources naturelles, de nombreux pays dont la France se sont notamment engagés dans la transition de leur modèle économique vers une économie durable.

Ainsi, la valorisation des matériaux biosourcés a connu un développement significatif ces dernières années.⁹ En effet, ces produits peuvent représenter un substitut aux matériaux conventionnels dans de nombreux secteurs d'application.

Le contexte politique et réglementaire actuel offre de réelles perspectives de développement à l'utilisation des matériaux biosourcés pour la construction de l'habitat. Ainsi, l'utilisation des matériaux biosourcés bénéficie d'atouts environnementaux intrinsèques reconnus notamment le stockage de carbone atmosphérique et la préservation des ressources naturelles. De même, ceux-ci peuvent apporter des réponses aux attentes d'un secteur particulièrement consommateur de matières premières et émetteur de gaz à effet de serre qu'est celui de la construction tout en s'appuyant sur des filières économiques locales à fort potentiel de croissance.

Le potentiel des matériaux de construction biosourcés trouve donc toute sa pertinence dans un contexte récent où l'on assiste à une montée en puissance de la notion de transition écologique.

Print your city

Dans la même veine, le projet "Print your City" ¹⁰ de l'agence The New Raw utilise l'impression 3D grand format afin de convertir les déchets plastiques quotidiens en mobilier urbain. Le projet a été lancé, dans un premier temps, à Amsterdam où plusieurs bancs de 50 kilos ont été créés avec les déchets produits par les habitants de la ville. Ce projet est mené par l'association The New Raw qui a par la suite étendu son initiative à Thessalonique, en Grèce. Différents meubles ont été imprimés en 3D, avec la même logique : bancs, pots de fleurs (Img. 25, 26 et 27). Les habitants peuvent ainsi directement venir dans un laboratoire dédié pour recycler leurs déchets et contribuer à cette dynamique d'économie circulaire.



Image 25. Photo de mobilier en plastique recyclé - The New Raw

⁹ Les matériaux biosourcés, enjeux stratégiques de la bioéconomie, Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction, Nomadéis, 2017

¹⁰ www.printyour.city



Image 26. Photo de mobiliers imprimés en plastique recyclé - The New Raw



Image 27. Photo de mobiliers imprimés en plastique recyclé - The New Raw

L'impression 3D prend alors tout son sens quand on parle de transition écologique du fait de la relocalisation de la production, de l'utilisation de matériaux recyclés ou bio-sourcés et de la réduction de pertes de matières premières (par rapport à la fabrication soustractive). Nous pourrions ainsi être à la fois producteurs et consommateurs de notre propre matière première grâce à des filières de recyclage locales et efficaces.

b) Les limites du recyclage

Le recyclage est qualifié par l'opération de revalorisation de déchets, retraités en substances, matières ou produits en fin de leur fonction initiale. Il concerne l'ensemble des techniques ayant pour objectif de récupérer des déchets et de les réintroduire dans le cycle de production dont ils sont issus. Le recyclage crée ainsi un nouveau cycle de vie du matériau en lui donnant une nouvelle forme et un nouvel usage.

Correctement réalisé, il réduit par conséquent l'utilisation de matières premières. Cependant il existe un certain nombre de limites à la mise en œuvre efficace de ce processus. Le recyclage peut en effet impliquer une grande consommation d'énergie et subseqüemment des coûts importants. Mais d'autres limites apparaissent également dans le recyclage : tout les matériaux ne peuvent pas être recyclés et ceux qui sont recyclables doivent l'être séparément.

Enfin, les matériaux peuvent être recyclés un nombre limité de fois en raison de leur dégradation à chaque processus (**décyclage**). Cette dévalorisation pose alors la question de la résistance structurelle de matériaux recyclés et par extension des normes et réglementations qui leurs seront appliquées.

c) Une nouvelle écologie pour un nouvel écosystème

L'impression 3D a donc le potentiel de changer la chaîne de production architecturale (Fig. 11). On passerait d'un système linéaire global actuel à un nouveau système circulaire dans lequel la construction locale est combinée avec la connaissance globale.

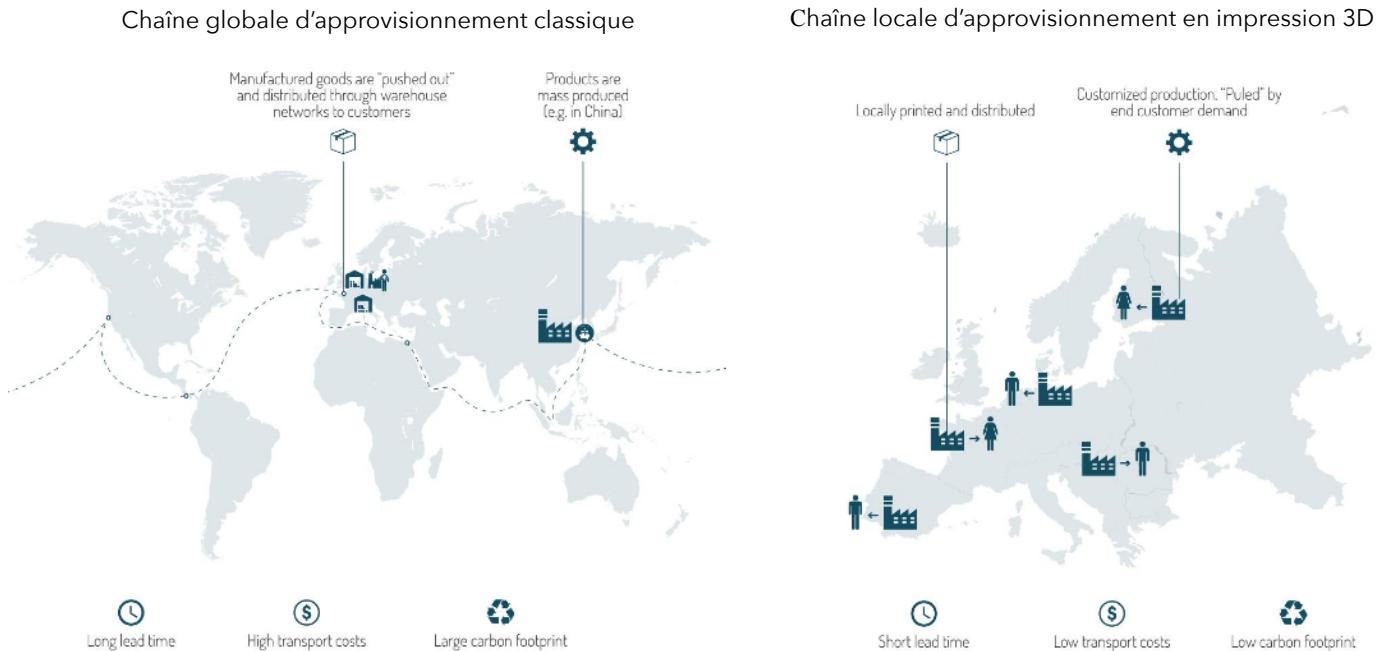


Figure 11. Cartes des chaînes d'approvisionnement, dans *A Performative Approach To 3D Printed Architecture*, Luca Breseghello

Agir localement tout en pensant globalement serait donc une façon de résoudre le défi écologique qui nous attend.

La partie suivante permettra alors de mettre en pratique cette idée de conception locale d'architectures avec l'utilisation de matériaux recyclés.

Partie III _ Expérimentation

Concevoir avec le local

Dans cette partie, il s'agira de mettre en oeuvre les connaissances précédentes afin d'expérimenter à travers la production physique d'un élément de construction et son potentiel à être efficacement introduit dans des exemples d'architecture.

Les résultats finaux seront discutés et des conclusions seront tirées concernant les possibilités et les limites de l'expérimentation proposée. De même, des suggestions d'améliorations supplémentaires seront proposées, en tenant compte des questions liées à l'efficacité du processus.

Le but de cette expérimentation est donc d'analyser le potentiel de la fabrication simple et efficace d'un élément de construction à morphologie complexe à l'aide d'un mécanisme robotisé de type Contour Crafting. Elle permettra ainsi de démontrer qu'il est possible de développer l'impression 3D comme une méthode de construction à partir de matériaux naturels, recyclables et trouvés localement.

Cela permettra de démontrer son potentiel à être introduit dans des scénarios de construction réels et permettre de résoudre des problèmes liés au coût et au temps de construction. En outre, il sera question de préserver la stabilité structurelle du matériau utilisé.

L'objectif de cette expérimentation est de montrer qu'il est possible de développer l'impression 3D comme une méthode de construction à partir de matériaux naturels, recyclables et trouvés localement.

Les étapes du processus d'expérimentation se décomposent comme ci-dessous :



Figure 12. Schéma du déroulement du processus d'expérimentation

1 - Expérimenter à travers la conception

a) Concevoir avec un logiciel de CAO

La première étape du processus consiste à concevoir des objets et de les exporter en fichiers **STL**.

Pour les premiers tests, l'objet a simplement été modélisé rapidement sur Rhinocéros afin de produire une forme relativement simple à imprimer : un cône tronqué (Img. 28).

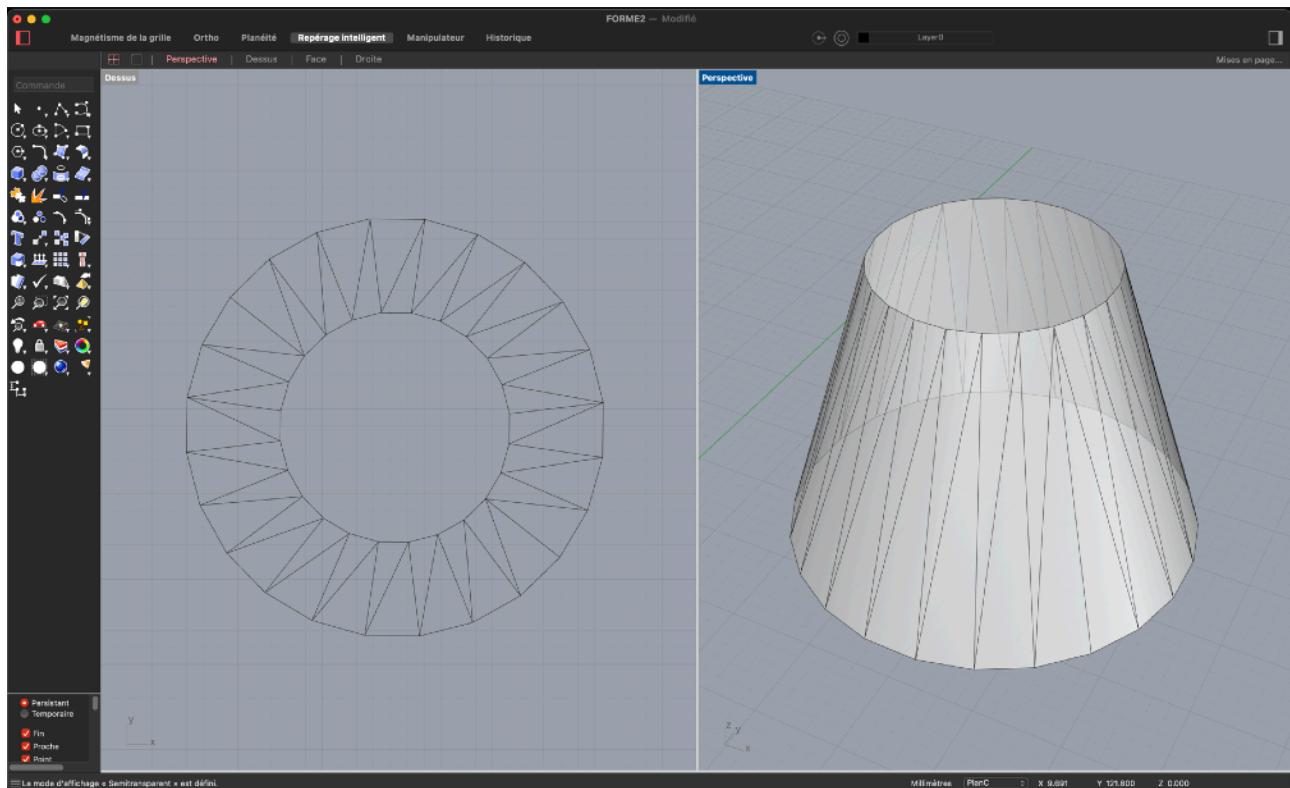


Image 28. Capture d'écran du cône tronqué réalisé sur le logiciel Rhinocéros

Ce solide a ensuite été modifié pour obtenir une géométrie plus complexe à imprimer (Img. 29) pour les tests suivants. Enfin, pour les derniers tests, la conception de la géométrie est réalisée à l'aide d'un script informatique produit sur Grasshopper (Img. 30). Cela présente l'avantage pour le concepteur de pouvoir facilement et rapidement faire des ajustements de la géométrie dans le processus de conception. Ainsi, plusieurs variantes de conception peuvent être testées et imprimées de manière plus rapide (boucle de rétroaction courte).

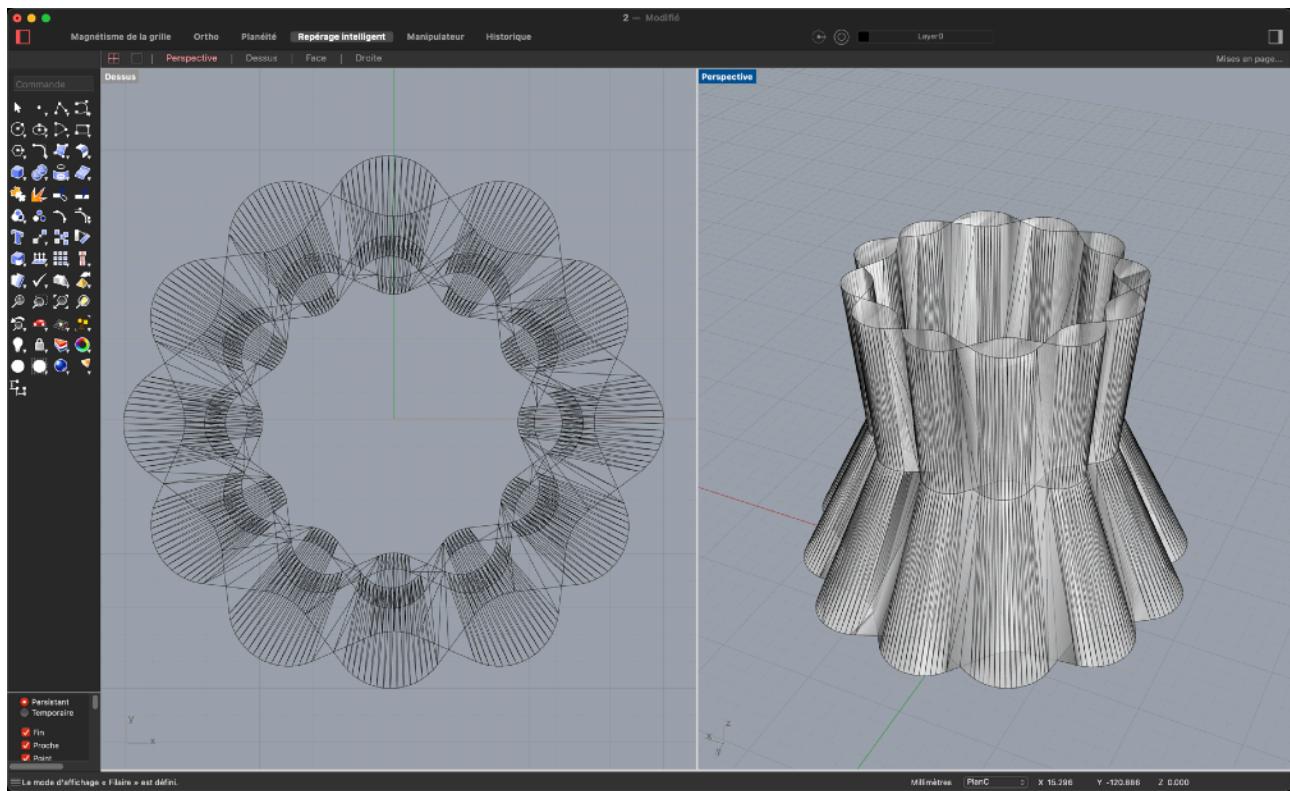


Image 29. Capture d'écran d'un solide réalisé sur le logiciel Rhinocéros

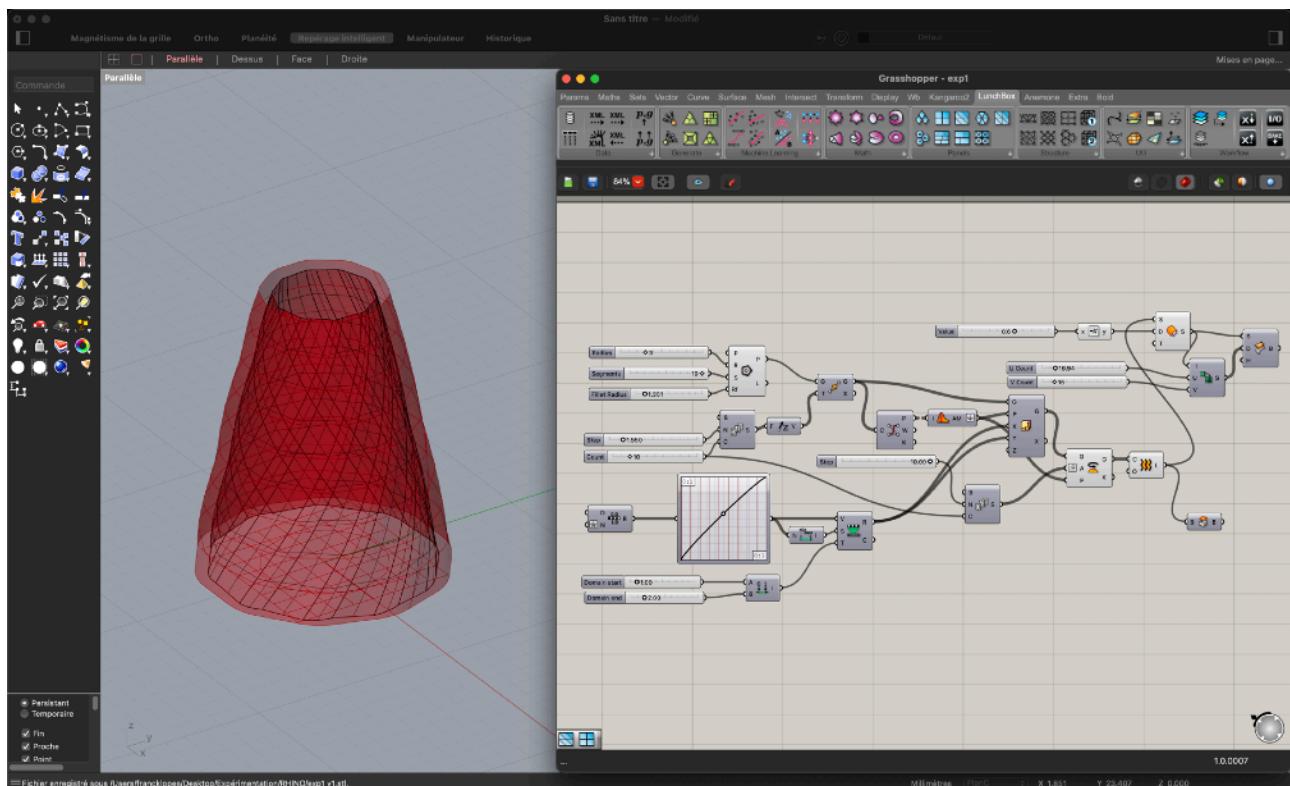


Image 30. Capture d'écran d'un solide réalisé avec un script Grasshopper

L'étape suivante du processus se résume à charger le fichier STL précédemment exporté dans le **slicer** Cura.

b) La traduction de l'élément 3D

Pour traduire l'élément conçu avec le logiciel de CAO, il est nécessaire de passer par un slicer. J'ai ainsi utilisé Cura, un logiciel libre de tranchage (slicer en anglais) pour impression 3D fourni par la société Ultimaker.

Cura fonctionne en découplant le modèle numérique en couches (Img.31) et en générant un g-code spécifique à l'imprimante. Une fois créé, le g-code peut être envoyé à l'imprimante pour la fabrication de l'objet physique.

L'image 32 présente l'interface du logiciel Cura ainsi que l'onglet des paramètres (en vert).

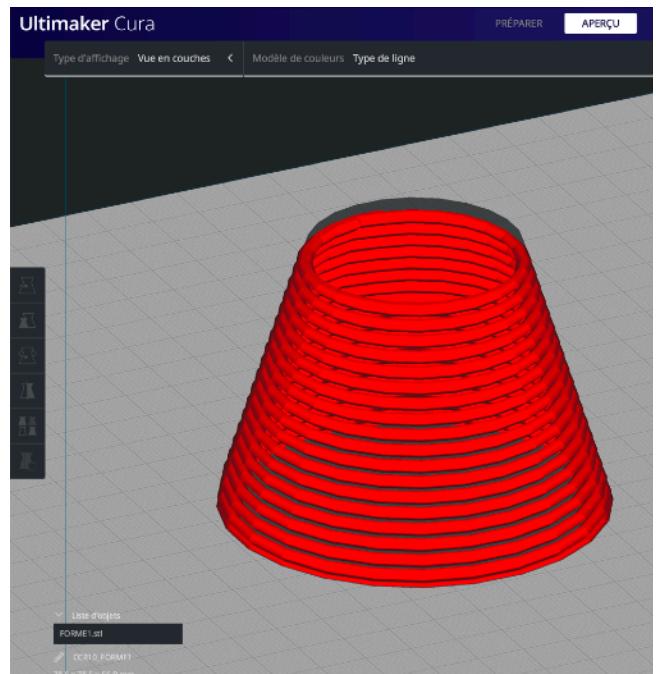


Image 31. Capture d'écran du découpage de la pièce 3D sur le logiciel Cura

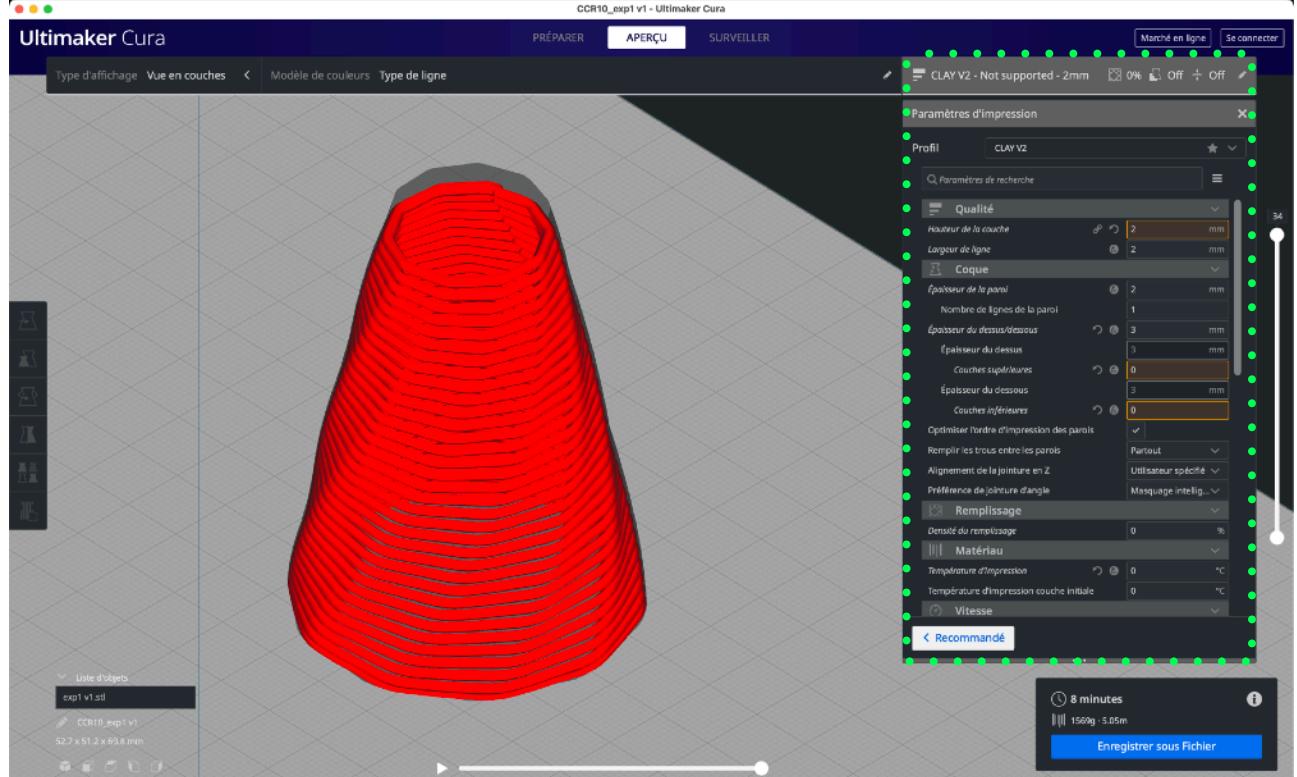


Image 32. Capture d'écran de l'onglet des paramètres d'impression (en vert) sur Cura

La pièce numérique est ainsi découpée (Img. 31 et 32) et traduite dans un tracé (en rouge) qui correspond au parcours de la buse de l'imprimante (Img. 33, 34, 35 et 36).

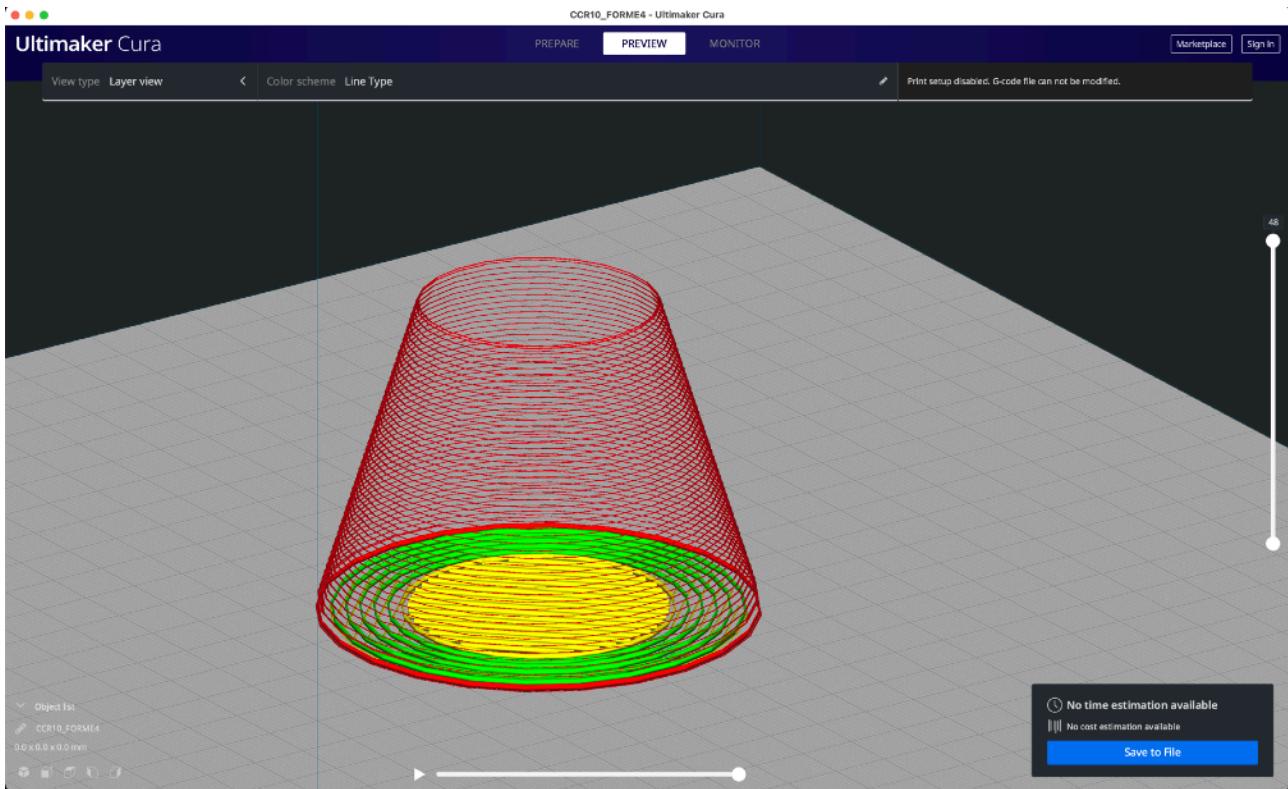


Image 33. Capture d'écran du trajet réalisé (en rouge) par la buse pour imprimer la pièce en 3D sur Cura

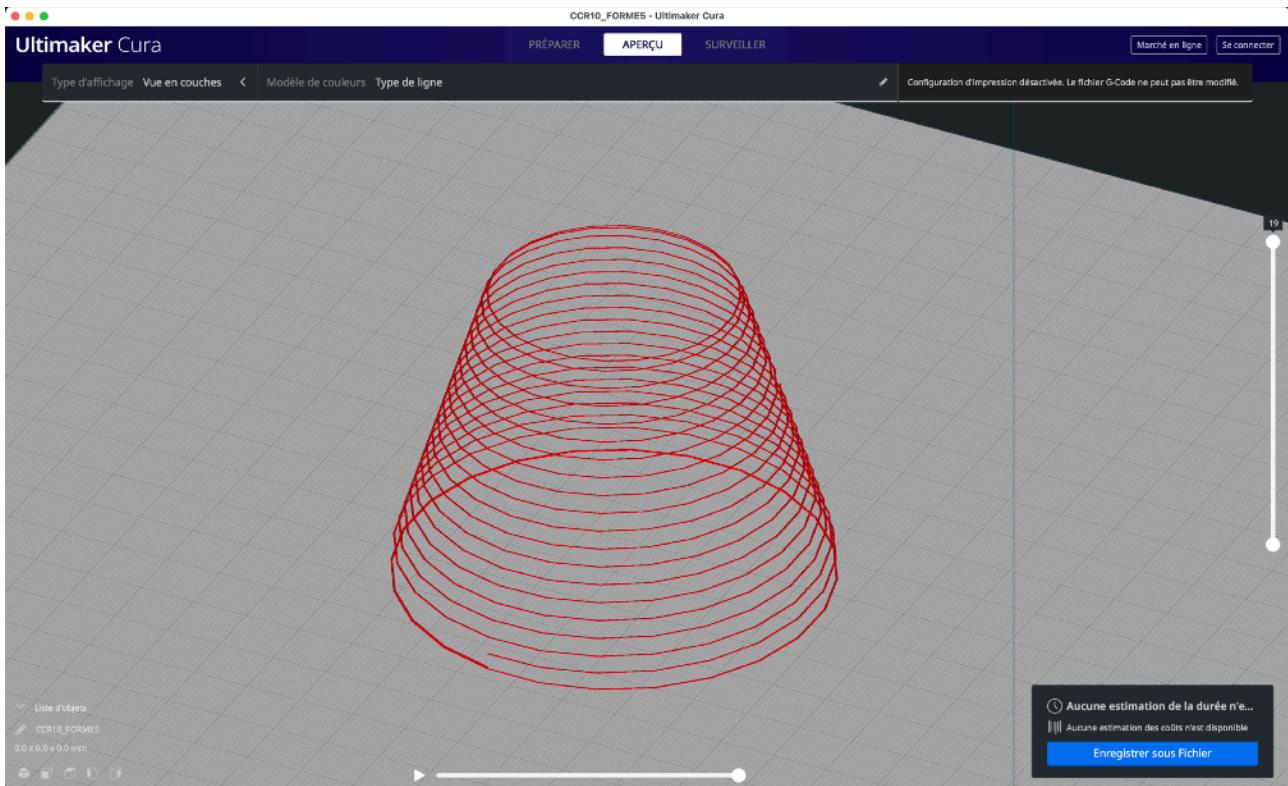


Image 34. Capture d'écran du trajet réalisé (en rouge) par la buse pour imprimer la première forme réalisée

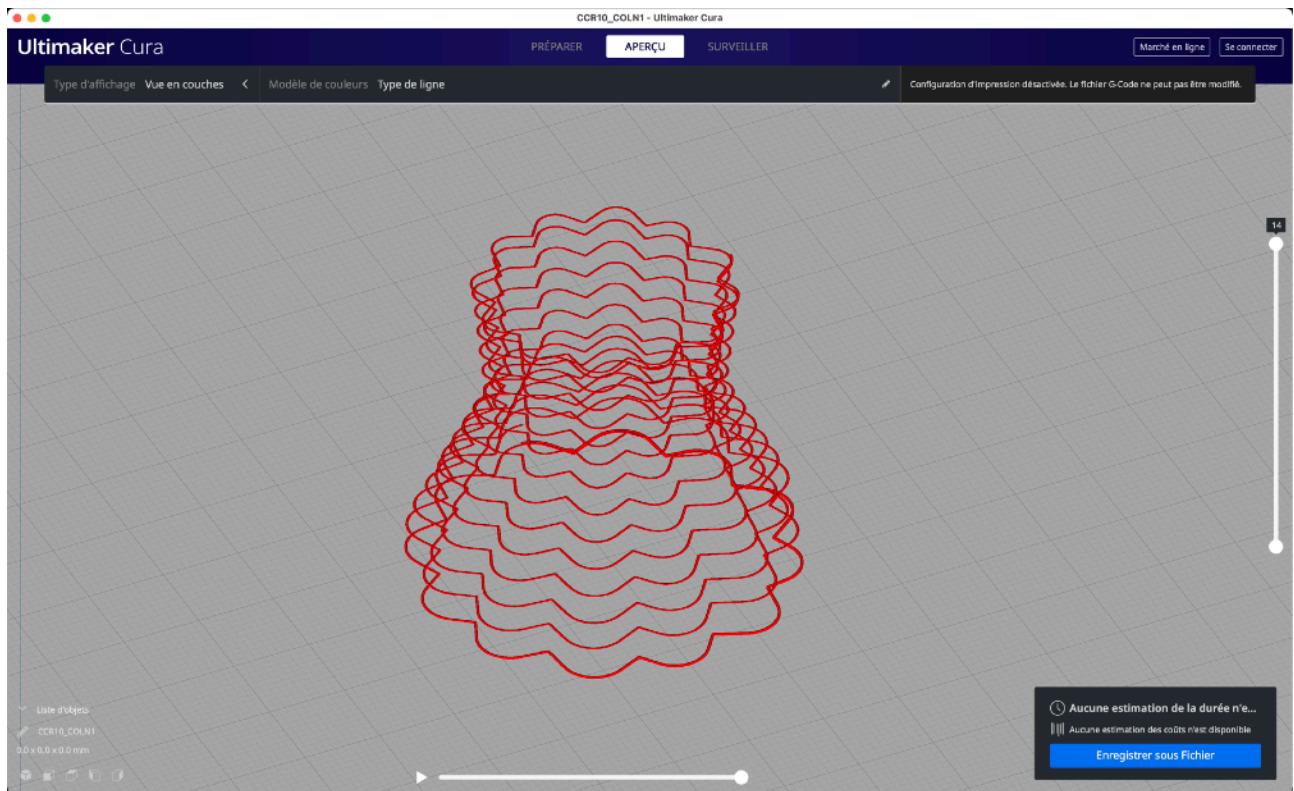


Image 35. Capture d'écran du trajet réalisé par la buse pour imprimer la deuxième forme réalisée

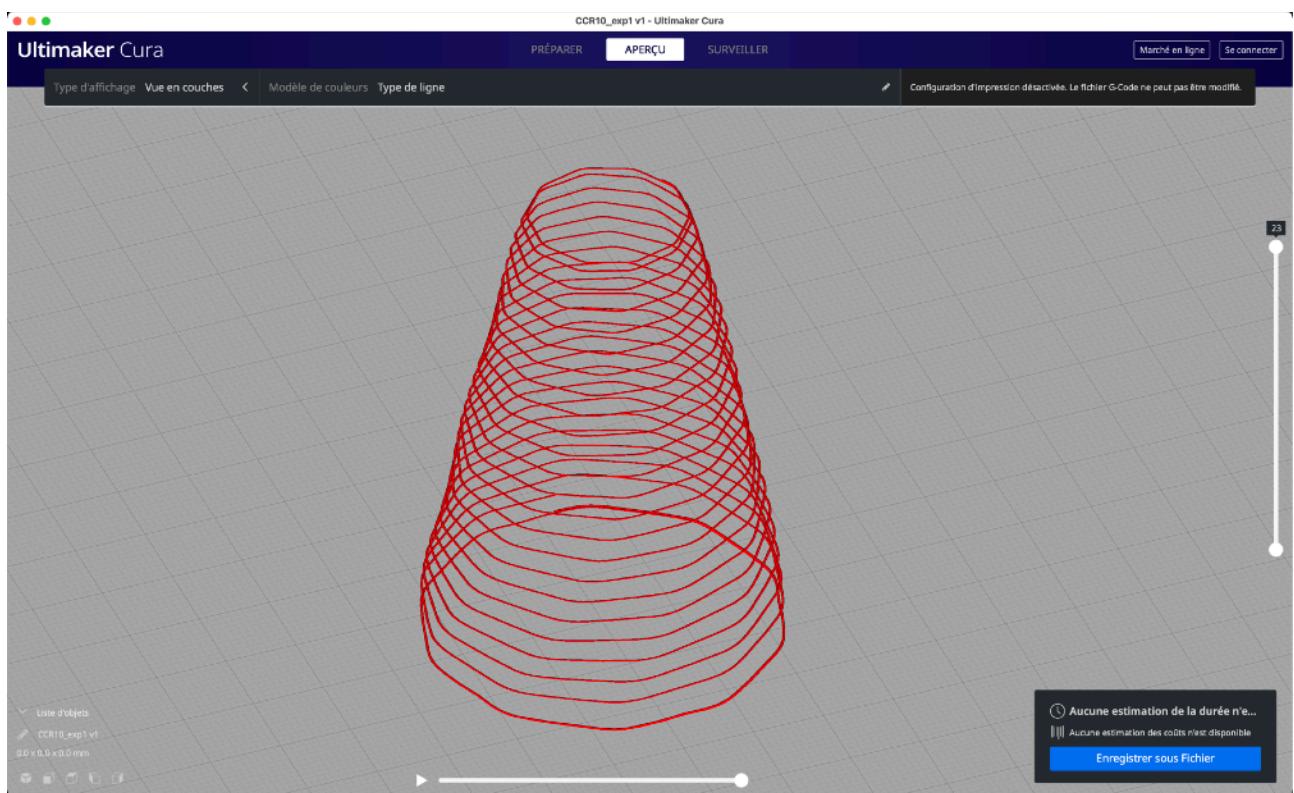


Image 36. Capture d'écran du trajet réalisé par la buse pour imprimer la troisième forme réalisée

Une fois le fichier STL bien chargé et son placement configuré, il est nécessaire de définir les paramètres d'impression. L'étape suivante consiste donc à configurer parallèlement l'imprimante et les paramètres d'impression en fonction des matériaux choisis ce qui sera l'objet du prochain chapitre.

2 - Expérimenter à travers l'impression

a) La question des ressources

L'objectif de ma démarche est de composer avec des matériaux les plus locaux possible. Je devrais donc élaborer et tester des mélanges de matériaux composés de matières premières issues de mon environnement et qui soient recyclables.

La Terre

La terre comme matériau de construction est utilisée depuis de nombreux siècles. En effet, elle offre des avantages d'isolation naturelle, de protection contre les incendies, de circulation d'air, de rigidité, de faible coût et enfin de recyclage. L'importance de ce matériau pour l'expérimentation n'est donc pas seulement liée à son existence en grande quantité, mais également à la diminution du degré d'énergie intrinsèque au processus de fabrication.

Pour la fabrication additive d'argile, on a pu voir que la technique utilisée par l'entreprise WASP notamment, est celle d'une matière mise sous pression, stabilisée au moyen d'un liant et extrudée. Afin de reproduire cette technique à mon échelle, j'ai dû chercher une technique qui permette de compresser la matière pour l'extruder.

Le papier

Issue de la récupération de papier et de carton, les fibres (de cellulose) qui les composent peuvent servir pour faire de nouvelles matières premières. Elles peuvent ensuite être stabilisées grâce à des liants.

Etant donné la qualité fragile de ces deux matériaux, l'expérimentation sera l'occasion d'étudier le comportement de l'argile et du papier lorsqu'ils sont mélangés à d'autres ingrédients recyclables, afin d'avoir une meilleure compréhension du matériau et des composites potentielles.

Le plastique

Issue de la récupération de déchets plastiques telles que les bouteilles d'eau, l'impression de plastique n'a pas cependant pas pu être testé du fait qu'il soit nécessaire d'avoir une broyeuse capable de transformer ces déchets plastiques en matériau de base imprimable.

b) La configuration

Le principe de fonctionnement de l'impression 3D par dépôt de matière consiste donc en un dépôt sélectif de matériau à l'état plastique à travers un orifice sur une plate-forme qui supporte la première couche. Le matériau est extrudé à travers la filière de la buse avec une section transversale circulaire, et une fois déposé, il adopte une section transversale oblongue, qui se déforme elle-même contre la plateforme ou la couche inférieure (Fig. 13).

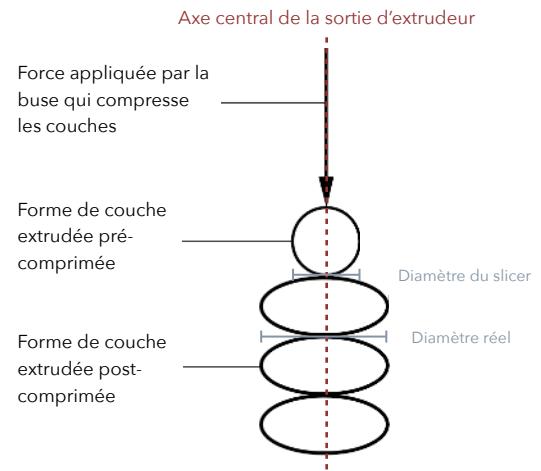


Figure 13. Schéma de la variation de diamètre du dépôt de matière

La maîtrise de la relation entre la vitesse d'extrusion et le mouvement de l'extrudeur est donc essentielle afin d'assurer à la fois une précision dimensionnelle globale, une épaisseur des parois uniforme ainsi qu'une constitution homogène des couches déposées. Bien que les variables géométriques du processus sont définies précisément par des paramètres au moment du tranchage de la pièce par le slicer, le flux d'extrusion peut varier en fonction des propriétés **rhéologiques** du matériau et de son comportement dans le dispositif d'extrusion.

Afin de pouvoir imprimer en 3D ce type de matériaux visqueux, il y a principalement trois mécanismes d'extrusion possibles (Fig. 14)

- L'extrusion pneumatique
- L'extrusion par piston
- L'extrusion par vis sans fin

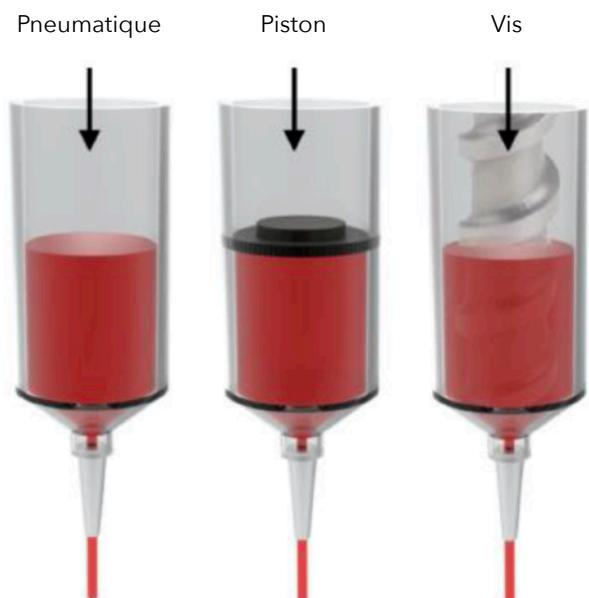


Figure 14. Représentation des 3 mécanismes d'extrusion de matériaux visqueux

Chacun de ces mécanismes offrent des avantages et des inconvénients que l'on peut détailler comme ci-dessous.

Compression d'air vs mécanique

L'impression d'argile avec une tête d'impression à vis sans fin alimentée en argile via un système de compression d'air paraît fonctionner comme en témoignent les projets réalisés par WASP. Cependant, l'utilisation de la technique de compression d'air présente certains inconvénients.

Tout d'abord, elle peut créer un danger pour la sécurité si les matériaux et les systèmes de sécurité appropriés ne sont pas utilisés. Deuxièmement, ce système nécessite un compresseur d'air imposant et bruyant. Troisièmement, celui-ci doit être contrôlé indépendamment du logiciel de l'imprimante et de celle-ci : sans lien avec l'interface logicielle, le système à compression d'air doit être réglé "manuellement". Cela complique le système, car il nécessite alors une synchronisation des systèmes analogiques (compression d'air) et numériques (impression du fichier).

Alimentation mécanique

Un système d'alimentation mécanique peut être qualifié de «volumétrique», car il peut mesurer précisément le volume de matière extrudé. Ceci est très important dans le cas de l'argile, qui est un matériau particulièrement complexe (fluide non newtonien) dont les propriétés peuvent varier considérablement d'un jour à l'autre à mesure que les conditions climatiques changent. Par conséquent, l'utilisateur d'un système de compression d'air est susceptible de passer un temps considérable à régler précisément l'alimentation en pression contrairement à système mécanique.

Le système d'alimentation mécanique permet donc de travailler avec une plus grande précision pour imprimer à grande échelle.

Cependant, au fil du temps, une alimentation mécanique sous entend une usure des parties mécaniques qui la composent.

Afin de pouvoir expérimenter l'impression de matériaux visqueux, j'ai donc dû modifier l'extrudeur de mon imprimante FDM qui imprime normalement du filament plastique. Pour cela, je me suis basé sur un modèle pré-existant partagé sur la plate-forme Thingverse : Paste Extruder par der_coco¹¹ (Img.15).

Matériel nécessaire à l'expérimentation

- Imprimante 3D déjà configurée
- Moteur pas à pas Nema 17
- Vis sans fin T8 150 mm (pas 2 mm, diamètre 8 mm) avec écrou
- Coupleur d'arbre (5 mm à 8 mm)
- Seringue 60 ml + embout



Matériel à imprimer en 3D

Afin d'assembler le tout, il est nécessaire d'imprimer le piston, le cadre ainsi qu'un support pour monter cette nouvelle extrudeuse à mon imprimante.

Figure 15. Représentation 3D de l'extrudeuse une fois assemblée

Installation

Il faut assembler les pièces imprimées avec le moteur, la vis sans fin, le coupleur et la seringue. Le câble du moteur pas à pas doit être branché là où le moteur de l'extrudeuse ordinaire est généralement branché.

Il faut ensuite régler les paramètres d'impression au niveau du logiciel afin qu'il corresponde à celui du diamètre de la buse utilisée.

La configuration finale de l'installation se fait par le calcul du multiplicateur d'extrusion ainsi que de la vitesse d'impression ce qui permettra un débit parfait du matériau imprimé.

L'objectif principal de l'utilisation de cette extrudeuse est sa relative simplicité quand à la demande de matériaux annexes et de son assemblage. Seuls certains paramètres du slicer devront être modifiés afin de permettre une impression correcte pour le matériau utilisé.

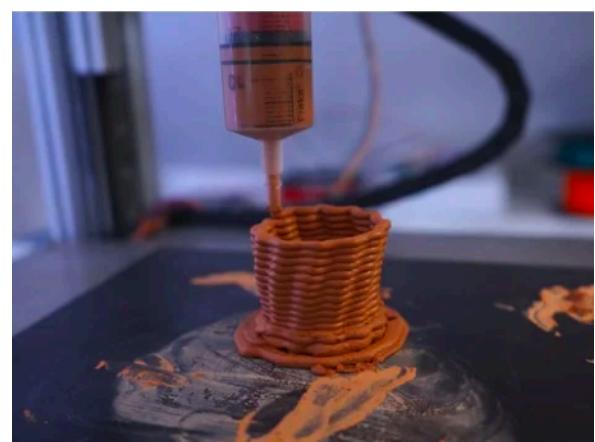


Image 37. Résultat d'impression d'argile par Constantijn

¹¹ thingiverse.com/thing:3487917

Mise en place

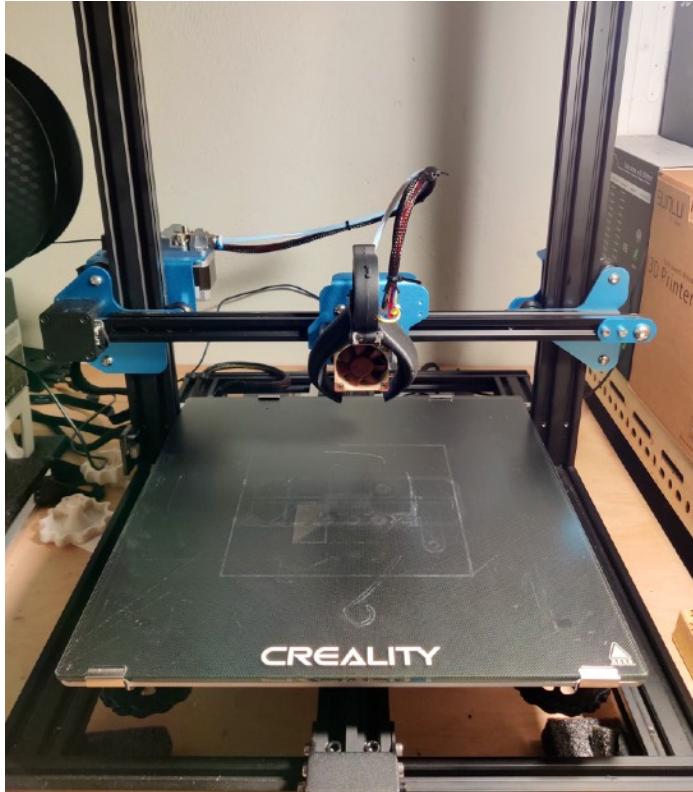


Image 38. Photographie de mon imprimante 3D avec l'extrudeuse d'origine

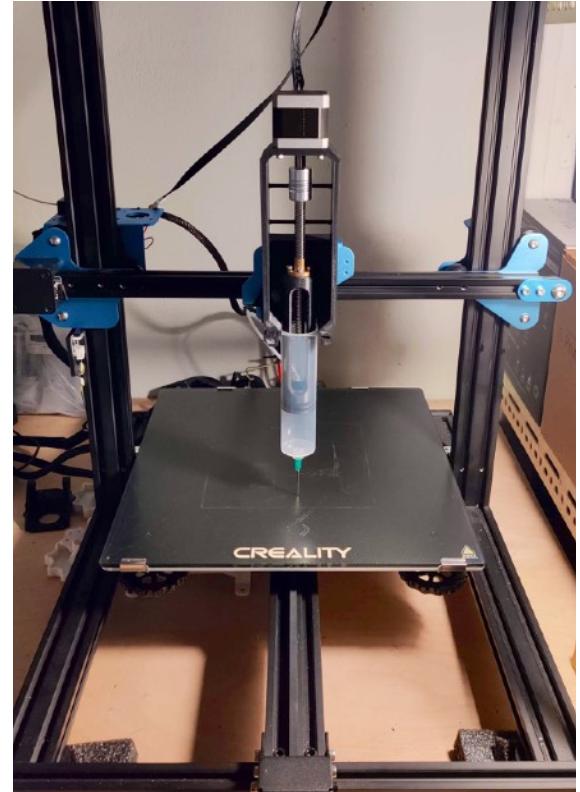


Image 39. Photographie de mon imprimante 3D avec la nouvelle extrudeuse installée



Image 40. Remplissage de la seringue avec de l'argile



Image 41. Mise en évidence des bulles d'air dans la seringue

Paramètres d'impression

La première étape du paramétrage consiste donc à régler le multiplicateur d'impression, directement sur l'imprimante, ce qui définira le flux de matière sortant.

Calcul du multiplicateur d'extrusion :

Pour déterminer le multiplicateur d'extrusion théorique optimal, il est nécessaire de calculer la différence entre l'ancien et le nouveau paramétrage.

Le multiplicateur d'extrusion optimal utilisé avant le changement d'extrudeuse était de 93.00 E-steps/mm.

Ancien paramètre :

Impression avec fil plastique de 1,75mm d'épaisseur

Rayon extrudeuse = 5 mm

Circonférence = $2 \pi R$

Circonférence = $2 \times \pi \times 5$

Circonférence = 31,41 mm

Volume extrudé = $\pi \times (\text{Rayon})^2 \times h$

Volume extrudé = $\pi \times (1,75/2)^2 \times 31,41$

Volume extrudé = 75,54 mm³/révolution

Nouveau paramètre :

Impression avec seringue de 60mL

d=2mm/révolution

1mL = 1000 mm³

Taille de la seringue 60 mL (=) 90 mm

Volume extrudé = 1333,33 mm³/révolution

Différence Ancien / Nouveau paramètre = 75,54 / 1333,33 = 0,05665 = 5,66%

Le nouveau multiplicateur d'extrusion optimal après le changement d'extrudeuse est donc de 5.66 E-steps/mm.

Une fois le nouveau paramètre rentré dans l'imprimante, l'étape suivante consiste à régler les paramètres suivants d'impression directement dans Cura.

Les paramètres sont catégorisés de la manière suivante :

Qualité

- Épaisseur de couche : hauteur de chaque couche déposée.
- Épaisseur de coque : correspond aux parois verticales de l'objet. Il est en général conseillé de rentrer un multiple de la taille de la buse (ici 2mm).

Remplissage

- Taux de remplissage : réglage de la densité de remplissage. Ce paramètre a une influence directe sur la durée de l'impression. Plus il y aura plus de matière à déposer, plus le temps d'impression sera long.

Vitesse

- Vitesse d'impression : vitesse d'impression générale.
- Vitesse de positionnement : il s'agit de la vitesse de déplacement entre les dépôt successifs.
- Vitesse de la première couche : il est préférable d'effectuer une première couche lentement afin qu'elle adhère bien au plateau.

Température

- Température d'impression : la température d'extrusion n'est pas utile ici étant donné que l'extrudeur ne chauffe pas.

Rétractation

Pour éviter d'avoir des écoulements indésirables aux endroits où l'extrudeur fait des rétractions, ce paramètre doit être calibré (vitesse et longueur) afin de ne pas rétracter trop ou pas assez.

Enfin, après ces derniers ajustements, on peut exporter le modèle et ces paramètres en fichier gcode.

Mais avant d'exporter le gcode, il est préférable de visualiser à quoi va ressembler l'impression. Pour cela, on affiche le "Mode de visualisation" en "Couches" afin de voir l'objet tel qu'il sera reproduit par l'imprimante. Ensuite, on peut exporter le gcode dans une carte mémoire qui sera lisible dans l'imprimante 3D et l'imprimer.

c) L'impression

Les mélanges d'argiles

Afin de comprendre quel proportion d'argile peut être imprimée avec la configuration de mon imprimante, j'ai dû concevoir plusieurs mélanges avec des proportions d'argile et d'eau. Le tableau X ci-dessous regroupe les proportions testées :

Matière	Mélange n°1	Mélange n°2	Mélange n°3	Mélange n°4	Mélange n°5
Argile	60 %	70 %	80 %	85 %	90 %
Eau	40 %	30 %	20 %	15 %	10 %

Tableau 3. Liste des différents mélanges réalisés avec de l'argile

Suite à des tests d'écoulement avec la seringue il apparait que les deux premiers mélanges sont beaucoup trop liquides pour être imprimés correctement et que le mélange n°5 est beaucoup trop visqueux pour être imprimé avec la pression délivré par le moteur d'extrusion dans la seringue (Img. 43).



Image 42. Photo du mélange n°3



Image 43. Photo d'impression du mélange n°5

Premier test

Lors de ce premier test d'impression, le mélange n°3 a été testé.

Ce premier test n'as pas été très concluant car il s'est avéré que la pâte était encore un peu trop liquide. De même, les paramètres utilisés pouvaient êtres améliorés. En effet, pour cette impression, le paramètre de hauteur des couches était très faible ce qui a engendré un écrasement des couches d'argiles entre elles. Enfin, le fait d'avoir une sortie d'extrusion courte en fin de seringue a généré une accentuation de l'écrasement intercouche et par conséquent un affaissement général de la pièce (Img.44).



Image 44. Photo du résultat d'impression du premier test

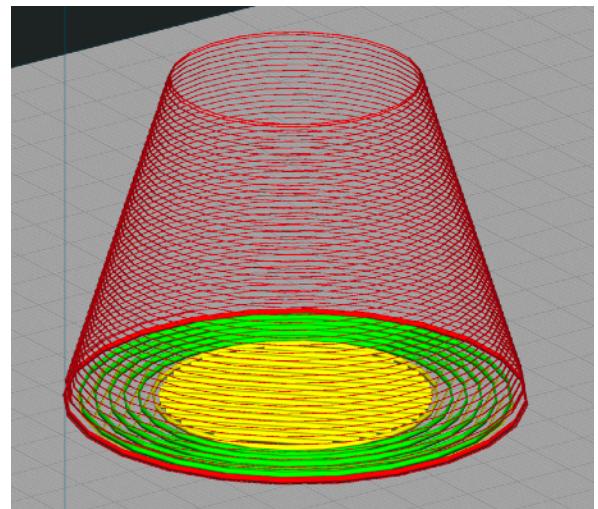


Image 45. Capture d'écran du trajet simulé, de la buse, par Cura pour imprimer la pièce 3D

Pour le prochain test, les résolutions suivantes doivent êtres effectuées :

- La sortie d'extrusion doit être étendue (Img. 47).
- Le mélange d'argile choisi doit être plus visqueux.
- La hauteur des couches doit être ajustée afin de permettre un meilleur flux de matière et éviter que la buse ne se bouche.
- Lors du chargement de la seringue en argile, une attention particulière doit être mise sur la présence de bulles d'air.

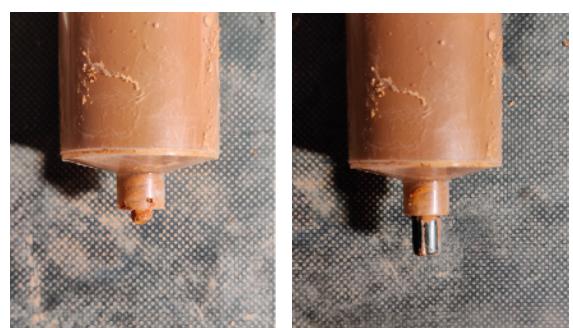


Image 46 et 47. Photo avec/sans extension d'embout de la seringue

Deuxième test

Lors de ce deuxième test d'impression, le mélange n°3 a été de nouveau utilisé. Cependant il s'est avéré que la pâte n'était pas assez visqueuse pour tenir sur elle-même à certains endroits. De même, certains paramètres utilisés pouvaient encore être améliorés. La modification des hauteurs de couches, visible sur l'image (& a permis une meilleure cohésion de l'impression, mais il apparaît que le flux d'extrusion d'argile est trop élevé. De plus, le fait d'imprimer la base de la pièce avec un remplissage a engendré un important dépôt de matière au niveau de celle-ci et a produit "une jupe" (Img.50).



Image 48, 49 et 50. Photos des résultats d'impression du deuxième test

Pour le prochain test, les résolutions suivantes doivent donc être effectuées :

- La hauteur des couches doit être encore ajustée afin d'éviter que les couches s'écrasent entre elles.
- Le paramètre d'extrusion doit être abaissé afin d'obtenir un meilleur flux de matière.
- Une méthode d'extrusion continue sans remplissage doit être appliquée.

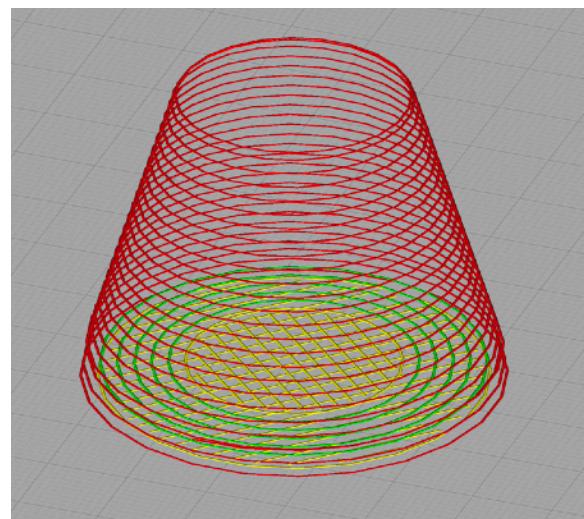


Image 51. Capture d'écran du trajet simulé, de la buse, par Cura pour imprimer la pièce 3D

Troisième test

Le troisième test s'est révélé plus satisfaisant du fait de l'expérimentation avec le mélange plus visqueux n°4. La forme est encore conservée mais cette fois-ci le paramètre de spiralisation de contours a été utilisé (Img.54). Cette fonction permet d'imprimer en "une seule fois" le modèle, c'est-à-dire, d'imprimer avec un trajet sans discontinuités. Du fait de l'extrusion continue que ce paramètre engendre, il n'est donc pas possible d'interrompre celle-ci. On note tout de même qu'une bulle d'air présente dans la seringue (tel que monté sur l'image 41) à occasionné un dépôt soudain et plus important d'argile au milieu de la pièce (Img.52).



Image 52. Photo du résultat d'impression du troisième test

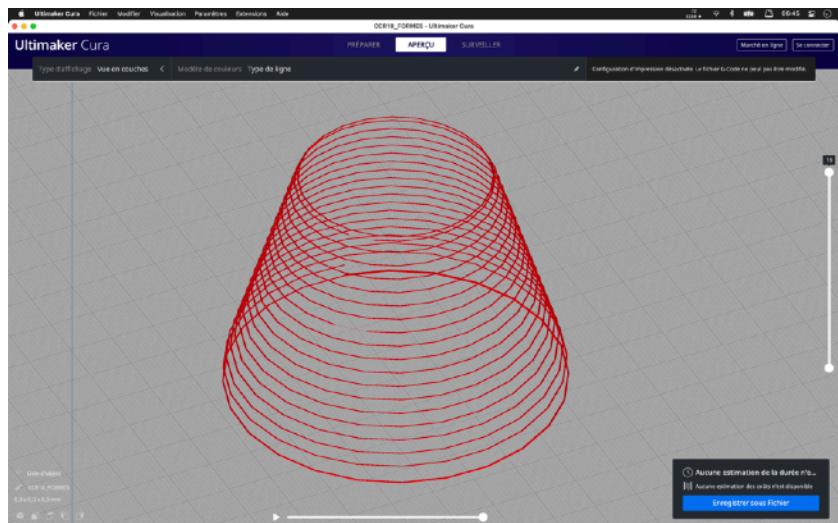


Image 53. Capture d'écran du trajet simulé, de la buse, par Cura pour imprimer la pièce 3D

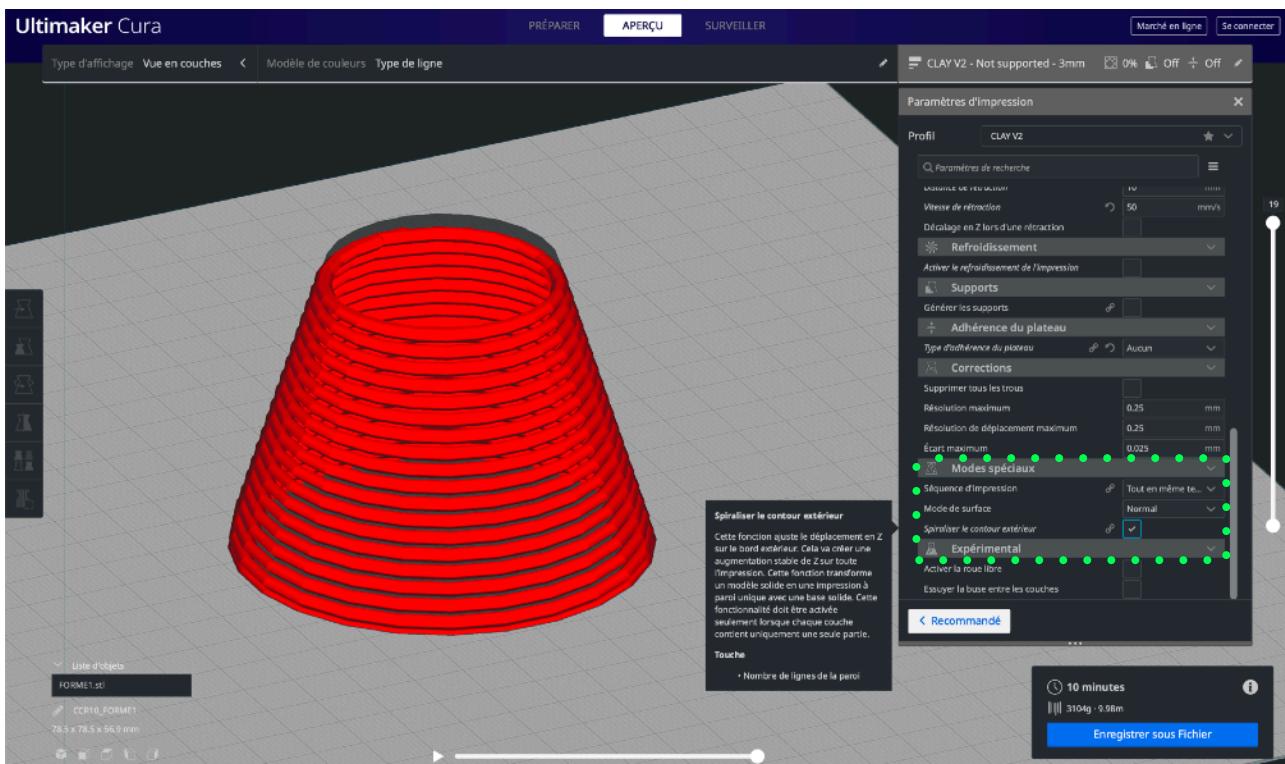


Image 54. Capture d'écran de la fonction de spiralisation de contours dans Cura

Quatrième test

Le quatrième test a été l'occasion d'expérimenter avec une autre forme conçue sur Rhinocéros. En effet, pour ce test, j'ai voulu expérimenter le comportement de l'impression du mélange d'argile n°4 dans l'application de formes un peu plus complexes.

L'impression s'est dans ce cas-là bien passée du fait de la recherche itérative des paramètres optimaux d'impression. Mais lors du séchage de la pièce, des fissures sont apparues à certains endroits clés de la pièce (Img.56). Du fait de la composition en eau de l'argile (la rendant malléable), celle-ci s'évapore progressivement au fur et à mesure du processus de séchage, rétractant donc l'argile. Ce retrait crée des tensions dans l'argile, ce qui à terme peut créer des fissures plus ou moins profondes. Il est donc essentiel que le processus de séchage soit réalisé dans une atmosphère homogène et légèrement humide. Ainsi tous les éléments peuvent sécher au même rythme.



Image 55. Photo de l'impression réalisée lors du quatrième test

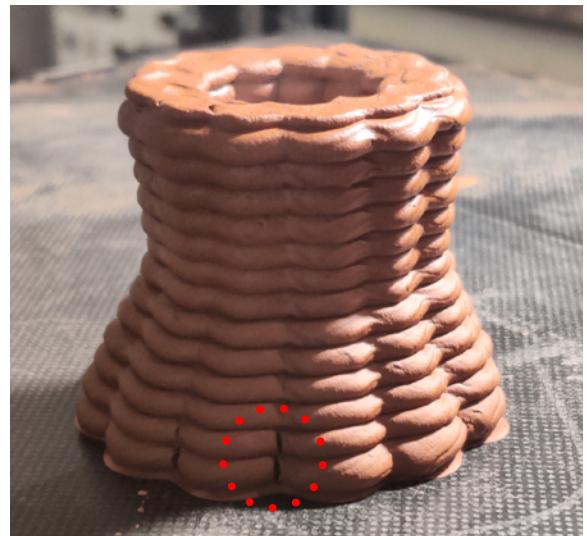


Image 56. Photo de fissures (en rouge) apparues après séchage

Comme nous l'avons précédemment dans la partie 2 avec les projets de WASP, l'utilisation de fibres dans ce type de mélange peut empêcher un retrait trop important de l'argile lors de l'évaporation d'eau.

Cinquième test

Le cinquième test a été l'occasion d'expérimenter une forme générée avec un script Grasshopper. Deux paramètres d'épaisseurs de parois ont donc été testés. La première de 4 mm (Img.59) et la seconde de 2 mm (Img. 60). L'impression de la première s'est moins bien déroulée que la seconde car l'épaisseur de matière déposée a engendré un flux trop important de matière qui s'est retrouvé en suspension et à déstabilisé les couches de matières supérieures (Img.58).

Comme, le test précédent, on retrouve également des fissures qui se produisent lors du séchage de la pièce (Img.57).

Lien du timelapse réalisé lors de ce test : [Google Drive](#).



Image 61. Photo de l'impression (2e paramètre) réalisée lors du cinquième test

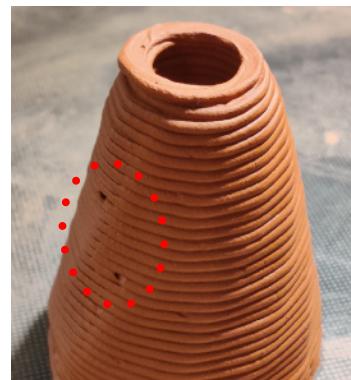


Image 57. Photo de fissures (en rouge) apparues après séchage



Image 58. Photo de l'impression (1er paramètre)



Image 59. Largeur de paroi avec le premier paramètre

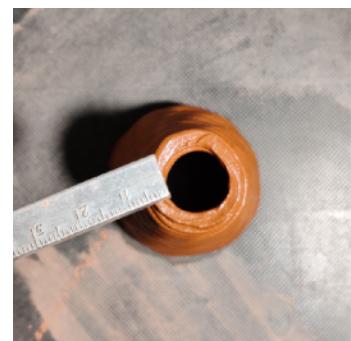


Image 60. Largeur de paroi avec le second paramètre

Sixième test

Pour ce dernier test, j'ai décidé d'expérimenter l'utilisation de matériaux cellulosiques à travers l'impression de carton recyclé. Pour cela, j'ai mixé avec de l'eau des copeaux de carton découpés finement.

Afin de combiner ce mélange, il est nécessaire d'y ajouter un liant. Deux options ont été testées : la féculle de pomme de terre et le plâtre.

Malheureusement, l'impression 3D de ces matériaux s'est révélée infructueuse du fait du manque de fluidité dans les différents types de mélanges effectués. En effet, ces mélanges, de par leur grande épaisseur, ont bouché la sortie d'extrusion de la seringue, qui n'est pas adaptée à purger de tels matériaux. Le manque de puissance d'extrusion du moteur utilisé est également en cause.



Image 62. Photo des copeaux de carton découpés

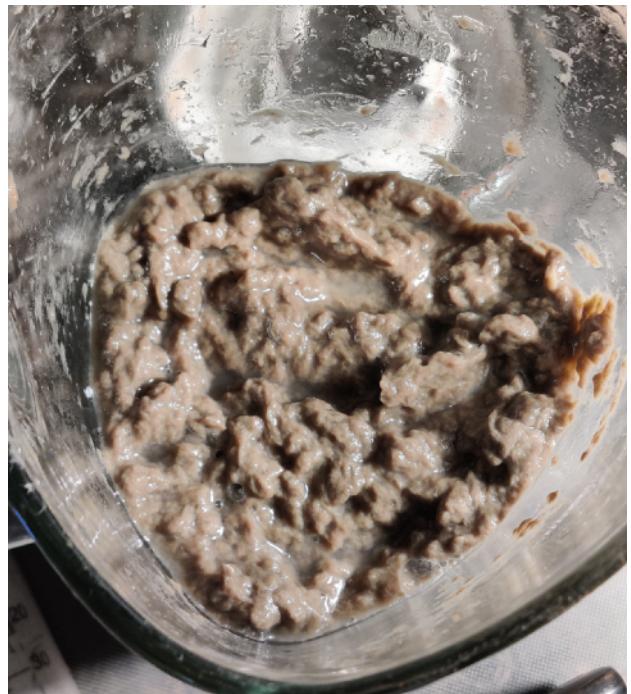


Image 63. Photo du mélange d'eau et carton mixé

Pour résoudre les problèmes rencontrés, il faudrait donc soit utiliser des techniques différentes d'extrusion de matière (pneumatique ou à vis), soit employer une plus grande seringue avec un moteur d'extrusion plus puissant.

3 - Synthèse de l'expérimentation

a) Les limites de l'expérimentation

Malgré le fait que j'ai atteint de bons résultats dans les dernières test avec l'impression d'argile, cette expérimentation a montré certaines de ces limitations.

Ainsi, l'un des problèmes importants rencontré dans cette expérimentation a été l'impossibilité d'extruder certains mélanges à travers la seringue du fait de leur viscosité élevée. Cette limitation peut être résolue en utilisant un système d'extrusion de matière plus performant.

De même, les limites dimensionnelles de mon imprimante et de mon système d'extrusion (seringue de 60mL et buse de 2 mm de diamètre) a restreint mes possibilités d'impression. Ainsi, l'utilisation d'extrudeuse et de mécanismes de buses de plus grande taille affectera inévitablement le processus de conception et de construction mais permettra de fournir de plus grandes dimensions.

De plus, le comportement d'une pâte en matériaux recyclés obtenue de manière artisanale sera toujours bien moins homogène que de celle des filaments disponibles de manière industrielle pour l'impression par dépôt fondu (FDM). L'homogénéité du matériau peut ainsi varier, non seulement d'un mélange à l'autre mais également au sein de celui-ci, ce qui est un problème pour un système d'impression rétroactif.

En effet, l'aspect critique de ce processus d'impression par dépôt concerne l'uniformité de la pièce qui est déterminée par l'adhérence correcte de chaque couche de matériau à la précédente. L'adhérence entre les dépôts se produit par la déformation du matériau extrudé lorsqu'il est pressé sur le matériau déposé précédemment. A cet égard, le rapport des vitesses d'extrusion et de hauteurs de couches sont critiques.

De plus des mouvements auxiliaires vers le prochain dépôt d'extrusion peut être nécessaire, au cours duquel l'extrusion doit être interrompue. Afin de contrôler efficacement ce cycle, on utilise la rétraction, c'est-à-dire le mouvement du matériau dans le sens inverse, ce qui élimine la pression restant dans la buse. Les propriétés du matériau, la hauteur de la couche et la largeur déposée déterminent l'angle minimum des parois verticales par rapport au plan horizontal sur lequel une pièce autoportante peut être construite.

b) L'optimisation de l'architecture imprimée

Nous avons vu que la vitesse d'impression, tout comme le choix de l'épaisseur des couches affecte directement la précision dimensionnelle du composant imprimé. Par conséquent, l'optimisation du procédé dépendra en grande partie de la rhéologie du mélange imprimable et de l'application technologique du produit final afin d'offrir plus d'opportunités dans la potentielle **scalabilité** de la construction à grande échelle.

Optimisation topologique

La fabrication additive offre une liberté de construction significative qui rend cette technologie adaptée au développement d'éléments structurels complexes de type panneaux à double courbure, murs creux avec structures internes ondulées, ou encore colonnes de formes libres (Img. 64)¹² qui sont complexes à réaliser par des méthodes conventionnelles. Grâce à une **optimisation topologique**, les éléments de construction peuvent ainsi être conçus de façon très spécifiques afin d'ajuster leurs propriétés en fonction du type d'application à laquelle ils sont adressés : réduction de poids/ matière, amélioration des propriétés mécaniques ou acoustiques.

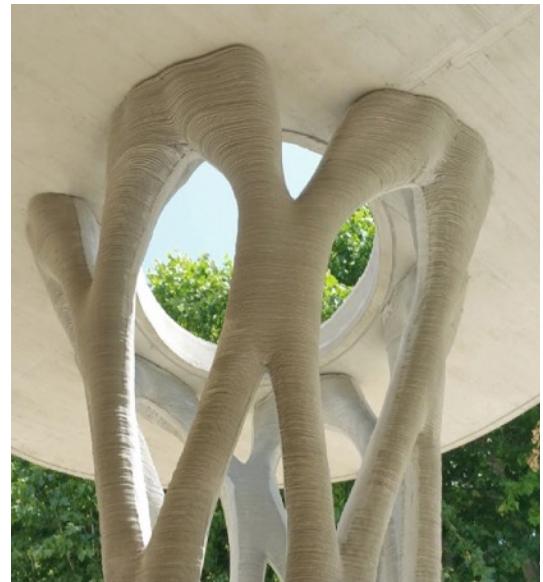


Image 64. Photo d'une colonne réalisée et optimisée topologiquement par XtreeE

Amélioration de la technologie

L'optimisation de la conception de l'imprimante, l'étude des paramètres d'impression optimaux et la recherche de stratégies automatisées pour l'insertion de renforts structurels sont des perspectives intéressantes pour les futures applications de la fabrication additive. De même, concernant l'appareil d'impression, les recherches peuvent se porter sur l'intégration de systèmes de dépôt multi-buses capables de réaliser des sections spécifiques ou pour déposer des matériaux avec des propriétés différentes. Cependant, l'intégration et l'assemblage de plusieurs systèmes de dépôt sont complexes et nécessitent une planification appropriée.

Enfin, puisqu'une capacité de construction élevée est intrinsèquement liée à la correspondance entre vitesse d'impression et débit, les études futures devront être basées sur une sélection et un équilibrage rigoureux des paramètres du processus d'impression afin de garantir le meilleur compromis entre la qualité du produit imprimé, le temps de production et les coûts de construction.

¹² GAUDILLIERE, N. & DUBALLET, R. & BOUYSOU, C. & MALLET, A. & ROUX, P., *Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete of Integrated Formwork for Truss-Shaped Pillars*, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design, Springer International Publishing, 2018

Conclusion

Vers une nouvelle architecture

Les défis majeurs de l'industrie de la construction sont de réduire ses coûts, ses émissions de dioxyde de carbone et de préserver les ressources naturelles en utilisant des matériaux durables. La technologie d'impression 3D a la capacité d'atteindre ces objectifs car elle présente de nombreux avantages tels qu'une liberté géométrique améliorée. Cependant, ces méthodes d'impression 3D doivent être améliorées en termes d'exigences et d'efficience relatives aux propriétés des matériaux avant d'être plus utilisée dans la construction.

Les technologies d'impression 3D ont été utilisées avec de nombreux matériaux pour une variété d'applications. Ce mémoire s'est concentré spécifiquement sur l'impression et l'évaluation des matériaux recyclés pour l'impression 3D. Un accent a été mis sur l'impression 3D par dépôt de matière et particulièrement sur l'imprimabilité et la fiabilité de forme de matériaux recyclables. Les conclusions suivantes ont été tirées.

Dans le cas de la technologie d'impression 3D pour la construction, de nombreux projets ont été menés sur des procédés différents, mais la recherche sur les propriétés des matériaux spécialisés pour la technologie d'impression 3D paraissent insuffisantes. Des efforts sont donc nécessaires pour caractériser et améliorer ces techniques et les matériaux de construction imprimables.

Pour le cas des matières premières, il est essentiel de garantir la stabilité de la forme et les propriétés mécaniques du résultat imprimé. Une recherche approfondie doit donc être menée sur les capacité de traitement et les caractéristiques de sortie des matériaux recyclés utilisés comme matières premières pour l'impression 3D à grande échelle.

On s'attend également à ce qu'à l'avenir, parallèlement au développement de matières premières pour les imprimantes 3D de construction utilisant des matériaux recyclés, il soit nécessaire de développer de nouvelles méthodes axées sur l'analyse en temps réel des caractéristiques des matériaux imprimés afin de pouvoir corriger les impressions au moment où elles sont réalisées.

Re-penser le monde ?

Enfin, ce mémoire ouvre un champ de recherche sur la manière de repenser l'architecture dans sa disposition formelle à travers les matériaux et leurs mises en œuvre singulières.

Le futur d'habiter ne serait-il alors pas une nouvelle spatialité dans laquelle les nouveaux matériaux employés engendreraient de nouvelles conceptions et par conséquent de nouvelles architectures ?

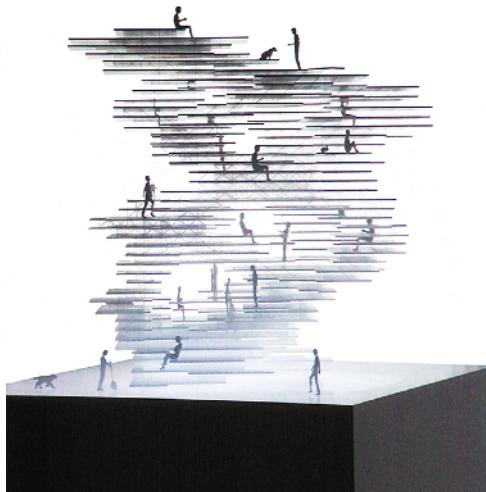


Image 65. Croquis de logements futuristes de Sou Fujimoto



Image 66. Project MARSHA (Mars HAbitat) par AI SpaceFactory



Proto House
Softkill Design
2012

Conception d'une structure poreuse générée par imitation des fibres d'os.

Bibliographie

Livres

- ANDERSON Chris, *Makers - La nouvelle révolution industrielle*, éd Pearson, 2012
- BARLIER, Claude, *Fabrication additive - Du prototypage rapide à l'impression 3D*, éd Dunod, 2016
- BERCHON, Mathilde, *L'impression 3D*, éd Eyrolles, 2014
- BRAYER, Marie-Ange (dir.), *Imprimer le monde*, éd Hyx, Orléans, 2017
- CONTAL, Marie-Hélène, *Ré-enchanter le monde : l'architecture et la ville face aux grandes transitions*, Galimard, collection Alternatives, 2014
- HENSEL, M. & MENGES, A. , *Morpho Ecologies*, AA Publications, 2006
- RUEL, Ronald & SAN FRATELLO, Virginia, *Printing Architecture, Innovative Recipes for 3D printing*, Princeton Architectural Press, New York, 2018
- RIFKIN, Jeremy, *La troisième Révolution Industrielle, Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Babel, Arles, 2013.

Mémoires

- AMORIM, Lopes & JOAO, Mickael & MARQUES Sandra, *Vers une architecture imprimée*, ENSA Toulouse, 2017
- BOUYSSOU, Charles, *Adaptative Aggregation Based Building System : une alternative à l'impression 3D grande échelle*, ENSA Paris-Malaquais, 2015
- CARON, Fabien, *Habitat 2.0 : open-source et outils numériques au secours de la crise du logement*, ENSA Paris-Malaquais, 2017
- CHANG, Che-chia, *L'apport de l'impression 3D dans la construction*, ENSA Paris Val de seine, 2016
- KONTOVOURKIS, O. & MICHAEL, P., *A robotically-driven additive construction planning process using an ecological material. The introduction of 3D clay printing for large scale construction*, Cardiff University, 2017
- LEBRUNET, Hugo & HALGAND, Marie-Paule, *La disparition de l'architecte : la conception architecturale au prisme des nouvelles technologies et de l'époque contemporaine*, ENSA Nantes, 2018

Articles

- GAUDILLIERE, N. & DUBALLET, R. & BOUYSOU, C. & MALLET, A. & ROUX, P., *Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete of Integrated Formwork for Truss-Shaped Pillars*, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design, Springer International Publishing, 2018
- KHOSHNEVIS, B., *Mega-scale fabrication by Contour Crafting*, International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2006
- MANDOUL, Thierry, *Climat(s) : Nouveau paradigme pour l'architecture ?*, Presses universitaires de Rennes, 2012
- OUEDRAOGO, K., *Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux*, Université Toulouse, 2019
- RUSCITTI, A. & TAPIA, C. & RENDTORFF, N. M., *A review on additive manufacturing of ceramic materials based on extrusion processes of clay pastes*, São Paulo, Cerâmica, 2020
- VISSAC, A. & BOURGES, A. & GANDREAU, D. & ANGER, R. et FONTAINE, L., *Argiles et biopolymères - les stabilisants naturels pour la construction en terre*, Villefontaine, CRAterre, 2017.

Sites

- *FabClay, projet d'impression d'argile par bras robotisé* (Consulté le 10/12/2020)
sasajokic.com/fabclay
- *Matériaux biosourcés* (Consulté le 10/11/2020)
ecologie.gouv.fr/materiaux-construction-biosources-et-geosources
- *Pylos, projet d'impression d'argile par bras robotisé* (Consulté le 30/11/2020)
pylos.iaac.net/
- *Base documentaire du Centre de Ressources du Développement Durable* (Consulté le 05/11/2020)
temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/index.html
- *Site du Laboratoire de recherche de l'ENSA Grenoble* (Consulté le 05/12/2020)
craterre.org/

Glossaire

- Contour crafting

Technologie d'impression de bâtiment (étudiée par Behrokh Khoshnevis de l'Institut des sciences de l'information en Californie du Sud) qui utilise une grue ou un portique contrôlés par ordinateur afin de construire des édifices rapidement et efficacement.

- Déterritorialisation

Concept créé par Gilles Deleuze et Félix Guattari dans L'Anti-Œdipe en 1972 qui décrit tout processus de décontextualisation d'un ensemble de relations. Devenu également concept de géographie culturelle, il désigne le fait de rompre le lien de territorialité entre une société et un territoire.

- Digitalisation

Procédé visant à transformer des processus traditionnels par le biais de technologies digitales afin de les rendre plus performants.

- Décyclage

Aussi appelé dévalorisation, procédé par lequel on transforme un déchet matériel en un nouveau matériau de qualité moindre. Un exemple typique est le recyclage d'un plastique de qualité en un plastique de moins bonne qualité.

- Efficience

Capacité d'un individu, d'un ensemble d'individus, d'une machine ou d'une technique à obtenir le maximum de résultats avec le minimum de moyens, de coûts, d'effort ou d'énergie.

- Fabrication additive

Regroupe les procédés de fabrication de pièces en volume par ajout, agglomération ou empilement de couches successives de matière.

- G-code

Code généré par un slicer afin de traduire le tracé de la géométrie d'un objet dans un langage compréhensible pour l'imprimante 3D.

- High-eco-tech

Terme utilisé par Werner Sobek caractérisant une technologie à visée écologique.

- **In-situ**

Locution latine signifiant sur place.

- **Optimisation topologique**

Méthode mathématique et logicielle qui permet de trouver la répartition de matière optimale dans un volume donné soumis à des contraintes.

- **Polysaccharides**

Composés de la famille des glucides et issus d'une réaction de la polycondensation d'une grande quantité de molécules de glucose. Les polysaccharides les plus répandus du règne végétal sont la cellulose et l'amidon.

- **RepRap : Replication Rapid prototyper**

Projet britannique de l'université de Bath, permettant la création d'imprimantes 3D capables de se répliquer aisément et librement (licence publique générale GNU).

- **Rhéologie**

Science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée.

- **Scalabilité**

Capacité d'un système à s'adapter à un changement dimensionnel.

- **Slicer**

Logiciel trancheur utilisé pour découper la pièce en fichier numérique gcode.

- **STL**

Format de fichier décrivant uniquement la géométrie de surface d'un objet en 3D.