

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette 2019-2021



## LES TECTONIQUES DE LA FABRICATION ADDITIVE

Séminaire : Activité et instrumentation de la conception

Professeur encadrant : François Guéna, Joaquim Silvestre et Anne Tüscher

Algane marwan

# LES TECTONIQUES DE LA FABRICATION ADDITIVE

## Problématique:

*Quelles sont les tectoniques de la fabrication additive et leurs impacts sur la conception et la fabrication architecturale ?*

*Quels sont les changements de production que génère la fabrication additive et quelles en sont les implications de conception architecturale ?*

## Thématische :

TECTONIQUE

FABRICATION ADDITIVE - MASS CUSTOMISATION

INDUSTRIE 4.0 - Fabrication digitale

FAB LAB - Apprendre / Faire / Partager

Optimisation topologique

## Synthèse:

Ce mémoire de recherche a pour but d'interroger la relation entre la fabrication additive et la manière de construire à travers le prisme de la tectonique. Il souhaite étudier la matérialité des processus de construction par ajout de matière. La tectonique est un concept architectural qui se réfère à la "poétique de la construction", elle est l'expression de la technique. Mais la tectonique est aussi un outil analytique permettant de comprendre les réalisations historiques et contemporaines en s'appuyant sur la pensée constructive et le rapport entre l'expression technique et plastique.

## Plan :

Introduction	3
1-La fabrication additive	4
1-1 Histoire de la fabrication additive	4
1-2 Les outils et les méthodes de la fabrication additive	6
1-3 Changement de paradigme - évolution des méthodes de conception	11
2-La tectonique de la fabrication additive	18
2-1 La tectonique : Outil d'analyse	18
2-2 Expérimentations	20
2-2-1 <i>Sens d'impression</i>	22
2-2-2 <i>Pourcentage</i>	25
2-2-3 <i>Forme et matière</i>	27
2-3 Aspects tectoniques de la fabrication additive	29
2-3-1 <i>Stratification</i>	29
2-3-2 <i>Assemblage</i>	43
2-3-3 <i>Formalisation</i>	51
2-3-4 <i>Optimisation topologique</i>	56
Conclusion	61
Bibliographie	
Iconographie	
Annexes	

## Introduction :

On construit avec les matériaux et les idées de son temps. L'informatique a modifié les manières de concevoir et de produire.

La fabrication additive est une manière de produire, par ajout successif de couche disposé selon un modèle numérique. En architecture et en ingénierie, cette technique de fabrication permet de produire rapidement des prototypes. Des projets sont en phase de recherche dans les laboratoires et les expérimentations dépassent le stade des pavillons et commencent à se concrétiser dans des projets aux envergures croissantes. La fabrication additive marque un changement de production et questionne la relation entre le virtuel et sa matérialisation.

Les recherches portées par ce mémoire ont pour but de dépasser la forme d'idéalisatoin des techniques de fabrication additive et comprendre comment s'effectue le passage du modèle numérique à l'objet réel composé de matière ?

A travers ce processus, quels sont les changements de production que génère la fabrication additive et quelles en sont les implications de conception ?

La démarche de conception et les procédés de fabrication sont intrinsèquement liés. La tectonique est une approche pour définir les principes constructifs et la matérialité. L'outil est ce qui permet de matérialiser l'idée et de donner forme à la matière. Ce mémoire a pour but de chercher quelle est l'expression tectonique de la fabrication additive et son impact sur la conception et la fabrication architecturale ?

*"La notion de tectonique se situe dans une compréhension théorique de son rapport à la technologie et des aspects représentationnels de l'édifice."<sup>1</sup>*

La tectonique permet de questionner les différents procédés de transformation de la matière de la fabrication additive et leur production.

---

<sup>1</sup> AMARAL, Izabel, *Tensions tectoniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967 - 2005)*, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, 2010

## 1 - La fabrication additive:

### Histoire de la fabrication additive :

En 1952, Kojima, un chercheur japonais a l'idée de fabriquer des objets par couches successives, dans le but de réaliser des prothèses artérielles.

Le 16 juillet 1984, Jean-Claude André, Olivier de Witte, et Alain Le Méhauté déposent le premier brevet d'impression 3D pour l'entreprise Cilas alcatel.

Le 8 août 1984, un ingénieur américain, Chuck Hull, dépose un brevet sur une technique de prototypage par stéréolithographie. Quatre ans plus tard, l'entreprise 3D system qu'il a fondé met au point la première imprimante par stéréolithographie ; le modèle SLA-250. C'est à cette période qu'est également établi le fichier standard; le format STL "*Standart Tesselation Language*".

En 1987, au sein du pôle d'ingénierie mécanique de l'université d'Austin au Texas, le Dr. Carl Deckard et le Dr. Joe Beaman mettent au point la fusion sélective par laser (sls - selective laser melting). C'est une technique de fabrication additive qui consiste à produire avec un laser de haute puissance des objets couche par couche à partir de poudre métallique ou de polymère.

En 1989, est créé le procédé par FDM "Fused Deposition Modeling" par l'Entreprise Stratasys, fondé par Lisa et Scott Crump. Cette entreprise a également créé le matériau ABS.

En 2003, les frères Conor et Fintan MacCormack mettent au point une technique de fabrication additive par un processus de laminage par dépôt successif nommé en anglais SDL (Selective Lamination Deposition).

Suite à l'expiration des brevets commerciaux FDM, le projet RepRap<sup>2</sup> a bouleversé l'accès aux technologies d'impression 3D. Au Royaume-Uni, Adrien Bowyer un chercheur à l'université de Bath met au point une imprimante 3D open source. Une fois l'imprimante imprimée elle a la capacité d'imprimer des pièces de ce modèle. En 2007 rePrap, le projet Darwin offre la possibilité à d'autres intervenants de participer à ce projet en apportant leur contribution par des modifications et des ajouts. Internet et l'open source ont permis de démocratiser la fabrication additive par FDM et de la rendre accessible à un plus grand nombre. La RepRap est désormais la base de toutes les imprimantes 3D disponibles sur le marché. La fabrication additive était limitée pour les industriels et les professionnels. Avec le déploiement open source d'une machine capable de "s'auto-répliquer", de nombreux acteurs se sont lancés dans la fabrication et la

---

<sup>2</sup>"RepRap est la première machine auto répliable de production d'usage général fabriquée par l'homme."  
<https://reprap.org/wiki/RepRap/fr>

diffusion de kit à monter rendant la fabrication additive accessible au grand public. L'avantage de ce type de machine est leur facilité à créer des objets physiques et ainsi produire des objets fonctionnels dont les modèles sont partagés en ligne.

En 2015, la société Carbon3D met au point une imprimante M1 utilisant le procédé CLIP ( Continuous Liquid Interface Production) qui permet d'imprimer 50 à 100 fois plus rapidement des objets à partir d'une résine liquide photosensible.

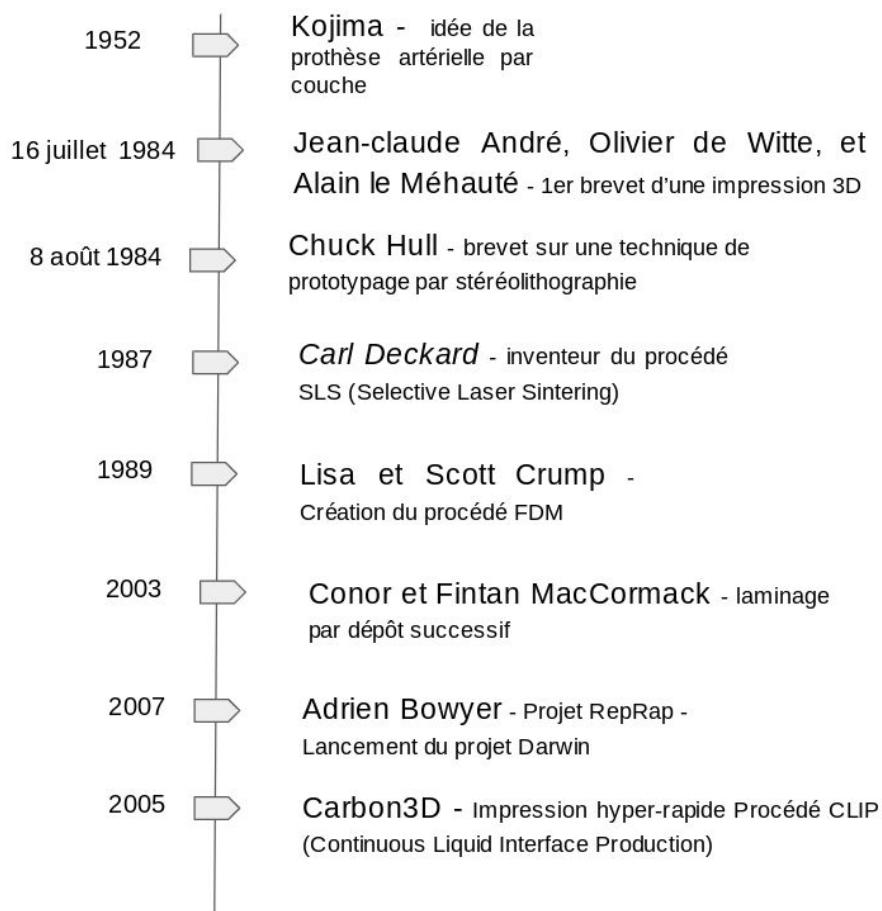


Schéma : Frise chronologique des dates marquantes de la fabrication additive

## Les outils et les méthodes de fabrication additive

Il existe quatre procédés de fabrication; par soustraction (enlever de la matière pour former un objet), par formage (mettre en forme un matériau en le déformant l'emboutissage, le pliage et le cintrage, le repoussage et le fluotournage), par moulage (couler une matière dans un moule) et enfin la fabrication additive.

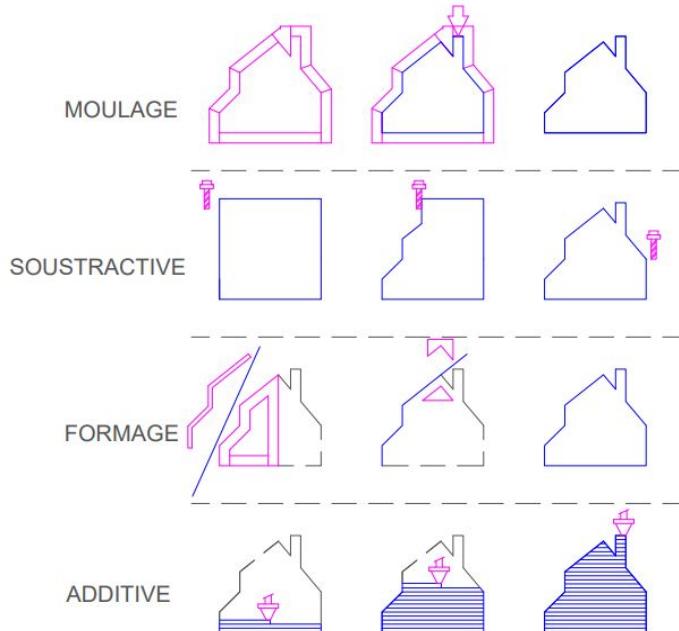


Schéma : Différence des procédés de fabrication par soustraction, formatage , moulage et additive.

Initialement, la fabrication additive se limitait à l'impression de matériaux présentés sous la forme de filament par extrusion puis par dépôt de matière. Avec le temps, de nouveaux procédés ont fait leur apparition, tels que la fabrication par polymérisation ou par frittage.

La fabrication par polymérisation consiste à solidifier une résine par un laser ou une projection. La fabrication par frittage procède par fusion d'élément présenté sous forme de poudre en élément rigide et solide.

Chacune de ces techniques exige un processus de transformation de la matière qui lui est spécifique mais produit des objets aux propriétés mécaniques différentes. A l'heure actuelle, avec ces différentes techniques, il est possible de travailler avec des matériaux divers tels que l'acier, le bois, le tissu, la céramique, du sable et des recherches explorent l'impression de matériaux composites. Des chercheurs en médecine travaillent à imprimer des organes à partir de cellules vivantes.

Le point de départ de la fabrication additive est un modèle numérique qui est ensuite découpé en tranches selon des paramètres et des conditions selon l'outil de la fabrication additive.

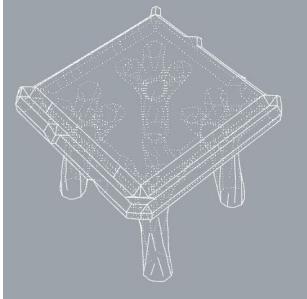
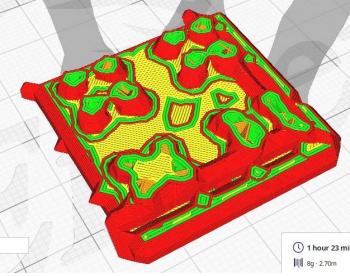
Modèle numérique d'un tabouret	Modèle découpé à travers un logiciel "slicer"	Objet imprimé : un tabouret
		

Tableau : Étape majeure du processus de fabrication additive

La fabrication additive possède différentes typologies aux caractéristiques changeantes selon l'échelle et le matériau utilisé. Elles ont été subdivisés en sept catégories :

### 1 - Déposition

La première est la fabrication additive par déposition. c'est celle dont le fonctionnement est le plus simple, elle consiste à déposer de la matière couche après couche à partir d'un modèle numérique. La composition de la matière, ainsi que son comportement ont une grande influence sur la manière de faire adhérer les couches entre elles. Le matériau le plus utilisé est un béton spécial mais des recherches sont menées en Catalogne pour imprimer à partir d'adobe.

### 2 - Fusion-Déposition

La fusion-déposition est un processus de transformation de la matière par une augmentation de sa température qui lui permet d'être malléable. A température ambiante, après sa déposition selon les configurations du modèle numérique, la matière retrouve ses propriétés et finit par produire un objet complet composé d'une superposition de couches dont l'adhérence et l'apparence changent selon les matériaux et le processus de transformation utilisée

Le processus de fusion-déposition, le plus commun, est celui des impressions par filament. Il équipe des particuliers, des fablabs ainsi que des entreprises. Les matériaux sont de plus en plus divers. Les plus populaires sont l'ABS et le PLA. mais il existe des filaments constitués de carbone, de bois ou de polycarbonate.



Photographie du processus de Fusion - Déposition

Il existe un processus de fusion déposition plus complexe que l'on nomme le dépôt de matière sous énergie concentrée. ( DED - Direct Energy Deposition) . Il consiste à déposer de la matière fondu à travers une buse à partir d'énergie localisée telle qu'un laser ou un arc électrique. Cette technique est utilisée pour réparer ponctuellement des portions de pièces mais elle permet également l'impression de grandes pièces telles que des hélices de navire ou des ponts piétons.

### 3 - Photopolymérisation

La photopolymérisation est un processus de fabrication additive qui se sert de la projection de lumière sur une résine provoquant sa solidification par polymérisation. C'est un processus rapide qui permet une production de pièces d'une grande précision. L'impression par photopolymérisation fut la première imprimante à être mise au point. (SLA - StereoLithography Apparatus). Pour cela un laser solidifie point par point l'objet.

La deuxième méthode est le traitement numérique de la lumière, elle consiste à solidifier par projection couche par couche, c'est un procédé plus rapide (DLP - Digital light processing)

### 4 - Frittage

Le procédé d'impression par fusion sur lit de poudre consiste à distribuer dans la chambre de fabrication une couche de poudre préchauffée sans atteindre son point de fusion. Selon le modèle numérique le laser va échauffer la poudre pour atteindre son point de fusion et ainsi solidifier la pièce. La plateforme de fabrication s'abaisse d'une couche et le processus reprend jusqu'à ce que l'itération se termine. Une fois que les pièces sont refroidies, un technicien aspire les poudres et nettoie les pièces créées. Un grand avantage de cette technique de fabrication additive est qu'elle ne nécessite aucun renforcement et ne provoque aucune perte de matière car les poudres non solidifiées servent de support. En revanche, les pièces possèdent un aspect rugueux qui parfois nécessite des post-traitements selon la fonction de la pièce. Cette technique est l'apanage des industriels. Elle est en perpétuel évolution et des chercheurs continuent à analyser le comportement de la matière ainsi qu'à optimiser les procédés.

### 5 - Projection de liant

Cette technique de fabrication additive fonctionne par projection de liant sur une poudre répartie à chaque couche par un rouleau. Les matériaux utilisés sont du sable, du métal. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite aucun support car la poudre ne recevant pas de liant, porte l'objet généré. Les objets métalliques ont une capacité mécanique limitée. En revanche, ces objets nécessitent un traitement post-production.

## 6 - Laminage par dépôt successif

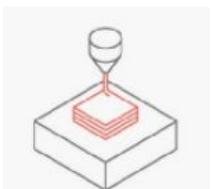
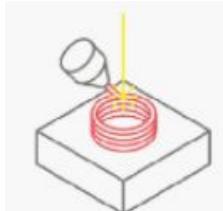
Cette technique de laminage par dépôt successif (SDL-Selective Deposition Lamination) consiste à faire fusionner des couches de matériaux par une pression ou une augmentation de température. Une couche adhésive est parfois utilisée pour faire adhérer deux couches.

Pour des raisons économiques, le matériau le plus couramment utilisé est le papier. Un procédé similaire consiste à découper les couches-feuilles par un laser. Il s'agit du laminage d'objet manufacturé; LOM (Laminated Object Manufacturing). Ce procédé permet de travailler le métal.

## 7 - Jet de matière

Le fonctionnement de la fabrication additive par jet de matière est similaire à celui des imprimantes à jet d'encre. Une tête d'impression envoie des micro-gouttelettes d'une résine sensible à la photopolymérisation sur une résine qui a été chauffée afin d'obtenir la viscosité nécessaire pour que la rencontre des deux résines se solidifie.

L'avantage de cette technique est la possibilité, lors d'une impression, de générer des impressions polychromiques. En revanche, selon la forme de l'objet, elle nécessite des supports

Technique de fabrication additive	Schéma de fonctionnement	Matériaux	Applications
Déposition		Béton - argile	Maison - mobilier urbain
Fusion-Déposition FFF-FDM		Polymère thermoplastique : (PLA - ABS - polycarbonate - PET - nylon ) Matériaux composites de bois, carbone, huître, pierre, verre...	Prototypage - objet du quotidien - objet de petite et de grande taille selon le dimensionnement de la machine
Dépot de matière sous énergie concentrée DED		Oxygène - gaz-métaux (titane...) Polymère et céramique	Objet manufacturier à haute valeur ajoutée

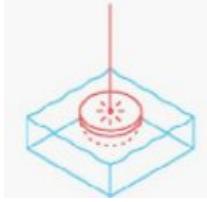
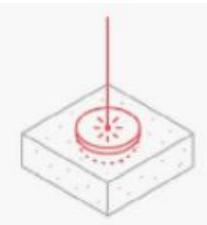
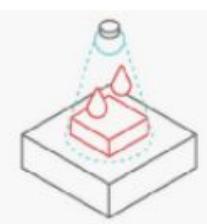
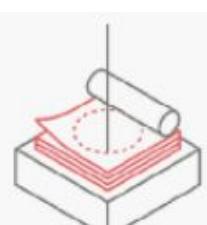
Photopolymérisation DLP-SLA		Résine photosensible	Prototypage - Produit manufacturier innovant ou complexe
Frittage SLS-SLM-EBM		Poudre de métal (titane) - de céramique - polymère plastique (nylon)	Objet manufacturier à haute valeur ajoutée
Jet de liant		sable , métaux céramique	Sable, métal, plastique
Laminage par dépôt successif		Papier, métal,	Prototypage , objet de décoration.
Jet de matière		Résine photopolymère	Prototypage - Produit polychromatique manufacturier innovant ou complexe

Tableau synthétique des outils de fabrication additive

Figure A : Les schémas de fonctionnement sont extraits de l'ouvrage *The 3D printing handbook - Design and applications - table 1-1 - classification of 3D printing*<sup>3</sup>

<sup>3</sup>REDWOOD Ben, FILEMON Schoffer et GARETT Brian. *The 3D printing handbook - Design and applications*, Multitude, 2017.

## Changement de paradigme-Evolution des méthodes de conception

En architecture, le choix d'un matériau et d'une technique constructive est porté par des conditions de production ainsi que par un contexte social, économique et culturel. On a tendance à simplifier le processus conceptuel à une succession d'événements linéaires; l'idée, le concept, l'esquisse, le projet sommaire, l'exécution enfin la réalisation.

Du passage de la conception à la réalisation, les intentions d'un projet peuvent se traduire d'une multitude de façons. Dans ce processus, la relation entre outil et matière a une importance dans la traduction des idées en un projet constitué.

*"Penser l'outil , le dessiner c'est déjà préfigurer une forme. Organe articulant la force de la machine à la matière en attente d'une transformation,"l'outil" définit en creux, en négatif, les caractéristiques formelles et plastiques de l'objet. L'outil, parce qu'il contient en puissance la capacité de donner forme à la matière, constitue l'une des figures premières du projet. "<sup>4</sup>*

Comme le souligne Philippe Potié, la faculté de l'outil à sculpter la matière lui donne la propriété d'être une condition de la conception. L'outil porte en lui un attribut et un potentiel structurel et formel.

Par exemple, la plieuse de métal a la particularité de pouvoir plier des éléments surfaciques. Dans les années 50, Jean Prouvé a exploité les capacités techniques qu'offrait l'association de plaque métallique et a utilisé cet outil pour créer des tôles pliées d'une grande résistance avec une esthétique particulière.

Comme nous allons le voir plus en détail dans la deuxième partie, un nouvel outil et de nouveaux matériaux émergent parmi des techniques existantes. Ils exécutent dans un premier temps des produits conventionnels puis la connaissance et la maîtrise de ceux-ci augmentent et s'affranchissent des techniques traditionnelles pour trouver leur singularité.

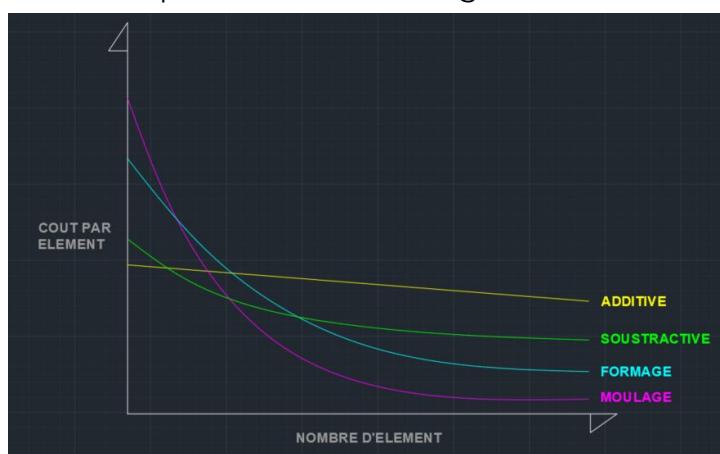


Schéma : Graphique du coût de production en fonction du nombre d'élément produit

<sup>4</sup>p43 POTIÉ, Philippe - *Forme et contre forme : le dessin du gabarit - Le projet tectonique* (sous la direction de Jean Pierre Chupin ; Cyrille Simonnet ), Gollion, Infolio , 2005.

En comparant la fabrication additive avec des techniques de fabrication traditionnelles, on peut observer à partir du graphique ci-dessus que la fabrication additive est rentable lors de la réalisation de petite série. En revanche, à la différence d'autres techniques de fabrication, lorsque le nombre d'éléments produit est important, le coût de revient par pièce est plus faible, mais en comparaison aux autres, il reste plus élevé.

La fabrication additive ouvre la porte à la personnalisation de masse car ce type de production n'est pas basé sur la reproductibilité d'un objet suivant une chaîne de production, mais sur la production par ajout successif. Comme l'a souligné Mario Carpo dans son livre "the second turn of digital - Design beyond intelligence" il est possible de produire une série d'objets différents à partir des propriétés chimiques et physiques de l'outil de fabrication additive.

Actuellement les coûts des différentes techniques de fabrication additive sont élevés et lentes, mais le monde de l'industrie s'approprie progressivement ces outils et elles commencent à trouver leur place parmi les modes de production existants, notamment lors de production de petites séries d'objets complexes aux formes particulières. Les fabrications additives interrogent les outils de production et les chaînes d'approvisionnement. Là où pour les procédés de fabrication contemporaine, les composants sont produits séparément, réunis puis assemblés, la fabrication additive permet de produire rapidement, dans une même localisation. Durant l'épidémie de Covid, en avril 2019, l'hôpital Cochin a fait l'acquisition de soixante imprimantes 3D afin d'être en mesure de produire du matériel de protection, des équipements médicaux ainsi que des objets de maintenance. En parallèle, a été mis en place un système de partage de données accessibles sur le site COVID 3D pour diffuser les modèles numériques et mettre en relation les soignants et les fabricants.

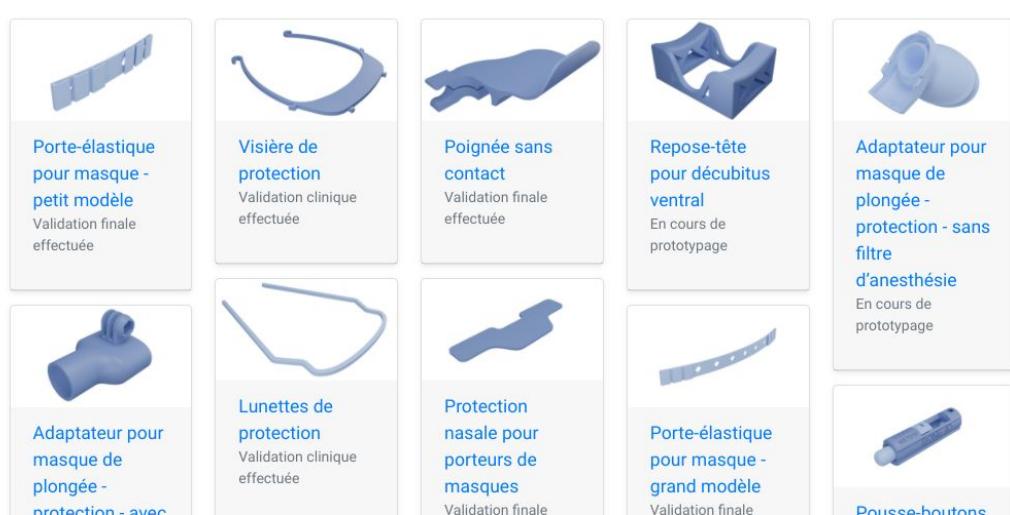


Figure B : Imprime-écran du catalogue des modélisations de projet pour la fabrication de dispositifs médicaux dans le cadre de la crise du Covid-19

Les laboratoires de fabrication communément appelés FAB-LAB ont rendu accessible ces outils à un plus grand nombre. Et a émergé la mentalité des makers, avec cette notion du "Do-it-yourself". Cette attitude change le rapport aux objets. Le consommateur passif devient ainsi un utilisateur actif. Le marché des impressions 3D domestiques est en pleine croissance et les machines de fabrication additive commencent à équiper de plus en plus d'établissements scolaires et des foyers. Il y a un emballement autour de ces techniques de production présentées comme révolutionnaires. Il est vrai que cette technique questionne les manières de produire et de consommer. Pourquoi acheter un objet ayant une chaîne de production complexe lorsqu'il est possible de simplement imprimer chez soi un objet. D'une certaine manière, les imprimantes 3D participent à une forme de démocratisation de la production.

La fabrication additive questionne la production de masse où chaque objet est identique et produit en série selon des processus lourds et hétérogènes mêlant interventions manuelles ou robotisées.

La fabrication additive est une chaîne de production malléable. Elle est adaptable aux changements de production. Par sa capacité de personnalisation, il est possible de produire une série d'objets radicalement différents composés du même matériaux, telle qu'un lot de visières de protection, puis à l'impression suivante de produire une pièce automobile et enfin des poignées de porte personnalisées.

La fabrication additive interroge également la manière de consommer et l'obsolescence programmée des produits. Par exemple, dans le cas d'une destruction d'une partie mécanique d'un objet, il est possible de la réimprimer, la rassembler avec l'ensemble, pour de nouveau le faire fonctionner et ainsi allonger la durée de vie d'un produit. Avec cette considération des produits émergents, où en amont de la conception, l'objet est pensé pour pouvoir être démontable-remplaçable en cas de panne.

Un facteur déterminant pour comprendre la fabrication additive est cette notion de prototypage. Elle a été une des raisons principales pour laquelle cette technique a été inventée et a permis son développement. L'intention était de pouvoir produire rapidement des objets afin de déterminer les rapports d'échelle entre les éléments et ainsi vérifier les propriétés d'une pièce.

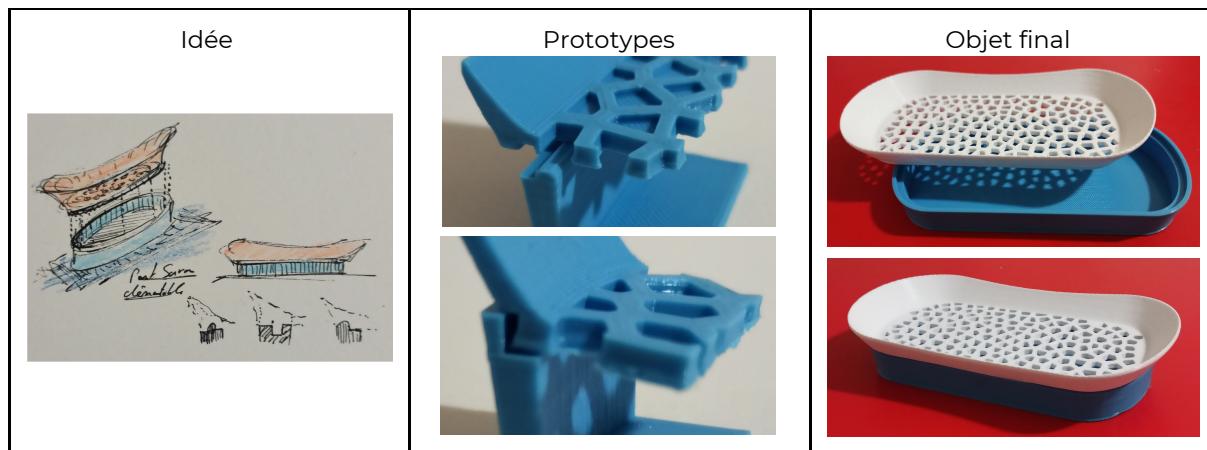
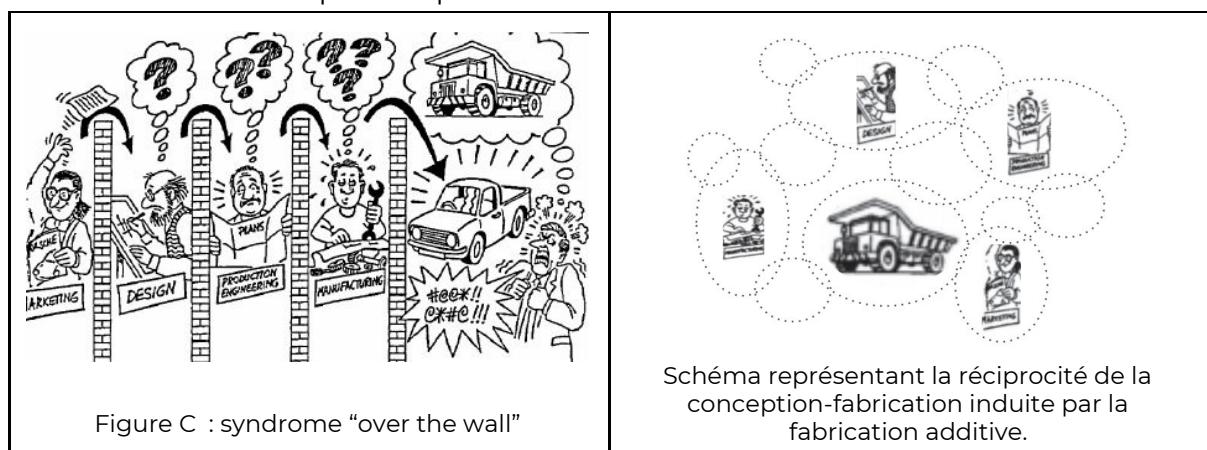


Tableau du processus de prototypage illustrée par un porte-savon imprimé

Le prototypage permet de manipuler un objet en apportant une vision d'ensemble sur le produit et permet de souligner des lacunes ou des axes d'améliorations. En ingénierie, le prototypage par la fabrication additive permet de créer des variantes d'un produit à l'échelle réelle, de les manipuler et d'en tester l'opérabilité.

Dans le processus de conception, le prototypage est une étape clé qui valide ou déduit les recherches papier en confrontant l'objet réalisé à la réalité matérielle et technique. Désormais l'outil informatique est omniprésent dans les phases de conception et de construction. En architecture, la fabrication additive est avant tout utilisée dans une démarche de prototypage. Elle permet de produire des maquettes ayant la précision des outils informatiques. Cette technique permet de confronter rapidement le modèle numérique avec le monde réel en exécutant des modèles réduits précis, mais offrant également de nouvelles possibilités formelles et techniques. Ces outils bouleversent le déroulement d'un projet traditionnel. Ce n'est plus un processus linéaire mais rétroactif.



Les méthodes de production contemporaine, avec le système inspiré du taylorisme, mettent en exergue une division des tâches dans un processus d'organisation scientifique du travail. Afin d'augmenter la productivité, cette méthode de travail préconise d'extraire les tâches considérées comme intellectuelles de l'atelier, pour qu'elles se focalisent sur l'organisation et la planification. Quant aux manuels, ils appliquent l'organisation dictée par le rythme imposé par les lignes de production. Ce qui peut provoquer l'effet "over the wall" où la séparation des tâches provoque l'incompréhension des services et ce qui peut générer des produits qui ne correspondent pas aux attentes du client. Entre les techniques de fabrication traditionnelle et additive, il existe un changement de paradigme important. La fabrication additive, par l'importante relation entre la conception et la fabrication, invite à une collaboration des acteurs dans le processus de création d'un projet.

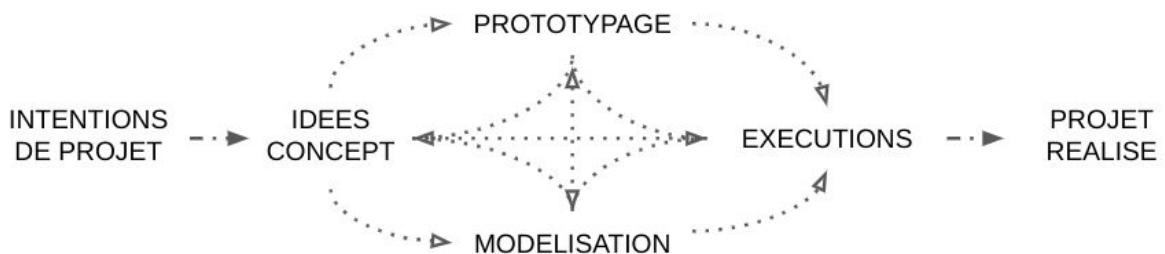


Schéma de la rétroactivité du processus de conception-fabrication

Dans sa thèse, "Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive" Nicolas Boyard souligne le changement de paradigme avec notamment la fusion des phases du prototypage avec celles des préséries ce qui engendre une réduction du temps du processus complet d'industrialisation. Rétroactivement, cela entrouvre la possibilité de dédier ce temps à la conception.

"il est possible de commencer la conception détaillée de la pièce sans avoir validé la conception architecturale. Cela permet une plus grande flexibilité de conception et une vision en amont de ce vers quoi tend le résultat final."<sup>5</sup>

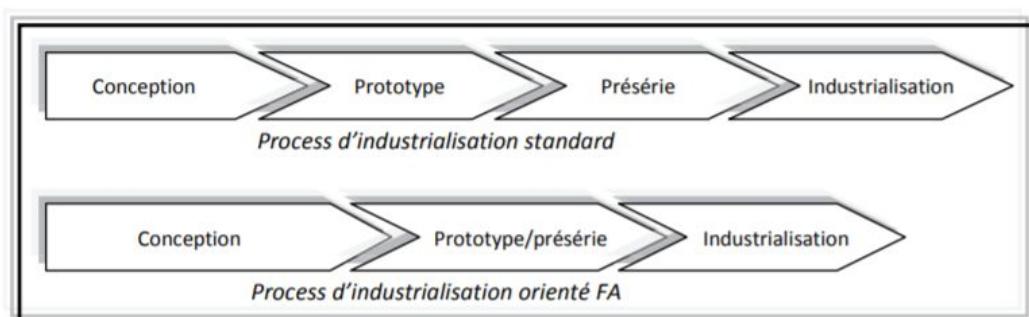


Schéma : "Potentielle augmentation du temps alloué à la phase de conception grâce à la facilité de mise en place des moyens de production."<sup>6</sup>

<sup>5</sup> p85 -Nicolas Boyard. *Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive*. Génie mécanique. École nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015.

<sup>6</sup>Figure 23-p36-Nicolas Boyard. *Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive*. Génie mécanique. École nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015.

La fabrication additive est un outil qui questionne les processus de fabrication. D'une manière rétroactive, les outils de la fabrication additive provoquent des changements dans la manière de penser et de concevoir, ce qui a pour conséquence d'ériger de nouveaux procédés en adéquation avec ces nouvelles techniques. Par exemple en aéronautique, la fabrication additive permet de produire des pièces complexes plus légères et performantes. Cette technique de création par accumulation de matière a ouvert des possibilités d'optimisation topologique; c'est un travail de conception-simulation qui consiste à placer la matière dans un volume selon des diagrammes de forces. Les volumes qui en résultent sont extrêmement complexes et les modes de fabrication par addition trouvent leur efficience.

Dans le cadre d'une thèse intitulée "Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique" de Floriane Laverne, a été réalisée une expérience cherchant à comprendre l'impact des connaissances de la fabrication additive sur la conception. Pour cela, elle fait effectuer à trois groupes de six personnes un travail de conception en 3H d'un robot pédagogique. Le premier groupe n'a aucune connaissance en fabrication additive, le deuxième a des connaissances de base et enfin le troisième groupe maîtrise des techniques de fabrication additive. Les groupes ont été répartis en mélangeant les types de professions et le nombre d'années d'expériences professionnelles. Une présentation et la distribution de fiches introduisant la fabrication additive a été faite avant la séance de brainstorming qui devait mener à des idées, puis s'enchaînait une séance de développement des concepts menant à la réalisation de fiches concepts. Elle conclut

"qu'il existe bien une corrélation entre KFA<sup>7</sup> et créativité des groupes de conception"<sup>8</sup>=

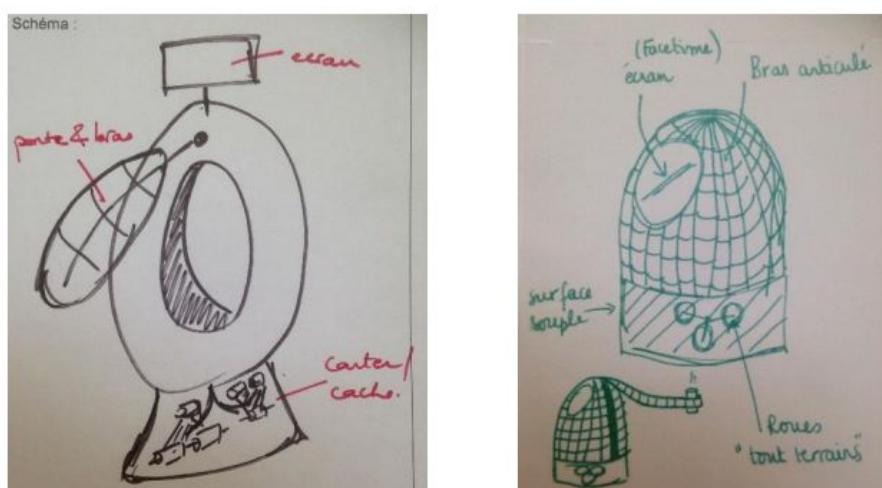


Figure D : Illustration de la différence de complexité dans les concepts extrait de la thèse de Floriane Laverne, Figure 66

<sup>7</sup> KFA : Connaissance relative à la Fabrication additive

<sup>8</sup> p95 : LAVERNE Floriane - *Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique*, Science des Métiers de l'ingénieur, 2016

Le dessin de gauche a été réalisé par le groupe n'ayant aucune connaissance des fabrications additives. L'objet est façonné par des outils traditionnels. En revanche le dessin de droite a été effectué par un groupe ayant des connaissances en fabrication additive et l'objet pensé et dessiné exploite les capacités offertes par l'impression 3D, en ayant des formes complexes faites d'alvéoles creuses et des articulations entre des matériaux souples. Cette expérience met en évidence que les méthodes de fabrication ont un impact sur la conception.

La connaissance accrue des outils, couplée avec des expérimentations cherchant à exploiter les possibilités de ceux-ci, présente les techniques de fabrication additives, comme des outils, ayant la capacité de donner matière à des projets sans aucune limitation de forme.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, à travers la tectonique, nous allons questionner cette non-limitation formelle générée par les techniques de fabrications additives, tout en interrogeant les processus de conception avec les processus de transformation de la matière, en essayant de souligner les points communs ainsi que les singularités des méthodes de fabrication additive.

## 2 - La tectonique de la fabrication additive

### La tectonique : Outil d'analyse

Des processus de construction traditionnelle portent les principes de la fabrication additive dans la mesure où le mur d'un édifice est construit par l'accumulation d'une succession de modules composés de briques et de pierres. Ce mémoire souhaite questionner la matérialité des processus de construction par ajout de matière. La tectonique est un concept architectural qui se réfère à la "poétique de la construction", elle est l'expression de la technique. Mais la tectonique est aussi un outil analytique permettant de comprendre les réalisations historiques et contemporaines en s'appuyant sur la pensée constructive et le rapport entre l'expression technique et plastique.

*"La tectonique d'un projet : quelles sont les conditions d'un dialogue efficient entre la conception et la construction du projet ?"*<sup>9</sup>

L'objectif des recherches de cette deuxième partie du mémoire est d'essayer de définir les tectoniques des fabrications additives et d'interroger leurs implications conceptuelles ainsi que leurs traductions matérielles en prenant l'exemple de projets théoriques et réalisés.

Tectonique est un mot d'origine grec ; "Tekton". Il signifie bâtisseur ou charpentier. La tectonique est un terme apparu au 18ème siècle par l'archéologue Karl Otfried Müller. A son émergence c'est un concept débattant de l'art et l'architecture. Il a été repris et diffusé par Karl Botticher et Gottfried Semper.

La tectonique est l'articulation de deux termes :

- KERNFORM désignant une forme "nucléaire" au sens de noyau ou selon les interprétations une forme opératoire (WERKFORM).
- Le KUNSFORM est l'idée constructive de la matière visible, c'est la réalité existante.

C'est un terme dont la signification a eu plusieurs interprétations. Elle a émergé dans le cadre de débats sur la vérité constructive et l'apparition d'ornements durant l'ère industrielle au 19ème siècle. Une période où émergeaient de nouveaux procédés et matériaux avec lesquels de nombreuses interrogations sur leurs utilisations ainsi que leurs authenticités.

*"le concept de tectonique allait en tirer sa propre aura, s'enracinant rapidement dans les langues allemande puis française et anglaise pour désigner toutes les approches du réel en tant que système de structures rationnelles."*<sup>10</sup>

<sup>9</sup>Kenneth Frampton, *Introduction - Le projet tectonique* (sous la direction de Jean Pierre Chupin ; Cyrille Simonnet ), Gollion, Infolio , 2005.

<sup>10</sup>p57-Labrusse Rémi - Chapitre 10 - Référence hellénique et ontologie de l'ornement La « tectonique » de Karl Bötticher - Sandrine Maufroy, Michel Espagne *L'hellénisme de Wilhelm von Humboldt et ses prolongements européens.* Demopolis, École française d'Athènes 2016 Disponible sur : <https://books.openedition.org/demopolis/728>

La tectonique est un concept ne se limitant pas qu'à l'architecture, elle touche tous les arts et les produits manufacturiers. Elle désigne le rapport entre l'esthétique au sens perceptif et la résultante des procédés constructifs au sens statique.

Ce terme a été ensuite utilisé par la géologie pour définir le mouvement des plaques tectoniques car les chaînes montagneuses sont l'expression de force interne non visible. De la même période, nous retrouvons ce questionnement chez des dessins de Viollet le Duc qui cherchait à représenter comment :

*"Les forces en présence vont modeler les formes visibles à la surface."*<sup>11</sup>

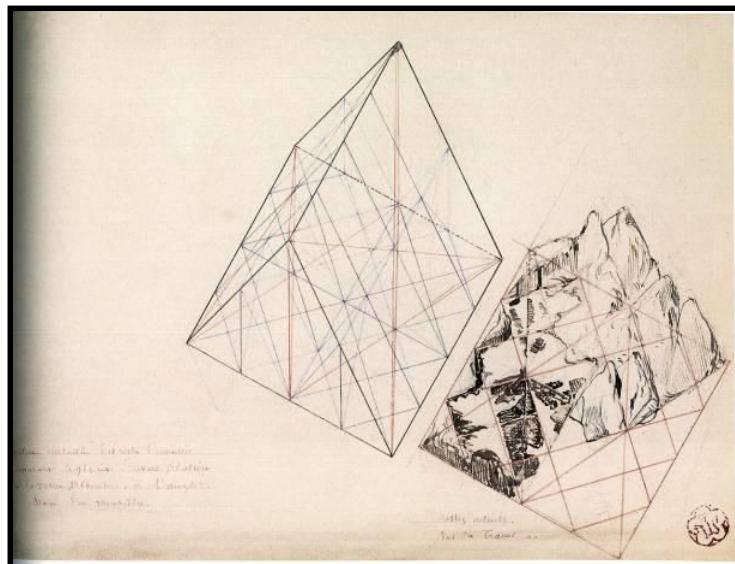


Figure E : illustration d'Eugène Viollet le Duc - Système rhomboédrique du Mont-Blanc

Ce concept de tectonique a été réintroduit dans le débat contemporain par Kenneth Frampton dans son ouvrage *"Studies in tectonic culture, the poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture"* en 1995. Il questionne la notion de spatialité des modernistes et soulève des questions d'expressions constructives en interrogeant la notion de spatialité. Il présente la tectonique comme "une poétique de la construction"<sup>12</sup>.

Dans ce mémoire, lorsque je fais référence au terme tectonique, je le fais sous l'angle présenté par Kenneth Frampton. C'est-à-dire un outil mettant en rapport la conception théorique et la traduction matérielle de celle-ci.

L'apport de la tectonique permet de questionner comment l'idée prend forme, quels outils sont nécessaires pour la représenter ? Quels sont les matériaux choisis et dans quelles conditions sont-ils mis en œuvre ? Le concept original est-il déformé, modifié, altéré ou au contraire sublimé par sa transformation matérielle ?

<sup>11</sup> DESTOMBES Louis , Extrait du cours d'Histoire intitulé : Pensée constructive. Histoire, théories, analyse

<sup>12</sup> Kenneth Frampton, *Studies in tectonic culture, the poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture*, Mit Press, 1995

## Expérimentations

Dans le cadre de l'analyse tectonique, un protocole expérimental de résistance des matériaux a été mis en place pour essayer de comprendre la manière dont la matière imprimée par fusion déposition se comporte après impression.

- La première expérience consiste à analyser l'impact du sens d'impression d'un objet sur sa résistance dans un test de la résistance à la flexion.
- La deuxième expérience cherche à comprendre l'impact du taux de remplissage d'un objet sur sa résistance dans un test à la résistance à la flexion.

Les expérimentations conduites dans ce mémoire ont été réalisées durant la période de covid et les outils de mesures utilisées n'ont pas la précision d'outil de laboratoire.

Le protocole expérimental mis en place essaie de reproduire les conditions d'un essai mécanique de résistance à la flexion en trois points; un point où une zone de charge située au centre de l'élément testé, deux points où zone de support située aux extrémités de celle-ci.

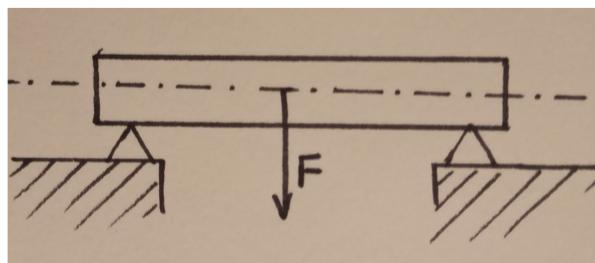


Schéma de l'essai mécanique mis en place

Au cours des expériences effectuées, on se rapproche d'un essai mécanisé non normalisé, dans la mesure où la compression a été réalisée par pression manuelle et mesuré à l'aide d'un dynamomètre. Dans le cadre de ces expériences, il est probable qu'il existe un quatrième point de charge qui produit un effort tranchant pouvant alterner la précision des mesures.

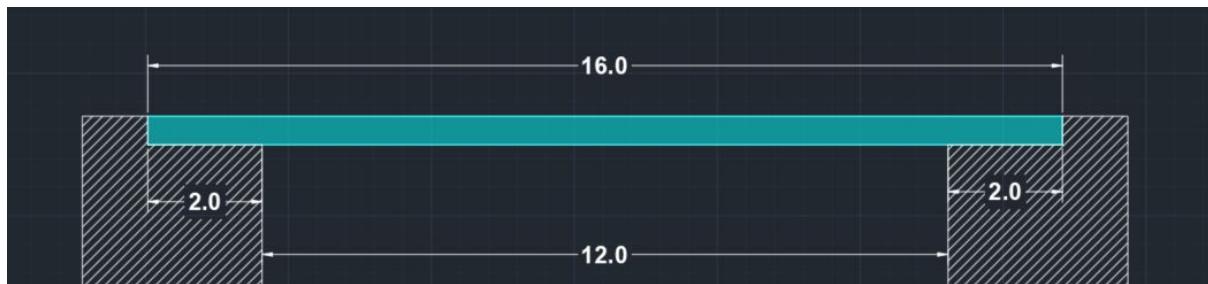
### Matériels et outils:

Pour effectuer les expérimentations, une imprimante par Fusion-Déposition a été acquise. Le modèle de l'imprimante FDM est une Creality ender 3.

C'est une variante du modèle RepRap. Elle est basée sur le mode de fonctionnement d'une imprimante cartésienne s'appuyant sur les axes X, Y, Z pour constituer des objets volumiques. Afin de faciliter l'adhérence des couches avec le support, celle-ci est constituée d'un plateau chauffant.

L'apport de filaments est géré par l'extrudeur. Le filament est transformé par un bloc chauffant puis est déposé à travers la buse selon l'itération du modèle.

### Protocole expérimental :



Dimension du test de traction



Photographie du dispositif mis en place

Afin de reproduire un test de traction, un support de travail a été mis en place où des cales en PLA ont été imprimées et placées à 12 cm l'une de l'autre de manière perpendiculaire.

Des premiers éléments mesurant 1\*1\*16 cm ont été imprimés. Lors de test préliminaire, avec les outils de rupture dont je disposais, il m'était impossible de rompre les barres. La décision a été prise de changer d'échelle.

Des barres mesurant 0,5\*0,5\*16 ont été imprimées et ce volume est devenu le volume de référence pour les deux expériences.

### Conditions d'expérimentation:

Les expérimentations ont été conduites à l'air libre en extérieur durant le mois d'avril lors d'après-midi où la température variait de 12° à 18° selon les jours de test de rupture. Du fait du montage artisanal du dispositif de test, une vérification avec un niveau à bulle a été effectuée avant chaque test pour vérifier les conditions d'équilibre similaires.

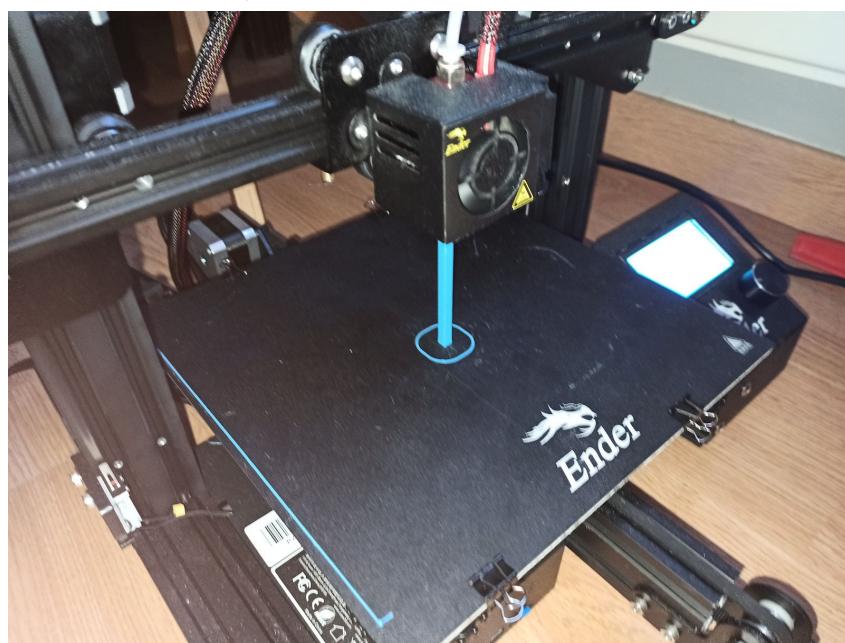
Pour optimiser l'impression, chaque barre a été imprimée d'une manière individuelle pour éviter les retraits et favoriser la cohérence entre les couches.

## SENS D'IMPRESSION :

La première expérience cherche à comprendre si le sens d'impression en PLA a des conséquences sur sa résistance.

Pour l'expérience, trois sens d'impressions ont été retenus. La Barre A, a un sens d'impression à 90°, pour cela, le volume de la barre a été imprimé de manière verticale. Ensuite, le volume de la barre B a été imprimé à plat, pour que les lignes d'impressions soient horizontales. Enfin la barre C, est imprimé dans les mêmes conditions que la barre C, sauf que lors du test de résistance, elle est pivotée à 90° afin que les lignes d'impressions soient positionnées verticalement

Toutes les barres ont été imprimées avec des paramètres similaires; elles ont une densité de 20%, une épaisseur de 0,2 mm, une température de fusion de 200°, d'un plateau chauffant à 50°, d'une vitesse de 50mm/s.



Photographie lors d'une impression d'une barre imprimée à 90°

A - Barre 90°	B - Barre - à plat	C - Barre - verticale
A diagram showing a series of horizontal lines forming a thick vertical wall, indicating a vertical print orientation. An arrow points downwards along the length of the wall.	A diagram showing a single long horizontal line, indicating a horizontal print orientation. An arrow points downwards along the length of the line.	A diagram showing a series of horizontal lines forming a thick vertical wall, similar to the first diagram, but rotated 90 degrees, indicating a vertical print orientation. An arrow points downwards along the length of the wall.

Tableau illustrant le sens d'impression des barres A, B et C lors du test

SENS D'IMPRESSION	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Barre A - 90°	/	/	6	5,5	3,5
Barre B - à plat	/	11	8,5	11	9,3
Barre C - verticale	11	14,5	/	12	10,2

Tableau et graphique synthétisant les résultats des 5 tests effectués

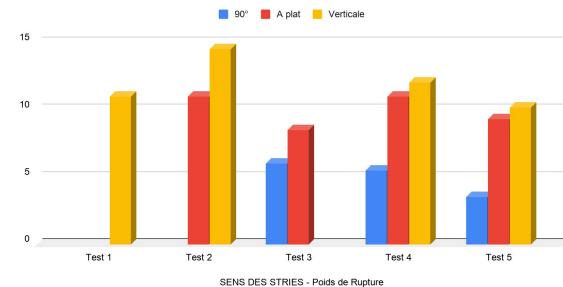
Une série de 5 tests a été effectuée, du fait des outils de mesures artisanaux les tests 1, 2 et 3 sont incomplets mais leurs données fiables ont été conservées pour pouvoir établir une moyenne de résistance à la traction générale du sens d'impression de barre.

Lors des tests 1 et 2 de la barre A des moments fléchissants ont été observés lors du test ce qui fait qu'aucune donnée n'a pu en être extraite, en revanche il est important de préciser qu'elles ont cassé lors de la mise en place du dispositif et de geste brusque de la part de l'opérateur.

En observant les tests 3, 4 et 5, on observe un décalage de valeurs entre la barre A et les deux autres allant du double au triple.

Lors des tests de la barre A, la rupture se faisait nette dans le sens des couches d'impression, alors que pour les barres B et C, la rupture était imprévisible et aucun schéma de rupture n'a pu être mis en évidence.

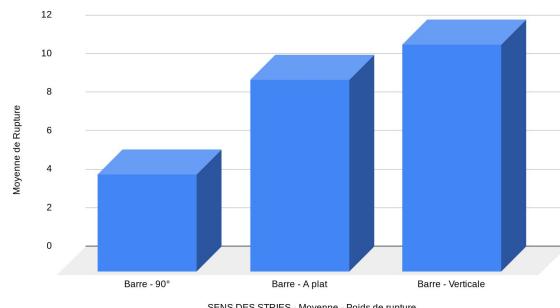
Barre 5-5-160cm - Poids de Rupture en Kilogramme en fonction de leur sens d'impression



SENS DES STRIES	Moyenne de Rupture
Barre - 90°	5 kg
Barre - à plat	9,95 kg
Barre - Verticale	11,74 kg

Tableau et graphique des moyennes de course

Moyenne de rupture par rapport au sens de d'impression de la barre



MOYENNE-BARRE 5*5*160	90°	A plat	Verticale
Temps d'impression (min)	70	30	30
Poids de la barre (g)	4	4	4
Poids de Rupture (kg)	5	9,95	11,74
Nbs après rupture (u)	3	3	2,4
Nombre de Test effectué (u)	3	4	5

Tableau de synthèse du sens d'impression des barres A, B et C

Conclusion :

Après cinq tests effectués, on en conclut donc que le sens d'impression en PLA a un impact sur la résistance des matériaux.

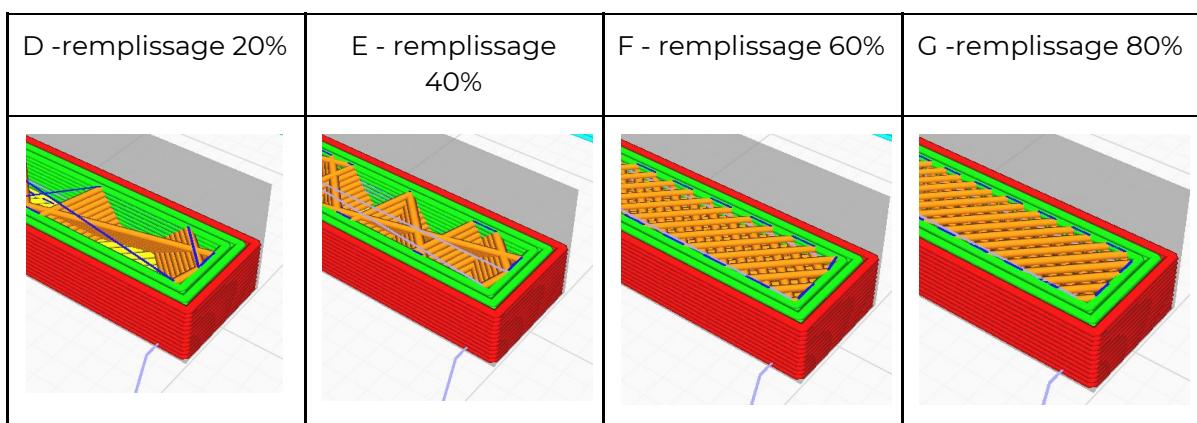
La barre C imprimée à plat, mais disposée verticalement est plus résistante que A et B. En revanche, afin d'établir une moyenne plus fiable, il serait intéressant d'effectuer un nombre plus important de tests avec des outils plus précis pour établir avec plus de distinction l'impact de résistance entre la barre B et C.

## POURCENTAGE :

La deuxième expérience cherche à comprendre si le taux de remplissage par impression FDM en PLA a des conséquences sur sa résistance.

Dans le logiciel Cura, il est possible de choisir le taux de remplissage mais aussi la forme du remplissage. Pour cette expérience a été choisi un remplissage à la forme pyramidale nommé "triangles" dans Cura. Chaque élément a été imprimé individuellement afin d'assurer une cohérence et éviter toute dégradation de pièce suite à une mauvaise cohérence des couches.

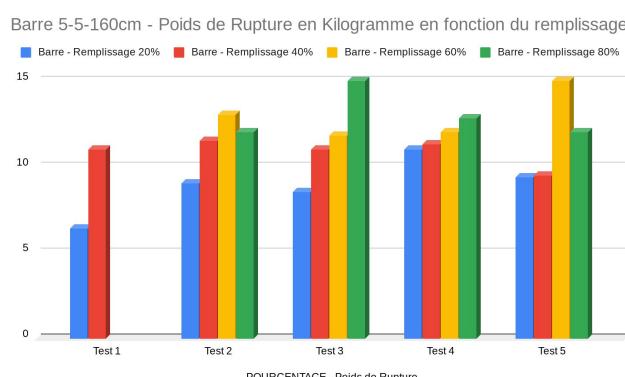
Quatre taux de remplissage avec un rapport de proportion ont été retenus : 20% 40% 60% et 80%.



Imprime-écran illustrant le taux de remplissage des barres D, E ,F et G

Comme vous pouvez le lire dans le tableau de synthèse, le taux d'impression a un impact sur le temps d'impression. En revanche à propos de la masse des objets on n'observe pas de variation significative entre la barre D, E et F . La barre G possède une masse supérieure de 1 gramme. Nous émettons l'hypothèse que la précision des outils de mesure ne permet pas de quantifier les masses des barres avec justesse. En théorie, les barres ayant un pourcentage plus élevé possèdent une masse plus élevée en correspondance avec la proportion de remplissage de matière de celles-ci. Les variations de masse entre barres ne respectent pas le

rapport de proportionnalité car les barres sont de petites dimensions et comme vous pouvez le voir sur les images extraites du modèle numérique ci-dessus, les lignes extérieures formant la couche périphérique, représentées par la ligne rouge et les lignes vertes. ont une dimension importante par rapport à l'espace vide.



Graphique synthétisant les résultats des 5 tests effectuées

POURCENTAGE	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Barre - Remplissage 20%	6,401	9	8,5	11	9,4
Barre - Remplissage 40%	11	11,5	11	11,3	9,5
Barre - Remplissage 60%	/	13	11,8	12	15
Barre - Remplissage 80%	/	12	15	12,8	12

Tableau et graphique synthétisant les résultats des 5 tests effectuées

Tout comme l'expérimentation des sens d'impression, le premier test a rencontré des problèmes afin d'extraire les données pour les barres de 60% et de 80%. Les données des barres au remplissage de 20% et de 40% ont été conservées pour établir une moyenne générale plus précise.

Après observation des 5 tests de ruptures effectuées, on observe que sur les tests 2 et 5, la barre F au remplissage de 60 % est plus résistante que la barre G. Nous remarquons que la différence dans le test 2 est plus légère de 1 g. En revanche, lors du test 5, nous observons une différence de résistance significative. Lors du test 5, la barre F est plus résistante de 3g .

POURCENTAGE	Moyenne de Rupture
Barre - Remplissage 20%	8,9 kg
Barre - Remplissage 40%	10,9 kg
Barre - Remplissage 60%	12,1 kg
Barre - Remplissage 80%	13 kg

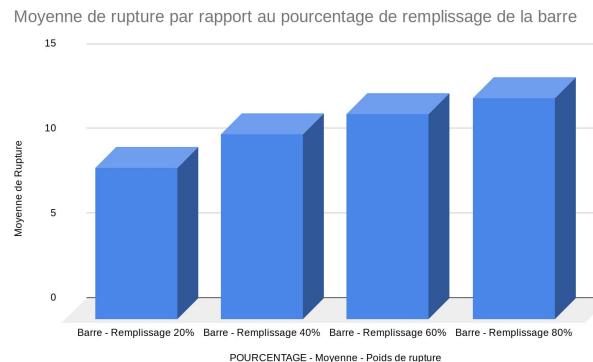


Tableau et graphique des moyennes de rupture

MOYENNE-BARRE 5*5*160	20%	40%	60%	80%
Temps d'impression (min)	30	34	37	39
Poids de la barre (g)	4	4	4	5
Poids de Rupture (kg)	8,8602	10,86	12,15	12,95
Nbs moyen après rupture (u)	2,8	3,2	2,75	2,25
Nombre de test effectué (u)	5	5	4	4

Tableau de synthèse des expériences du pourcentage de remplissage

#### Conclusion :

En réalisant une moyenne des données réalisées sur les cinqs tests, nous observons que plus le taux de remplissage est élevé, plus la résistance de la pièce est importante

## FORME MATIÈRE :

Lors d'un concours organisé par Polymaker, un fabricant de filament a lancé une compétition pour déterminer quel anneau fabriqué par une imprimante par fusion-déposition était le plus résistant lors d'une mise en tension de deux anneaux reliés par des crochets.

Pour avoir des bases communes, les concurrents devaient utiliser le même matériau PolyMax™ PLA sans renforcement, imprimé avec un diamètre de 0,4 mm, ne devant pas dépasser 50g et respectant des dimensions définies.

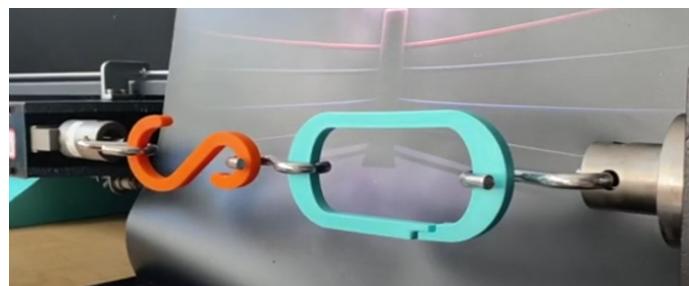


Figure F : Image extraite d'une vidéo décrivant les conditions de test des anneaux

Dans le cadre de ce concours, un internaute nommé Stephan-CNC Kitchen , un maker qui partage sur internet des tests de compression et des tests d'élongations, a produit différentes formes d'anneaux au poids avoisinant les 8 grammes. A travers cette expérience, il cherche à mettre en évidence l'impact des formes sur la résistance.

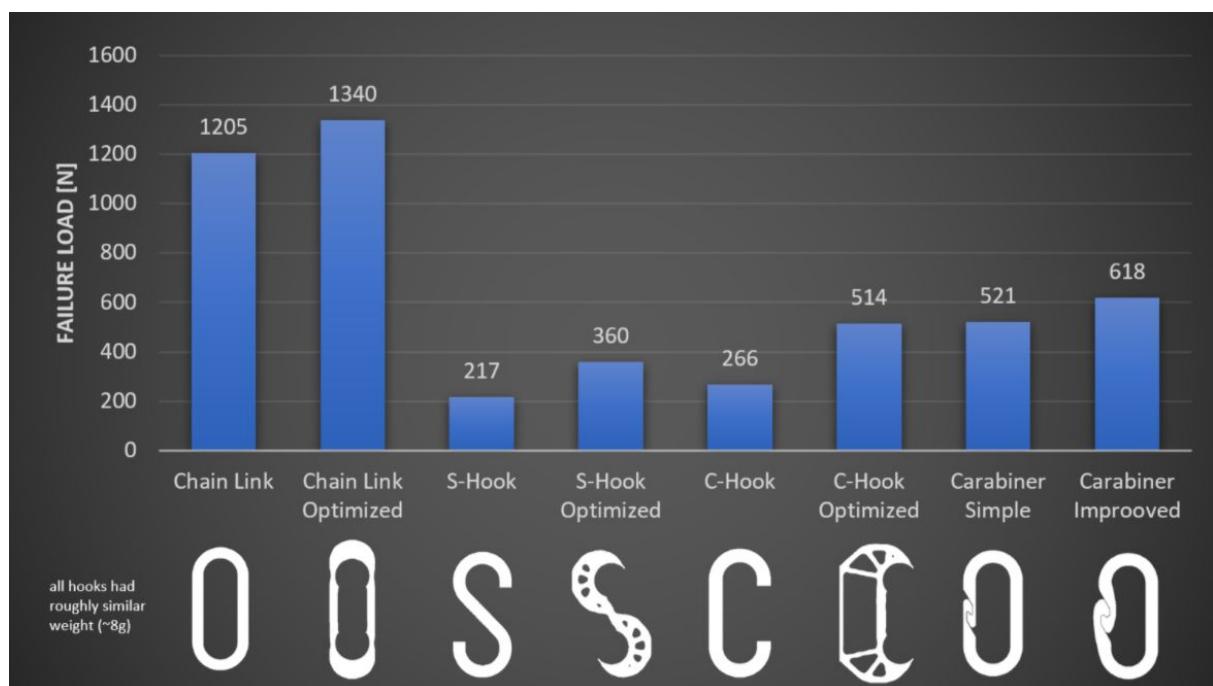
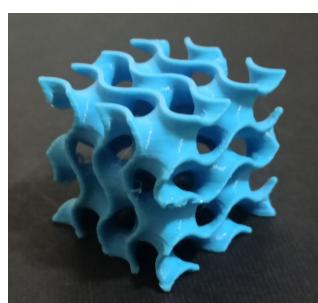
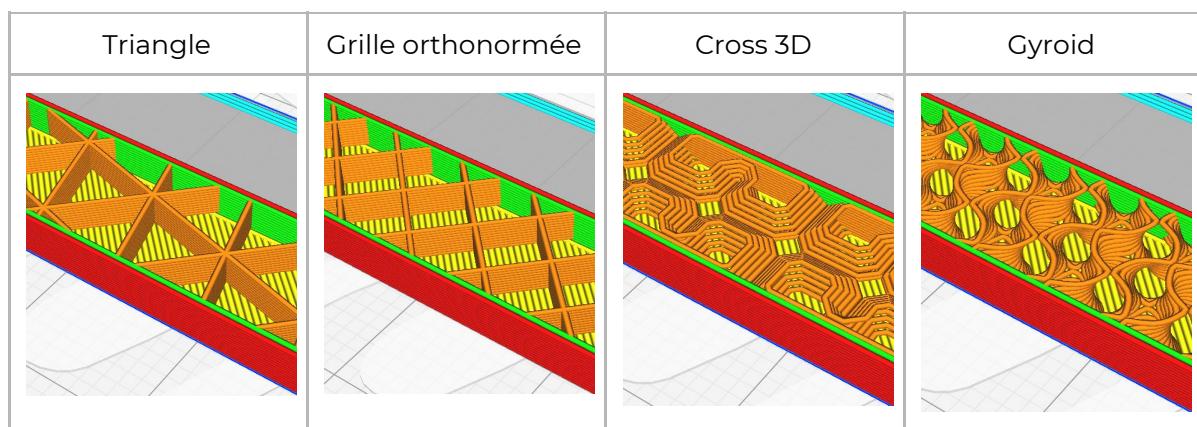


Figure G : Diagramme illustrant la résistance des anneaux en fonction de leur forme

Ce diagramme met en évidence l'impact de la forme sur le comportement mécanique d'une pièce donc de la disposition de la matière dans l'espace selon des contraintes de forces appliquées.

Les expérimentations par impression en fusion-déposition mettent en évidence l'anisotropie du matériau PLA. Le sens des impressions a un impact sur la résistance des matériaux. La tenue mécanique d'une pièce dépend de son orientation, la quantité et le placement de la matière selon des contraintes.

Ces expérimentations sur le sens d'impression et le pourcentage devait être complété par des tests de traction de barres imprimées dont la forme de remplissage variait comme l'indique le tableau ci-dessous.



Puis pour comprendre l'impact de la forme sur la résistance, devait être produit des tests de compression à partir de volume cubique en produisant les formes ci-dessus, de même volume et dont la masse est égale.

Il aurait été préférable de réaliser l'intégralité des mesures à l'aide de bancs d'essai, ce qui aurait permis de produire des données d'une plus grande précision.

Les limites des expérimentations que j'ai menées, sont les précisions des mesures corrélées à des éléments imprimés de petite échelle. De plus, les expérimentations ont été faites avec un outil de fabrication additive par fusion-déposition et un seul matériau qu'est le PLA.

Comme nous avons pu l'aborder dans l'état de l'art, il existe de nombreux outils de fabrication additive associés à différents matériaux transformés par des procédés de mise en œuvre, qui par la rencontre de ces deux éléments possèdent des singularités que nous allons aborder à travers un corpus pour souligner les aspects tectonique de la fabrication additive.

## **Aspects tectoniques de la fabrication additive**

Les techniques de fabrication additive possèdent de nombreux matériaux et des procédés techniques de transformation de la matière qui ont des impacts sur les propriétés mécaniques ainsi que sur l'expression structurelle et formelle.

Pour essayer de comprendre quelles sont les tectoniques des fabrications additives, je vais vous les présenter à travers trois grandes thématiques qui explorent et interrogent les rapports entre conception, matière, outil et processus de transformation de la matière.

### **Stratification**

Une des particularités de la fabrication additive est l'association d'un modèle numérique découpé en tranche par un logiciel selon les paramètres de l'outil utilisé. Par exemple pour la FA par FDM, la mesure des couches provient du diamètre de la buse, pour le SLS la mesure des couches provient de la précision du laser et de la granulométrie des poudres employées.

Le processus de fabrication additive est un processus de fabrication par couche successive. L'adhérence des couches est déterminante pour définir l'objet et ainsi constituer son unité. Dans le processus de conception par fabrication additive, une étape cruciale est le découpage en tranche. Elle s'effectue à l'aide de logiciels dédiés qui prennent en compte les propriétés physiques de l'outil de fabrication additive et les retroussent numériquement. C'est une étape intermédiaire entre la conception et la fabrication.

Pour effectuer cette démarche de découpage, le logiciel le plus communément utilisé est Cura. C'est un logiciel gratuit développé par l'entreprise Ultimaker avec pour objectif de faciliter l'accès aux outils de fabrication additive. Au vu de son succès, une communauté s'est formée et a contribué à l'évolution et à l'amélioration de ce produit. Il existe des variantes entre les éditeurs de logiciel dont l'accès est payant ou relatif à l'utilisation de machines spécifiques.

Le logiciel Cura est intéressant car depuis sa mise à disposition; il a énormément évolué grâce aux requêtes des utilisateurs et des avancées techniques de l'ensemble des imprimantes du marché. En effet, le logiciel Cura possède différents niveaux d'utilisation; simple pour une utilisation élémentaire mais également des paramètres plus complexes selon le niveau de l'utilisateur ou la production de pièces spécifiques. Le logiciel Cura synthétise les éventails de possibilité et les déclinaisons qu'offre ce processus de découpage.

### Paramètres de stratification dans le logiciel Cura :

Dans le logiciel Cura, il existe 3 étapes du processus d'impression : la préparation , la visualisation et enfin la surveillance. Les paramètres d'impression sont ajustables selon les modèles de machines. Une fois cela effectué, apparaît un espace de travail dimensionné selon les limites physiques des dimensions d'impression de celles-ci. Ces données physiques sont modifiables si des changements ont été opérés sur les modèles initiaux. Il est possible de paramétrier les données de taille, les données relatives à l'extrudeur ou la présence d'un plateau chauffant.

Les paramètres les plus essentiels sont présentés dans une fenêtre. Elle contient les informations suivantes :

- Les épaisseurs de couche
- Le taux de remplissage
- La présence de support
- La présence d'un radeau d'adhésion

Dans cette démarche de personnalisation, les données relatives à la matière sont paramétrables, il est possible d'affecter la densité de celui-ci en g/m<sup>2</sup>, son diamètre, son poids ainsi que son coût.

Lors du processus de visualisation, il est possible de définir les couleurs et d'attribuer des épaisseurs de ligne aux types produites.

Lors du processus de découpage, il existe la possibilité de définir la forme du pourcentage, de régler les vitesses de ventilation, de définir les vitesses d'impression, de déplacement ou les retraits.

Il est également possible de paramétrier la stratification du modèle selon deux extrudeurs pour produire des objets polychromiques.

Après importation d'un modèle, lorsque les conditions d'impression sont définies et que le processus de découpage est effectué, les données sont encodées en langage G-CODE pour transmettre les informations d'impression à la machine.

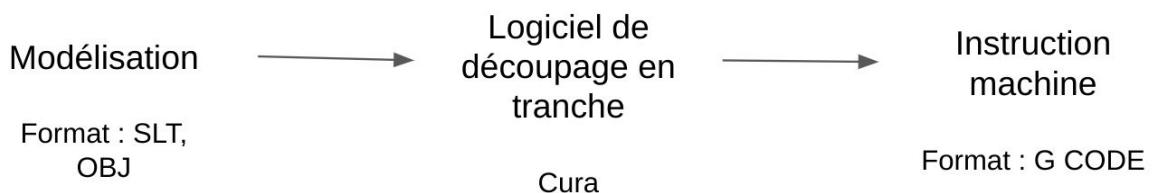


Schéma du processus de découpage en strate

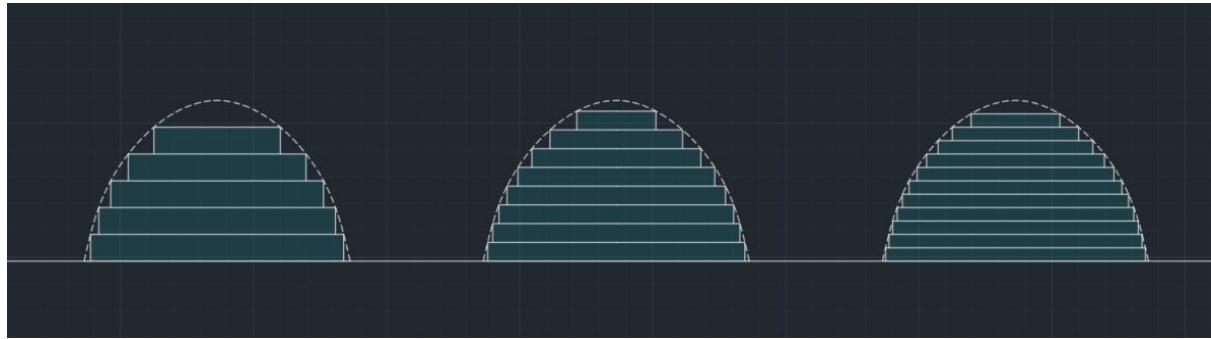
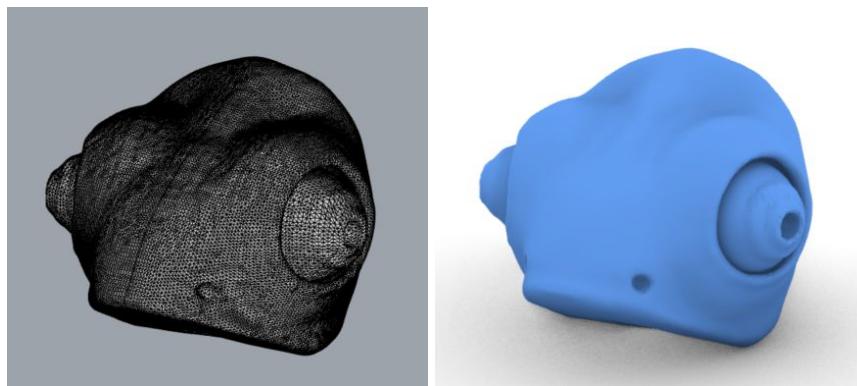


Schéma de la stratification

A l'instar des résolutions des pixels, la résolution des couches définit la précision des modèles, comme on peut l'observer sur la figure représentant l'effet d'escalier. Il est important de noter que ce processus de stratification transforme un modèle en une reconstitution de celui-ci par un processus défini par les capacités constitutives de l'outil.

Sur le modèle, creality ender 3, avec lequel les expérimentations ont été menées, il existe quatre diamètres de buse : 0,12 mm - 0,16 mm - 0,2 mm - 0,28 mm. Et pour un modèle initial commun, nous souhaitons observer le processus de découpage sur cura puis leur traduction matériel après impression. Le modèle choisi est une tête de caméléon constitué d'une base plate, de porte à faux dépassant les 45° et de formes courbes à des angles variés permettant de mettre en valeur les stratifications de l'objet.

Les modèles ont été imprimés en PLA d'une manière individuelle, dans des conditions similaires où la seule différence de paramètre est l'épaisseur des couches d'impression.



Imprime écran de rhinocéros d'une tête de caméléon en filaire et rendu

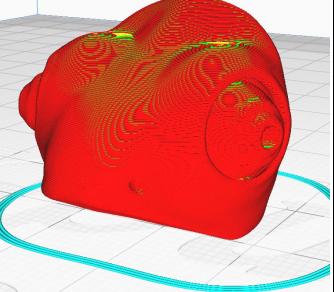
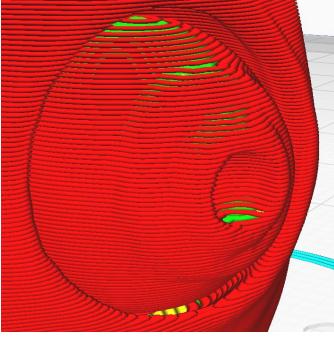
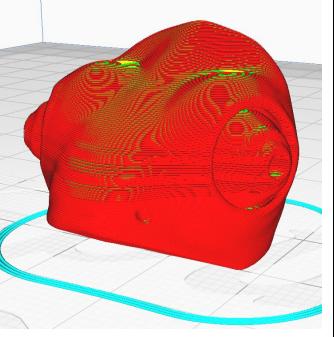
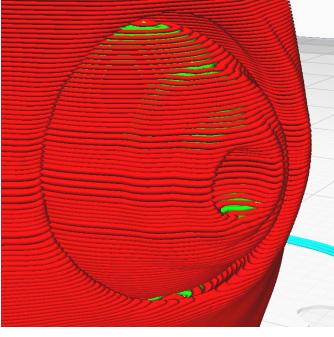
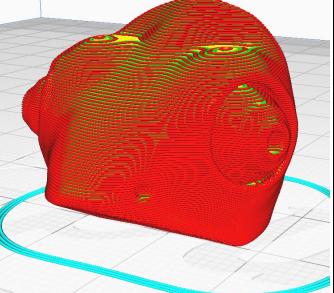
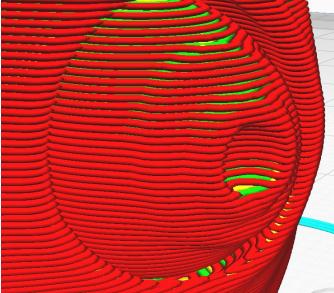
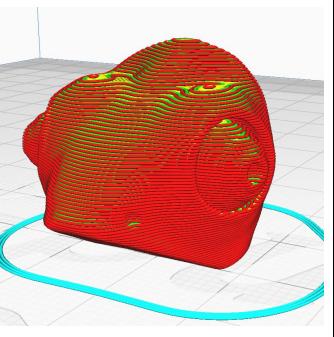
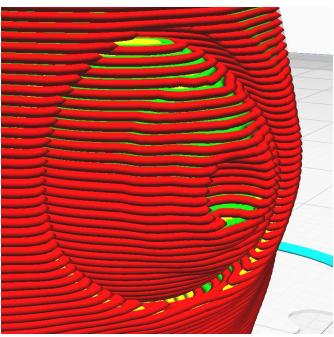
Epaisseur = 0.12mm Temps = 1h15min Poids = 5g Longueur = 1,53m			
Epaisseur = 0.16mm Temps = 1h07min Poids = 4g Longueur = 1,40m			
Epaisseur = 0.2 mm Temps = 43 min Poids = 4g Longueur = 1,33m			
Epaisseur = 0.28mm Temps = 35 min Poids = 4g Longueur = 1,45m			

Tableau comparatif des modèles imprimés à différents diamètres de buse

En observant les données de préparations extraites de Cura et les objets imprimés, nous remarquons que plus les couches d'impression sont petites, plus le temps d'impression est long. De plus, lorsque le diamètre de la buse d'impression est fin, nous observons une atténuation visible de ce processus de stratification.

Pour atténuer ou faire disparaître ce processus, il est possible d'effectuer des post-traitement afin de lisser les pièces. Il y a un rapport à trouver entre qualité de la pièce, apparence et résistance en fonction de l'usage de celle-ci.

Pour les objets imprimés par Fusion-déposition, la stratification d'objet imprimé en PLA est visible et comme nous l'avons montré dans la partie précédente, le PLA est un matériau anisotrope et les liaisons des couches sont un point de faiblesse du matériau.

En regard des expérimentations effectuées, il aurait été intéressant d'effectuer des tests de résistance à la traction pour observer l'impact de la résolution des couches sur la résistance des objets imprimés en PLA.

### Stratification et sens d'impression :

D'une manière conventionnelle, les imprimantes 3D cartésiennes impriment du bas vers le haut avec les axes x et y horizontal et l'axe z est vertical.

Pour dépasser des limites d'impression, des ingénieurs ont eu l'idée d'imprimer sur un rouleau chauffant et de modifier l'orientation des buses afin d'être en mesure de produire des objets aux tailles dépassant celle de l'outil.

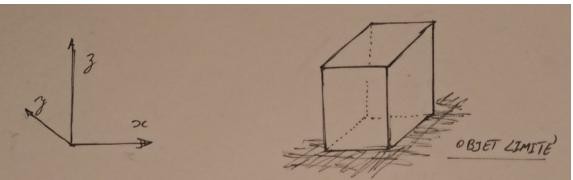
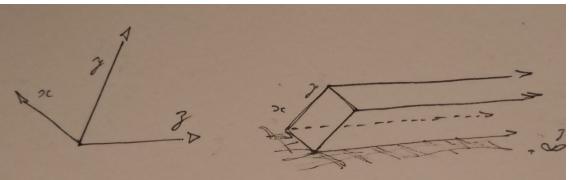
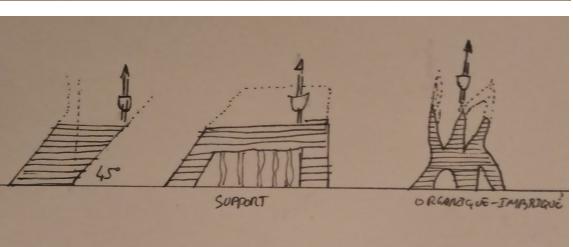
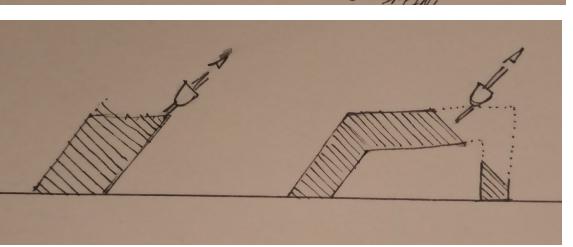
 	 
<p>Schéma : Outils de fabrication additive dont l'axe Z se déplace verticalement</p>	<p>Schéma : Outils de fabrication additive dont l'axe Z se déplace horizontalement</p>

Tableau comparatif du sens des stratifications

Comme on peut l'observer sur les schémas des outils dont l'axe z se déplace verticalement, les objets en porte à faux orientés à  $90^\circ$  sont difficilement réalisables sans la création de support. En revanche, les outils dont l'axe Z se déplace horizontalement et ayant un sens d'impression à  $45^\circ$  sont en mesure d'imprimer des porte à faux avec une grande aisance du fait de l'angle de la buse. Car cela revient à déposer les couches les unes sur les autres. Ces nouveaux modèles d'imprimantes ont la particularité d'imprimer des objets d'une longueur théoriquement infinie et l'on peut imaginer l'impression de poutre ou d'objet dépassant les limites des outils.

La matière et la manière d'imprimer ont des impacts sur le processus de stratification et sur l'esthétique générée. A une échelle plus importante, ce processus de fabrication par couche successive a d'abord été traduit dans l'univers du bâtiment par des universitaires qui ont essayé d'imprimer du béton ou de l'argile, à l'aide de dispositif gruté ou de bras robotisé.

C'est le cas d'un projet mené, dans le cadre d'un master d'architecture et de fabrication digitale à l'ETH de Zurich. En partenariat avec un festival de danse, ils ont exploré comment les colonnes pourraient être traduites d'une manière contemporaine en se servant des outils de génération de forme informatisée et des processus d'impression 3D. Dans leur réflexion il pose la question suivante :

*"What could the contemporary design of a new column order enabled by emerging digital technologies be like?"<sup>13</sup>*



Figure H et I : Modèle numérique et photographie de l'impression de la colonne

Les formes ont été générées à l'aide d'outils computationnels. Elles ont produit toute une série de variantes, chacune constituée d'une esthétique propre à la fabrication additive. A l'instar des trous de banche du processus de coffrage qui vont rendre visible le processus constructif utilisé. Cette technique de fabrication additive par déposition va donner à voir le processus de stratification. Cette expérimentation met en lumière la traduction du procédé de fabrication d'un élément fondamental de l'architecture qu'est la colonne. Ce porteur ponctuel vertical étant traditionnellement la reconstitution d'un assemblage de pierre subdivisé en 3 éléments; la base, le fût et et chapiteau. Avec l'apparition du béton, la colonne s'est muée en un porteur linéaire dénué d'ornement.

Les processus constructifs produits par l'ETH de Zurich génèrent des colonnes pouvant être générées avec une grande richesse de variation selon deux critères : la génération du modèle informatique subdivisé en tranche et son exécution avec un outil couplé à une matière.

La traduction des formes informatiques en matière par déposition à deux lectures, celle du détail et celle de la forme générale. Il est intéressant de comparer la forme générale théorique avec la forme produite car la superposition des couches détermine la modénature de la colonne. Ces modénatures des colonnes sont constituées de courbes où la superposition générale des strates génère la forme globale. S'en dégage des formes organiques où le béton séché donne l'impression de rochers corallieux.

---

<sup>13</sup>MAS DFAB in Architecture and Digital Fabrication | ETH Zurich "Quelle pourrait être la conception contemporaine d'un nouvel ordre de colonnes rendu possible par les technologies numériques émergentes?" <https://dbt.arch.ethz.ch/project/concrete-choreography/>

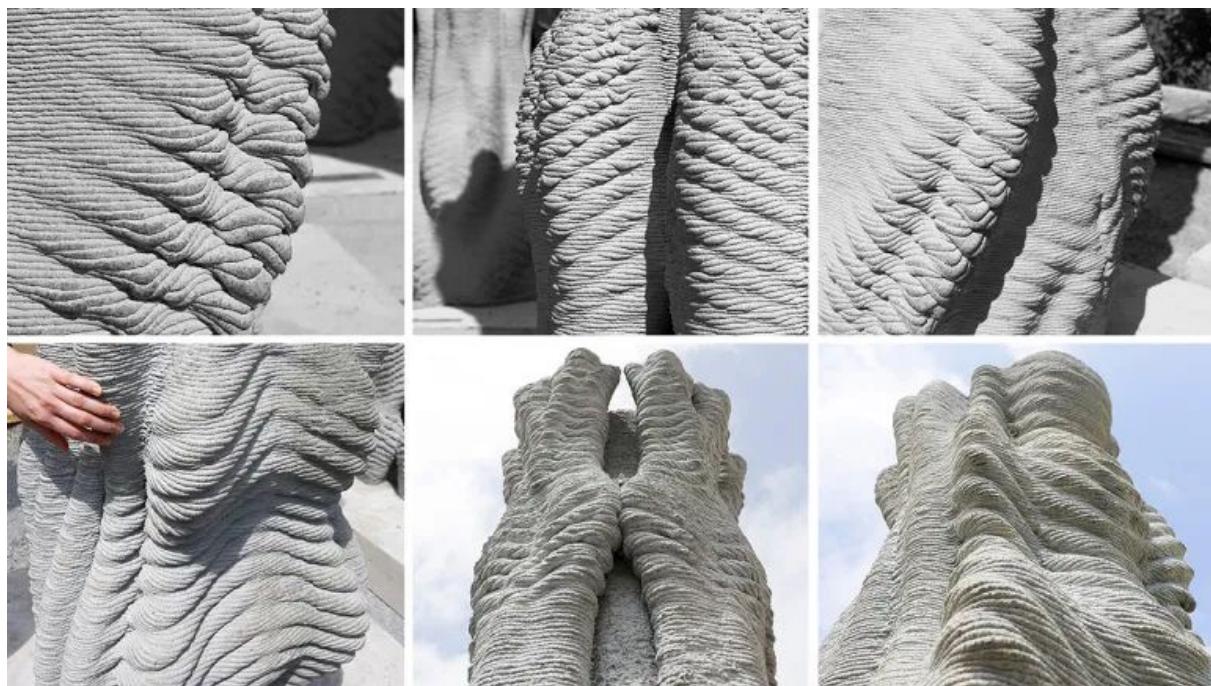


Figure J : Photographie des stratifications des colonnes

Ce processus de stratification-déposition peut être manié de telle sorte que la déposition des couches de matière provoque volontairement une esthétique particulière composée de motifs et d'ornements qui utilisent le potentiel de l'outil de fabrication additive.

Le monde de la poterie s'est approprié ces outils de fabrication additive pour manier l'argile. Communément aux techniques de fabrication additive, celle-ci est déposée selon un modèle numérique puis une fois le processus terminé, l'objet est cuit pour rendre l'argile façonnable en céramique dure. L'argile a la propriété d'être malléable et sa constitution pâteuse la rend sujet à des affaissements ou des effondrements des objets. En revanche, lorsque la composition de l'argile est maîtrisée, ces propriétés offrent la capacité de générer des objets où les strates ne se superposent plus et forment des excroissances.



Figure K : Photographies des poteries intitulée Bad Ombres V2 de Emerging Object

L'entreprise Emerging Objet fondée par un couple d'architectes a produit des outils de fabrication additive adaptés à l'argile à l'aide d'une roue sans fin et d'un système de piston. Ils ont réalisé un pavillon se servant des potentialités du processus de stratification pour générer des revêtements extérieurs constitués par cette esthétique de stratification.



Figure L: Photographies du projet Seed Stitch de Emerging Object

Les formes produites sont atectoniques dans la mesure où l'agencement de matière est purement esthétique et n'a pas de justification structurelle. La fabrication additive peut-elle marquer le retour à une forme d'ornement ?

### Stratification et traduction architecturale :

Au vu du potentiel de ces procédés techniques, des entreprises se sont emparées de ces procédés pour les traduire chacune à leur manière. En France deux entreprises se dégagent du marché, Xtree basé à Rungis, et Construction 3D basée à Valenciennes. Aux états-unis, ICON a développé des impressions de maisons en 24 heures. Apis Core est une entreprise russe qui a développé un bras articulé et a produit avec celui-ci des logements dans des sites aux conditions hétéroclites (en Russie à Dubaï).

Ces quatre entreprises ont été sélectionnées car elles travaillent avec du béton et ont dépassé la phase expérimentale pour commencer à édifier et concevoir des projets qui arrivent sur le marché avec des outils opérationnels.

	Outil	Chantier
Xtree	 Figure M1 : Bras robotisé	 Figure M2 : Buse de déposition
Construction 3D	 Figure N1 : Imprimante 3D béton	 Figure N2 : Buse de déposition

Icon (texas)	 <p>Figure O1 : Système de portique posé sur rail</p>	 <p>Figure O2 : Buse montée sur portique</p>
Apis Cor	 <p>Figure P1: Bras articulé imprimant sur site</p>	 <p>Figure P2 : Buse orientable</p>

Tableau comparatif des procédés de fabrication par déposition de béton

La comparaison de ces entreprises est basée sur des vidéos et des photographies tirées des publications produites par les entreprises. Du fait du caractère expérimental donc confidentiel, les données techniques précises n'étaient pas disponibles pour établir un comparatif plus précis, notamment sur le temps d'impression et sur la résistance des objets produits.

Néanmoins nous pouvons observer qu'à partir d'une intention d'un procédé de déposition du béton similaire, ces quatre entreprises ont développé des outils différents ce qui a pour conséquence de traduire avec des variations le processus de déposition. Par exemple Xtree a mis l'accent sur un outil précis issu des recherches en laboratoire, ce qui a pour conséquence d'avoir une résolution d'impression plus petite et ainsi de produire des formes plus complexes avec une stratification moins visible que des objets produits par Construction 3D. La manière de déposer le matériau est différente donc les productions générées le seront.

	Projet réalisé	Projet en cours de réalisation
Xtree	 <p>Figure M3 : Krypton, un poteau à Aix-en-Provence</p>	 <p>Figure M4 : Viliaprint cinq maisons à Reims</p>
Construction 3D	 <p>Figure N 3 : Pavillon dont les murs sont imprimés.</p>	 <p>Figure N4 : Bâtiments administratifs de l'entreprise de 2500 m<sup>2</sup></p>
Icon (texas)	 <p>Figure O3 : Maison imprimée en 24h</p>	 <p>Figure O4 : Overland Partner : lauréat d'un concours de design de logement imprimé</p>
Apis Cor	 <p>Figure P3 : Maison imprimée en Russie en 24h</p>	 <p>Figure P4 : Bâtiment administratif construit à Dubaï.</p>

Tableau comparatif des tectoniques des projets réalisés ou en cours de réalisation

### Les singularités :

Xtree est une entreprise qui réunit des chercheurs qui ont énormément expérimenté et développé un outil précis qui produit hors site, à la manière des processus de standardisation où les éléments sont acheminés sur place puis coulés ou assemblés avec d'autres éléments de construction.

La tectonique des projets produits exploite les attributs de la fabrication additive.

Construction 3D a avant tout développé un outil capable d'être transportable facilement à l'aide d'une grue articulée se déplaçant à l'aide d'une chaîne puis fixé sur pieds. Le diamètre de buse est d'une dimension plus importante et le projet imprimé révèle la stratification de la fabrication additive. Leurs outils ont la singularité de nécessiter une ouverture d'une largeur conséquente pour pouvoir être extraite après usage. Les dimensions des ouvertures ont été dictées par la dimension des dispositifs d'impression.

En revanche , l'entreprise ICON se sert d'un système de portique pour produire sur site des maisons. Le portique nécessite une protection pour éviter les perturbations de l'extérieur, pluie ou vent violent. Le système de portique assure une meilleure stabilité avec un ratio rapidité/qualité d'exécution

Apis Core a développé un système de bras articulé avec un système de déplacement similaire aux portiques. Ils ont la singularité de développer un dispositif de buse orientable qui permet d'orienter la déposition des couches de béton. Ce qui a pour incidence de générer des couches plus larges.

### Les communs :

D'une manière similaire, se dégage des projets imprimés en 3D, une esthétique particulière où le chemin de buse dessine les contours. L'angle droit est peu présent car l'utilisation d'une buse dépositaire et d'un matériau "pâteux" déposé invite à la réalisation de courbe. La courbure est intéressante pour donner de la résistance par l'inertie qu'elle produit. Les projets réalisés ou en cours ont en commun la génération de mur double constitué d'un remplissage sinusoïdal.

Lors du processus de fabrication, on retrouve la stratification comme aspect tectonique. Celle-ci est visible mais peut être recouverte d'un enduit pour protéger le matériau des intempéries extérieures ou pour des raisons esthétiques. Ces projets démontrent les potentiels des fabrications additives; réduction des coûts, gain de temps, économie de matière et liberté formelle. Néanmoins, le passage de prototype à des dimensions de projets viables posent de nombreuses interrogations. et la généralisation de ces processus de construction passera par une forme de normalisation pour garantir sécurité et tenue du mur dans le temps.

En dépassant les discours des entreprises, face à l'automatisation des procédés de fabrication additive, on observe sur les vidéos tirées des chantiers que la main de l'homme reste présente pour suivre les opérations et intervenir si des événements extérieurs surviennent. Sur les photographies, on distingue des agrafes métalliques pour éviter des affaissements différentiels lors de l'impression de mur à étage ou sur la deuxième image un étayage supportant les linteaux d'ouverture.

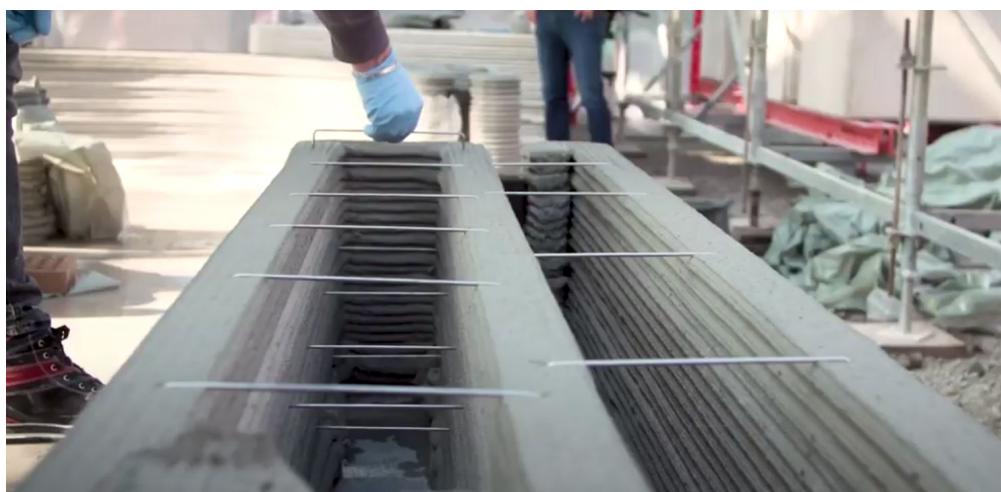


Figure Q : Attache métallique déposé manuellement sur les strates de béton,

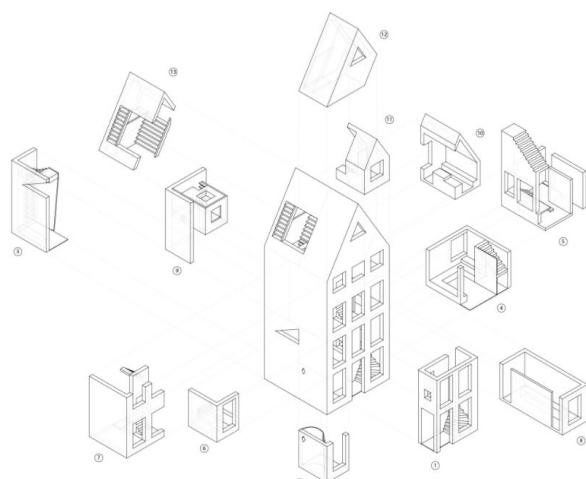
# Assemblage

## Superposition

La fabrication additive pose la question de la dimension imprimable. Dans la partie précédente, nous avons vu que les projets s'affranchissent des tailles par des systèmes de bras robotisés ou des systèmes de portiques. Cependant de nombreuses interrogations demeurent comme l'a souligné Hervé Chavet, le directeur technique de Maison Confort lors de l'opération Yris, « Il y a un vrai fossé entre ce que l'on voit sur le web et la réalité »<sup>14</sup>

Lors de cette opération, Xtree a imprimé des poteaux en 1h20, mais la problématique rencontrée sur le chantier a été comment établir une liaison entre les poteaux imprimés et la dalle du sol et celle du plafond.

Cette posture de superposition consiste à imprimer des éléments à grande échelle, puis à les assembler. Des recherches sont actuellement menées par Dus architect au Pays-Bas. Avec une imprimante de fusion déposition de grande taille, leur intention est de transformer des matériaux recyclés en portion d'immeuble.



L'opération 3D print house canal consiste à réaliser une maison de 5 étages en imprimant les éléments séparément puis venir les relier à la manière des légos par un système de clip. L'opération devait être finalisée en 2018 mais les intervenants ont eu du retard et continuent à explorer des typologies d'assemblages qui seraient propres à chaque élément selon sa position et le comportement statique de l'ensemble.

Figure R : Schéma de l'opération de constitution de la 3D print Canal House

Ce projet fait suite à une série de recherches, où ils ont progressivement augmenté d'échelle et fait évoluer l'outil. Ils sont passés d'une imprimante de grande taille reposant sur un système cartésien à un bras robotisé de 6 axes leur offrant une plus grande rapidité et précision.

<sup>14</sup>Pouthier Adrien, Maillet Florent, Flepp Augustin, *L'impression 3D entre dans une autre dimension*, Le moniteur, [Publié le 1 septembre 2017] [Dernière consultation le 08 janvier 2021] Disponible sur : <https://www.concept-yrys.com/wp-content/uploads/2017/09/2017-09-01-LE-MONITEUR-DES-TRAVAUX-PUBLICS-ET-DU-BATIMENT.pdf>



Figure S : Photographies des liaisons du projet Urban Cabin

Avant de se lancer dans l'impression puis l'assemblage d'un immeuble de 5 étages, Dus architect a produit un pavillon. Sur ce dernier ou sur le projet du canal 3D printing, on retrouve la forme archétypale des maisons hollandaises sauf qu'on ne retrouve pas une modénature dictée par les assemblages de brique. Les concepteurs générèrent une ondulation qui trouve son déploiement sur l'ensemble de l'opération en s'affranchissant des portions imprimées. Sur la photo de droite, en observant avec plus de détails le pavillon réalisé, on observe une liaison disparate qui met en évidence la reconstitution d'éléments imprimés séparément.

A l'instar d'un mur en brique où les éléments maçonnés se superposent, la fabrication additive dépose des couches. En raison du procédé de fabrication, les briques sont toutes identiques alors que le procédé de fabrication additive permet de produire des éléments différents.

Ces possibilités qu'offre l'outil changent les paradigmes de fabrication et d'assemblage. Là où la standardisation produit des variantes, la fabrication additive permet de produire des éléments uniques offrant aux concepteurs et aux fabricants des potentialités que l'on commence à explorer.

A la faculté d'architecture de Hong Kong, ils ont interrogé la relation d'un élément variant avec la constitution d'un ensemble, en s'affranchissant des processus de standardisation de la brique à l'aide de processus robotisés et de logiciels paramétriques. L'ensemble produit comporte 1871 briques, chacune est unique. L'ensemble des impressions a duré 21 jours.

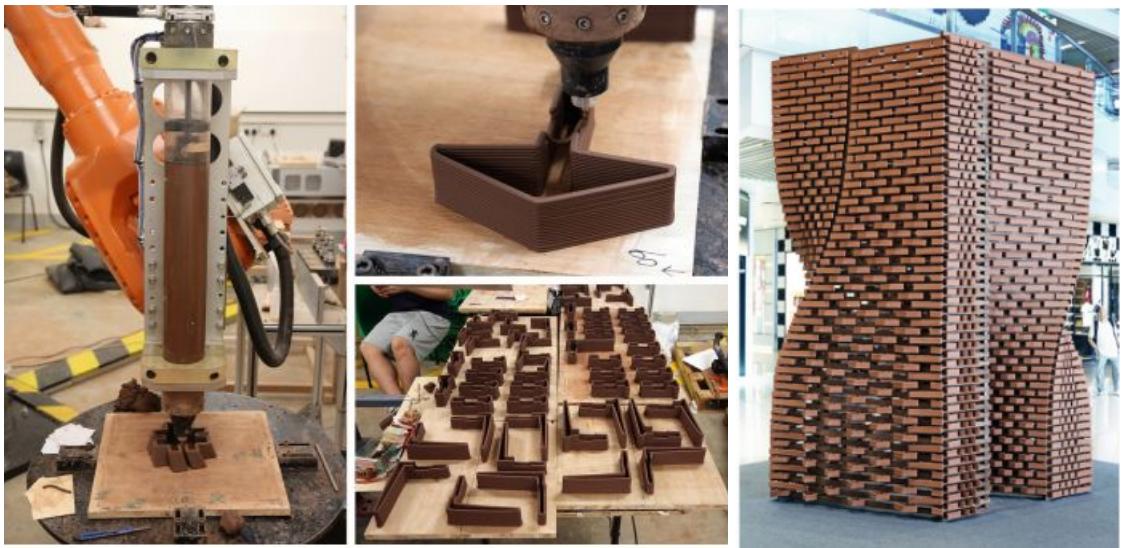


Figure T : Image extraite de Constellation de Céramique de l'université de Hong-Kong

Ce projet est une démonstration dont le but est d'éprouver les potentialités des outils de fabrication additive à partir de matériaux traditionnels tel que l'argile. Ce projet exploite la capacité de la fabrication additive pour traduire une diversité de formes complexes différentes. En revanche, les conditions d'assemblage qui ont été générées sont simples et ne tirent pas parties de tout le potentiel des outils de fabrication additive. Les briques imprimés reposent sur des couches de tasseaux de bois de 40 mm marquées par des machines CNC pour définir l'emplacement de chacune des pièces.

Il est tout à fait possible d'imaginer des générations d'assemblage plus complexes où elles font partie intégrante du processus de conception. La fabrication additive en procédant couche par couche est en mesure de réaliser des assemblages complexes et indémontables où s'enchevêtrent les éléments imprimés.

## Imbrication

La grande singularité de la fabrication additive est ce processus de constitution par stratification qui offre la possibilité de réaliser des formes imbriquées où la matière s'enchevêtre selon un modèle numérique. Ce processus d'imbrication, les techniques traditionnelles ne peuvent le réaliser avec la facilité des procédés de la fabrication additive.

Pour se familiariser au processus de fabrication additive par fusion déposition, une diversité de pièces a été imprimée pour comprendre les tectoniques de celles-ci. Une pièce trouvée sur thingiverse a été sélectionnée car elle reproduit un maillage d'un tissu. Par l'imbrication des mailles, l'objet imprimé à plat peut être plié et déformé selon les conditions d'assemblage et d'imbrication de celui-ci.

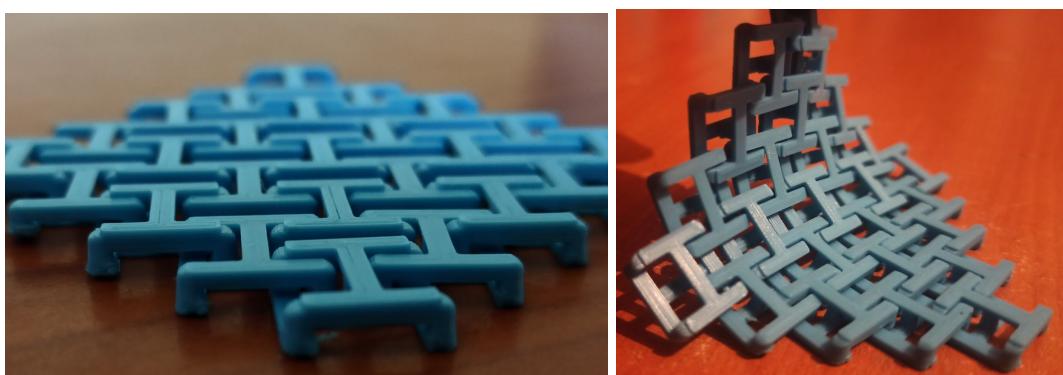


Figure U : Photographie d'impression réalisé à partir du fichier Chainmail

Ces principes d'imbrication trouvent principalement leur application dans le monde de l'ingénierie. Les singularités de l'outil provoquent un dépassement des modèles traditionnels. Par exemple, ces formes imbriquées sont utilisées pour générer des pneus sans air. L'entreprise Michelin a développé ses propres outils de fabrication additive pour mettre au point : Uptis<sup>15</sup> un système de pneu unique sans crevaison. Ce produit est imprimé avec un caoutchouc composite mêlé à une résine et du verre. La forme du pneu est une synthèse des forces de traction et de freinage. L'automobile tout comme l'aéronautique ont été les premiers secteurs à exploiter les capacités des outils de fabrication additive car ce processus d'imbrication change radicalement le processus de conception et de fabrication. Les assemblages ne sont plus pensés comme un regroupement de pièces diverses. Désormais, il est possible de produire une pièce complexe précise d'un seul tenant. Par exemple General Motors en partenariat avec Autodesk a repensé le support de siège arrière. Il était composé de 8 pièces soudées entre elles. A l'aide du generative design, ils ont conçu une pièce imprimée par frittage permettant une réduction de 40% de masse totale.

---

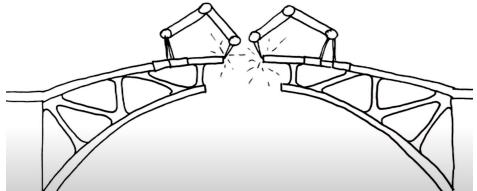
<sup>15</sup> (Unique Puncture-Proof Tire System)

Assemblage des pièces du support de siège arrière avec les pièces environnantes	8 pièces composant le support arrière	Pièce générée par design génératif	Nouvelle assemblage du siège arrière avec les pièces environnantes
			

Figure V : Tableau illustrant les changements d'assemblage d'une pièce de siège arrière

En architecture à plus grande échelle, des projets ont tenté d'exploiter les capacités d'imbrication et d'enchevêtrement de la fabrication additive pour produire des structures lattices.

L'entreprise MX3D au Pays-Bas s'est spécialisée dans la fabrication additive métallique et a tenté de réaliser un pont entièrement imprimé par un bras robotisé.

L'intention initiale de ce projet était d'imprimer à l'aide de bras robotisés directement sur site par un processus de frittage déposition.	
La première traduction du projet a été la réalisation de forme arborescente suivant un algorithme de distribution des forces.	
Pour des raisons d'usage et de sécurité, le garde corps a été intégré et participe à la résistance structurelle du franchissement. L'arborescence a été réduite à une portion.	

Le projet final réalisé ne porte plus les formes en résilles arborescentes et des intentions initiales. Ils ont conservé le garde corps courbé s'effilant selon un design paramétrique du designer Joris Laarman.

En apparence les processus d'imbrication ne sont pas présents sur le projet réalisé. Mais lorsqu'on regarde en coupe, on observe que l'imbrication de matière se trouve dans l'épaisseur du garde-corps générant des formes évidées selon la distribution des forces.

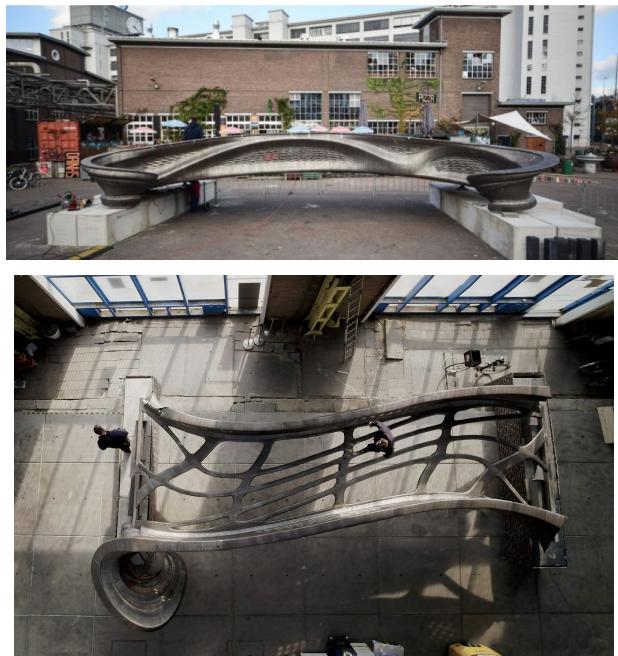


Figure W : Tableau illustrant l'évolution des intentions initiales aux projet final

En confrontant les étapes du processus de conception du projet, on observe des modifications importantes du fait du processus de fabrication additive par frittage déposition qui est encore dans une phase expérimentale. Ce pont traduit l'imbrication de matière dans sa constitution interne.

## Liaison

La fabrication additive n'est pas forcément un processus total, englobant toutes les phases d'une opération. Il peut s'intégrer ponctuellement comme un processus de fabrication parmi d'autres. Les éléments imprimés peuvent servir de liaison avec d'autres matériaux. L'entreprise MX3D a produit en partenariat avec l'entreprise Takenaka des connecteurs pour relier un poteau à trois éléments disposés dans un système arborescent. L'élément produit porte les conditions d'imbrication que nous avons évoquées dans la partie précédente.

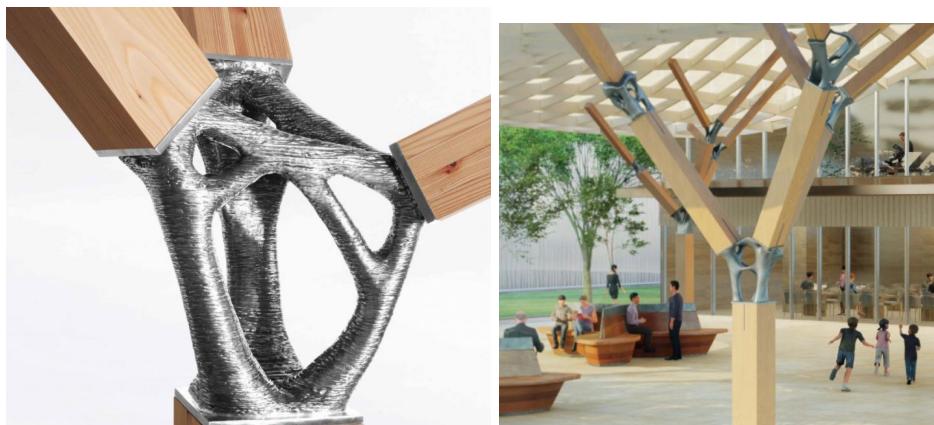
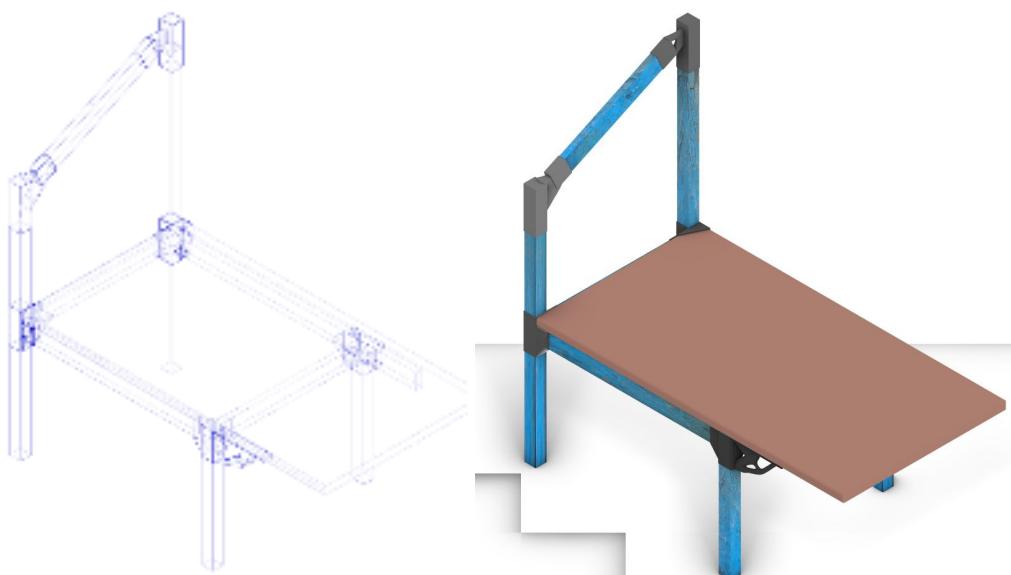


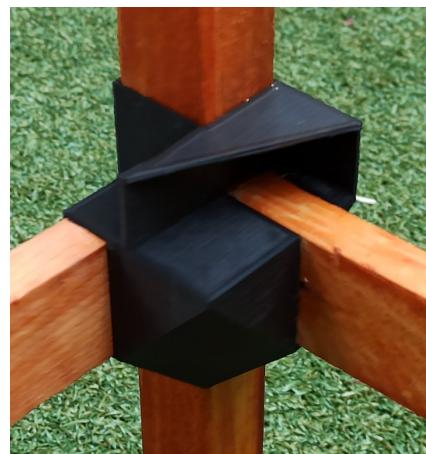
Figure X : Connecteur Takenaka

Après avoir réalisé des tests de résistance des barres, une expérimentation a été menée pour essayer d'exploiter les capacités de la fabrication additive à produire des petites séries de liaisons non standards. Les tasseaux de bois ont été agencés volontairement de telle sorte à produire des liaisons uniques.



Axonométrie éclatée et axonométrie du meuble produit sur rhinocéros

Les premiers éléments qui ont été produits s'inspirent des équerres et des dispositifs de liaisons traditionnelles que l'on trouve dans le commerce ou les mobiliers. Après avoir modélisé les liaisons sur rhinocéros, en effectuant le tranchage, émergeait sur Cura la problématique de l'impression et comment imprimer des formes en porte à faux sans utiliser de support et dépenser de la matière inutilement. Très simplement les premiers objets imprimés sont constitués de forme tétraédrique permettant d'imprimer l'objet avec des portes à faux limités. C'est le cas des liaisons A, B et C.

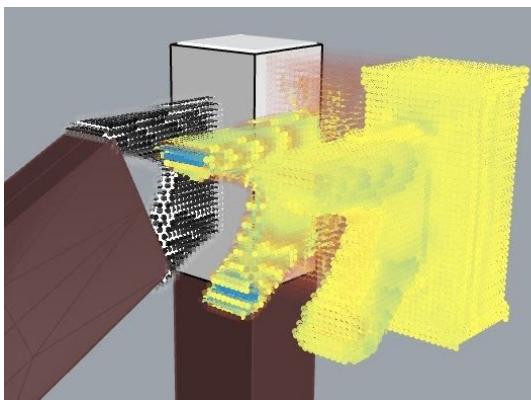


Photographie de la liaison B

Au fur et à mesure des impressions et des modélisations des liaisons, une recherche a été menée pour les imprimer le plus rapidement possible, en réduisant la quantité de matière et sans utiliser de support avec une démarche similaire au projet Takenaka de MX3D. Les liaisons D, E et F ont été imprimées avec une démarche de réduction de la matière et ont généré des liaisons organiques. Pour cela a été utilisé un logiciel d'optimisation topologique que je vous présenterais en dernière partie de ce mémoire.



Photographie de la liaison D



Imprime-écran d'une optimisation topologique - Photographie de l'objet assemblé

## Formalisation

La fabrication additive repose sur un modèle numérique et un processus de transformation de la matière par reconstitution couche par couche d'un objet. Elle permet de traduire la complexité géométrique des modèles informatiques dans des réalisations aux formes uniques. La forme est le résultat d'un processus et pose des conditions de constitution définies par les capacités du processus de transformation de la matière.



Processus de formalisation

Une expérimentation a été réalisée pour essayer de tester la capacité de traduire un agencement de barre placé selon un modèle numérique et de s'interroger sur la concordance d'un modèle numérique et d'une forme constituée.

Ces éléments linéaires ont été générés sur rhinocéros grâce à grasshopper un plug-in paramétrique. Après avoir fixé une configuration de barre qui ne se touchait pas et dont les angles étaient complexes à créer, des liaisons ont été produites pour reconstituer la forme après impression de celle-ci. Les percements des liaisons ont été générés à partir des diamètres des éléments bois rond. Après une première exportation et impression de la partie supérieure, les éléments de bois ne rentraient pas dans les percements. En observant l'impression réalisée, les trous n'étaient pas parfaitement ronds.

La raison pour laquelle la première impression n'était pas valable provient du format d'exportation. Il était exporté format obj et la forme courbée se transformait en forme polygonale ce qui avait pour impact de déformer l'objet, car le volume d'un objet est définie par une ou des surfaces extérieures subdivisées en facette ou triangle. Une deuxième exportation a été effectuée format stl (stéréolithographie).

Sur rhinocéros, l'échelle de ce processus de maillage lors de l'exportation au format stl est réglable. Et le fichier exporté ne présentait plus de déformation impactant la contrainte entre la liaison imprimée et l'élément de bois. Il a été possible d'imprimer les deux liaisons et de reconstituer la forme générée à partir de processus paramétrables.

La fabrication additive apporte la possibilité de traduire des formes complexes modélisées numériquement qu'il ne serait pas possible de produire avec des techniques traditionnelles. Cette notion de formalisation est énoncée comme la capacité de l'outil à donner matière à des données informatiques.

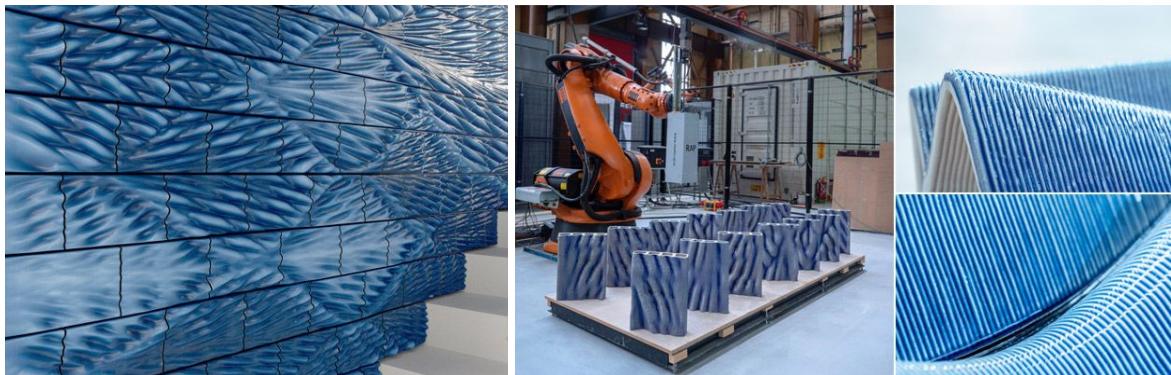


Figure Y : Tuile imprimé pour habiller une structure résidentielle du studio RAP

La fabrication additive tout comme les fabrications digitales n'ont pas le caractère répétitif des procédés standardisés. Ils permettent de produire de la variété.

En Hollande, dans la ville de Delft, ils se sont servi des outils de fabrication additive pour interpréter d'une manière contemporaine un procédé traditionnel qu'est l'émaillage avec le bleu de Delft. Pour cela, une glaçure liquide est déposée sur l'argile brûlante. Les glaçures coulent sur les formes générées et produisent ainsi des variations de couleurs entre le bas des courbes plus foncées ou s'accumulent la glaçure et le haut plus clair. Dans le processus de formalisation, les données numériques sont associées à une matière et un processus de transformation qui ont des rapports entre les cultures constructives et les savoirs faire locaux. Néanmoins, ce projet démontre d'une part d'aléatoire dans le comportement de la matière lors du processus de déposition et de constitution de la forme. Cependant la production d'un modèle numérique demeure et les outils de fabrication additive permettent de matérialiser des formes aléatoires, courbes, sinueuses, avec une géométrie complexe et dont l'esthétique exprime l'expression de forme produite par informatique.

Afin d'appréhender les capacités de l'outil à traduire des formes produites par informatique. Des modélisations de recherche de forme ont été faites sur grasshopper à l'aide du Plug-in nommé Galapagos. A l'instar du travail de Frei Otto ou de Gaudi, un maillage a été généré puis des vecteurs de force ont y été appliqués.



Impression d'objet généré par un processus de form-finding

Les modèles reproduisent des chaînes inversées dans lesquelles la gravité sculpte la forme. Lorsqu'on la retourne, la forme générée fonctionne parfaitement en compression et la distribution se fait d'une manière optimale. La fabrication additive en fonctionnant couche par couche s'accorde avec ces procédés de formalisation.

Les expérimentations effectuées de form-finding sont de simples prototypes ou l'échelle d'impression est limitée par la taille. Les outils de fabrication additive armés de bras à six axes ont les capacités pour s'affranchir des limites établies et questionner les processus constructifs existant. Sur les chantiers actuels, le coffrage est un procédé répandu car il est à la fois standard, il permet de produire en série, mais est également flexible et peut s'adapter au cas par cas. En revanche, la production de moule sur mesure est onéreuse et longue à produire.

Des recherches sont actuellement menées à l'ETH de Zurich, par Joris Burger pour exploiter les capacités formelles de la fabrication additive. La fabrication additive peut constituer une forme en produisant un coffrage léger car possédant une forme en coquille d'œuf dans lequel un matériau est coulé. Ce procédé est prometteur car nécessitant peu de matière et donc le processus de décoffrage mérite d'être interrogé. Le béton n'a pas de forme en soit c'est l'outil et le procédé constructif qui va le lui donner. Et la tectonique de ces éléments de béton porte les traces des formes informatiques et les logiciels de simulation.

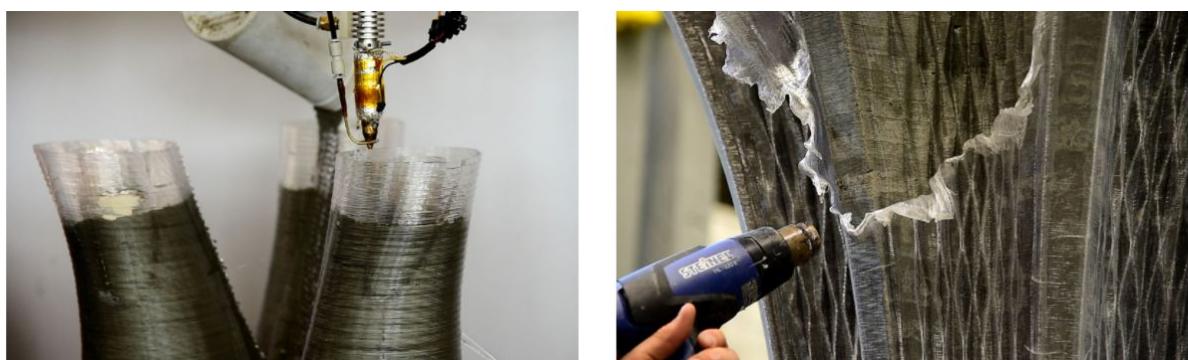


Figure Z : Processus de coffrage et d'impression - Processus de décoffrage

La formalisation est également "une action de réduire un système de connaissances à des structures formelles"<sup>16</sup>

Les fabrications additives ont la propriété de dépendre d'une modélisation informatique donc ont la capacité d'exploiter les possibilités géométriques des morphologies complexes générées à partir de simulation numérique.

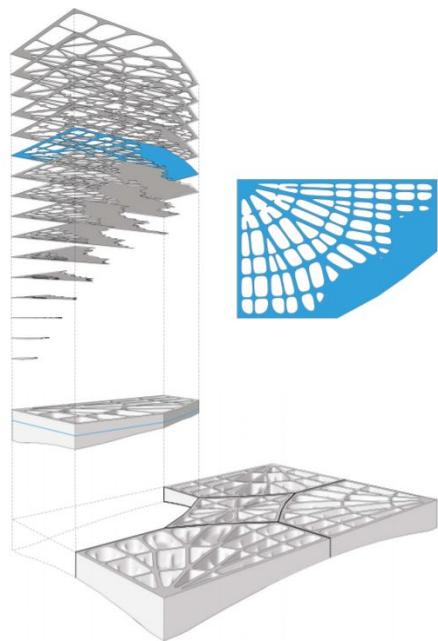
<sup>16</sup> Définition extraite du site internet Larousse :  
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/formalisation/34623#:~:text=Action%20de%20formaliser,connaissances%20%C3%A0%20des%20structures%20formelles>.  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021]

Comme l'a souligné Mario Carpo :

*"Through computational form-searching we can already design new structures of unimaginable complexity"*<sup>17</sup>

Les logiciels de simulation et les processus de design génératif offrent de nouvelles opportunités pour produire des formes ou modéliser des processus constructifs. La tectonique de ces productions est questionable dans la mesure où elles sont dénuées de toute matière. On pourrait raccourcir les formes réalisées informatiquement à de simples formes qui seraient traduites avec une matière ou un processus constructif à des productions atectoniques.

Mais comme nous avons pu le voir dans les parties précédentes, la mise en forme dans les conditions portées par l'outil et un choix de matérialité produisent une tectonique. D'une manière analogue dans certains processus de modélisation informatique résident des démarches conceptuelles qui s'appuient sur des itérations pour générer des formes. La forme est mouvante, elle peut différer selon des paramètres mises en place mais elle exprime "Les forces en présence"<sup>18</sup>.



Lors de la biennale de Venise, l'ETH de Zurich en 2016 a présenté un projet expérimental beyond the slab tire son inspiration des voûtes de tuiles. Leur projet exploite les capacités de conception/simulation couplées à des outillages de fabrications numériques pour s'affranchir des limites des outils de fabrication traditionnelle. A partir des analyses des passages des forces dans la matière une modélisation a été générée par optimisation topologique pour permettre une distribution des forces qui soit optimale entre les cinq éléments. La forme est le produit de cette simulation.

Figure AA : Axonométrie de Beyond the slab 2

Les outils de fabrication additive sont en mesure de la reproduire avec la précision d'un grain de sable. Pour produire cette forme, le moule a été réalisé à partir de sable de silice lié par des liants phénoliques (les couches mesurent 0,25 mm.) Le procédé constructif est flexible, précis et durable dans la mesure où il permet de faire des économies de matière en la plaçant uniquement là où elle travaille.

<sup>17</sup> p47: Carpo, Mario- *The second turn of digital - Design beyond intelligence* , Writing architecture series, 2017

<sup>18</sup>Extrait du cours d'Histoire intitulé Pensée constructive. Histoire, théories, analyse de Mr Louis Destombes

*“New possibilities in 3D printing enable the fabrication of complex structures and components at competitive cost. With well-designed compression shapes that have low stresses, the formal freedom offered by such exciting digital fabrication technologies can be fully exploited.”*<sup>19</sup>

Ce projet illustre les possibilités des fabrications additives à traduire les formes produites selon des conditions statiques et ainsi produire des formes optimales. La tectonique de ces objets exprime les distributions de force selon un modèle. L’outil de fabrication additive possède le potentiel pour exploiter les capacités des conceptions informatiques, ouvrant le champ à de nouvelles tectoniques.

*“ using digital simulation and data-driven form-searching, we can now model the structural behavior of each individual part in a hypercomplex, irregular, and discontinuous 3-D mesh. And using digital tools, we can fabricate any heterocline mess precisely to specs” on time and on budget: robots will see to that. Industrial materials were standardized so they could be calculated and mass-produced. Today we can calculate and fabricate variations at all scales, and compose with unlimited variations as needed or as found in nature.*<sup>20</sup>

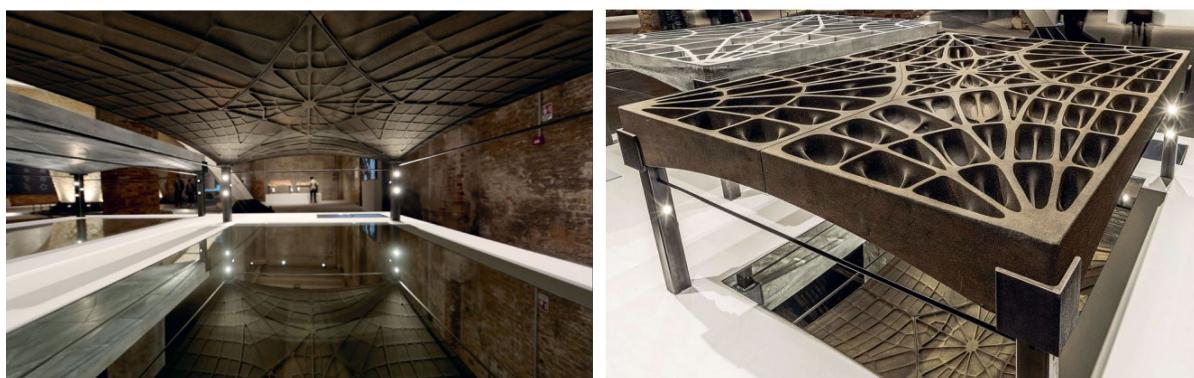


Figure AB : Beyond the slab 2 Prototypes exposés lors de la Biennale de Venise 2016

<sup>19</sup> p33 : Philippe Block, Tome Van Mele, Matthias Rippmann, Noelle Paulson, *Beyond bending reimagining Compression Shells - Edition Detail*, 2017

<sup>20</sup>p52-53 : Carpo, Mario- *The second turn of digital - Design beyond intelligence* , Writing architecture series, 2017

# Optimisation topologique

La topologie est une discipline mathématique qui étudie l'évolution des déformations géométriques par déformation. L'optimisation topologique est une méthodologie d'optimisation de distribution de la matière. selon des conditions de vecteur de force.

Le travail d'optimisation topologique que je vais vous présenter est basé sur celui du département d'ingénierie mécanique de Delph de l'université du Danemark. Ils ont développé et rendu accessible un plug-in grasshopper intitulé Topos. Il permet de travailler en volume l'optimisation avec les paramètres que je vais vous présenter à travers une expérience réalisée.

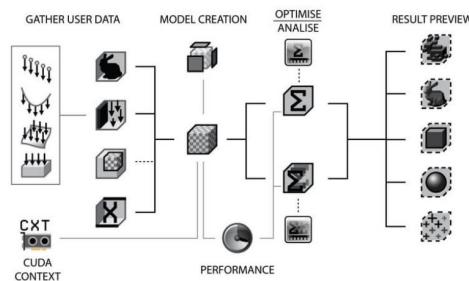
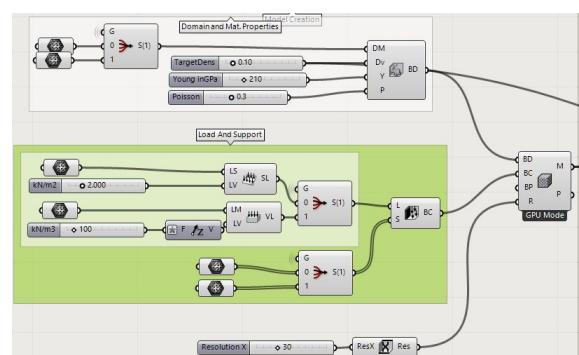


Figure AC : Schéma des itérations du plug-in Topos

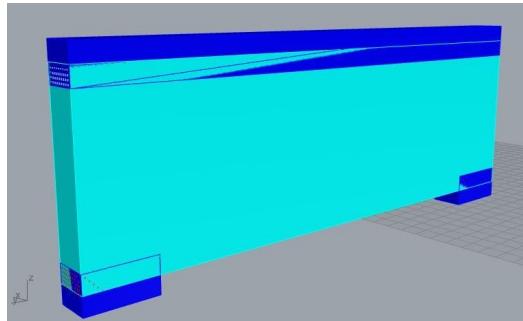
A partir des expérimentations menées sur les tests de résistance des barres, une expérimentation a été menée pour produire un franchissement qui serait optimisé topologiquement. Le volume mis en place est élevé pour observer la manière dont les vecteurs de l'algorithme génèrent les itérations. Les étapes du processus d'optimisation topologique ont été synthétisées dans le tableau ci-dessous.

Les paramètres d'entrée à définir sont les suivantes :

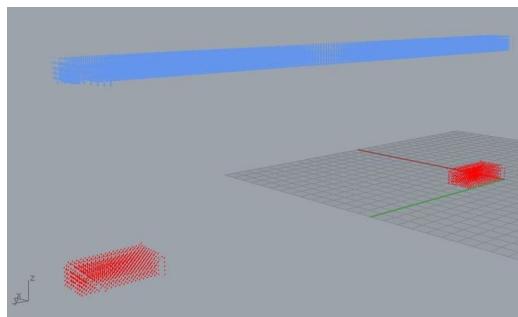
- Définir les conditions d'application des itérations (reproduire les propriétés mécaniques d'un matériau)
  - Densité ciblé en pourcentage -  $10\% = 0,1$
  - Module de Young (module d'élasticité)- acier=210
  - Le coefficient de poisson - isotrope=0,25 acier=0,3
- La force appliquée en KN/m<sup>2</sup> et KN/m<sup>3</sup>
- La résolution
- Le nombre d'itération



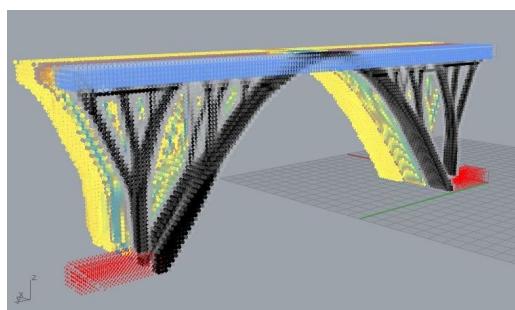
Imprime écran des paramètres d'entrée de Topos



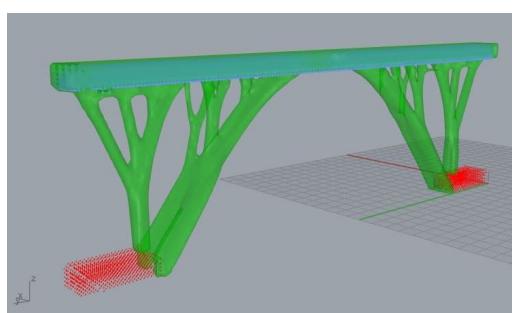
Création d'un volume de travail dans lequel les itérations vont avoir lieu que vous pouvez observer en bleu clair sur le schéma de gauche. Elles sont modélisées par un maillage tri-dimensionnelle représenté par des sphères définies par une résolution. Les zones bleu foncé représentent les volumes d'applications et de réception des forces.



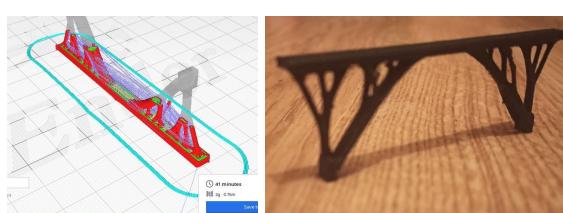
L'échelle des vecteurs est définie par la résolution de la simulation. Le volume d'application est modélisé par les vecteurs bleus. Il représente les forces appliquées au test d'optimisation. Elles sont paramétrables et l'unité de mesure sont le KN/m<sup>2</sup> et KN/m<sup>3</sup>. Les volumes des supports sont modélisés par les vecteurs rouges.



Une fois que les paramètres d'entrée sont définis, il faut définir le nombre d'itération. C'est le nombre de fois où l'algorithme va appliquer les forces appliquées au support à travers le maillage. A chaque fin d'itération, les zones où les vecteurs sont présents sont conservés et les autres éliminés. Le nombre d'itération impacte la précision des modèles générés.



A la fin du processus d'itération, dans les paramètres de sortie, il est possible de modifier l'épaisseur des éléments produits selon un facteur. La forme résultante est une structure arborescente, pleine ou les volumes d'application de force ont été appliqués et évidés à l'emplacement des supports.



Le modèle généré a été découpé en tranches sur Cura en retournant celui-ci pour assurer une stabilité lors de l'impression. Puis le franchissement a été imprimé en PLA, avec une épaisseur de 0,2 mm et un remplissage de 20%.

Tableau résumant les étapes d'une optimisation topologique d'un franchissement



Photographie du franchissement généré



Imprime écran et Photographie de l'impact de la résolution sur la génération du modèle

Malgré une symétrie du modèle, des supports et du linéaire des forces appliquées, on observe sur le franchissement généré une petite variation des pieds arborescents qui pourrait être expliquée par le processus d'itération. Cependant la topologie est une branche des mathématiques complexes dont la compréhension des algorithmes n'est pas évidente et qui mériterait d'être approfondie.

Lors d'expérimentation de test de modélisation-impression d'objet optimisé topologiquement, on observe des générations de formes organiques exprimant la distribution des forces selon des conditions de simulation paramétrable.

Chaise optimisée	Tabouret rond optimisé	Table optimisée

Tableau des expérimentations d'optimisation-impression

Les objets imprimés sont de petite taille et ont été limités par la taille des machines d'impression. Il est possible de produire des éléments de taille plus importante en subdivisant la pièce en pièce reliée par un assemblage qui exploite les capacités formelles des fabrications additives.

Dans son mémoire de recherche Thomas Larnicol a produit une subdivision d'un tabouret optimisé topologiquement à l'aide de Millipede, un plug-in Rhino, en produisant des assemblages interprétant des liaisons d'aboutage en bois.

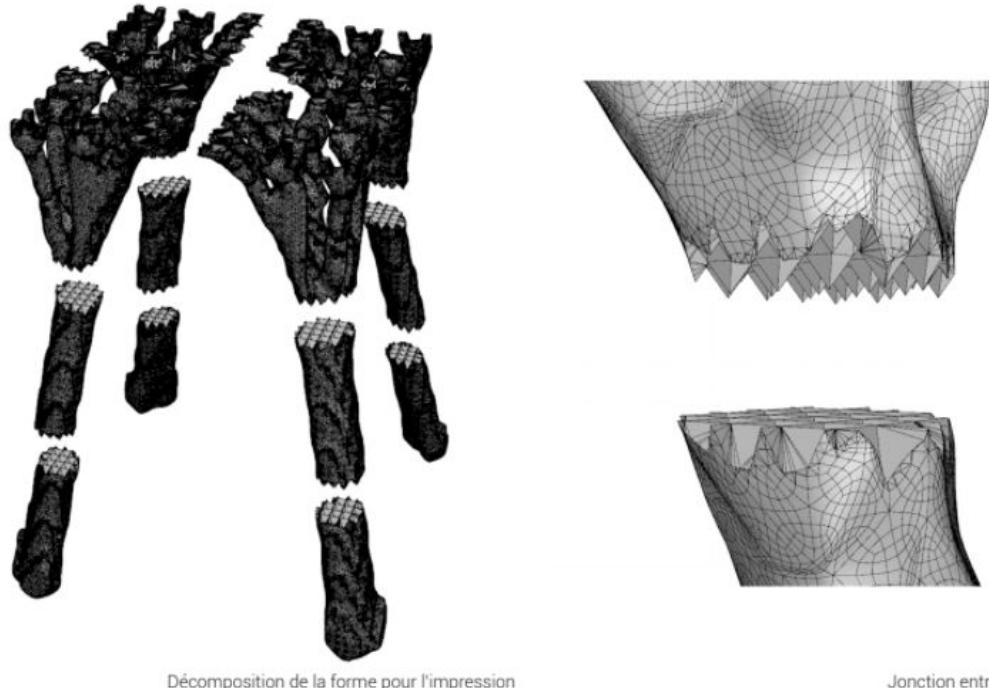


Figure AD : Assemblage d'un tabouret optimisé topologiquement tiré du mémoire de master réalisé Thomas Larnicol

L'optimisation topologique est une méthode dont l'association avec les outils de fabrication additive est intéressante car elle porte les aspects de celle-ci. Les pièces produites par optimisation topologique sont celles qui synthétisent les aspects tectoniques des fabrications additives. A l'instar du processus de stratification, la résolution est le processus qui va définir la précision du modèle.

La tectonique est définie comme :

*“une « essence » et comme « schéma » de construction déterminé par un réseau de contraintes matérielles et techniques.”<sup>21</sup>*

L'optimisation topologique exploite le potentiel de formalisation des outils de fabrication additive pour produire des formes imbriquées et des assemblages complexes résultant de simulation de propriété physique.

---

<sup>21</sup>Labrusse Rémi - Chapitre 10 - Référence hellénique et ontologie de l'ornement La « tectonique » de Karl Bötticher - Sandrine Mauroy, Michel Espagne L'hellénisme de Wilhelm von Humboldt et ses prolongements européens. Demopolis, École française d'Athènes 2016 Disponible sur : <https://books.openedition.org/demopolis/728>

Pour conclure, une expérimentation de test de résistance devait être mise en place pour comparer les barres imprimées en PLA précédemment avec des barres optimisées topologiquement afin de confronter leur comportement à la rupture. Elle n'a pu être effectuée du fait du manque de précision des outils de mesure et du protocole expérimental dont le facteur commun n'a pas été défini. Deux options étaient envisageables:

- La première était de partir de deux volumes similaires dont l'un est optimisé à l'aide d'un outil topologique. Théoriquement la barre optimisée aurait eu un volume moins important mais après stratification qu'en est-il de sa masse du fait du ratio remplissage/couche extérieure ?
- La deuxième option était de comparer la résistance d'une barre optimisée avec celle d'une barre sans optimisation possédant la même masse. L'hypothèse émise était que celle optimisée est plus résistante mais est-ce que l'échelle a un impact sur la résistance à cause du processus de stratification ?

Il demeure beaucoup de questions car comme nous l'avons vu, le PLA est un matériau anisotrope dont le sens de stratification et le taux de remplissage ont des impacts sur la résistance des matériaux. Donc comment se comportent les formes en résille d'une barre optimisée topologiquement pour un matériau qu'il soit isotrope ou anisotrope ? Les outils d'optimisation topologique sont en mesure d'effectuer des simulations à partir de propriété mécanique de matériaux. Comment se comportent les modèles théoriques par rapport à ceux imprimés ? Quelles sont les tectoniques générées pour les matériaux simulés et ceux imprimés ?

## Conclusion :

La fabrication additive est un outil émergent dont des recherches sont menées pour réduire les coûts, s'affranchir de la limite des tailles et intégrer ces outils dans les processus de conception et de fabrication conventionnelle.

A la différence de la production de masse, où produire en quantité permet de réduire les coûts, une des particularités de la fabrication additive est la customisation de masse. Elle permet de réaliser un produit sur mesure répondant à un besoin.

*“C'est le contraire de la production de masse , qui favorise la répétition et la standardisation . L'impression 3D , elle, favorise l'individualisation et la personnalisation . La grande avancée de l'ère de la fabrication numérique est que nous pouvons choisir entre l'une et l'autre sans devoir revenir à une coûteuse réalisation manuelle : le massif comme le sur mesure sont désormais des méthodes viables de fabrication automatisée”.*

<sup>22</sup>

Les techniques des fabrications additives permettent de s'affranchir des répétitions uniformisantes, elles offrent la possibilité de créer de la variation sans engendrer des surcoûts.

En s'interrogeant sur la tectonique de la fabrication additive, ce mémoire a tenté de souligner le potentiel de cet outil, à travers un corpus de projets réalisés et des impressions effectuées. En analysant les productions des différentes techniques de fabrication additive, ont été relevés des aspects tectoniques de l'outil changeant le paradigme de la conception. Car un nouvel outil porte une nouvelle manière d'exécuter une tâche ou d'agir sur la matière. D'une manière rétroactive, cela va impacter la conception et offrir de nouvelles potentialités permettant d'exploiter pleinement les capacités intrinsèques de l'outil.

Par son caractère expérimental, les outils de fabrication additive continuent à évoluer et les tectoniques présentées ne sont donc pas fixes. Elles vont continuer à évoluer. Les modèles produits fonctionnent par imitation de ceux existants. Puis par une meilleure compréhension de l'outil et de la matière, les modèles vont évoluer pour trouver leur singularité.

Ce mémoire a expérimenté les techniques de fabrication additive par fusion-déposition, les autres procédés ont été illustrés à travers les corpus présentés. Chacune des techniques de fabrication additive porte elle-même des procédés de transformation propre ce qui leur confère à chacune des tectoniques singulières.

---

<sup>22</sup>p109, Anderson Chris, *Makers, la nouvelle révolution industrielle*, Pearson 2012

Les techniques de fabrication partagent des attributs communs qui ont été présentés à travers les thématiques suivantes : stratification, assemblage et formalisation.

En effet, pour produire un objet, l'outil procède couche par couche. Ce processus de constitution illustre la stratification et exprime une constituante de la fabrication additive.

Cette technique de dépôt successif questionne les procédés de construction en renouvelant par exemple les tectoniques d'assemblages. La singularité de la fabrication additive est sa capacité à produire des imbrications qu'aucune technique traditionnelle ne permet.

La fabrication additive est un outil transformant physiquement la matière à partir de données numériques. L'outil a la contenance pour traduire, avec la précision informatique, les modèles générés par des algorithmes. Une multitude de génération de forme est possible, dont la sélection est effectuée par les capacités transformatrices de l'outil. Les tectoniques des fabrications additives sont les résultats d'interactions entre la génération de formes numériques couplées avec les propriétés physiques matérielles.

Les outils de modélisation et de simulation ont gagné en précision et en performance, ils sont capables de modéliser le réel et de prédire les comportements des matériaux. Ils offrent la possibilité de traduire dans le réel les données et les formes créées par les outils informatiques.

Les outils de modélisation numériques participent donc aux tectoniques des objets produits par les techniques de fabrication additive. L'association des deux éléments ouvre de nouvelles perspectives dans la manière de travailler la matière en la plaçant en concordance avec des modèles numériques. Ces outils permettent de générer de nouvelles tectoniques faites de géométrie complexe et irrégulière, permettant ainsi d'en exploiter les possibilités constructives et structurelles.

## Bibliographie

ANDERSON Chris, *Makers, la nouvelle révolution industrielle*, Pearson 2012

AMARAL, Izabel, *Tensions tectoniques du projet d'architecture : études comparatives de concours canadiens et brésiliens (1967 - 2005)*, Faculté de l'aménagement, Université de montréal. 2010

Block Philippe, Tome Van Mele, Matthias Rippmann, Noelle Paulson, *Beyond bending reimaging Compression Shells* - Edition Detail, 2017

BOYARD Nicolas. *Méthodologie de conception pour la réalisation de pièces en Fabrication Additive*. Génie mécanique. École nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015.

CARPO, Mario- *The second turn of digital - Design beyond intelligence* , Writing architecture series, 2017

FRAMPTON Kenneth , *Introduction - Le projet tectonique* (sous la direction de Jean Pierre Chupin ; Cyrille Simonnet ), Gollion, Infolio , 2005.

FRAMPTON Kenneth, *Studies in tectonic culture, the poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture*, Mit Press, 1995

LABRUSSE Rémi - Chapitre 10 - *Référence hellénique et ontologie de l'ornement La « tectonique » de Karl Bötticher* - Sandrine Maufroy, Michel Espagne *L'hellénisme de Wilhelm von Humboldt et ses prolongements européens*. Demopolis, École française d'Athènes 2016 Disponible sur :  
<https://books.openedition.org/demopolis/728>

LAVERNE Floriane - *Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique*, Science des Métiers de l'ingénieur, 2016

MIGAYROU Frédéric , Architectures non standard Exposition. Paris, Centre Pompidou-. 2003-2004

POTIÉ, Philippe - *Forme et contre forme : le dessin du gabarit - Le projet tectonique* (sous la direction de Jean Pierre Chupin ; Cyrille Simonnet ), Gollion, Infolio , 2005.

POUTHIER Adrien, Maillet Florent, Flepp Augustin, *L'impression 3D entre dans une autre dimension*, Le moniteur, [Publié le 1 septembre 2017] [Dernière consultation le 08 janvier 2021] Disponible sur :  
<https://www.concept-yrys.com/wp-content/uploads/2017/09/2017-09-01-LE-MONITEUR-DES-TRAVAUX-PUBLICS-ET-DU-BATIMENT.pdf>

REDWOOD Ben, FILEMON Schoffer et GARETT Brian. *The 3D printing handbook - Design and applications*, Multitude, 2017.

## Iconographie

Figure A : Les schémas de fonctionnement sont extraits de l'ouvrage suivant : Ben Redwood, Filemon Schoffer & Brian Garrett. *The 3D printing handbook - Design and applications, Multitude*, 2017

Figure B : Imprime-écran du catalogue des modélisations de projet - Impression 3D pour la fabrication de dispositifs médicaux dans le cadre de la crise du Covid-19. Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé, COVID 3D, 2021 . [Dernière consultation le 08 janvier 2021]. Disponible sur : <https://covid3d.org/projects>

Figure C : le schéma du syndrome “over the wall” est extrait de l'ouvrage suivant : Ettlie, J. E. *Integrated design and new product success*. Journal of Operations management, 33-35

Figure D : Illustration de la différence de complexité dans les concepts extraits de la thèse de Floriane Laverne, Figure 66, p.93.

Floriane Laverne. Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique. 2016

Fligure E : illustration d'Eugène Viollet le Duc - Système rhomboédrique du Mont-Blanc, s.d. Viollet-le-Duc, Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Charenton-le-Pont. Dessin du géographe n°55, Les cafés géographiques, *Viollet-le-duc géographe des montages*, [publié le 2 mai 2015 à 18h32]

[Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <http://cafe-geo.net/viollet-le-duc-geographe-des-montagnes/>

Figure F : Image extraite d'une vidéo décrivant les conditions de test des anneaux. 3D Printed Hook Tournament. Polymaker. [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://polymaker.com/3d-printed-hook-tournament/>

Figure G : Diagramme illustrant la résistance des anneaux en fonction de leur forme. CNC Kitchen. How designs the strongest hook ? - Polymaker competition. [Publié le 12 septembre 2020]

[Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.cnckitchen.com/blog/how-designs-the-strongest-hook-polymaker-competition>

Figure H : Modèle numérique de l'impression de la colonne.

Patrick Bedarf. ETH Zurich,Digital Building Technologies- *Screenshot of generative design software applet - Concrete Choreography* - [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.bedarf.cc/portfolio/concrete-choreography/>

Figure I : Photographie de l'impression de la colonne.

Axel Crettenand. ETH Zurich, Digital Building Technologies - *Concrete extrusion 3D printing setup* -

[Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://dbt.arch.ethz.ch/project/concrete-choreography/>

Figure J : Photographie des stratifications des colonnes  
Sofia Michopoulou. ETH Zurich, Digital Building Technologies - *Surface textures as material ornament*  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://dbt.arch.ethz.ch/project/concrete-choreography/>

Figure K : Photographies des poteries intitulée Bad Ombres de Emerging Object. Ronald Rael, Virginia San Fratello, Phirak Suon, *Bad Ombres v.2*.  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://emergingobjects.com/project/bad-ombres-v-2/>

Figure L: Photographies du projet Seed Stitch de Emerging Object. Ronald Rael, Virginia San Fratello, Kent Wilson, Alex Schofield, *Seed Stitch*  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <http://emergingobjects.com/project/seed-stitch/>

Figure M1 : Xtree, The large-scale 3D, *Bras robotisé* - *Image extraite de la vidéo : XtreeE - 3D printing solution for R&D à la minute 0min17s*, [Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://xtreee.com/we/>

Figure M2 : Xtree, The large-scale 3D, *Buse de déposition* - *Image extraite de la vidéo : XtreeE - 3D printing solution for R&D à la minute 2min20s*, [Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://xtreee.com/we/>

Figure M3 : Xtree, The large-scale 3D, *Krypton, un poteau à Aix-en-Provence*, [Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://xtreee.com/project/krypton/>

Figure M4 : Xtree, The large-scale 3D, *Viliaprint, cinq maisons à Reims (en cours)*  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://xtreee.com/project/viliaprint-cinq-maisons-individuelles/>

Figure N1 : Construction 3D, *Solution complète de construction automatisée*,  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://www.constructions-3d.com/la-maxi-printer>

Figure N2 : Construction 3D, - *Buse de déposition* - *Image extraite de la vidéo : L'imprimante 3D de bâtiment grande échelle à 1m15s*  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://www.constructions-3d.com/le-projet>

Figure N3 : Constructions 3D, Pavillon dont les murs sont imprimés. image extraite de la vidéo *Pavillon de Constructions-3D - 2020 à 0min 16s*  
[Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur :

[https://www.youtube.com/watch?v=9kle0vJElk&ab\\_channel=Constructions-3D](https://www.youtube.com/watch?v=9kle0vJElk&ab_channel=Constructions-3D)

Figure N4 : Constructions 3D,Bâtiments administratifs de l'entreprise de 2500 m<sup>2</sup> - *image extraite de la vidéo Chantier de CONSTRUCTIONS 3D - PAVILLON à la minute 1min49s* [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur :

[https://www.youtube.com/watch?v=YEmWVhaLcUk&ab\\_channel=Constructions-3D](https://www.youtube.com/watch?v=YEmWVhaLcUk&ab_channel=Constructions-3D)

Figure O1 : Icon Build, *Système de portique posé sur rail* [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.iconbuild.com/>

Figure O2 : Icon Build, *Buse montée sur portique - Vulcan II printing a 500 sq ft home at Community First! Village. @ Regan Morton Photography*

[Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.iconbuild.com/updates/2019-from-the-lab-to-new-homes>

Figure O3 : Icon Build, *Maison imprimée en 24h* [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.iconbuild.com/about>

Figure O4 : Icon Build, *Overland Partner : lauréat d'un concours de design de logement 11 imprimé.* 11 mars 2019[Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur :

<https://www.iconbuild.com/updates/overland-partners-and-3strands-3d-printed-home-de-sign-challenge>

Figure P1 : Apis Cor, *Bras articulé imprimant sur site - Image extraite de la vidéo : 3D printing a home for under \$10,000 à 0min03s* [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.apis-cor.com/gallery>

Figure P2 : Apis Cor, *Buse orientable Image extraite de la vidéo : 3D printing a home for under \$10,000 à 0min1s.* [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.apis-cor.com/gallery>

Figure P3 : Apis Cor, *Maison imprimée en Russie en 24h, Image extraite de la vidéo : 3D printing a home for under \$10,000 à 1min21s.*

Figure P4 : Carlota V, *Apis Core collaborates on world's largest 3D printed building.* [Publié le 26 octobre 2019] [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur :

<https://www.3dnatives.com/en/apis-cor-largest-3d-printed-building-261020194/#!>

Figure Q : PERI, *Attache métallique déposé manuellement sur les strates de béton, Image extraite de la vidéo : PERI 3D Construction Printing: First 3D-printed residential building in Germany à 42 seconde,* [Publié 29 septembre 2020] [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : [https://www.youtube.com/watch?v=3qCBpSiNWWc&ab\\_channel=PERI](https://www.youtube.com/watch?v=3qCBpSiNWWc&ab_channel=PERI)

Figure R : Dus Architect, *3D printed House,* [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://houseofdus.com/work/#project-3d-print-canal-house>

Figure S : Dus architect, *Urban cabin*, [Dernière consultation le 08 janvier 2021].  
Disponible sur : <https://houseofdus.com/project/urban-cabin/>

FIGURE T : Livre : Jan Willmann, Philippe Block, Marco Hutter, Kendra Byrne, Tim Schork, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Springer, 2018  
Article : p435-446 Christian J. Lange , Donn Holohan, and Holger Kehne, *Ceramic Constellation | Robotically Printed Brick Specials* - Faculté d'architecture, Université de Hong-Kong.

Figure U : FLOWALISTIK, *Chainmail - 3D Printable Fabric* [Publié 12 septembre 2018] [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.thingiverse.com/thing:3096598>

Figure V : Autodesk, *Image extraite de la vidéo : Using generative design and additive manufacturing, GM was able to consolidate the eight different components of a small but important part—a seat bracket, where seat belts are fastened—into one 3D-printed part.* [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur :

<https://www.autodesk.com/customer-stories/general-motors-generative-design>

Figure W : MX3D, MX3D Bridge, [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/>

Figure X : MX3D, *Connector for takenaka*, [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://mx3d.com/projects/takenaka-connector/>

Figure Y : Mélanie R. 4 000 tuiles imprimées en 3D pour habiller une structure résidentielle, [Publié le 9 octobre]. [Dernière consultation le 08 janvier 2021].

Disponible sur : <https://www.3dnatives.com/tuiles-imprimees-en-3d-091020203/>

Figure Z : Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, Collaborators: Joris Burger (project lead), Dr. Ena Lloret-Fritschi, Fabio Scotto, Nizar Taha, Bruno Pinto Aranda, Dr. Thibault Demoulin, Dr. Sara Mantellato, Andi Reusser, Michael Lyrenmann, Philippe Fleischmann. Collaborators: Joris Burger (project lead), Dr. Ena Lloret-Fritschi, Fabio Scotto, Nizar Taha, Bruno Pinto Aranda, Dr. Thibault Demoulin, Dr. Sara Mantellato, Andi Reusser, Michael Lyrenmann, Philippe Fleischmann - *Eggshell* [Dernière consultation le 08 janvier 2021]  
Disponible sur : <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/334.html>

Figure AA: P41 - Axonométrie de Beyond the slab 2, Philippe Block, Tome Van Mele, Matthias Rippmann, Noelle Paulson, *Beyond bending reimagining Compression Shells* - Edition Detail, 2017

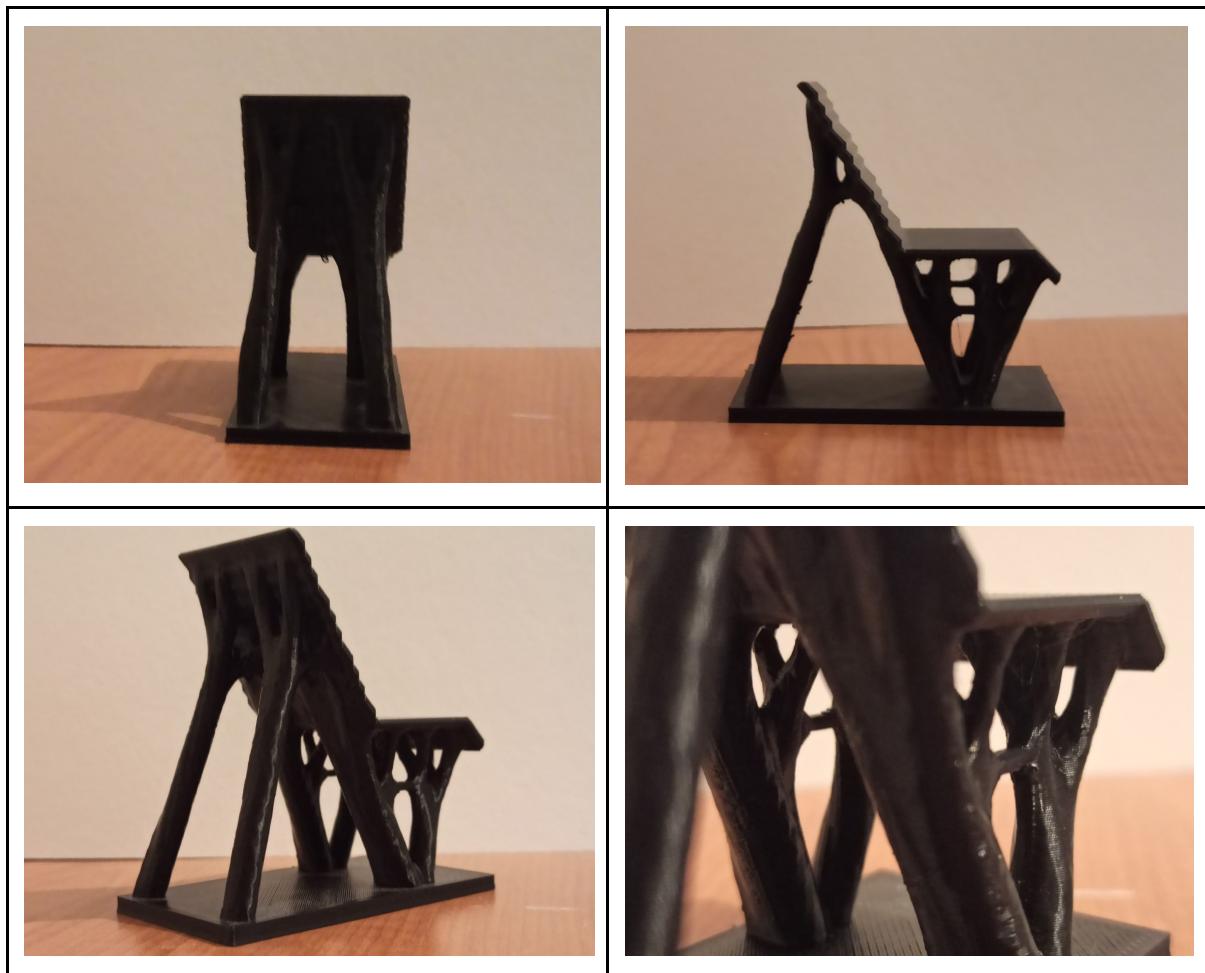
Figure AB : P36-37- Axonométrie de Beyond the slab 2, Philippe Block, Tome Van Mele, Matthias Rippmann, Noelle Paulson, *Beyond bending reimagining Compression Shells* - Edition Detail, 2017

Figure AC : Archiseb - *Schéma des itérations du plug-in Topos accessible sur Food 4 Rhino*. [Dernière consultation le 08 janvier 2021]

Disponible sur :<https://www.food4rhino.com/app/topos>

Figure AD : P39 : Assemblage d'un tabouret optimisé topologiquement tiré du mémoire de master - Thomas Larnicol - Mémoire de master : Fabrication additive et optimisation structurelle - *Décomposition de la forme pour impression - Jonction entre deux pièces*. École Nationale Supérieure d'Architecture de Versailles. 2018

## Annexes



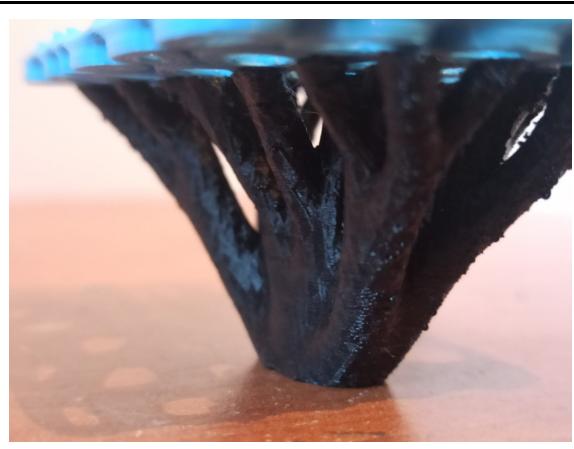
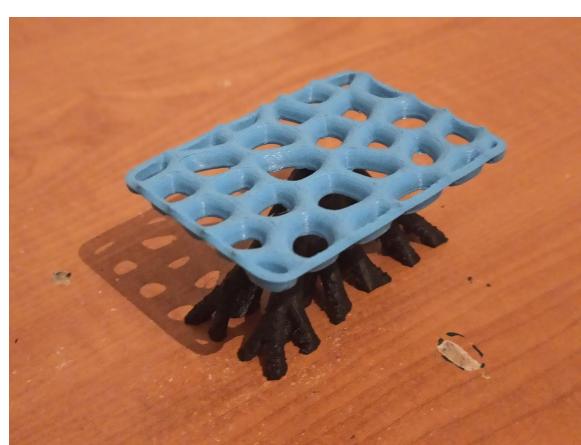
Optimisation et impression d'une chaise



Optimisation et impression d'un tabouret avec support



Optimisation et impression d'une table à quatre support ponctuel



Optimisation et impression d'une table à arborescence