

Mémoire de fin d'études : "Architecture et impression 3D : Risque de standardisation ou opportunité culturelle ? La Maison-Sculpture comme expérience à relire."

Auteur : Minique, Bryan

Promoteur(s) : Occhiuto, Rita; Wuytack, Karel

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/14289>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



UNIVERSITE DE LIEGE – FACULTE D'ARCHITECTURE

ARCHITECTURE ET IMPRESSION 3D : RISQUE
DE STANDARDISATION OU OPPORTUNITÉ
CULTURELLE ?
LA MAISON-SCULPTURE COMME EXPÉRIENCE
À RELIRE.

Travail de fin d'études présenté par Bryan MINIQUE en vue
De l'obtention du grade de Master en Architecture

Sous la direction de Madame Rita OCCHIUTO
Et de Monsieur Karel WUYTACK
Année académique 2021 -2022

Mes remerciements se dirigent vers toutes les personnes qui m'ont soutenu, conseillé et guidé tout au long de la création de ce travail de fin d'études.

Tout d'abord, je suis très reconnaissant envers ma promotrice, Madame Rita OCCHIUTO, qui m'a donné l'opportunité de réaliser ce travail de manière autonome tout en faisant preuve de beaucoup de bienveillance. Elle m'a soutenu durant l'entièreté de ma dernière année d'études, tant au niveau de mon projet de fin d'études que de ce mémoire. Je voudrais aussi remercier mon Co-promoteur, Monsieur Karel WUYTACK, qui a toujours été positif et engagé envers moi. Sans eux, je n'aurais pas trouvé les ressources nécessaires. Ils m'ont transmis leur méthode de travail et leur savoir avec beaucoup d'envie et de passion.

Je tiens à remercier avec toute ma gratitude Mademoiselle Dominique MARECHAL, qui a effectué une relecture de mon travail remarquable. Et également, Christophe HOMPESCH pour son TFE d'analyse sur la maison-sculpture de Jacques GILLET.

Je voudrais aussi remercier mes parents, Maryse et Sébastien, pour la confiance qu'ils m'ont accordée lors du choix de mes études. Ainsi que mes colocataires - Elodie, Corentin et Noé - pour leur soutien au quotidien. Sans oublier mes amis pour mes années d'études.

*« Et faire l'architecture
Et pas la guerre
L'architecture sauvage
Sur la grève sauvage
Directe
Et spontanée
Et créative
Et sans permis de bâtir
L'architecture pour insolubles
Pour gens qui n'ont pas de « biens »
Qui n'ont pas de terrain
Et qu'ont pas de meubles
Pas de « trousseau »
Pas de vaisselle.
L'architecture pour ceux qui n'ont rien
Pour ceux que notre monde pense avoir mis
La tête en bas
Mais qu'ont bien tous leurs bois
Et les racines dans
L'Univers. »*

J. Gillet¹, architagogue²

¹ J. Gillet, *Mes deux ans à Rennes ; sept écrits*, Editions Rennes, 1972.

² Contraction d'architecte et de pédagogue.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION.....	6
1.1. <i>PROBLÉMATISATION.....</i>	<i>6</i>
1.2. <i>QUESTIONS DE RECHERCHE.....</i>	<i>9</i>
1.3. <i>PRISE DE POSITION ET STRUCTURE DU TFE.....</i>	<i>10</i>
2. LE PARI DE L'INNOVATION.....	16
2.1. <i>LA TROISIÈME RÉVOLUTION INDUSTRIELLE.....</i>	<i>16</i>
2.2. <i>PROGRÈS OU INNOVATION.....</i>	<i>18</i>
2.3. <i>LES AVANTAGES ET ENJEUX POUR L'ARCHITECTURE.....</i>	<i>20</i>
2.4. <i>LE CAS D'ÉTUDE DE LA MAISON-SCULPTURE DE JACQUES GILLET.....</i>	<i>21</i>
2.5. <i>REPORTAGE PHOTO.....</i>	<i>28</i>
3. LA MAISON-SCULPTURE, UNE FORME ET UNE FORME DE CRITIQUE CONTRE LA STANDARDISATION DES FORMES EN ARCHITECTURE.....	31
3.1. <i>RÉPÉTITION INDUSTRIELLE.....</i>	<i>36</i>
3.2. <i>STANDARDISATION / NORMALISATION.....</i>	<i>40</i>
3.3. <i>VARIATION COMME RÉACTION À L'INDUSTRIALISATION : ARCHITECTURES NON-STANDARD..</i>	<i>43</i>
3.4. <i>HYPER-STANDARDISATION / DIVERSIFICATION.....</i>	<i>47</i>
3.5. <i>L'IMPRESSIION 3D SUR CHANTIER VERS UNE HYPER-STANDARDISATION DE LA FORME ARCHITECTURALE.....</i>	<i>50</i>
4. LA MAISON-SCULPTURE, UNE UNITÉ ENTRE LA FORME ET LA LIBERTÉ D'UNE MATIÈRE CONTRÔLÉE SANS COFFRAGE.....	52
4.1. <i>LA TECHNIQUE TRADITIONNELLE DE L'ASSEMBLAGE D'ÉLÉMENTS.....</i>	<i>56</i>
4.2. <i>LA TECHNIQUE TRADITIONNELLE DU MOULAGE / COFFRAGE.....</i>	<i>58</i>
4.3. <i>LA TECHNIQUE TRADITIONNELLE DE LA COMPRESSION.....</i>	<i>61</i>
4.4. <i>L'EXPANSION DE LA MATIÈRE CONTRÔLÉE.....</i>	<i>63</i>
4.5. <i>L'IMPRESSIION 3D SUR CHANTIER VERS UNE EXPANSION DE LA MATIÈRE CONTRÔLÉE SANS COFFRAGE.....</i>	<i>65</i>

5. LA MAISON-SCULPTURE, UNE STRUCTURE ADDITIVE RENFORCÉE SANS COFFRAGE	68
5.1. <i>LES CONSTRUCTIONS TRADITIONNELLES DE MASSE PAR IMPRESSION 3D</i>	73
5.2. <i>LES AVANTAGES DES CONSTRUCTIONS EN DOUBLE PEAU PAR IMPRESSION 3D</i>	74
5.3. <i>LES AVANTAGES DES CONSTRUCTIONS RENFORCÉES PAR IMPRESSION 3D.....</i>	76
5.4. <i>LES NOUVELLES POSSIBILITÉS DES CONSTRUCTIONS RENFORCÉES PAR IMPRESSION 3D.....</i>	77
6. LA MAISON-SCULPTURE OU L'EXPÉRIENCE DE CONSTRUIRE COLLECTIVEMENT SUR CHANTIER	80
6.1. <i>L'IMPRESSON 3D SUR CHANTIER PAR UNE IMPRIMANTE DE TYPE PORTIQUE</i>	83
6.2. <i>L'IMPRESSON 3D SUR CHANTIER PAR UNE IMPRIMANTE DE TYPE BRAS ROBOTIQUE</i>	84
6.3. <i>L'IMPRESSON 3D SUR CHANTIER PAR UNE IMPRIMANTE DE TYPE DELTA</i>	86
6.4. <i>L'IMPRESSON 3D OU L'EXPÉRIENCE COLLECTIVE AUTOUR D'UN MODEL VIRTUEL.....</i>	88
7. LA MAISON-SCULPTURE, VERS UN 7^{ème} ORDRE D'ARCHITECTURE.....	90
8. CONCLUSION.....	100
9. BIBLIOGRAPHIE	103

1. INTRODUCTION

1.1. PROBLÉMATISATION

La technologie d'impression 3D m'a toujours fasciné, au point que je me suis procuré une imprimante 3D de « *prototypage* »³ d'architecture réduite. J'ai pu observer l'impact de cette technique ainsi que des logiciels de modélisation 3D, de plus en plus performants, sur la conception et représentation de l'architecture. Aujourd'hui, le processus de conception (penser) et de réalisation (faire) d'un objet architectural reçoit de plus en plus d'attention. Dans le livre « *Penser-Faire, Quand des architectes se mêlent de construction* »⁴, l'hypothèse est développée que « *Les architectes ne font pas des bâtiments, ils les imaginent et les dessinent* ». A travers des situations, actuelles ou historiques, qui troublent cette division entre conception et construction, ce livre, accompagné du colloque « *penser-faire les enjeux théoriques et pratiques des revalorisations du faire en architecture* » et de l'exposition « *Artefacts* », met en perspective une certaine tendance à la valorisation du « *faire* » l'œuvre en architecture et interroge les promesses du « *faire* » quant à d'autres rapports possibles aux techniques. Les auteurs insistent sur les questions de la forme, la matière, la construction, le langage architectural et l'environnement. L'introduction est écrite par Tim Ingold. Dans son approche matérialiste de la fabrication (« *Faire - anthropologie, archéologie, art et architecture* », 2014), il va encore plus loin et renverse l'idée que l'acte de fabrication impose une forme à la matière inerte et nous révèle « *l'itinérance* » au sein de la matière pour engendrer des formes. Pour lui, la conception est médiée par le processus de la réalisation (doing-in-making) et il développe également la différence impliquant les deux questions : « *Qu'est-ce que vous faites (doing) ?* » et « *Qu'est-ce que vous êtes en train de faire (making) ?* ». La première question est de l'ordre du descriptif de la forme, de la matière, des enjeux de la structure, des techniques utilisées sur le chantier et du résultat obtenu. Tandis que la deuxième question engendre une réflexion profonde sur le projet et les convictions qui donnent direction et sens à cette démarche.

³ Consiste à simuler l'interface d'un produit, afin d'obtenir des informations sur l'interaction des utilisateurs avec le futur produit.

⁴ Pauline Lefèvre, Julie Neuwels, Jean-Philippe Possoz (Eds.), *Penser-Faire, Quand des architectes se mêlent de construction*, Editions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles, 2021.

Le caractère des contributions du livre « *Penser-Faire, Quand des architectes se mêlent de construction* » est, selon Ingold, que les différents auteurs sont convaincus que faire quelque chose (making) arrive en le faisant (doing) et que la pensée (conception de et réflexion sur) dirige et suit le processus de la réalisation (faire). C'est la transition, même l'inversion, de « *doing-in-making* » vers « *making-in-doing* ». Dans la publication, cinq notions ont attiré mon attention : « *la forme non-standard, vers l'hyper-standard* », « *la matière qui donne forme, une nouvelle forme d'artisanat* », « *l'évolution structurelle des structures additives sur chantier, des nouvelles perspectives* », « *Le chantier virtuel, une expérience partagée* » et « *l'esthétique d'imperfections historiques, technologiques et matérielles* ».

Initialement, je voulais consacrer mon TFE aux différentes techniques d'impression 3D ou de « *fabrications additives* »⁵ sur chantier. Très vite, je me suis rendu compte que la seule question de la description devrait être complétée par des questions qui engendrent une réflexion profonde sur le projet et les convictions architecturales qui donnent direction et sens à ces nouvelles techniques. En suivant la logique explicitée par Ingold et développée dans le livre « *Penser-Faire, Quand des architectes se mêlent de construction* », la question de Mélanie Renard « *Les technologies d'impression 3D redéfinissent-elles l'architecture ?* »⁶, où l'architecture suit les nouvelles technologies de construction et logiciels 3D afin de concevoir et représenter des formes tridimensionnelles avec des géométries complexes, devrait être complétée par « *L'architecture redéfinit-elle les technologies d'impression 3D ?* ». Ici, l'architecture ne suit pas seulement une technique mais dirige également le processus de réalisation.

Dans le cadre de ce TFE, ma promotrice Madame Occhiuto m'a fait découvrir la remarquable maison-sculpture de l'architecte Jacques Gillet, construite en étroite collaboration avec le sculpteur Félix Roulin et l'ingénieur René Greisch. Cette maison unifamiliale, conçue entre 1965 et 1969, est « *un projet manifeste* »⁷, porteur de valeurs architecturales et humaines. La maison sera le cas d'étude à interroger qui permettra de faire une lecture critique de la construction actuelle d'impression 3D sur chantier. Après avoir suivi le processus de genèse de la maison et avoir bien pris conscience du savoir que ce bâtiment

⁵ Désigne l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique.

⁶ Voir sur : 3dnatives.com, publication du 16 novembre 2020.

⁷ Déclaration écrite et publique.

incorpore, une lecture de la littérature sur ce bâtiment-sculpture permettra de compléter l'étude. Dans le spectre de la lecture de ce bâtiment, ce TFE s'inscrit dans l'interprétation propre à Luc Merx et Christian Holl « *entre une recherche pour l'unicité et sa nécessité d'expérimenter les nouvelles technologies* ». Ce TFE ne sera pas seulement l'occasion de faire un éloge sur les nouvelles possibilités des techniques, mais d'apporter une solution aux applications des outils numériques à l'architecture biomorphique actuelle. L'œuvre de Gillet annonce un futur porteur de connaissances, au sens culturel et technique, pour les nouvelles technologies, y compris l'impression 3D.

En se concentrant sur les aspects de l'architecture de Gillet, qui diffère de la composition numérique standard, on prend très vite conscience que « *la maison-sculpture n'est précisément pas ce que vise le marketing de l'architecture numérique : une habitation complète et entièrement formulée qui a simplement besoin d'être consommée* »⁸. Et si on ne considérait plus l'ordinateur et l'imprimante 3D comme un instrument de mise en œuvre des principes fondateurs du « *modernisme* »⁹, mais comme une technologie qui peut libérer au lieu d'uniformiser ? Afin d'accentuer ce propos et de certifier ce choix de cas d'étude, « *Vidler* »¹⁰ fait référence à un manque d'un projet culturel d'architecture biomorphique-numérique qui jusqu'ici s'est limité à s'extasier sur la possibilité de générer des structures géométriques complexes. Pourtant, l'architecture numérique permet d'explorer les relations complexes entre le contrôle et la liberté, entre la prédiction et la coïncidence.

Antoine Picon parle d'une véritable « *culture numérique* »¹¹, où s'articulent plusieurs dimensions : non seulement des réflexions et des tendances stylistiques propres aux architectes mais aussi, plus généralement, des modes de vie en forte évolution depuis l'après-

⁸ Luc Merx, Christian Holl, *Closeness to Nature and Alienation from Nature. The Sculpture House by Jacques Gillet, René Greisch and Felix Roulin in Liège and its significance in the current architectural discourse*, in *Graz Architektur Magazin Springer Wien*, pp. 28-42, 2005.

⁹ *L'architecture numérique reste profondément piégée dans les systèmes du modernisme en termes de structure de son fondement et en termes d'attente de sa réception. Il pense toujours à l'avant-garde. Parce qu'il perpétue la croyance au progrès du modernisme, il doit se considérer comme nouveau et donc comme juste. Il a également adopté le principe d'abstraction : tout comme il faut ignorer la patine comme faisant partie de la réalité lorsqu'on observe des bâtiments du modernisme classique pour reconnaître leur qualité et ne percevoir que la géométrie pure ou l'idée abstraite du bâtiment, dans les instances construites de architecture numérique c'est la conception à l'état non construit et, avec elle, le rendu et la formule mathématique sous-jacente au bâtiment, qui est au centre de ce qui doit être perçu comme qualité.*

¹⁰ Anthony Vidler, *Architecture's Expanded Field*, 2004.

¹¹ Antoine Picon, *Culture numérique et architecture : une introduction*, Birkhäuser, Bâle, 2010.

guerre et des choix technologiques et industriels liés à un contexte géopolitique lui-même changeant.

L'hypothèse de départ de Luc Merx et Christian Holl dans « *Closeness to Nature and Alienation from Nature. The Sculpture House by Jacques Gillet, René Greisch and Felix Roulin in Liège and its significance in the current architectural discourse* » est que « *Nous devons trouver un moyen de créer une relation à la nature dans le cadre de la pratique culturelle avec une distance que nous aurions besoin d'explorer dans chaque nouvelle instance. L'habitation liégeoise suggère que cela sera possible si la qualité de l'architecture n'arrive que lorsque l'occupant est appelé non seulement à prendre position vis-à-vis d'elle, mais aussi à revoir cette position encore et encore* »¹². Ainsi, ces auteurs formulent une hypothèse de relance de projet à travers une interprétation de la pensée, du dessin et de la réalisation formelle. La maison-sculpture ou sculpture-vivante, comme un milieu bâti à la fois plus complexe et plus proche des structures naturelles, devient l'œuvre de départ d'une nouvelle interprétation.

De cette révision critique découle une relecture de la 3^{ème} révolution industrielle et de son impact sur la pratique, la conception et la réalisation d'architectures. On peut en déduire que l'innovation dans le biomorphique-numérique et l'impression 3D sur chantier manque d'un projet de culture numérique lié à l'architecture.

La maison-sculpture comme cas d'étude peut servir de guide pour produire un nouveau propos, au sens culturel et technique, et peut donner direction au projet de culture numérique appliqué à l'architecture d'impression 3D sur chantier tout en gardant un lien avec la nature.

1.2. QUESTIONS DE RECHERCHE

La double question « *Les technologies d'impression 3D redéfinissent-elles l'architecture ?* » et « *L'architecture redéfinit-elle les technologies d'impression 3D ?* » est au cœur de ce TFE.

Il s'agira également de savoir dans quelle mesure la maison-sculpture de Jacques Gillet a eu un effet sur la vision de l'architecture. Mais aussi de savoir dans quels sujets elle donne

¹² Luc Merx, Christian Holl, *Closeness to Nature and Alienation from Nature. The Sculpture House by Jacques Gillet, René Greisch and Felix Roulin in Liège and its significance in the current architectural discourse*, in *Graz Architektur Magazin Springer Wien*, pp. 28-42, 2005.

des orientations d'un futur projet culturel qu'on pourrait identifier dans la conception numérique d'impression 3D sur chantier ?

Afin de répondre à cette double question, quatre sous-questions sont formulées :

- Comment la forme non standard propre à la maison-sculpture ouvre-t-elle des perspectives vers l'hyper standard, qui devient le nouveau standard, puisque la technologie du biomorphique-numérique d'impression 3D sur chantier pourrait libérer au lieu d'uniformiser ?
- Comment la conception à travers la matière contrôlée sans coffrage de la maison-sculpture ouvre-t-elle des perspectives vers une optimisation de la quantité de matière et quel est son impact sur la forme dans le biomorphique-numérique d'impression 3D sur chantier ?
- Comment l'expérimentation avec les nouvelles techniques de construction dans la maison-sculpture montre-t-elle des analogies avec la dernière génération d'impression 3D sur chantier dans le biomorphique-numérique ?
- Comment le processus de conception sur chantier de la maison-sculpture présente-t-il des parallèles étonnants avec l'architecture biomorphique-numérique et comment son processus de construction collective rejoint-il l'expérience de se réunir autour d'un modèle virtuel ?

1.3. PRISE DE POSITION ET STRUCTURE DU TFE

Après avoir situé l'impact de la troisième révolution industrielle pour l'architecture comme discipline et pratique, les notions d'innovation, invention et progrès technologique seront étudiées individuellement et ensuite en interrelation. L'historien Mario Carpo¹³ estime que l'impact de l'architecture biomorphique-numérique d'impression 3D sur chantier sur la théorie et la pratique architecturale serait équivalent à celui de l'invention de l'imprimerie à la Renaissance. Les outils numériques offrent des possibilités qui étaient encore inconcevables

¹³ Mario Carpo, *L'Architecture à l'âge de l'imprimerie : culture orale, culture écrite, livre et reproduction mécanique de l'image dans l'histoire des théories architecturales*, Editions de la Villette, Paris, 2008.

il y a quelques années. Ces possibilités soulèvent également de nombreuses questions concernant les défis qui attendent la discipline architecturale.

La nouvelle phase de développement technique fondée sur le numérique questionne profondément les outils et le rôle de l'architecte. Afin de répondre à la double question « *Les technologies d'impression 3D redéfinissent-elles l'architecture ?* » et « *L'architecture redéfinit-elle les technologies d'impression 3D ?* » et en partant de l'hypothèse que le cas d'étude de la maison-sculpture est porteur de connaissances et contient la promesse d'un projet de nouvelle culture d'architecture, une lecture fine des différents textes sur le cas d'étude est entreprise et complétée avec un reportage photo personnel.

A travers un recueil et une lecture critique des différents textes sur cette maison, il devient clair que ce TFE se différencie du TFE de Christophe Hompesch, *Habitation SCULPTURE*, ULiège, 2014, dans lequel il déclare explicitement qu'il ne veut pas explorer les parallèles entre l'habitation-sculpture et le courant contemporain de l'architecture biomorphique. Une hypothèse que Luc Merx et Christian Holl explorent, dans « *Closeness to Nature and Alienation from Nature. The Sculpture House by Jacques Gillet, René Greisch and Felix Roulin in Liège and its significance in the current architectural discourse* », met justement en avant, dans l'optique de trouver une solution, un moyen de formuler une nouvelle pratique culturelle d'impression 3D sur chantier. Ce TFE veut poursuivre ce chemin de recherche à la découverte des réflexions, des motivations, des dessins qui ont guidé l'expérience ainsi que la construction de la maison-sculpture/vivante comme un lieu bâti à la fois plus complexe et plus proche des structures naturelles.

Dans l'article « *Sculpture house in Belgium by Jacques Gillet* », le focus est mis sur la façon dont l'équipe, à travers la maison-sculpture, a exploré et expérimenté de nouvelles techniques de construction et des matériaux tout au long de la conception. Dans ce TFE, ces thèmes seront abordés en fonction des « *enjeux contemporains de l'impression 3D sur chantier* »¹⁴.

Là où pour Geert Bekaert, la maison de Gillet est « *une critique d'architecture aveugle* » qui par sa forme complexe, radicalement unique et non-standard ne contribue en rien à une meilleure approche et élaboration de la problématique du logement ou de la sculpture, ce TFE

¹⁴ S. Van de Voorde, R. De Meyer, E. De Kooning, L. Taerwe and R. Van De Walle, *Sculpture House in Belgium by Jacques Gillet*, Université de Gand, Belgique, 2006.

tentera de démontrer, à travers la notion d'hyper-standard, que les considérations de Gillet se rencontrent dans le contexte d'impression 3D sur chantier de par leur pertinence, même pour une production d'habitat-pour-le-plus-grand-nombre.

Du chapitre 3 à 6 inclus, le TFE sera structuré à travers les quatre premières notions qui ont attiré mon attention dans la publication « *Penser-Faire, Quand des architectes se mêlent de construction* », et qui sont étroitement liées aux quatre sous-questions de recherche. Chacun de ces chapitres commence avec une description à travers le prisme de l'impression 3D sur chantier de la maison-sculpture (doing). Après une réflexion profonde sur les différentes techniques ou technologies utilisées dans le projet, les convictions et motivations qui donnent direction et sens à la démarche seront explicitées (making). Ce sont elles qui forment la base d'une culture technologique d'architecture qui manque tellement au biomorphique-numérique d'impression 3D sur chantier. Chaque chapitre sera clôturé par des expérimentations contemporaines de techniques d'impression 3D ou de fabrications additives sur chantier qui démontrent la pertinence de penser à travers cette nouvelle culture d'impression 3D et la façon dont les technologies d'impression 3D redéfinissent l'architecture et vice versa.

Le chapitre 3 part de la question « *Comment la forme non standard de la maison-sculpture ouvre des perspectives vers l'hyper standard qui devient le nouveau standard si la technologie du biomorphique-numérique d'impression 3D sur chantier libère au lieu d'uniformiser ?* ». On y découvre que pour Gillet, il fallait imaginer une « *autre industrie* » : une industrie qui interprète pour le standard, l'origine même de la matière. La nouvelle interprétation concerne la molécule, l'atome, l'électron et la particule. La maison-sculpture est plus qu'un exemple d'architecture organique avec des similitudes formelles au biomorphique ou numérique. Comment sa notion de « *préfabrication particulière* »¹⁵ se rapproche de la notion « *d'hyper-standardisation* » actuelle avec son processus morphogénétique ? Une géométrie ou surface qui deviennent un paysage accueillant, un écosystème, afin de devenir « *une construction plus vivante* » à l'image de « *la sculpture vivante* » de Jacques Gillet.

¹⁵ *Technique de construction, relative aux particules en physique, qui consiste à fabriquer à l'écart de l'ouvrage les éléments constitutifs.*

Le chapitre 4 part de la question « *Comment la conception à travers la matière contrôlée sans coffrage de la maison-sculpture ouvre des perspectives vers une optimisation de la quantité de matière et son impact sur la forme dans le biomorphique-numérique d'impression 3D sur chantier ?* » On y découvre que, dans la maison-sculpture, le béton est exploité à l'extrême de ses propres caractéristiques matérielles et comment à travers la technique du « *gunitage* »¹⁶, une unité est trouvée entre l'itinérance de la matière et de la forme contrôlée, sans maîtriser tout à fait la matière, mais en l'orientant autant que possible. Ici, la matière donne forme, « *Co-engendre les formes* » dit Tim Ingold. Ainsi, celles-ci rompent avec l'acte de la fabrication qui impose une forme à la matière inerte. Dans les dernières technologies de modélisation assistées par ordinateur, on observe que, après une étape de géométrisation, la matérialité prend le relais dans la génération de la forme définitive. Lors de l'impression 3D sur chantier, on utilise de moins en moins de coffrage ; la matière, de préférence locale, y est directement imprimée ou pulvérisée par des couches successives de matière liquide qui soudainement se figent dans leur mouvement. Le chapitre sera structuré par quatre gestes de création de matière dirigée - « *l'assemblage, le moulage/coffrage, la compression traditionnelle et l'expansion de la matière contrôlée* »¹⁷ - démontrant l'actualité et la pertinence de la technique utilisée dans la maison-sculpture pour le biomorphique-numérique imprimée en 3D sur chantier.

Le chapitre 5 part de la question « *Comment l'expérimentation avec les nouvelles techniques de construction dans la maison-sculpture montre-t-elle des analogies avec la dernière génération d'impression 3D sur chantier dans le biomorphique-numérique ?* ». La maison-sculpture ou l'enfant-béton est une synthèse de la structure et de la forme. Après avoir parcouru les constructions traditionnelles de masse par impression 3D et les techniques afin de réduire le matériel utilisé ainsi que le poids des structures, on constate l'émergence des structures renforcées ou armées. Là où les premières impressions 3D sur chantier étaient des formes pensées à travers leur capacité constructive de compression, la nouvelle génération d'impression 3D sur chantier est également résistante à des forces de tractions et de torsions. Les parallèles formels et les principes structurels utilisés dans les dernières

¹⁶ Procédé de revêtement par projection de mortier.

¹⁷ Jean Nouvel, *Anthologie de César*, Editions Xavier Barral, Coédition Fondation Cartier pour l'art contemporain, Paris, 2008.

impressions 3D expérimentales et dans les formes de structures additives renforcées sans coffrage de la maison-sculpture seront questionnés.

Le chapitre 6 part de la question « *Comment le processus de conception sur chantier de la maison-sculpture présente-t-il des parallèles étonnants avec l'architecture biomorphique-numérique et comment son processus de construction collective rejoint-il l'expérience de se réunir autour d'un modèle virtuel ?* ». On y découvre comment l'architecte, le sculpteur et l'ingénieur se sont réunis autour de plusieurs maquettes réduites de ce bâtiment expérimental, ainsi que, dans le cas d'étude de la maison-sculpture, la réalisation de tests de prototypage à l'échelle 1/1 avant de se lancer dans l'expérience de construction collective de cette maison sur chantier. Ici, on revient à la différence entre le processus de conception (penser) et de réalisation (faire), où la pratique en tant qu'acte premier et partagé et la conception est médiée par le processus de la réalisation (doing-in-making / making-in-doing). Le projet a continué d'évoluer entre la version déposée à la ville et sa réalité construite qui a été à la fois planifiée et improvisée. Cette construction expérimentale se planifiait, pour Gillet, dans une période de contact, d'échange, de communication qui fait redécouvrir la joie, la joie de faire, la joie de participer, la joie de construire, et la joie du contact avec les choses et les êtres réels. La manière dont Gillet a fait appel aux outils, aux technologies de masse, aux esprits scientifiques de pointe et aux équipes pluridisciplinaires de recherche présente, à bien des égards, des parallèles étonnants avec l'architecture biomorphique-numérique, tant en termes de logique de conception assistée par ordinateur qu'en tant que processus de construction. Les différents types d'imprimantes 3D sur chantier, le portique, le bras robotique et le type Delta sont présentés, et « *une nouvelle forme d'artisanat* » qui valorise les technologies de fabrication digitale en architecture permet d'assurer la continuité des outils manipulés d'une part, et de combler l'écart entre conception et construction d'autre part. La phase de conception devient un chantier virtuel, un espace de prototypage et de collaboration interdisciplinaire qui permet l'optimisation adaptée à la fabrication de topologies complexes. Lorsque le robot effectue la construction sur le chantier, l'homme se retrouve autour du modèle virtuel.

Pour conclure ce TFE et répondre à notre question de recherche initiale, c'est-à-dire « *est-ce que la maison-sculpture de Jacques Gillet a modifié la vision de l'architecture et est-ce qu'elle indique la direction des possibilités d'un futur projet culturel dans le biomorphique-*

numérique d'impression 3D sur chantier? », ce dernier chapitre explore la réflexion critique de Leon Krier avec son sixième ordre architectural publié en 1977, où il plaide pour une composition organique contre le rationalisme et la standardisation en faisant référence aux cinq ordres d'architecture de Vignole. Et si, dans cette même technologie, que critique Krier, on libérait au lieu d'uniformiser, on imposerait plus une forme à la matière inerte, mais on révélerait l'itinérance au sein de la matière pour engendrer des formes ? Dans ce cas, le sixième ordre de Michael Hansmeyer était un fait, mais sa colonne du sixième ordre, qui se développe au-delà des cinq ordres classiques, a oublié l'ordre de Krier et sera donc classé 7^{ème} au lieu de 6^{ème}.

2. LE PARI DE L'INNOVATION

Dans son article « *Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle : le pari de l'innovation* », Christophe de Maistre¹⁸ développe, pour l'Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise à Paris, une réflexion sur les conséquences socio-économiques de la troisième révolution industrielle - c'est-à-dire une recherche sur la robotique et l'impression 3D et comment elles définissent « *l'industrie 4.0* »¹⁹. Ce nouveau type d'industrie « *rend la chaîne de production polyvalente* »²⁰ et fait émerger « *l'artisanat 2.0* »²¹. Puis, à travers « *l'intervention inspirante* »²² d'Etienne Klein, la manie de l'impression 3D pour l'innovation est située par rapport aux progrès et à l'invention. Ce chapitre se clôture avec les nouveaux avantages et enjeux de l'impression 3D sur chantier pour l'architecture.

2.1. LA TROISIÈME RÉVOLUTION INDUSTRIELLE

Parmi les nouvelles technologies de production les plus novatrices se trouvent la robotique avancée, l'impression 3D ou fabrication additive (la simulation et la conception assistées par ordinateur) et la construction assistée par ordinateur ou par fabrication numérique.

Les nouveaux procédés de production gagnent en performance et s'enrichissent de nouvelles technologies de fabrication automatisées. On peut remarquer, dans cette évolution, une mutation majeure du centre de production, à la suite de la machine à vapeur, de l'électricité et de l'automatisation. Ce phénomène voit le jour sous le nom « *d'industrie 4.0* ».

La notion d'usine 4.0 est présentée dans « *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* », dans le rapport d'avril 2013 du groupe de travail allemand « *Industrie 4.0* ». Après les trois révolutions industrielles (machine à vapeur, électricité et

¹⁸ Christophe de Maistre, *Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle : le pari de l'innovation, Les nouvelles technologies de production, Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise, Paris, 2014.*

¹⁹ *Idem.*

²⁰ *Idem.*

²¹ *Idem.*

²² Etienne Klein, *intervention inspirante, 20 octobre 2021. voir conférence : <https://www.youtube.com/watch?v=ISnPQmImJqM>.*

informatique), les objets connectés et les nouvelles technologies de production, de plus en plus autonomes, permettent l'essor de « *smart factories* », dans lesquelles les différents appareils communiquent entre eux et avec le produit en cours de fabrication. À tout moment, chaque produit peut être suivi individuellement sur tout son cycle de vie. Ces nouvelles usines créent des possibilités de personnalisation des produits, assouplissent les processus de fabrication, permettent une gestion globale optimisée de la chaîne de production, et ouvrent le champ à de nouveaux « *business models* ».

L'impression 3D, ou production additive, a été développée dans les années 1980 et comprend l'ensemble du processus qui consiste à la conception des objets numériques aux objets physiques en trois dimensions. C'est une technique de fabrication rapide. Les logiciels de conception assistée par ordinateur peuvent créer des modèles d'objets en ajoutant des matériaux, contrairement aux méthodes de production traditionnelles qui utilisent des chutes de coupe et de production. Les matières premières utilisées peuvent être de natures différentes et peuvent être utilisées sous forme de poudre, de fil ou de matière liquide.

L'alliance de ces nouveaux outils permet de produire avec une meilleure efficacité et plus de liberté. Les objets peuvent plus facilement être personnalisés et évoluent par simple modification du fichier numérique. De plus, les courtes séries deviennent rentables, tandis que l'organisation de la chaîne de production est plus flexible.

Une des spécificités du marché de l'impression 3D est la multiplicité des technologies utilisées. Chaque technologie permet une impression avec un certain type de matériau. Les imprimantes les plus simples impriment des objets en plastique, d'autres plus sophistiquées produisent des pièces en métal et en polymère. Ce phénomène est à la base d'un « *artisanat 2.0* ».

L'industrie reste, à l'heure actuelle, le plus gros utilisateur de ces technologies, à la fois pour ses séries limitées et pour ses processus internes d'innovation. C'est d'ailleurs pour le même type d'usages que les agences de design et les architectes utilisent de plus en plus l'imprimante, notamment pour la réalisation de prototypes.

Il s'agit d'une technologie grand public. « *L'impression 3D permet de disposer d'un chemin direct entre un objet dessiné et sa réalisation* »²³. La capacité à fabriquer facilement, à domicile, des objets de la vie courante revient à mettre en concurrence le consommateur et l'industriel. Mais l'impression 3D redéfinit aussi le rôle de l'utilisateur : il est désormais actif dans la conception du produit, ce qui permet de parler de « *co-conception* » ou de « *co-création* ». À l'heure de l'innovation ouverte, les utilisateurs partagent leurs modèles sur des plates-formes libres en ligne et collaborent entre eux ou avec l'entreprise pour créer de nouveaux modèles.

2.2. PROGRÈS OU INNOVATION

Dans la recherche constante d'amélioration de l'existant, le terme « *progrès* » est emprunté au latin *progressus* (*pro*, « avant » et *gradi*, « marcher, s'avancer »), qui désigne au sens propre « *la marche en avant* ». Au sens figuré, le progrès signifie « *le développement, l'accroissement des choses* » qui est issu du latin *progressus* (de *pro* : "en avant" et *gressus* : "marche", "démarche").

L'emploi absolu du terme « *Progrès* », avec une majuscule, est entendu comme l'évolution de l'humanité, de la civilisation vers un terme idéal qui appartient au Siècle des Lumières (Mirabeau, 1757).

« *Mais comment définir le progrès ? Ce concept correspond à un ensemble de significations :*

- *L'idée d'une évolution générale et améliorante*
- *L'accumulation de connaissances*
- *Une représentation linéaire de l'histoire de la vérité, dans laquelle le faux représente l'état initial et le vrai le moment ultime*
- *De par toutes ces caractéristiques, la notion de progrès a représenté un véritable idéal symbolique de la modernité* ».²⁴

²³ Christophe de Maistre, *Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle : le pari de l'innovation, Les nouvelles technologies de production, Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise, Paris, 2014.*

²⁴ Jean-Pierre Leac, *Innovation et Progrès. Le progrès est mort, vive l'innovation ! Les cahiers de l'innovation, 2020.*

La notion d'innovation vient du mot latin innovare, qui signifie « *revenir à, renouveler* ». Innovare est quant à lui composé du verbe novare, de la racine novus qui veut dire « *changer* », « *nouveau* », et du préfixe in-, qui indique un mouvement vers l'intérieur. Cette technique connaît une amélioration continue et constante qui, en la référant à la modernité et au progrès, s'est substituée progressivement à celle-ci. C'est une nouveauté ou une invention qui, mise en marché et en société, est capable de renouveler cette dernière, de modifier ses usages et les représentations mentales qui conditionnent ceux-ci. Elle se traduit par la conception d'un nouveau produit, service, processus de fabrication ou d'organisation pouvant être directement mis en œuvre dans l'appareil productif et répondant aux besoins du consommateur. Dans les entreprises, l'innovation peut être un avantage compétitif.

Entre l'innovation et le Progrès, il y a une différence fondamentale. Dès le 18^{ème} siècle, la notion de « Progrès » est indissociable d'une finalité, alors que la notion d'innovation, beaucoup plus neutre, ne désigne que le fait de produire du nouveau sans que celui-ci ne soit positif ou négatif. Là où le Progrès recherche une amélioration de la condition humaine, l'innovation ne se contente que de créer de nouveaux produits et de les lancer sur le marché. C'est pourquoi l'innovation est le progrès dénué des valeurs des Lumières. Nous aurions donc renoncé aux valeurs héritées des Lumières. Mais, en contrepartie de ce renoncement, « *nos outils techniques deviendraient de plus en plus sophistiqués. La sophistication technique s'est donc substituée à la recherche de sens* ». ²⁵

Dans son livre paru en 2008, le physicien et philosophe Etienne Klein suggérait qu'il existe un véritable effroi à l'idée que le progrès s'arrête. En effet, l'idée de progrès permettait de donner un sens à l'action humaine dans le temps et l'histoire. Si on ne croit plus au progrès, notre action historique semble totalement désorientée.

L'innovation est à l'horizon des politiques de recherche. En 2010, la Commission européenne (CE) s'est ainsi fixé l'objectif de développer une « *Union de l'innovation* » pour 2020. Le document de référence affirme d'emblée que la compétitivité, l'emploi et le niveau de vie du continent européen dépendent essentiellement de sa capacité à promouvoir l'innovation, qui est « *également le meilleur moyen dont nous disposons pour résoudre les principaux problèmes auxquels notre société est confrontée et qui, chaque jour, se posent de*

²⁵ *Innovation et Progrès : est-ce la même chose ?* Publié le 9 juillet 2014.

manière plus aiguë, qu'il s'agisse du changement climatique, de la pénurie d'énergie et de la raréfaction des ressources, de la santé ou du vieillissement de la population ».²⁶

En 2013, l'écrivain américain Evgeny Morozov développe la notion de « *solutionnisme technologique* » pour expliquer que chaque problème humain (politique, social et sociétal) est systématiquement transformé en question technique. Des solutions numériques traitent les effets des problèmes sans jamais analyser leurs causes. Selon lui, « *ce qui pose problème n'est pas les solutions proposées, mais plutôt la définition même de la question : le solutionniste possède un marteau (le Web, Internet, de puissants ordinateurs...) et tout ressemble à un clou* ».

La notion de progrès est donc problématisée. Il devient donc urgent d'imaginer comment concilier l'innovation technique avec un projet socio-politique afin d'améliorer la condition humaine dans son ensemble. Cette idée met la société en crise avec une idée future de faire devenir et progresser.

2.3. LES AVANTAGES ET ENJEUX POUR L'ARCHITECTURE

L'impression 3D se distingue des autres moyens de production. Tout d'abord utilisée pour faciliter le prototypage, elle permet au marché de se développer et s'étend aux individus. Au-delà des apports industriels, comme la capacité de réaliser des pièces imbriquées, de consommer moins de matériaux coûteux en supprimant le gaspillage et en allégeant les objets, de fabriquer des pièces personnalisées en très petites quantités, les imprimantes personnelles atteignent le grand public grâce à des prix abordables et sont donc de plus en plus utilisées.

Depuis que la technologie d'impression 3D s'est démocratisée, les utilisations dans l'architecture se multiplient. Que ce soit lors de la création, de l'imagination et de la réalisation, la construction additive fascine et permet à l'architecture d'élargir le champ des possibles.

Afin de favoriser l'utilisation de l'impression 3D sur chantier, on retrouve souvent les mêmes arguments :

²⁶ Commission européenne (CE), pp. 2, 2010.

- Respect de l'environnement
- Les maisons imprimées en 3D coûtent moins cher
- Les maisons imprimées en 3D peuvent être fabriquées plus rapidement
- Plus de possibilités architecturales.

Mais dans la publication « *Penser-Faire : quand des architectes se mêlent de la construction* », on retrouve plusieurs contributions qui développent et interrogent au fil des chapitres les promesses d'autres rapports possibles à la matière, aux techniques, à l'environnement et à l'émergence d'autres pratiques d'impression 3D où des artisans, des programmeurs, des techniciens et des bricoleurs travaillent ensemble. Ici, le « *faire* » n'est pas forcément lié à l'utilisation de techniques « *Low-Tech* » ou à l'artisanat. Ses vertus supposées jouent un rôle central dans la valorisation des technologies de fabrication digitale en architecture, suivant l'argument qu'elles permettent de combler l'écart entre conception (thinking) et construction (doing).

2.4. LE CAS D'ÉTUDE DE LA MAISON-SCULPTURE DE JACQUES GILLET

Né à Liège en 1931, Jacques Gillet est diplômé du Département d'Architecture de l'Académie des Beaux-Arts de Liège en 1956. En 1964, il revient et devient professeur de ce qui sera rebaptisé plus tard « Institut Supérieur d'Architecture Lambert Lombard ». Au sein de l'institut, il mène des recherches sur l'architecture spontanée et l'intégration avec la nature.



Figure 1 : Jean-Marie Huberty et André Paduart, maison privée à La Hulpe, 1962.

À travers une collaboration en 1961 avec les ingénieurs civils Jean-Marie Huberty et André Paduart, il travaille sur une coque en béton de 5 centimètres d'épaisseur sur une ossature de planches de bois et d'isolation thermique, où « la technologie du béton est exploitée à l'extrême de ses propres caractéristiques matérielles ». ²⁷

En 1962, il fait la connaissance du sculpteur Félix Roulin et du peintre Gabriël Belgeonne, lorsque leur projet d'auditorium de musique de chambre remporte le premier prix *Koopal* « *Synthèse des arts plastiques* ». La même année, Gillet rencontre l'ingénieur René Greisch, et ensemble ils sont mandatés par l'Université de Liège pour concevoir le Laboratoire de recherche radiobiologique. En 1964, il est, avec Félix Roulin, chargé de la conception d'une station d'observation (non réalisée) pour le Département d'Astrophysique de l'Université de Liège.

Finalement en 1967, le frère de Gillet demande à l'équipe Jacques Gillet, Félix Roulin et René Greisch de concevoir une maison unifamiliale au numéro 318, discrètement en retrait de la rue de la Belle Jardinière à Angleur.

« Pourquoi cette maison-sculpture ? Expliquer ce projet voudrait dire qu'on tente de le « rationaliser », de le rendre logique. Cela induirait que l'on doit voir cette maison avec un regard objectif, rationnel, logique. Or ici, il n'y a rien à comprendre. Ici, vous pouvez sentir tout, subjectivement ».

Jacques Gillet²⁸

La maison-sculpture est conçue comme une synthèse de la structure et de la forme, « *l'enfant-béton* » se fait remarquer par sa singularité. Dès sa conception, de nombreux articles sont publiés dans des magazines d'architecture comme *La Maison* (« *Habitacle pour une famille sur un promontoire bien dégagé* ») et *Moustique* (« *La maison sur mesure* »), ainsi que des journaux comme *La Libre Belgique* (« *Une maison-grotte à Angleur* ») ; et en 1969, Jacques Gillet écrit l'article « *Habitat selon la nature* » dans *Neuf*.

²⁷ S. Van de Voorde, R. De Meyer, E. De Kooning, L. Taerwe and R. Van De Walle, *Sculpture House in Belgium by Jacques Gillet, Université de Gand, Belgique, 2006.*

²⁸ S. Van de Voorde, R. De Meyer, E. De Kooning, L. Taerwe and R. Van De Walle, *Sculpture House in Belgium by Jacques Gillet, Université de Gand, Belgique, pp. 58, 2006.*

Dans le livre de référence sur l'architecture en Belgique sur la période 1945-1970 de Geert Bekaert et Francis Strauven (« *La Construction en Belgique 1945–1970* », 1971), la maison de Jacques Gillet est répertoriée. Gillet explique dans ce livre :

« Expliquer consisterait, je crois, à vouloir « justifier », à faire paraître « logique ». Expliquer voudrait dire qu'il faut passer par le « rationnel » pour « comprendre ». Il n'y a rien à comprendre, mais tout à sentir, subjectivement. Et le rationnel, pris pour lui-même, nous lui tournons le dos, car sur le plan humain, il y a quelques générations qu'il commence à nous mentir. Le rationnel est basé sur l'approche objective des choses. Le contraire, ou l'irrationnel, est basé sur l'approche subjective des choses. Croit-on. Et si on commençait par approcher objectivement l'objectivité elle-même ? Si on essayait, objectivement, de « mettre en évidence », de « définir », de « mesurer » l'objectivité de l'homme ? Nous trouverons vite un certain degré d'objectivité au niveau de l'exécution, de la réalisation, du concret. Et on s'apercevrait bien vite aussi que c'est au niveau des motivations, de l'origine de l'acte que se concentre le plus fort pourcentage d'in objectivité. On verrait bien vite cette lapalissade, que l'essentiel des problèmes de l'humanité sont au niveau des problèmes humains, sources d'erreurs humaines ». Dites « réactions irrationnelles », « sentimentales », « subjectives », etc., et se diffusent dans les domaines tels que la guerre, la politique, l'amour, les affaires, la religion, le commerce, l'économie, l'idéologie, l'art, la culture, les loisirs, le travail, la vie de tous les jours ... Que reste-t-il ? Mais où siège-t-elle cette fameuse objectivité ? La Science ? Oui, peut-être, au niveau de l'acte scientifique pur, abstrait, extrait de la vie. Mais au niveau de la vie, des motivations ; la soif de connaître n'est-elle pas l'origine de la science ? Est-elle « objective » cette soif ? Ou subjective ? Et l'application de la science, la soif de dominer, c'est rationnel, ça ? Alors ? Rayer d'un trait de plume l'irrationnel, effacer d'un coup de gomme la moitié d'un portrait d'homme ? Ou effacer d'un presse-bouton la moitié des hommes... la moitié subjective ? N'y aurait-t-il pas enfin une loi de la foncière in objectivité humaine à établir ? Y aurait-t-il un progrès de l'objectivité de l'homme, du groupe humain, de l'humanité ? Le seul espoir dans la logique ? Ou « Abandon all Hope » ? Notre réponse est non, à l'un comme à l'autre. Notre réponse est dans tout acte qui cherche à aider l'homme à s'accomplir tel qu'il est, à devenir ce qu'il est ; une entité, fluente, mais une entité. Notre réponse est dans tout essai d'exemple aux organisateurs et gouverneurs de tout acabit pour qu'ils acceptent enfin l'intégrité de l'homme, de tous les hommes. Pour qu'ils renoncent à trier, cataloguer, découper,

séparer, classer, séquestrer, refuser et tuer des morceaux d'humanité au nom de l'Humanité, car c'est là que le masque du rationnel nous ment. Bien sûr, il faut résoudre le-problème-de-l'habitat-pour-le-plus-grand-nombre, et il est rationnel de penser à l'industrie. Bien sûr, il faut intéresser et l'industriel et le politicien, et il est rationnel de chercher une méthode et une logique irréfutable pour les convaincre, pense-t-on. Bien sûr, il est rationnel, pour élaborer cette méthode, étayer cette logique, de faire appel aux outils, aux technologies de masse, aux esprits scientifiques de pointe et aux équipes-pluridisciplinaires de recherche. Sans doute, l'architecte seul est-il dépassé, l'individu désarmé, l'artiste anachronique, irrationnel... et pourtant... nous avons fait ceci. Et pourtant, trois ans, nous avons cherché, étudié, testé, discuté et construit cette chose « aberrante parmi les aberrations », une « habitation-sculpture ». Pourquoi alors ? pourquoi... Et si, plus tard, on découvrait avec surprise que pour résoudre le-problème-de-l'habitat-pour-le-plus-grand-nombre, il ne fallait pas, il ne fallait surtout pas penser à l'industrie telle qu'on la conçoit aujourd'hui, celle de la standardisation des produits, mais qu'il fallait imaginer une autre industrie. L'industrie qui accepte pour standard l'origine même de la matière ; la molécule, l'atome, l'électron, la particule... Et si l'avenir était la préfabrication particulière ? ... Je rêve de cette merveilleuse industrie de l'outil à portée de la main, de la matière à portée du corps, de l'espace à portée du cœur, de l'Architecte à portée de l'Habitat. Je rêve de cette industrie, et j'y crois, qui aide le contact, l'échange, la communication, et qui, comme au temps des cathédrales, fasse redécouvrir la joie, la joie de faire, la joie de participer, la joie de construire, la joie du contact avec les choses et les êtres réels. Et non plus jamais, cette industrie de l'imposé et du tout cuit. Cette industrie pour invertébrés, « Je ne veux pas, disait Alain, qu'on offre à l'enfant la noix toute décortiquée. » Et cette industrie, s'il fallait aujourd'hui en chercher les sources, ne doit-on pas, pour les trouver, aller très loin du fleuve aveugle et borné, puissant mais impuissant, où tous, fascinés par la quantité, se précipitent et se noient. Ne sont-elles pas, ces sources, ailleurs que dans le monde usuel des architectes ? » (Pp. 317-318, « La Construction en Belgique 1945–1970 », 1971).

Avec l'exposition « *Architecture organique* » au Musée d'art moderne et d'art contemporain de Liège (23 décembre 2005 - 5 février 2006), la maison reçoit beaucoup d'attention. D'abord par Luc Merx et Christian Holl dans « Proximité avec la nature et aliénation de la nature. La Maison-sculpture de Jacques Gillet, René Greisch et Félix Roulin à

Liège et son importance dans le discours architectural actuel »²⁹. Pour eux, la signification de cette maison se trouve dans sa dialectique où la maison explore l'unicité mais pour ce faire, il est nécessaire d'expérimenter la technologie. Ici, la technologie libère au lieu d'uniformiser. Il souligne qu'à bien des égards, la maison présente des parallèles étonnants avec l'architecture biomorphique-numérique, tant en termes de la logique de conception assistée par ordinateur et de processus de construction qu'en termes d'apparence formelle. Ils expliquent que ce n'est pas une coïncidence, car cette architecture définit également ses géométries complexes comme une analogie avec la nature et comme une réaction au modernisme. En suivant leur dialectique, ils démontrent comment l'architecture biomorphique-numérique reste profondément piégée dans les systèmes du modernisme et comment l'architecture de Gillet offre au spectateur de nombreuses réponses aux problèmes et aux fascinations suscités par l'invention de l'ordinateur. Elle peut constituer la base d'une géométrie complexe, au-delà de l'ordinateur en tant qu'outil de conception. L'unicité de la maison-sculpture n'est pas fondée sur la révolution. Il ne s'agit pas tant d'un manifeste d'une solution universelle qui devrait remplacer ce qui existe déjà. Elle diffère du principe de l'avant-garde en ce qu'elle ne se veut pas universelle, mais radicalement personnelle, radicalement unique. Quiconque étudie la maison Gillet se sent poussé à redécouvrir l'ordinateur et à se passer de la mode et de l'émulation formaliste.

En 2006, l'article « *Sculpture house in Belgium by Jacques Gillet* »³⁰ est publié. Les auteurs se focalisent surtout sur les aspects de la construction en béton projetée, la préfabrication particulière et cette nouvelle industrie dont Gillet rêvait (« cette merveilleuse industrie de l'outil à portée de la main, de la matière à portée du corps, de l'espace à portée du cœur, de l'Architecte à portée de l'Habitat »³¹). Ils soulignent l'actualité de cette technique et que ce projet ne doit pas être considéré comme une réaction contre l'industrie du bâtiment en général, puisque l'équipe a exploré et expérimenté de nouvelles techniques de construction et des matériaux tout au long de la conception. Après tous ces éloges, en 2010, Geert Bekaert écrit l'article intitulé « Une critique d'architecture aveugle »³². Sa stratégie est

²⁹ Luc Merx, Christian Holl, *Closeness to Nature and Alienation from Nature. The Sculpture House by Jacques Gillet, René Greisch and Felix Roulin in Liège and its significance in the current architectural discourse*, in *Graz Architektur Magazin Springer Wien*, pp. 28-42, 2005.

³⁰ S. Van de Voorde, R. De Meyer, E. De Kooning, L. Taerwe and R. Van De Walle, *Sculpture House in Belgium by Jacques Gillet*, Université de Gand, Belgique, pp. 49-59, 2006.

³¹ Geert Bekaert, Francis Strauven, *La Construction en Belgique 1945-1970*, pp. 317-318, 1971.

³² Geert Bekaert, *Blind Architecture Criticism*, Dans *OASE*, pp. 127-132, 1971.

claire : il reprend le texte initial que Gillet avait écrit en 1971 pour le livre « L'architecture en Belgique 1945-1970 », dont il était l'éditeur avec Francis Strauven. Son verdict est radical : à part les dessins de construction de René Greisch, ce bâtard entre maison et sculpture peut peut-être être interprété au mieux comme une forme spéciale, frappante, peut-être ludique, en tout cas aveugle de critique architecturale. Pour Bekaert, l'approche de Gillet est une parodie boiteuse et son discours est incompréhensible. En remettant tout en discussion, Gillet, selon Bekaert, ne contribue en rien à une meilleure approche et élaboration de la problématique du logement ou de la sculpture. Et comme dernier coup de grâce, il compare la maison aux constructions étranges d'un Facteur Cheval ou d'un Simon Roda et de bien d'autres fanatiques qui ont fait de leur maison ou de leur jardin une expression de soi démonstrative et expressive qui dégénère rapidement en une forme de spectacle qui ne peut qu'attirer l'attention sur lui-même. Bekaert regarde la maison du point de vue du modernisme auquel Gillet veut s'opposer et n'y trouve pas de réponses sur les questions fondamentales que le modernisme pose sans remettre en question ses questions.

En 2013, l'artiste liégeois de renommée internationale Jaques Charlier produit la vidéo « *The dream of the columns. Jaques Gillet* », dans laquelle il se rend sur la « zone artisanale d'Ouffet pour visiter le « Permanent Experimental Building site of Sculpture-Architecture » de Jaques Gillet ou « colonnes du rêve » de 1979 forment des gestes inachevés sur lesquels d'autres « rêves » viendront se greffer.

Ce TFE n'est pas le premier dans l'Université de Liège sur cette maison ; en 2014, Christophe Hompesch traite déjà de la maison Jacques Gillet en détail dans son TFE « *Habitation SCULPTURE* ». Hompesch voit la maison-sculpture comme un ovni de l'architecture. Il choisit de raconter objectivement le trajet de l'œuvre en interprétant le discours qu'elle porte. Dans son introduction, il déclare explicitement qu'il ne veut pas explorer les parallèles entre l'habitation-sculpture et le courant contemporain de l'architecture biomorphique.

En 2018, la famille Gillet réalise le documentaire « *Maison-sculpture Gillet* »³³. Il s'agit d'un documentaire grand public avec des témoignages de l'historien d'art Pierre Henrion, de l'architecte Jacques Antoine et de Pierre Gillet. Ce film montre comment cette architecture

³³ Jacques Donjean, *Le Réseau, Production : Famille Gillet Les Films de La Passerelle, 2018.*

fonctionne comme un organisme vivant. Un an plus tard, la maison est accessible pour l'exposition « Hors les murs... Art contemporain Où Maison Sculpture ». Dans les journaux, on lit ce témoignage :

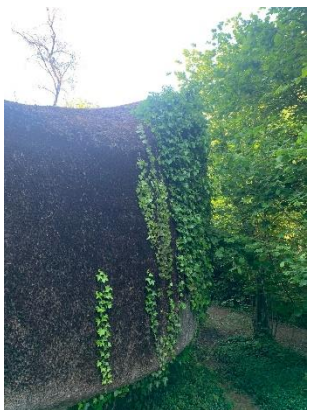
« On y est loin des villas qui cadénassent l'alentour. Ici, tout est folie douce, rêve instantané, joie des broussailles et des lierres rampants, fête païenne et surprise du chef. Tout ici respire l'audace, le savoir-faire et le savoir-vivre, un petit bois d'alentour, fougères, chênes courts, hêtres et bouleaux, agrémentant le lieu d'une fraîcheur qui vous ravive l'énergie quand, ailleurs, la chaleur estivale vous réduirait presque à néant. »³⁴

Actuellement, l'agence Servais Engineering Architectural occupe la maison-sculpture et une exposition sur la maison est en préparation.

³⁴ Roger Pierre Turine, *Hors les murs et stupéfiant*, Arts Libre, pp. 12, mercredi 4 septembre 2019.

2.5. REPORTAGE PHOTO







Figures 2 : Bryan Minique, Reportage photographique, 16 mai 2022.

3. LA MAISON-SCULPTURE, UNE FORME ET UNE FORME DE CRITIQUE CONTRE LA STANDARDISATION DES FORMES EN ARCHITECTURE

La maison-sculpture est plus qu'un exemple « *d'architecture organique* »³⁵ avec des similitudes formelles au biomorphique-numérique. D'abord, la forme unique est le résultat d'une collaboration étroite entre l'architecte Jacques Gillet, le sculpteur Félix Roulin et l'ingénieur René Greisch. Dans les écrits de Gillet, on remarque que la forme est une forme de critique sur la standardisation des formes « architectoniques »³⁶ qui résultent d'une vision progressiste. Pour utiliser les trois courants dans l'architecture définis par Françoise Choay³⁷, Gillet s'inscrit dans une vision naturaliste. Il rejoint la pensée de Frank Lloyd Wright : « *Les artistes doivent changer leurs attitudes envers la nouvelle technologie, au lieu de la blâmer pour sa destruction de l'artisanat traditionnel, ils doivent saisir la machine comme outil caractéristique de l'âge moderne et avec elle, créer un art vivant, indispensable à la vie de ces temps* »³⁸. Gillet, avec sa notion de « la préfabrication particulière »³⁹, rejoint la notion « d'hyper-standardisation » actuelle. Cette dialectique entre l'unicité de la maison-sculpture, qui nécessite d'expérimenter avec des nouvelles technologies, est développée par Luc Merx et Christian Holl. Ces auteurs soulignent également l'importance du projet culturel de Gillet à créer une proximité avec la nature et l'aliénation de la nature pour « *l'architecture biomorphique-numérique qui jusqu'ici s'est limitée à s'extasier sur la possibilité de générer des structures géométriques complexes* ». ⁴⁰

³⁵ *Courant architectural dont le but est d'exprimer le lien profond qui unit les habitants d'un bâtiment à l'environnement naturel qui les entoure. Sa particularité est de casser les codes et de se fondre visuellement dans la nature.*

³⁶ *Qui est conforme à la technique de l'architecture.*

³⁷ *Françoise Choay, L'Urbanisme, utopies et réalités : Une anthologie, Seuil, Paris, 1965.*

³⁸ *Frank Lloyd Wright cité par Jacques Gillet, Dans Précision sur l'expression et l'architecture organique, Arch&Life nr 33, pp. 9, 1989.*

³⁹ *Geert Bekaert et Francis Strauven, La Construction en Belgique 1945–1970, pp. 317-318, 1971.*

⁴⁰ *Anthony Vidler, Architecture's Expanded Field, 2004.*



Figure 3 : F. Roulin et J. Gillet, la maquette du "squelette".



Figure 4 : Les cheminées, deux points d'accroche et les renforts de rive.

« Cette sculpture vivante était une réaction contre la pression générale de l'époque vers la standardisation des formes en architecture, dans laquelle une pauvreté et une carence artistique devaient être contrebalancées par la collaboration avec des sculpteurs et des peintres. Le mérite de la collaboration artistique est évident lorsque l'on regarde le schéma du chantier. Les matériaux et les techniques utilisées ont donné à l'équipe une liberté de création : des barres d'acier ont été pliées, et posées une à une, pour renforcer la contingence entre nature, espace, matière et poésie. Un treillis métallique a été apposé sur les barres d'acier et la forme définitive a ensuite été fixée en projetant dessus un béton à prise rapide : direct, immédiat et efficace. L'extérieur n'en est que plus enveloppe que l'intérieur et aucune structure supplémentaire n'était nécessaire. La structure a été laissée nue à l'extérieur, postulant une véritable unité entre la forme et la matière. »⁴¹

⁴¹ S. Van de Voorde, R. De Meyer, E. De Kooning, L. Taerwe and R. Van De Walle, *Sculpture House in Belgium* by Jacques Gillet, Université de Gand, Belgique, 2006.

Afin de commencer une réflexion profonde sur le projet et les convictions qui donnent direction et sens à cette démarche, le statut des analogies naturelles sera questionné afin de comprendre leur importance dans la production théorique et pratique de l'architecture biomorphique-numérique d'impression 3D sur chantier.



Figure 5 : Alisa Andrasek, *Mesonic Fabrics*, 2009.

Avec « *Naturaliser l'architecture* »⁴², Frédéric Migayrou développe une position théorique sur le rapport à la nature. Il parle d'une « *naturalisation* »⁴³, c'est-à-dire de véritables références et analogies avec la nature. Après « *la géométrisation* », qui part d'une abstraction généralisée, « *l'organique* »⁴⁴, qui reste une forme de mimétisme de la nature et de la nouvelle écologie du design, conditionne tout autant l'architecture que la politique et la culture, au sein de laquelle nature et architecture se confondent pour se nommer « *éco physique* »⁴⁵.

« *Alors je me tiens devant vous prêchant l'architecture organique : déclarant que l'architecture organique devrait être l'idéal moderne, et son enseignement tellement nécessaire si nous voulons voir la vie en entier, et à partir de maintenant servir la vie dans son intégralité, ne tenant aucune tradition essentielle à la grande tradition. Il ne faut chérir ni forme préconçue nous liant par-dessus nous aussi bien au passé, au présent qu'au futur, mais*

⁴² Marie-Ange Brayer, Frédéric Migayrou, *Naturaliser l'architecture*, Editions HYX, Orléans, 2013.

⁴³ *Acclimatation durable d'une espèce (animale, végétale) dans un nouvel environnement.*

⁴⁴ *Propre aux êtres organisés.*

⁴⁵ *Mélange entre une nature et un objet physique.*

plutôt exaltant les lois simples du bon sens, ou d'un sens supérieur si vous préférez, déterminant la forme par le biais de la nature et des matériaux »⁴⁶.

L'éco physique est sous-entendu par une approche qui se veut « systémique »⁴⁷, et qui tente de « développer une nouvelle équation du design où le progrès technologique est égal à un engagement symbiotique intensifié avec les forces, les processus et les écosystèmes naturels »⁴⁸. Pour Migayrou, l'outil numérique montre, par sa capacité à reproduire la complexité du vivant, et même devenir nature artificielle, l'étendue de ses pouvoirs ainsi que la manière dont il va révolutionner l'architecture de demain.

« L'accès à de nouveaux langages de conception, à des algorithmes fondés sur les automates cellulaires [...] ainsi que l'accès au Scripting et au code, irriguent aujourd'hui une nouvelle génération d'architectes qui ont déjà gommé les frontières entre architecture, physique et biologie pour inventer des schèmes d'interactions entre formes et matériaux, entre minéral et organique, entre processus de construction et croissance »⁴⁹.



Figure 6 : Michael Hansmeyer, *Subdivided Columns*, 2010.

Les impressionnantes « colonnes accidentées »⁵⁰ qui s'élèvent par strates de Michael Hansmeyer, présentées lors de l'exposition « *Naturaliser l'architecture* », incarnent parfaitement l'approche « éco physique » dont parle Migayrou. Hansmeyer, quant à lui, explore le potentiel génératif et constructif des outils numériques à des fins architecturales.

⁴⁶ Frank Lloyd Wright, *Une architecture organique*, 1939.

⁴⁷ Relatif à un système dans son ensemble

⁴⁸ EcoLogicStudio, Voir sur : <http://www.ecologicstudio.com>.

⁴⁹ Marie-Ange Brayer, Frédéric Migayrou, *Naturaliser l'architecture*, Editions HYX, Orléans, pp. 59, 2013.

⁵⁰ Michael Hansmeyer, *Subdivided columns, including information on Sixth Order at Gwangju Design Biennale and Astana Columns*, Grand Palais, Paris, France, 2010.

Avec son approche biomimétique de l'architecture, il part des processus de subdivision cellulaire, dont la complexité procède de « *la simulation computationnelle de systèmes vivants* »⁵¹. Loin de toute approche imitative de formes issues de la nature (biomorphisme), et des méthodes et outils traditionnels de conception et de dessin, Hansmeyer développe une « *mimèsis* »⁵² spécifique qui consiste à concevoir des protocoles plutôt que des formes. Une place importante est laissée au hasard et à l'indétermination, conduisant l'architecte à se définir avant tout comme un « *chef d'orchestre* » et non comme celui qui détermine la totalité du projet.



Figure 7 : Marcos Cruz, Richard Beckett and Javier Ruiz, *Bioresceptive concrete*, Bartlett School of Architecture, 2020.

A travers une recherche formelle de la surface et de la composition physique elle-même du « *béton bio-réceptif* »⁵³, Marcos Cruz, Javier Ruiz et Richard Beckett créent et réalisent, à travers des méthodes de conception et de fabrication numériques, « *une construction plus vivante* ». Cinquante-deux ans plus tard, « *la sculpture vivante* » de Jacques Gillet fait son apparition en architecture.

Ainsi, on peut conclure que la « *sculpture vivante* » ouvre de nouvelles perspectives de cultures virtuelles avec des formes de plus en plus complexes et proches des structures naturelles. Là où la critique sur cette maison était de l'ordre de l'exceptionnellement non standard, et là où elle ne contribuait d'aucune façon à la demande du plus grand nombre, les nouvelles technologies permettent de dépasser la répétition industrielle avec sa standardisation et normalisation afin que l'hyper-standardisation devienne « *le nouveau*

⁵¹ Michael Hansmeyer, *approche expérimentale de l'architecture numérique*, FRAC centre Val De Loire, 2010.

⁵² *Idée de faire la même chose.*

⁵³ *Permet d'accueillir un écosystème biologique.*

standard ». Dans ce chapitre, l'évolution de la répétition industrielle, la logique de la standardisation et de la normalisation, et sa réaction (la variation et la nouvelle norme de l'hyper-standardisation) seront développés.

3.1. RÉPÉTITION INDUSTRIELLE

L'industriel lyonnais François Coignet (1814-1888) crée, en 1851, une usine de produits chimiques et peu de temps après, en 1854, une usine de matériaux de construction. Il publie des notices publicitaires sur les bétons agglomérés (technique brevetée en 1855) et le béton plastique (technique brevetée en 1859), ainsi que des ouvrages d'économie politique. En 1853, il construit la première maison à quatre étages en béton armé de fer à Saint-Denis. Avec cette maison, il va révolutionner à tout jamais les techniques de construction, et notamment celles utilisées pour bâtir le logement social. Quand il propose, en 1855, à l'Exposition universelle de Paris, son « *béton économique* », il s'inscrit dans la tradition utilitariste et l'économie dans la construction établie par J.-N.-L. Durand, en comparant sa maison à d'autres logements du point de vue du coût, de l'efficacité de construction et de l'économie des matériaux. « *D'après les procédés ordinaires, ce mur, pour obtenir une solidité suffisante, aurait dû être construit en moellons ordinaires avec revêtements en pierres brutes et couvert en pierres de taille. Il eût coûté de 16.000 à 20.000 francs à Saint-Denis en maçonnerie ordinaire ; fait en meulières ou en pierres de taille, il a coûté de 30.000 à 40.000 francs* ». Ce mur exécuté coûte à M. Coignet 5.000 francs. « *Il n'y a ni chaînage, ni ancras, ni linteaux, ni bois dans les murs. Le béton, réduit en pâte pulvérulente, est porté dans des moules établis sur le mur et y est simplement pilonné* »⁵⁴. « *J'ai démontré qu'il était possible de construire une maison à bon marché* »⁵⁵. Ce prototype de logement recèle le principe d'une véritable révolution avec un produit simple et modeste, mais n'attire cependant pas l'attention des membres du Jury de l'Exposition de 1855.

⁵⁴ François Coignet, *Exposition universelle : Constructions économiques, Extrait du journal L'ingénieur, 1^{er} novembre 1855.*

⁵⁵ *Idem.*



Figure 8 : François Coignet, La maison située au 72, rue Charles-Michels, Saint-Denis, 1853-1855.

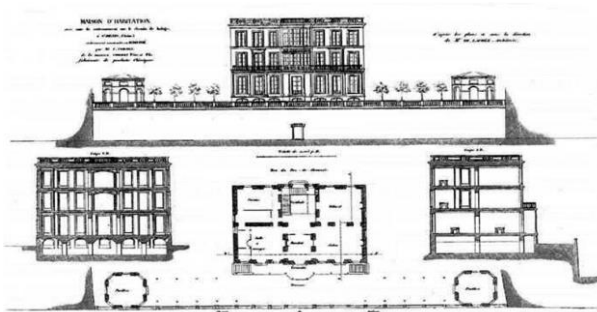


Figure 9 : François Coignet, La maison située au 72, rue Charles-Michels, Saint-Denis, 1853-1855..

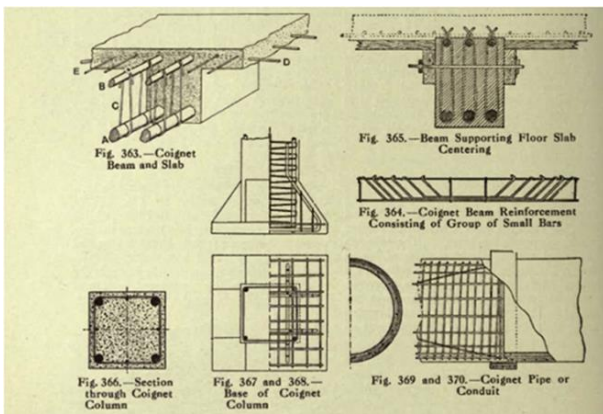


Figure 10 : François Coignet, Détails techniques.

Comme François Coignet, la start-up américaine ICON a l'ambition de transformer le monde de la construction résidentielle avec une nouvelle technique qui donne des possibilités de réduire le coût, de rendre la construction plus efficace et de faire une économie des matériaux. Dans leur projet sociétal, ils impriment des maisons en série en 24 heures pour répondre à la crise du logement. Durables, écologiques et surtout très abordables, les

nouvelles techniques d'impression 3D sur chantier ont révolutionné la construction de maisons. Les méthodes traditionnelles deviennent dès lors inefficaces.



Figure 11 : Icon, Maisons imprimées en 3D en 24 heures à Austin, Texas, 2018.



Figure 12 : Icon, Maisons imprimées en 3D en 24 heures à Austin, Texas, 2018.

Les premières visualisations de leurs maisons Austin, produites en série, semblaient d'un point de vue architectural peu convaincantes, mais ils ont pu réunir, avec leur concept, des investisseurs et des clients. « Nous avons utilisé ce soutien pour développer la robotique, les logiciels et les matériaux en tant que technologie de base pour nos partenaires et les acheteurs de maisons »⁵⁶. En 2018, ils obtiennent un permis de construire pour réaliser la première maison imprimée en 3D en Amérique.

⁵⁶ Voir sur : <https://www.iconbuild.com>.



Figure 13 : Icon, BIG-Bjarke Ingels, communauté de 100 maisons imprimées 3D, 2022.

Depuis cette première maison, ils ont imprimé en 3D sur chantier une communauté de 100 maisons. Pour la conception, ils ont fait appel au groupe BIG-Bjarke Ingels. Le chantier est en pleine construction et le plus grand quartier de ce type au monde sera inauguré en 2022. « *La technologie d'impression 3D d'ICON produit des maisons résilientes et économes en énergie plus rapidement que les méthodes de construction conventionnelles avec moins de déchets et plus de liberté de conception tout en respectant les délais et le budget des projets de construction* ». ⁵⁷

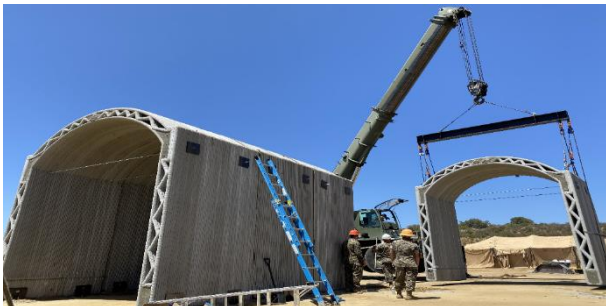


Figure 14 : DIU, Defense innovation Unit, structure militaire imprimée en 3D, 2020.

Au cours de l'année écoulée, la Defense Innovation Unit (DIU), une organisation qui se concentre sur l'accélération de la technologie commerciale au sein du ministère de la Défense, a montré un intérêt pour l'équipe ICON. « *Il existe des technologies commerciales qui fournissent un domaine d'excellence dans la construction robotique, mais peu d'entre elles relient tous les aspects nécessaires de manière à rendre la construction instantanément accessible au novice sans aucune formation d'ingénieur logiciel* »⁵⁸. L'utilisation de la

⁵⁷ Voir sur : <https://www.iconbuild.com>.

⁵⁸ Jeremiah Diacogiannis, responsable du programme DIU, Lieutenant de la marine américaine.

fabrication additive à des fins militaires se trouve surtout dans la conception de nouvelles structures, comme des abris aux ponts, qui peuvent être réalisées en moins de temps et avec moins de mains via des commandes simples et intuitives sur une tablette tactile ou un smartphone. Cette conception peut ensuite être exécutée par le système robotique en appuyant simplement sur un bouton.

3.2. STANDARDISATION/NORMALISATION

Dès 1914, Le Corbusier s'intéresse au problème du logement social et crée un procédé de construction industrielle par éléments structurels combinables. Ce système, nommé « *Dom-ino* »⁵⁹ (du latin domus, la maison et du mot innovation), évoque le jeu de dominos dont on associe les pièces les unes aux autres comme on pourra articuler les uns aux autres les éléments préfabriqués du système. « *L'ossature standard « Dom-ino » pour exécution en grande série est fabriquée en éléments standards, combinables les uns avec les autres, ce qui permet une grande diversité dans le groupement des maisons. Ce béton armé-là est fait sans coffrage : à vrai dire, il s'agit d'un matériau de chantier spécial qui permet de couler les planchers définitivement lisses dessus et dessous au moyen d'un très simple échafaudage de poutrelles double T accrochées temporairement à des colliers qui sont fixés au sommet de chaque poteau : Les poteaux de béton sont coulés à pied d'œuvre et dressés avec le système de coffrage ci-dessus* »⁶⁰.

« Une grande époque vient de commencer.

Il existe un esprit nouveau.

L'industrie, envahissante comme un fleuve qui roule à sa destinée, nous apporte les outils neufs adaptés à cette époque nouvelle animée d'esprit nouveau.

La loi d'Économie gère impérativement nos actes et nos conceptions ne sont viables que par elle.

⁵⁹ Le Corbusier, *Maison Dom-ino, construction standardisée, 1914.*

⁶⁰ *Idem.*

Le problème de la maison est un problème d'époque. L'équilibre des sociétés en dépend aujourd'hui. L'architecture a pour premier devoir, dans une époque de renouvellement, d'opérer la révision des valeurs, la révision des éléments constructifs de la maison.

La série est basée sur l'analyse et l'expérimentation.

La grande industrie doit s'occuper du bâtiment et établir en série les éléments de la maison.

Il faut créer l'état d'esprit de la série,

L'état d'esprit de construire des maisons en série,

L'état d'esprit d'habiter des maisons en série,

L'état d'esprit de concevoir des maisons en série, si l'on arrache de son cœur et de son esprit les conceptions immobiles de la maison et qu'on envisage la question d'un point de vue critique et objectif, on arrivera à la maison-outil, maison en série, saine (et moralement aussi) et belle de l'esthétique des outils de travail qui accompagnent notre existence.

Belle aussi de l'animation que le sens artiste peut apporter à ces stricts et purs organes ? »⁶¹

Le Corbusier

Dans le chapitre « *Maison en série* »⁶², Le Corbusier s'oppose à l'improvisation, au coût énorme de la main-d'œuvre, et aux solutions bâtardes qu'il observe dans les constructions. Afin de résoudre « le problème de l'habitat pour le plus grand nombre »⁶³, pour Le Corbusier, il faut que l'état d'esprit de la série naisse. Ainsi, l'industrie, qui est pour lui une puissance comme une force naturelle, envahissante comme un fleuve qui roule à sa destinée, tend de plus en plus à transformer les matériaux bruts naturels, et à produire ce qu'on appelle des « matériaux nouveaux ». Comme on a pu lire dans l'introduction, Jacques Gillet rêve aussi de cette merveilleuse industrie qu'il imagine tout autre que Le Corbusier qui voit, comme adepte du taylorisme et du fordisme américain, dans ces techniques industrielles un moyen de « *standardisation* »⁶⁴. Pour Gillet, l'architecture rationnelle est une « architecture mort-née », le masque du rationnel nous ment. Pour résoudre le problème de l'habitat pour le plus grand

⁶¹ Le Corbusier, *Vers une architecture*, éditions Vincent Féal & C°, Paris, pp. 188, 1920.

⁶² Le Corbusier, *Maison en série* « Citrohan », 1920.

⁶³ Idem.

⁶⁴ Le standard : une formule qui décrit la meilleure manière de faire quelque chose.

nombre, Gillet conclut qu'il ne fallait surtout pas penser à l'industrie telle qu'on la conçoit aujourd'hui, celle de la « standardisation ».

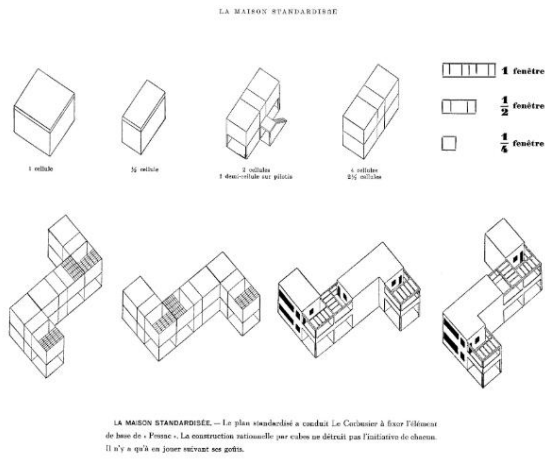


Figure 15 : Le Corbusier, Maison en série « Citrohan », 1920.

« Maison en série Citrohan. Autrement dit, une maison comme une auto, conçue et agencée comme un omnibus ou une cabine de navire. Les nécessités actuelles de l'habitation peuvent être précisées et exiger une solution. Il faut agir contre l'ancienne maison qui mesurait l'espace. Il faut considérer la maison comme une machine à habiter ou comme un outil. Lorsqu'on crée une industrie, on achète l'outillage ; Lorsqu'on se met en ménage, on loue actuellement des appartements imbéciles. Jusqu'ici on faisait d'une maison un groupement peu cohérent de nombreuses grandes salles ; dans les salles il y avait toujours de la place en trop et toujours trop peu de place. Aujourd'hui, heureusement, on n'a plus assez d'argent pour perpétuer ces usages et comme on ne veut pas considérer le problème sous son vrai jour (machine à habiter), on ne peut pas construire dans les villes et une crise désastreuse s'ensuit ; avec les budgets, on pourrait construire des immeubles admirablement agencés, à condition, bien entendu, que le locataire modifie sa mentalité ; du reste, il obéira bien sous la poussée de la nécessité. Les fenêtres, les portes doivent avoir leurs dimensions rectifiées ; les wagons, les limousines, nous ont prouvé que l'homme passe par des ouvertures restreintes et que l'on peut calculer la place au centimètre carré ; il est criminel de concevoir des W.C. de quatre mètres carrés. Le prix du bâtiment ayant quadruplé, il faut réduire de moitié les anciennes prétentions architecturales et de moitié au moins le cube des maisons ; c'est désormais un problème de technicien ; on fait appel aux découvertes de l'industrie ; on modifie totalement son état

*d'esprit. La beauté ? IL y en a toujours lorsqu'il en existe l'intention et les moyens qui sont la proportion ; la proportion ne coûte rien aux propriétaires, mais seulement à l'architecte. Le cœur ne sera touché que si la raison est satisfaite et celle-ci peut l'être quand les choses sont calculées. Il ne faut pas avoir honte d'habiter une maison sans comble pointu, de posséder des murs lisses comme des feuilles de tôle, des fenêtres semblables aux châssis des usines. Mais ce dont on peut être fier, c'est d'avoir une maison pratique comme sa machine à écrire. »*⁶⁵

La Maison Citroën a été réalisée comme un prototype de logement avec des éléments de construction standard. Comme on peut le constater dans ce fragment de texte ci-dessus, pour Le Corbusier, le principe-clé est la fonction. C'est à ce moment-là que la métaphore de la machine est si importante. L'idée de la maison en tant que machine est qu'elle remplit une fonction spécifique. Le fait qu'une norme est, pour Le Corbusier, établie sur des bases sûres et non pas par caprice, mais avec la certitude de quelque chose d'intentionnel et d'une logique contrôlée par l'analyse et l'expérimentation, suggérait une manière rationnelle de penser et de son importance dans le processus de conception de l'architecture qui tend à supposer que l'être humain dispose des mêmes besoins fondamentaux pouvant être normalisés.

3.3. VARIATION COMME RÉACTION À L'INDUSTRIALISATION ; ARCHITECTURES NON STANDARD



Figure 16 : Andy Warhol, Bouteilles de Coca-Cola vertes, 1962.

« Si je peins de cette façon, c'est parce que je veux être une machine ».

Andy Warhol

⁶⁵ Le Corbusier, *Vers une architecture*, éditions Vincent Fréal & C°, pp. 201, Paris, 1920.

Comme une machine, Warhol représente, sur ce tableau, la répétition d'une réalité froide, anonyme et monotone. La bouteille en verre de « *Coca-Cola* » n'est pas unique, en la démultipliant, elle perd de sa singularité et de son originalité. La représentation quasi industrielle et technique veut finir avec la picturalité de l'expressionnisme abstrait, où le geste de l'artiste s'inscrit dans la matière et la forme. Dans son article « *répétition ou différence* », Didier Dauphin⁶⁶ développe le thème de la différence dans la répétition, dans lequel le pop art s'inscrit. Il nous démontre que la sérialité dans la plupart des œuvres n'est jamais enfermée dans une logique du même. Comme le souligne John Cage, « *Andy s'est efforcé, par la répétition, de nous montrer qu'il n'y a pas vraiment de répétition* ». ⁶⁷

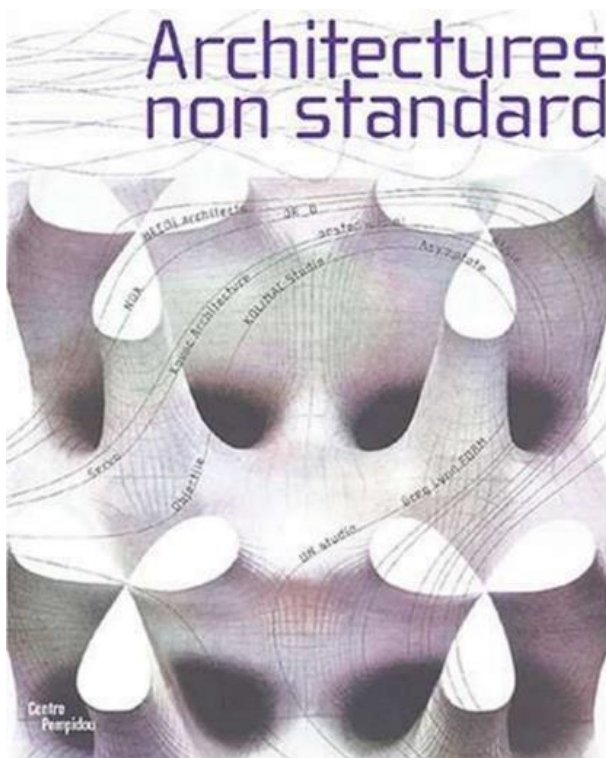


Figure 17 : *Architectures non-standard*, Centre Pompidou, Paris, France, 2004.

Depuis les années 1980, avec l'utilisation des logiciels de conception et de fabrication assistée par ordinateur, la pratique de l'architecture a subi une profonde mutation. Dans

⁶⁶ Didier Dauphin, *Le pop art américain : répétition ou différence*, dans *Nouvelle revue d'esthétique*, pp. 105-116, 2011.

⁶⁷ John Cage cité par Kinaston McShine dans *Andy Warhol Rétrospective*, Paris, Centre Georges Pompidou, pp. 13, 1989.

l'élaboration d'un projet, de sa conception à sa réalisation, l'architecte pourra affirmer davantage son rôle de prescripteur, en se positionnant en amont de la chaîne de fabrication, et en s'affranchissant des formes architecturales « *standardisées* » qui résultent des impératifs techniques et économiques de l'industrie du bâtiment. L'architecture s'ouvre ainsi à des formes « *non-standard* ». Avec l'exposition « *Architectures non standard* », le Centre Pompidou présente en 2003-2004 « *12 équipes* »⁶⁸ internationales d'architectes qui ont développé une recherche et une mise en application des outils numériques tant pour la conception et la production que pour la distribution d'éléments constructifs de l'architecture. Cette exposition permet de mesurer les mutations sociales, économiques et politiques induites par une mise en œuvre généralisée d'une production « *non-standard* » de l'architecture, du design et des politiques territoriales et urbaines. L'intérêt de cette exposition pour ce TFE est l'accent qui est mis sur les modifications de l'industrialisation de l'architecture au-delà des questions de représentation (virtualité, hyperspace) et d'architecture numérique.

« *Architectures Non-Standard* » : par définition, ce terme s'oppose au « *standard* ». Il sous-entend l'idée de répétition à l'identique engendrée par la rationalisation et la normalisation de la production. Mais l'idée de « *non-standard* » trouve son origine dans les mathématiques : Abraham Robinson, puis Benoît Mandelbrot et René Thom, ont montré que, dans le domaine de la topologie, l'analyse non-standard impliquait une transformation de l'idée de géométrie et une redéfinition de l'espace en tant qu'ensemble de paramètres modifiables.

Une jeune génération d'architectes expérimente le potentiel des outils informatiques dont témoignait en 2003 l'exposition « *Architectures Non-Standard* » au Centre Pompidou. La révolution numérique a modifié toute l'économie de la production architecturale, depuis la conception jusqu'à la réalisation. L'ordinateur permet à présent de calculer et générer des formes à partir de codes et de données paramétriques, et on peut produire, à une échelle industrielle, des objets pourtant uniques grâce aux machines à commandes numériques.

⁶⁸ *Asymptote, dECOI Architects, DR_D, Greg Lynn FORM, Kol/Mac Studio, Kovac Architecture, NOX, Objectile, Oosterhuis.nl, R&Sie, Servo, UN studio.*

« Les normes et les lois naturelles ne sont pas utilisées comme une contrainte mais plutôt comme un moteur de l'individualité ». ⁶⁹

A travers la réflexion de Lars Spuybroek (NOX), on va tenter de comprendre le « processus morphogénétique » ⁷⁰ en utilisant des logiciels de conception et de fabrication assistés par ordinateur et les impacts sur l'économie de la production architecturale, de la conception à la réalisation. Le MU Hybrid Art House propose, en 2001, « un logement préfabriqué non standard » et, en 2005, il écrit le texte « *The Structure of Vagueness* » ⁷¹, où il part des expériences de Frei Otto qui explorait, à Stuttgart fin 1990, à l'instar de la technique de modélisation en chaîne utilisée par Gaudí pour la Sagrada Familia, des systèmes de matériaux pour définir la forme. En partant du constat que les matériaux fonctionnent comme des « agents », il est essentiel pour lui de ne pas imposer une forme préconçue à la matière mais de trouver une forme en la manipulant.



Figure 18 : Antoni Gaudí et Frei Otto, La Sagrada Família, 2016.

Partant de ce principe, Frei Otto construit un logiciel informatique qui part dans une première étape de la géométrie, puis dans la matérialité qui prend le relais lors d'une étape de re-décalage et de procédure, et qui s'arrête dans un état de pleine géométrie à nouveau.

⁶⁹ Luc Merx, Christian Holl, *Closeness to Nature and Alienation from Nature. The Sculpture House by Jacques Gillet, René Greisch and Felix Roulin in Liège and its significance in the current architectural discourse*, in *Graz Architektur Magazin Springer Wien*, pp. 28-42, 2005.

⁷⁰ Développement des formes complexes et des processus qui élabore le relief.

⁷¹ Lars Spuybroek, *The Structure of Vagueness*, Dans *Textile The Journal of Cloth and Culture*, pp. 352-355, Janvier 2005.

Cette géométrie n'est plus imposée à un matériau, mais en est le résultat des interactions matérielles. Dans ce processus, le dessin n'est plus créé dans le champ visuel, mais devient le produit final du processus de la logique, en partie aveugle et informationnelle du logiciel. Ici, la géométrie n'est plus considérée comme la forme la plus élevée, la plus abstraite et la plus pure de la matérialité, comme on pouvait le lire dans « *Vers une architecture* » de Le Corbusier. Dans le processus de Frei, la géométrie co-évolue avec la matérialité dans ce qu'il appelle un « *espace topologique* » et une « *structure situationniste* ». Pour Spuybroek, l'architecture « *non-standard* » n'a rien à voir avec « *l'architecture de forme libre* » ou « *une complexité linguistique* ». Pour lui, elle est rigoureuse, car c'est repenser la répétition dans des ensembles de variabilité, repenser les structures dans des gammes de souplesse. « *S'il n'y a pas de technologie de conception, une technologie de fabrication devient absurde, avec des machines sous contrôle numérique, nous avons besoin du processus de conception lui-même également en tant que procédure d'information, il a besoin de règles et de scripts clairs pour générer une structure d'impression 3D* »⁷². Selon Spuybroek, dans la recherche de la forme, on ne peut plus se contenter d'emprunter des « *images de la complexité* » qu'on introduit dans des diagrammes de circulation, formels ou structurels, si on veut passer du « *constructivisme post-industriel* » à un « *constructivisme non-standard* ».

3.4. HYPER-STANDARDISATION / DIVERSIFICATION

« *De plus en plus, les productions de masse standardisées cèdent la place à une configuration productive qui s'ajuste à la demande particulière du client. Les données recueillies sur Internet, qui traduisent les préférences des internautes, acquièrent une valeur marchande au prorata de l'adaptabilité des processus de production, adaptabilité permise par le numérique.* »⁷³

Pierre Veltz⁷⁴, parle d'une société hyper-industrielle plutôt que d'une société post-industrielle. Dans le modèle de production fordiste d'industrialisation de l'après-guerre, la séparation entre « *penser* » et « *faire* » est poussée jusqu'à l'extrême à travers un idéal de

⁷² Lars Spuybroek, *The Structure of Vagueness*, Dans *Textile The Journal of Cloth and Culture*, pp. 352-355, Janvier 2005.

⁷³ Pierre Veltz, *LA SOCIÉTÉ HYPER-INDUSTRIELLE. Le nouveau capitalisme productif*, Seuil, 2017.

⁷⁴ *Idem*.

standardisation et normalisation. L'idéal architecturale, portée par les milieux investis dans les technologies avancées au tournant du XXIe siècle, s'appuie sur « *la continuité conception-fabrication* »⁷⁵, qui suppose un processus ininterrompu de la conception/représentation informatique afin de produire numériquement des objets en série diversifiés.



Figure 19 : Lars Spuybroek, *Architecture of Variation*, 2009.

La dimension culturelle de la société hyper-industrielle n'est pas moins intéressante que sa dimension technique, explique Pierre Veltz. L'économie de la connaissance favorise les relations entre pairs, capables de s'entendre par-dessus le cloisonnement des pays, des hiérarchies et des spécialités. Certes, le culte de la compliance, cette soumission scrupuleuse aux normes ; aux règlements ; aux protocoles ; aux rubriques et aux procédures dictés par la hiérarchie, ne cèdera pas facilement la place à la réactivité plus risquée des start-ups innovantes. Mais ce repliement derrière les règles ne peut que pénaliser les industries matures face aux industries innovantes qui mobilisent des réseaux étendus. En revanche, la prime revient à ceux qui, tels des robots multifonctions aisément reprogrammables, peuvent mobiliser le travail liquide et autonome où le résultat compte plus que le moyen. La qualité fleurit alors aux confins d'un dialogue intelligent entre concepteurs, opérateurs d'exploitation, maintenance et service après-vente.

⁷⁵ Dimitriadi Leda, *L'idéologie du continu et l'architecture hyper-standard*. Dans Lefebvre P., Neuwels J., Possoz J.-P. (dirs.), *Penser-Faire, Thinking-Making, Quand des architectes se mêlent de construction, When Architects Engage in Construction*, Éditions de l'Université de Bruxelles, pp. 181-194, 2021.



Figure 20 : Lars Spuybroek, *Architecture of Variation*, 2009.

L'hyper, ou ce qui va au-delà de la standardisation est le non-standard. Dans son livre « *The architecture of Variation* » Lars Spuybroek⁷⁶, pionnier de la révolution numérique, examine la pratique de conception de la personnalisation de masse en architecture, afin d'examiner comment un langage intègre la variation et la complexité dans les dernières innovations en matière de conception numérique et fabrication informatisée. Il nous montre comment les outils numériques ont radicalement transformé la conception, la pratique et la construction de l'architecture.

« Grâce à la conception et fabrication assistées par ordinateur, l'architecte pourra affirmer davantage son rôle de prescripteur, en se positionnant en amont de la chaîne de fabrication, et s'affranchir des formes architecturales « standardisées » qui résultent des impératifs techniques et économiques de l'industrie du bâtiment. L'opposition est donc à la fois entre deux systèmes de production, deux postures ou rôles de l'architecte, mais aussi entre deux visions de la forme architecturale. »⁷⁷

Là où la mécanisation de l'après-guerre visait principalement la productivité, les architectes s'engageant dans l'ère numérique à chercher une diversification formelle maximale afin de renouveler l'éventail des formes architecturales et à les rendre constructibles. Les logiciels de modélisation permettent de concevoir, représenter et calculer des objets géométriques à l'aide de machines à commande numérique souples et automatisées.

⁷⁶ Lars Spuybroek, *Research & Design: The Architecture of Variation*, Thames & Hudson, London, 2009.

⁷⁷ Idem.

3.5. L'IMPRESSION 3D SUR CHANTIER VERS UNE HYPER-STANDARDISATION DE LA FORME ARCHITECTURALE

Maintenant que toutes les formes les plus complexes sont réalisables, l'architecture « organique », à travers « l'éco physique » et le « biomimétisme », prend un autre enjeu. Comme la maison-sculpture de Gillet, il est possible de concevoir, par impression 3D, des constructions plus vivantes accueillant un véritable écosystème.

L'architecture d'aujourd'hui nous montre la facilité que peut avoir l'impression 3D à réaliser des formes plus complexes. Les critères de recherche formelle changent dans le processus développé ci-dessus. La forme fait partie intégrante du paysage et la surface devient un paysage en lui-même, tous les deux accueillant un écosystème propre à leur échelle.



Figure 21 : ETH Zurich, Robotic Fabrication Lab, Prototype de construction à grande échelle du toit en coque NEST HiLo, 2017.

Actuellement, on a, sur l'échelle du bâtiment dans son entièreté, une recherche faite par l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zurich). Cet institut a réalisé un toit en béton aux formes complexes. « *Ce n'est pas la construction en elle-même qui est une prouesse, mais c'est la performance qui vient de l'épaisseur du toit et du système autoportant. Il ne mesure en moyenne que 5 cm (3 cm sur les bords et jusqu'à 12 cm sur les parties porteuses)* ». ⁷⁸

« *Sa conception a fait appel à des techniques de simulations numériques qui ont permis de créer une méthode de fabrication utilisant beaucoup moins de matériaux. Au lieu de recourir à un système de coffrages ou de mousses sur mesure à usage unique, les ingénieurs de l'ETH Zurich ont utilisé un réseau de câbles en acier tendus sur une structure d'échafaudage réutilisable. Ils ont ensuite recouvert cette toile d'un tissu polymère qui fait office de coffrage*

⁷⁸ ETH Zurich, Robotic Fabrication Lab, Prototype de construction à grande échelle du toit en coque NEST HiLo, 2017.

pour recevoir le béton. Plus économique en matériaux et réutilisable, ce procédé autorise aussi une grande complexité dans les formes. »

« Un algorithme qui calcule la répartition de charge sur la structure a servi à déterminer la quantité exacte de béton à appliquer aux différentes parties du toit. Le béton lui-même a fait l'objet d'un traitement particulier afin de trouver une texture suffisamment fluide pour pouvoir être pulvérisé et damé selon une technique spécialement conçue pour l'occasion, tout en restant assez visqueux pour ne pas couler au contact du tissu polymère, notamment sur les zones verticales de la structure. »



Figure 22 : Marcos Cruz, Richard Beckett and Javier Ruiz, Bioreceptive Concrete Wall, Bartlett School of Architecture, 2019.

Sur l'échelle de la surface d'un volume, « Bioreceptive Concrete Wall » est une création de Marcos Cruz, en collaboration avec Javier Ruiz et Richard Beckett, également architectes et designers. Ces murs en béton bio-réceptifs permettent d'accueillir un écosystème au sein même de l'architecture. En effet, ces panneaux ont été imprimés en 3D et leur mode de conception et de fabrication numérique offre la possibilité d'accueillir différents organismes et de rendre ces façades végétalisées.

« Composées d'un nouveau type de béton biologiquement modifié allié à du liège, ces plaques répondent à un besoin urgent d'améliorer la qualité environnementale de nos villes, souvent trop polluées. Ce même béton présente beaucoup de vertus puisqu'il a été étudié et modifié pour fournir des niveaux de ph, des valeurs de porosité et des propriétés de rétention d'eau favorables à l'établissement et à la prolifération des micro-organismes (matières cryptogamiques d'algues, lichens et mousse). »

4. LA MAISON-SCULPTURE, UNE UNITÉ ENTRE LA FORME ET LA LIBERTÉ D'UNE MATIÈRE CONTRÔLÉE SANS COFFRAGE

Les dernières technologies de l'impression 3D sur chantier utilisent de moins en moins de coffrage. La matière y est imprimée par des couches successives ou projetée comme pour le gunitage de la maison-sculpture. Ainsi, la maison-sculpture ouvre des nouvelles possibilités autres que les techniques traditionnelles assistées par bras robotisé. Ce chapitre se structure par quatre gestes de la matière dirigée : l'assemblage d'éléments ; le moulage/coffrage ; la compression et l'expansion de la matière contrôlée. Une première réflexion devra être faite sur ce dernier point. Pour cela, on part de la question que Tim Ingold se pose : « *D'où proviennent les formes ?* »⁷⁹. Pour lui, l'acte de la fabrication qui impose une forme à la matière inerte n'est plus d'actualité. En effet, il a fait place à une approche plus matérialiste de la fabrication ou de l'itinérance au sein de la matière qui co-engendre les formes. En comblant l'écart entre conception et construction, et en assurant la continuité des outils manipulés de part et d'autre, la conception et la fabrication digitale bouleversent la notion que « *Les architectes ne font pas des bâtiments, ils les imaginent et les dessinent* ».⁸⁰



Figure 23 : Phase de gunitage, Ouvriers de l'entreprise Pasek projetant le béton.

⁷⁹ Tim Ingold, *Faire - anthropologie, archéologie, art et architecture*, Dehors, Bellevaux, 2014.

⁸⁰ Dimitriadi Leda, *L'idéologie du continu et l'architecture hyper-standard*. Dans Lefebvre P., Neuwels J., Possoz J.-P. (dirs.), *Penser-Faire, Thinking-Making, Quand des architectes se mêlent de construction, When Architects Engage in Construction*, Éditions de l'Université de Bruxelles, pp. 181-194, 2021.



Figure 24 : Phase de gunitage, Ouvriers de l'entreprise Pasek projetant le béton.

C'est en 1962 que Jacques Gillet découvre les possibilités incroyables du béton. André Paduart, spécialisé dans les coquilles minces en béton, inspirera Jacques Gillet lors de la réalisation d'une maison privée à La Hulpe. C'est alors que le gunitage, « *une technique de projection de béton fluide propulsé au moyen d'air comprimé* », intervient dans l'architecture de la maison-sculpture.

Malheureusement, avec la maille du squelette principal de l'habitation-sculpture, le béton ne peut pas s'accrocher à la structure. C'est alors que Jacques Gillet, accompagné du sculpteur Félix Roulin et de l'ingénieur René Greish, met en place une deuxième grille positionnée à l'intérieur du squelette existant, ce qui fait donc office de coffrage pour la projection contrôlée.

Jean-Marie Huberty et André Paduart. Tous deux sont de grands connaisseurs du béton et ont conduit diverses recherches pour la fédération Belge de l'industrie du ciment. André Paduart est d'ailleurs particulièrement spécialisé dans les coquilles minces en béton. Dans la maison personnelle de Jean-Marie Hunert, les deux jeunes ingénieurs ont exploité les caractéristiques du matériau jusqu'à la limite extrême en mettant en place, au niveau du plafond, deux coquilles de béton sous forme de paraboles hyperboliques de seulement cinq

centimètres d'épaisseur. »⁸¹ Le gunitage de l'habitation-sculpture se place dans la lignée de ces exploits architectoniques qui inspirent Jacques Gillet.

*« Un treillis métallique a été apposé sur les barres d'acier et la forme définitive a ensuite été fixée en projetant dessus un béton à prise rapide : direct, immédiat et efficace. L'extérieur n'est que la simple enveloppe de l'intérieur : aucune structure supplémentaire n'a été nécessaire. La structure a été laissée nue à l'extérieur, postulant une véritable unité entre la forme et la matière ».*⁸²

« L'entreprise Pasek dès 1964 développe la technique du gunitage, principalement dans le cadre de l'industrie sidérurgique, pour l'intérieur des hauts-fourneaux Le gunitage n'est pas une technique de construction aisée il se déroule sans interruption durant un peu plus de deux mois. L'entreprise Pasek possède son propre canon de projection qu'elle nomme le « Refra-Gun ».

*« Celui-ci a un premier temps de prise rapide, inférieure à quinze minutes : l'effet est direct, efficace, immédiat. Si certaines parties basses des voiles de béton peuvent atteindre quinze ou vingt centimètres d'épaisseur, de même que les rives sont épaissies d'une dizaine de centimètres d'épaisseur. La projection se fait premièrement du bas vers le haut. Quelques jours plus tard. La projection de béton est ensuite terminée du haut vers le bas, en allant rejoindre les « murets » projetés précédemment ».*⁸³



Figure 25 : César, *Expansion*, 1991.

⁸¹ S. Van de Voorde, R. De Meyer, E. De Kooning, L. Taerwe and R. Van De Walle, *Sculpture House in Belgium by Jacques Gillet*, Université de Gand, Belgique, 2006.

⁸² *Idem.*

⁸³ *Idem.*



Figure 26 : Robert Smithson, *Glue Pour*, 1970.



Figure 27 : John Chamberlain, *Hillbilly Galoot*, 1960.



Figure 28 : César, *Suite Milanaise*, 1998.

Afin de structurer ce chapitre sur l'unité entre l'itinérance de la matière et la forme contrôlée, on s'inscrit dans la pensée de Jean Nouvel, dans son « *anthologie* » du sculpteur César. Il ne part pas des formes ni de la chronologie des sculptures, mais choisit une catégorisation plus « matérialiste » de l'œuvre en optant pour « *quatre gestes de création* »⁸⁴ dans lesquels la combinaison du matériau et du moyen technique crée le langage artistique ; « *ce qui est à l'opposé du travail traditionnel du sculpteur qui procède progressivement par assemblage et équilibrage* »⁸⁵. Là où chez John Chamberlain, il s'agit encore d'une composition classique avec des tôles récupérées, chez César, la forme finale de ces « *compressions* » est la résultante d'un processus technique « *dirigé* ». Ainsi l'écoulement « libre » de la matière chez Robert Smithson n'a rien à voir avec le geste « dirigé » des expansions de César.

4.1. LA TECHNIQUE TRADITIONNELLE DE L'ASSEMBLAGE D'ÉLÉMENT

Dans le geste de « *l'assemblage* », c'est presque toujours le matériau, employé selon un processus spontané, qui dicte la forme de l'ensemble. Mais c'est également le contact physique avec celui-ci qui stimule et conditionne les capacités créatrices. C'est donc ce rapport tactile avec le matériau qui confère aux créations leur dimension esthétique et leur vigueur expressive, ce que César appelle leur « *présence* ».



Figure 29 : Gramazio & Kohler, Façades en briques non-standard, ETH Zurich, 2006.

⁸⁴ *Assemblage, Moulage/empreintes, Compression et Expansion.*

⁸⁵ Jean Nouvel, *Anthologie de César*, Editions Xavier Barral, Coédition Fondation Cartier pour l'art contemporain, Paris, 2008.

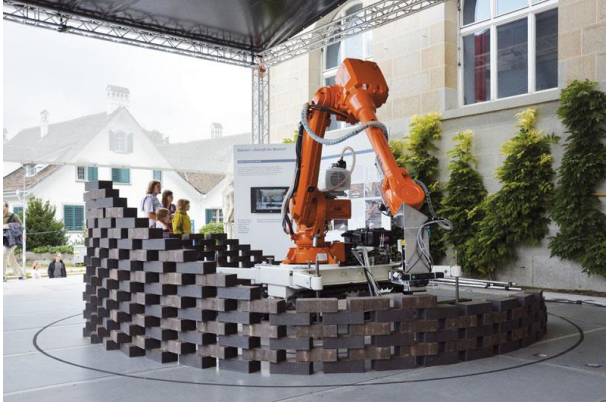


Figure 30 : Gramazio & Kohler, Façades en briques non-standard, ETH Zurich, 2006.

Fabio Gramazio et Matthias Kohler ont réalisé une construction assistée par robot en 2006. Ils ont assemblé une façade en brique « *non-standard* », dans le Pavillon de la Biennale de Venise en Suisse, à l'aide d'un bras robotisé (R-O-B). Pour eux, « *le numérique ne saurait se limiter à une recherche auto-référencée et doit confronter l'étendue de ses potentialités au domaine de la réalité construite et matérielle* »⁸⁶. La construction par robot accompagnée de l'imagination individuelle sera un avantage de la production de « *masse additive* ». ⁸⁷ Cette technique a déjà démontré son utilité, depuis son prototypage, dans plusieurs chantiers. Plusieurs expérimentations avec d'autres matériaux ont déjà été effectuées.



Figure 31 : The Eindhoven University of Technology, Project Milestone, 2021.

⁸⁶ Gramazio & Kohler, *Façades en briques non-standard*, ETH Zurich, 2006.

⁸⁷ Quantité de matières qui s'ajoute couche par couche.



Figure 32 : The Eindhoven University of Technology, Project Milestone, 2021

Dans ce projet expérimental de 2021, qui se situe à Eindhoven aux Pays-Bas, la maison est imprimée en béton et assemblée sur le chantier. Elle se compose de 24 éléments en béton imprimé, réalisés couche par couche. Les travaux visaient à développer la liberté de conception de l'impression 3D. L'habitation de plain-pied tente de s'intégrer parfaitement à son environnement naturel. En ce qui concerne la forme, des recherches ont été effectuées afin de permettre au béton de se produire sous différentes formes, notamment dans la réalisation de murs inclinés – ce qui était, pour les acteurs du projet, un réel défi.

*« La liberté de forme que permet l'impression 3D du béton crée énormément de possibilités pour concevoir une habitation et l'adapter aux souhaits des habitants. En même temps, cette nouvelle technique contribue au besoin de durabilité du secteur de la construction, à l'accélération de la construction et à la maîtrise des coûts, ce qui est indispensable pour continuer à construire des logements abordables ».*⁸⁸

Ce projet a été pionnier en démontrant qu'il était possible de faire une gamme de bâtiments avec des formes complexes imprimés en 3D en usine, et assemblés sur chantier, tout en étant conformes aux normes en vigueur.

4.2. LA TECHNIQUE TRADITIONNELLE DU MOULAGE / COFFRAGE

Dans le geste de « couler » une matière dans un « moule », le résultat garde des empreintes de la matière qui touche le coffrage. César parle de « *révélation* » et « *dissociation* » de la forme et des fragments par les matériaux, les couleurs et les différentes échelles.

⁸⁸ Pieter Knauff, Chief Investment Officer du projet Milestone, 2021.



Figure 33 : Team DBT, formwork, ETH Zurich, 2021.



Figure 34 : Team DBT, formwork, ETH Zurich, 2021.



Figure 35 : Team DBT, printed slab, ETH Zurich, 2016.



Figure 36 : Team DBT, printed slab, ETH Zurich, 2016.



Figure 37 : Team DBT, printed slab, ETH Zurich, 2016.

La recherche de l'ETH Zurich explore d'autres techniques d'impression 3D qui lui permettent de prendre le problème dans l'autre sens, en imprimant le coffrage qui servira à accueillir le béton à l'intérieur. Ce type de technique, nécessitant l'utilisation d'un coffrage, « permet de réaliser des éléments architecturaux de grande taille typologiquement optimisés ». ⁸⁹ D'un côté, on remarque une technique qui utilise des méthodes de coffrage standard qui sont transformées en y ajoutant des éléments imprimés en 3D dans une mousse isolante afin de réaliser une forme plus complexe et avec des coûts réduits. D'un autre côté, la technique est beaucoup plus sophistiquée et coûteuse : le coffrage entier est imprimé en 3D, offrant une possibilité de couler des formes presque plus complexes.

La première technique a déjà fait ses preuves sur des chantiers concrets. Ces coffrages tridimensionnels d'impression 3D ont pour le moment surtout démontré leur pertinence pour les éléments préfabriqués et de prototypage d'objets de design. Ils ouvrent de nouvelles

⁸⁹ Team DBT, printed slab, ETH Zurich, 2016.

perspectives où ils ont l'avantage d'être moins lourds et plus faciles à manipuler directement sur le site.

4.3. LA TECHNIQUE TRADITIONNELLE DE LA COMPRESSION

Du geste compacter ; densifier ; enchevêtrer ; résulte une forme géométrique monumentale, aux volumes pleins, dressés à même le sol comme une stèle, mais dont une multitude de détails arrêtent le regard. En tournant autour, le spectateur découvre une surface animée d'éclats de lumière ; d'imbrications colorées et de pliures nettes ombrées. La compression dirigée, comme geste artistique, exprime chez César « *un recyclage poétique du réel* ». ⁹⁰



Figure 38 : Gramazio & Kohler, *Smart Dynamic Casting*, ETH Zurich, 2012-2015.

⁹⁰ Jean Nouvel, *Anthologie de César*, Editions Xavier Barral, Coédition Fondation Cartier pour l'art contemporain, Paris, 2008.



Figure 39 : Gramazio & Kohler, Smart Dynamic Casting, ETH Zurich, 2012-2015.

Des scientifiques suisses de l'ETH Zurich utilisent une technologie de « *coulage dynamique* ». Les colonnes sont le résultat d'un coulage constant dans un coffrage qui se modifie durant le processus, qui lui-même est en mouvement. Pour cela, les chercheurs utilisent un énorme robot de soudage à chenilles « *Mesh Mold* ». De plus, le caillebotis imprimé en 3D servira d'élément de renforcement. Après cela, le moule sera rempli d'un mélange spécial de béton, suffisamment visqueux pour qu'il ne fuie pas jusqu'à ce qu'il se solidifie.



Figure 40 : Zeliha Öztürk, Digital fabrication of rammed earth, 2017.



Figure 41 : Zeliha Öztürk, Digital fabrication of rammed earth, 2017.

Le projet de recherche « *fabrication robotique d'éléments en terre battue* » vise à développer un processus de fabrication robotique applicable pour les composants en terre battue. Le pisé est une technique de construction ancienne utilisée depuis 8000 ans. La technique est basée sur le compactage en couches de la terre dans un coffrage à l'aide d'un pilon en bois à effort manuel. Aujourd'hui, la technologie de coffrage s'est améliorée et les dameuses pneumatiques ont remplacé les dameuses manuelles.

4.4. L'EXPANSION DE LA MATIÈRE CONTRÔLÉE

Dans « *l'Expansion dirigée* »⁹¹, on sent le geste de la matière qui coule et qui soudain se fige dans son mouvement, dans son glissement. La hauteur depuis laquelle la matière a été versée et la manière dont elle s'est répandue restent visibles. Verticale ou horizontale, « *l'Expansion* » n'est pas une forme libre. César se réserve la possibilité d'intervenir dans les trois phases du processus d'exécution. Il peut agir tout d'abord sur la rigidité et l'épaisseur des volumes en contrôlant leur temps de solidification, et il peut effectuer un travail de colorisation par incorporation des pigments. Il peut intervenir ensuite sur les coulées en les dirigeant, en les superposant ou les juxtaposant comme le sont, par exemple, « *Les Jumelles* »

⁹¹ Jean Nouvel, *Anthologie de César*, Editions Xavier Barral, Coédition Fondation Cartier pour l'art contemporain, Paris, 2008.

dans l'Expansion n° 8. Il peut provoquer également des accidents de surface que l'on peut voir dans l'Expansion n° 3 « La Lunaire ». César a anticipé une forme sans maîtriser tout à fait la matière, mais en l'orientant autant que possible.



Figure 42 : Zeeshan Ahmed and Rob Wolfs, Filigreed Firewall, Technical University of Eindhoven, 2017.



Figure 43 : Zeeshan Ahmed and Rob Wolfs, Filigreed Firewall, Technical University of Eindhoven, 2017.

Cette recherche a été menée dans le cadre d'un projet collaboratif entre Bekkering Adams, l'Université technique d'Eindhoven et Cement & Beton Centrum en 2017. La technique développée a permis à l'équipe de faire varier la hauteur de la couche et la vitesse à laquelle le matériau en béton a été déposé. Comme dans les « *expansions dirigées* » de César, où la forme finale est la résultante d'une matière fluide qui coule et soudain se fige, la recherche ouvre des nouvelles perspectives d'expression de la surface dans l'impression 3D sur chantier.

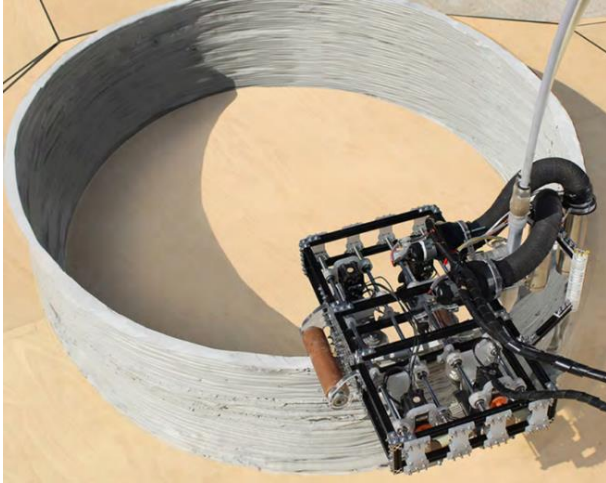


Figure 44 : The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), Minibuilders, Barcelona, 2013.

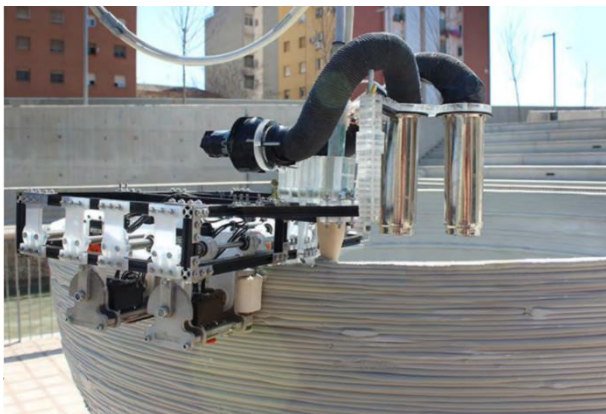


Figure 45 : The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), Minibuilders, Barcelona, 2013.

Dans l'impression 3D, une technologie appelée « *minibuilders* » a été conçue. Il s'agit d'une famille de robots pour imprimer en 3D des structures de toutes tailles. Comme des termites, trois robots travaillent ensemble et successivement. Le premier, le « *robot de base* », pose 10 couches faisant office de base. Le deuxième, appelé « *robot à prise* », construit la coque restante de la structure. Et finalement, le « *robot aspirateur* » traverse la coque, ajoutant des couches de renforcement chaque fois que cela est nécessaire.

4.5. L'IMPRESSON 3D SUR CHANTIER VERS UNE EXPANSION DE LA MATIÈRE CONTRÔLÉE SANS COFFRAGE

Maintenant que l'on impose plus une forme, « *l'itinérance* » au sein de la matière « *co-engendre* » les formes et laisse des traces de sa production grâce au processus

morphogénétique dans lequel les matériaux sont des agents qui, lorsqu'ils sont manipulés, donnent forme. La construction peut donc aller plus vite, avec moins de matières.

« Le faire n'est pas non plus forcément lié à l'utilisation de techniques low-tech ou à l'artisanat. Ses vertus supposées jouent, par exemple, un rôle central dans la valorisation des technologies de fabrication digitale en architecture, suivant l'argument qu'elles permettent de combler l'écart entre conception et construction, en assurant la continuité des outils manipulés de part et d'autre. »⁹²

Afin de démontrer la démarche sur cette matière qui donne forme, deux expérimentations seront présentées. D'une part, l'extrusion de la matière continue et d'autre part, une succession de plusieurs couches de projection de matière.



Figure 46 : The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), Prototype de mur de terre imprimé en 3D, Barcelona, 2017-2018.

Dans la première expérimentation de l'empilement de couches, le prototype final du programme OTF 2017-2018 est un mur en terre cuite imprimée de 2 mètres de large et 5 mètres de haut d'épaisseur variable (0,7 m en bas et 0,2 m en haut) orienté vers le sud. C'est une structure autoportante dans laquelle l'épaisseur du mur et la géométrie de ses couches sont conçues pour correspondre aux nécessités structurelles. Le mur est conçu en fonction du climat local, en tenant compte de l'incidence solaire, des températures annuelles et de l'humidité.

⁹² *Pauline Lefebvre, Julie Neuwels, Introduction Des valorisations du faire en architecture dans Penser-Faire Quand des architectes se mêlent de construction, Edition de l'Université de Bruxelles, pp. 25, 2021.*



Figure 47 : Gramazio & Kohler, Robotic Plaster Spraying, ETH Zurich, 2018-2022.

La recherche présentée est une étude exploratoire d'un processus à commande numérique qui peut être appliqué pour élargir les possibilités de conception des surfaces des structures de bâtiments. Cela implique la pulvérisation de plusieurs couches minces de plâtre sur une surface verticale pour créer des formations ou des motifs volumétriques, sans l'utilisation de coffrages ou de structures de support. Le dispositif expérimental et les premiers résultats de la méthode de collecte de données impliquent des études systématiques avec des essais physiques, permettant de développer des moyens de prédire et de visualiser le comportement complexe à simuler des matériaux, ce qui pourrait éventuellement amener à concevoir avec la plasticité de ce matériau un outil de conception numérique.

5. LA MAISON-SCULPTURE, UNE STRUCTURE ADDITIVE RENFORCÉE SANS COFFRAGE

Les expériences présentées actuellement de la dernière génération d'impression 3D reflètent des expériences vécues dans la maison-sculpture. Cet enfant-béton est une synthèse de la structure et de la forme. Le chapitre abordera l'émergence de structures renforcées qui provient d'une évolution des constructions traditionnelles de masse et des techniques afin de réduire la quantité de matière. Là où les premières impressions 3D sur chantier étaient des formes pensées à travers leur capacité constructive de compression, la nouvelle génération d'impression 3D sur chantier est également résistante à des forces de tractions et de torsions. Les parallèles formels et les principes structurels utilisés dans les dernières impressions 3D expérimentales et dans les formes de structures additives renforcées sans coffrage de la maison-sculpture seront explorés.

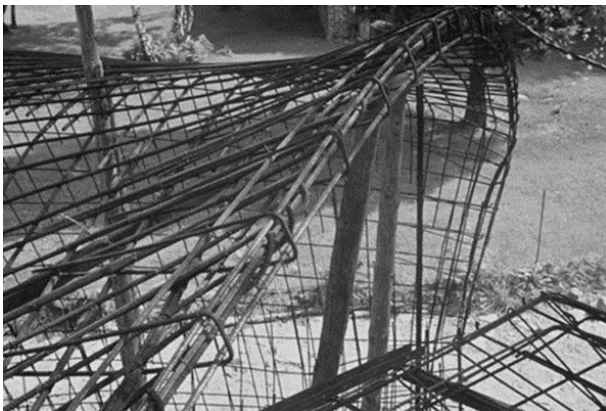


Figure 48 : "Poutres" en acier au bord.



Figure 49 : Vue d'ensemble du chantier avant le gunitage.

La maison-sculpture dispose d'une structure expérimentale et d'un socle traditionnel. Réalisé par un entrepreneur, le socle est constitué de blocs béton. Les murs occupent deux des trois dalles qui correspondent aux grandes zones de l'habitation. Les deux cheminées en béton, d'une hauteur de cinq à six mètres, sont les deux points d'accroche assurant la sécurité de la structure métallique qui sert à recevoir le « gunitage ».

« La maille du squelette principal de l'habitation-sculpture est formée par un quadrillage qui possède un espacement de quinze centimètres. Cet écart ne permet évidemment pas au béton de s'accrocher. Jacques Gillet met alors en place une deuxième grille qui sera positionnée à l'intérieur du squelette existant. Des pattes métalliques dessinées par Jacques Gillet permettront d'agrafer cette dentelle à la maille principale, en maintenant un écart régulier entre les deux éléments de ce grillage-armature qui sert de coffrage.

Ces deux tours de béton d'une hauteur variant de cinq à six mètres forment les deux seuls points d'accroche supérieurs à la structure métallique qui recevra la projection du béton. Ce grillage, composé de tige rondes à béton crénelé de huit millimètres, placées une à une, se greffe à des barres à béton pré-ancrés dans des chapes de fondation.

Le tissage de toutes ces voiles est délicat et le chantier se transforme vite en une accumulation de toiles d'araignée gigantesques, soutenues et ajustées entre elles par un étaçonnement sauvage, une véritable forêt de fins piquets de bois.

René Greisch demande également que tous les nœuds de rencontre soient soudés. Ceux-ci étaient au départ uniquement tenus par des ligatures en acier torsadé. L'objectif était simplement d'obtenir un « squelette » plus solide et robuste avant d'entamer le gunitage ».

Concernant le squelette, il s'agit d'un processus expérimental et évolutif. L'ingénieur René Greisch, l'architecte Jacques Gillet et le sculpteur Félix Roulin donnent ensemble les indications et modifications spécifiques à la collectivité d'encadrants et d'étudiants participant à cette expérience, qu'ils doivent effectuer sur la structure directement sur le chantier. Ici, la transmission d'un savoir-faire structurel est donc d'une importance capitale pour cette maison-sculpture, car l'objectif de celle-ci est d'obtenir une structure poétique la plus robuste et solide possible avant d'effectuer la projection du béton sur l'armature du squelette.

Dans l'histoire de la construction des dômes, on remarque trois types d'évolutions structurelles qui se démarquent : la masse, la double peau et le renforcé.

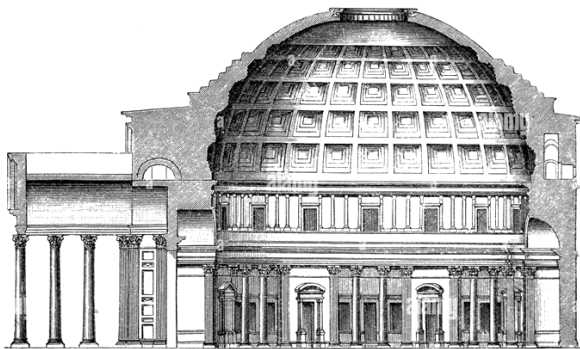


Figure 50 : Agrippa puis Adrien, Le Panthéon, Rome, 125 après. J.-C.

Pour la première construction (celle de masse), les Romains étaient d'habiles constructeurs. Le Panthéon, vers 125 après J.-C., est un dôme en béton massif. Afin d'assurer la structure, ils ont réduit la quantité de matière au fur et à mesure que le dôme prenait forme.

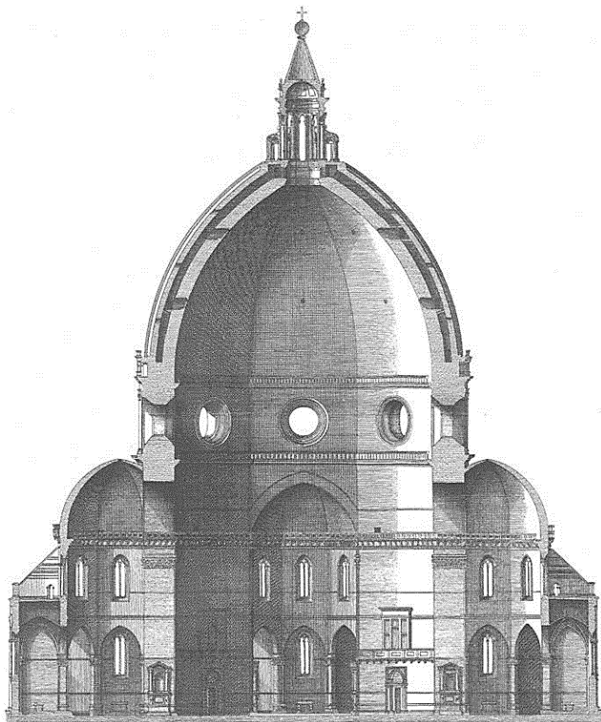


Figure 51 : Filippo Brunelleschi, Cathédrale Santa Maria Del Fiore, Florence, 1420.

Pour la deuxième construction (celle de la double peau), c'est la cathédrale de Florence de Filippo Brunelleschi⁹³ qui attire l'attention. L'architecte s'est penché sur la construction de ce dôme en 1420. Son objectif était de « *diriger la fabrication des matériaux afin qu'ils soient le plus léger possible* »⁹⁴. Il a mis en exergue une structure en brique avec des murs incurvés, et c'est ainsi qu'il développe une double structure reliée par des éléments qui permettent de solidifier l'ensemble, de le rendre plus robuste avec moins de matériaux.

⁹³ Architecte, peintre et orfèvre de l'école de Florentine, 1377-1446.

⁹⁴ Filippo Brunelleschi, Voir sur : <https://cultea.fr>.

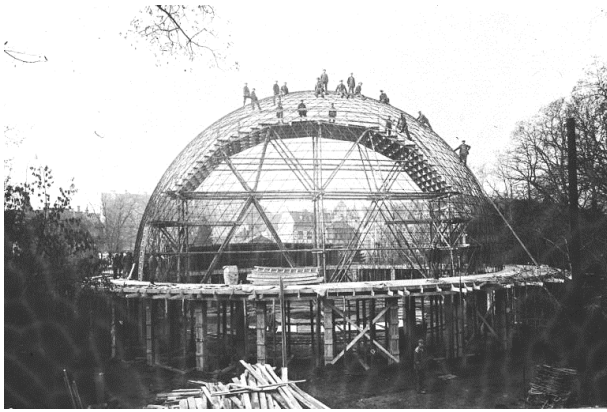


Figure 52 : Walter Bauersfeld, prototype du planétarium de Iéna, 1922.



Figure 53 : Walter Bauersfeld, prototype du planétarium de Iéna, 1922.

Pour le dernier type de dôme (celui de la structure renforcée), on prend l'exemple de l'ingénieur Walter Bauersfeld, qui s'attaque, en 1922, à la question du dôme en béton armé. « On entend ici par construction renforcée des éléments en béton armé permettant des structures spatiales dont l'épaisseur est très faible par rapport aux éléments plus conventionnels »⁹⁵. En combinant les avantages des deux matériaux, il est possible de réduire la quantité de matière et de concevoir d'autres formes de dôme. Bauersfeld développe « un projecteur pour un planétarium pour lequel il travaillait chez le constructeur d'instruments optiques Zeiss de Iéna depuis 1912 »⁹⁶. Il conçoit un treillis métallique en forme de dôme à la géométrie contrôlée afin d'y projeter du béton gunité à travers l'ossature sur un coffrage mobile.

Dans le domaine de l'impression 3D sur chantier, on retrouve les mêmes types d'évolutions structurelles que dans les exemples explicités ci-dessus.

⁹⁵ Bernard Espion, Université Libre de Bruxelles, Service BATir, Voir sur : <https://docplayer.fr>.

⁹⁶ Idem.

5.1. LES CONSTRUCTIONS TRADITIONNELLES DE MASSE PAR IMPRESSION 3D

Dans les impressions 3D en masse, la logique structurelle fonctionne selon un système de compression de la matière couche par couche. En effet, chaque fois la buse de l'imprimante passe par-dessus une couche déjà déposée, et ainsi de suite.

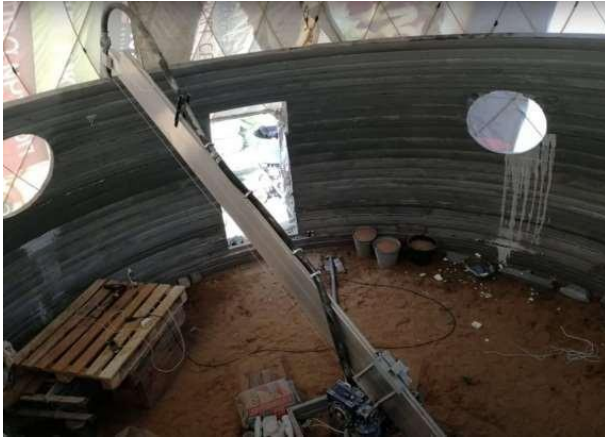


Figure 54 : Printed Dome, Le dôme imprimé en 3D, 2021.

Cette méthode a été testée par une start-up russe appelée Printed Dome, qui développe une approche d'impression 3D afin de fabriquer des dômes 3D. Cette entreprise a mis en œuvre « une technique de construction permettant d'ériger un bâtiment peu coûteux, de meilleure qualité et conçu directement sur le chantier »⁹⁷. Cette technique consiste en un dépôt de couches successives.

⁹⁷ Printed Dome, Le dôme imprimé en 3D, Voir sur : <https://www.3dprintingmedia.network>, 2021.



Figure 55 : The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), *Voûtes et Dômes d'impression 3D*, Barcelona, 2021.



Figure 56 : The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), *Voûtes et Dômes d'impression 3D*, Barcelona, 2021.

La recherche de l'IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) explore également les méthodes d'impression 3D de dômes, à travers des tests de prototypage, afin de définir la forme du dôme. L'objectif est « *d'obtenir des géométries pouvant être imprimées sans supports ni coffrages supplémentaires, afin de réduire les coûts, le temps et le gaspillage de matériaux* »⁹⁸. Ils étudient l'optimisation des géométries, la robotique d'impression 3D et le remplissage stratégique. La conception de cette voûte est réalisée en masse, sans réduction de matière, mais informée par le prototypage qui l'a précédée.

5.2. LES AVANTAGES DES CONSTRUCTIONS EN DOUBLE PEAU PAR IMPRESSION 3D

La fabrication additive en double peau a pour objectif de réduire la quantité de matière et de diminuer le poids propre de la construction, ainsi que de bénéficier d'une plus grande performance structurelle. La double coque est séparée par une « coulisse ».⁹⁹

⁹⁸ The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), *Voûtes et Dômes d'impression 3D*, Barcelona, Voir sur : <https://www.iaacblog.com>, 2021.

⁹⁹ *Vide entre deux murs.*



Figure 57 : WASP, La maison prototype TECLA, 2020.



Figure 58 : WASP, La maison prototype TECLA, 2020.

Dans le cas de figure ci-dessus, Mario Cucinella, en collaboration avec l'entreprise TECLA qui fabrique des imprimantes 3D WASP, inscrit le projet dans une transition écologique. Leur recherche entre matérialité et technique est intéressante, car leur réalisation d'un double dôme permet de jouer le rôle de structure, toiture et revêtement extérieur. Etant donné que le matériau est utilisé uniquement pour la structure, on bénéficie d'une économie de matière. Dans le cas d'une construction sans imprimante 3D, un coffrage serait réalisé autour de la structure et le béton y serait coulé par la suite. Deux fois moins de matériaux sont donc utilisés. De plus, dans le processus, la structure est renforcée par un liant intérieur qui connecte les deux parois. Ainsi, la structure et la finition ne font qu'un.

5.3. LES AVANTAGES DES CONSTRUCTIONS RENFORCÉES PAR IMPRESSION 3D

Les murs des constructions renforcées, dans la fabrication additive, ont pour objectif de rendre les bâtiments plus résistants et de réduire la quantité de matière. Lorsque l'on ajoute un élément permettant de renforcer la structure, celle-ci va se retrouver naturellement dans un phénomène de traction et de torsion, ce qui la rend plus résistante. Des recherches sont effectuées afin de déterminer la capacité portante d'un matériau armé imprimé en 3D, ainsi que sur l'automatisation d'assemblages innovants d'éléments imprimés en 3D.

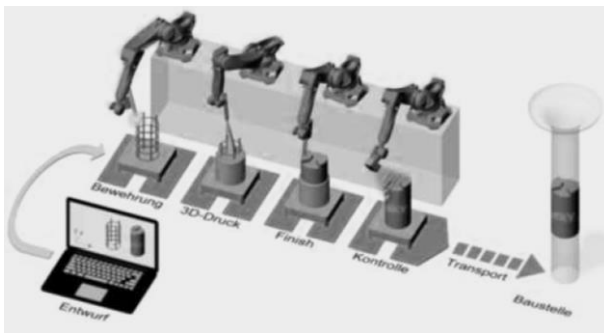


Figure 59 : TU Braunschweig, Production des premières colonnes en béton armé par impression 3D, 2019.



Figure 60 : TU Braunschweig, Production des premières colonnes en béton armé par impression 3D, 2019.

L'université allemande TU Braunschweig (Technische Universität Braunschweig) a mené une recherche sur l'impression 3D de colonnes en béton renforcé. Leur analyse a été étudiée selon les expérimentations faites en béton non armé. La production de l'armature se fait de

manière automatisée, à l'aide d'une machine à souder, mais nous pourrions envisager qu'à l'avenir, ce serait au moyen d'une imprimante 3D. A cause de l'armature, diriger la buse est toujours compliqué, c'est donc à l'aide d'une imprimante 3D de béton à projection de gunitage que cela est devenu possible. L'étape finale de ce processus de réalisation est le fraisage, qui donne ainsi l'aspect final à l'expérimentation. Il est important de retenir que tout ce processus de fabrication, de la conception à la planification des différents éléments de structures, s'effectue autour d'un modèle virtuel pour ensuite être conçu de manière automatisée.

5.4. LES NOUVELLES POSSIBILITÉS DES CONSTRUCTIONS RENFORCÉES PAR IMPRESSION 3D

Dans le chantier de la maison-sculpture, deux techniques différentes ont été utilisées pour le socle et le squelette. La première technique est notamment la structure de base en béton renforcé qui est mise en place par un entrepreneur. La deuxième technique utilisée est l'expérimentation d'un squelette avec des tiges et un maillage de fer rempli à l'aide d'un gunitage de béton à l'extérieur et un isolant projeté à l'intérieur. La technique pour le socle est similaire à celle de l'expérimentation chez KUKA et la structure du squelette est se raccorde à l'expérimentation « *Mesh Mold* ».

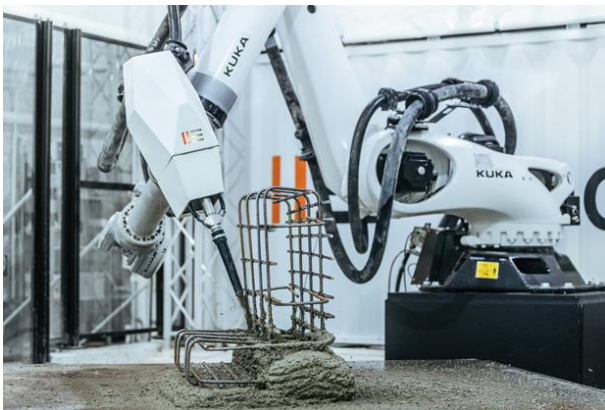


Figure 61 : KUKA, Impression 3D avec du béton projeté, Ausbourg, Allemagne, 2022.

KUKA, une entreprise d'Ausbourg en Allemagne, réalise des tests de projection de béton gunité sur une structure métallique couche après couche à l'aide d'un grand bras robotique. Le matériau est directement déposé sur la grille en acier. Cette technologie se rapproche des

techniques conventionnelles utilisées lors de la réalisation d'un béton armé, mais cette fois-ci sans coffrage par un robot et non par un ouvrier.



Figure 62 : Gramazio & Kohler, Mesh Mould Prefabrication, ETH Zurich, 2019-2021.



Figure 63 : Gramazio & Kohler, Mesh Mould Prefabrication, ETH Zurich, 2019-2021.



Figure 64 : Gramazio & Kohler, Mesh Mould and In Situ Fabricator, ETH Zurich, 2017.



Figure 65 : Gramazio & Kohler, Mesh Mould and In Situ Fabricator, ETH Zurich, 2017.

Grâce à la collaboration entre Gramazio & Kohler Research et l'ETH Zurich, Mesh Mold fait des tests qui s'approchent structurellement des solutions constructives développées pour la maison-sculpture. Cette solution qui est présentée comme, apparemment, une nouvelle méthode réalise industriellement et à grand échelle des structures aux formes complexes en béton renforcé sans aucun coffrage. Cette fabrication robotisée en treillis, assemblée sur chantier, forme le coffrage et le renforcement structurel nécessaire afin de concevoir des matériaux armés de bonne qualité. Un second processus, dans le développement de cette expérimentation, permet de plier et souder, de manière automatisée par un robot, des structures complexes bien dimensionnées et optimisées.

6. LA MAISON-SCULPTURE OU L'EXPÉRIENCE DE CONSTRUIRE COLLECTIVEMENT SUR CHANTIER

« Comment le processus de conception de la maison-sculpture présente-t-il des parallèles étonnants avec l'architecture biomorphique-numérique et comment son processus de construction collective rejoint-il l'expérience de se réunir autour d'un modèle virtuel ? » L'architecte, le sculpteur et l'ingénieur se sont réunis autour de plusieurs maquettes réduites de ce bâtiment expérimental, ainsi que, dans le cas d'étude de la maison-sculpture, autour de la réalisation de tests de prototypage à l'échelle 1/1 avant de se lancer dans l'expérience de construction collective de cette maison sur chantier. Ici, on revient à la différence entre le processus de conception (penser) et de réalisation (faire), où la pratique en tant qu'acte premier et partagé et la conception est médiée par le processus de la réalisation (doing-in-making / making-in-doing). Les différents types d'imprimantes 3D sur chantier, le portique, le bras robotique et le type Delta sont présentés et « *une nouvelle forme d'artisanat* » qui valorise les technologies de fabrication digitale en architecture permet d'assurer la continuité des outils manipulés d'une part, et de combler l'écart entre conception et construction d'autre part. La phase de conception devient un chantier virtuel, un espace de prototypage et de collaboration interdisciplinaire qui permet l'optimisation adaptée à la fabrication de topologies complexes. Lorsque le robot effectue la construction sur le chantier, l'homme se retrouve autour du modèle virtuel.



Figure 66 : F. Roulin et J. Gillet, la maquette du «squelette».



Figure 67 : R. Greish, Test de gunitage, Namur, 1966.

Pour construire cette maison-sculpture, une dérogation au règlement communal des bâtisses est obtenue par le Conseil Communal d'Angleur en considérant « l'aspect artistique » et le fait que ce projet « constitue l'unique spécimen d'un nouveau genre d'architecture ».

Comme le dit Ingold : « Le cours était un voyage dans lequel nous nous étions tous embarqués, sans savoir ce que nous allions découvrir ». C'est également tout au long de l'enquête que surgissent des possibles que le projet initial n'aurait pu anticiper. Le défi vaut ici tout autant pour l'anthropologue que pour le concepteur, qu'il soit artiste, designer ou architecte : faire confiance à une dynamique d'exploration et avoir l'humilité de suivre le déroulement de la situation comme de « suivre » le matériau pour se laisser guider là où il nous mène.



Figure 68 : Vue d'ensemble du chantier.



Figure 69 : Chantier de l'habitation-sculpture, 1967.

Les matériaux et les techniques utilisés sur chantier ont donné à l'équipe une liberté de création : des barres d'acier ont été pliées, et posées une à une, pour renforcer la contingence entre nature, espace, matière et poésie. C'est lors de la réalisation de l'objet construit qu'apparaît réellement le caractère participatif du projet.

Entre la version déposée à la Ville et sa réalité construite, qui a été à la fois planifiée et improvisée, le projet a continué d'évoluer. Cette construction expérimentale se planifiait, pour Gillet, dans une période de contacts, d'échanges, de communication qui fait redécouvrir la joie, la joie de faire, la joie de participer, la joie de construire, la joie du contact avec les choses et les êtres réels. « Plusieurs astuces ont été trouvées et décidées lors du chantier lui-même, comme le détail de rive ou bien l'intégration de châssis ouvrants découpés dans les vitrages fixes. Il y a également les multiples ajustements et renforts ponctuels décidés par René Greisch in situ. »¹⁰⁰ La manière dont Gillet a fait appel aux outils, aux technologies de masse, aux esprits scientifiques de pointe et aux équipes pluridisciplinaires de recherche présente, à bien des égards, des parallèles étonnants avec l'architecture biomorphique-numérique, tant en termes de logique de conception assistée par ordinateur qu'en tant que processus de construction.

Les imprimantes 3D sur le chantier fonctionnent en empilant des couches d'un mélange spécifique basé sur un modèle informatique en trois dimensions. Le mélange préparé de ciment, de plastifiant et d'autres substances est placé dans la trémie de l'appareil et ensuite fourni à la tête d'impression. La mixture est ensuite déposée sur la surface ou couche

¹⁰⁰ Christophe Hompesch, *Travail de fin d'études, Habitation-Sculpture, ULiège, 2013-2014.*

préalablement imprimée sur le chantier. C'est ainsi que fonctionnent la plupart des imprimantes 3D architecturales. Il existe néanmoins d'autres systèmes qui ont été montrés ci-dessus. Dans le secteur de l'impression 3D, il existe trois grands types d'imprimantes 3D : celle de type portique, celle à bras robotisé et celle de type Delta.

6.1. L'IMPRESSION 3D SUR CHANTIER PAR UNE IMPRIMANTE DE TYPE PORTIQUE

*« Composée d'un cadre, de 3 axes et d'une tête d'impression, vous pouvez imprimer le bâtiment partiellement ou dans son ensemble ».*¹⁰¹

Les imprimantes à portique présentent souvent des avantages en termes de coût et de stabilité, permettant d'imprimer de gros volumes ou des bâtiments entiers à la fois. Ces imprimantes 3 axes fournissent également l'impression discontinue nécessaire lors de l'impression de l'ensemble du bâtiment, ce qui facilite le contrôle et élimine le besoin de programmeurs hautement qualifiés. Les avantages majeurs de ce type d'imprimante 3D sont nombreux, avec quatre points retenus :

- Vous pouvez imprimer de grands et petits bâtiments. Il est possible d'imprimer plusieurs étages comme un petit projet.
- Il est possible d'imprimer des éléments architecturaux complexes avec un haut niveau de détail. Vous pouvez apprendre exactement en utilisant les trois axes directionnels (X, Y, Z). La vitesse variable permet une impression lente et rapide. Cependant, il convient de garder à l'esprit qu'il faut analyser le comportement du matériau pour obtenir une impression plus précise.
- Ce type d'imprimante est mobile et peut être utilisé sur site et hors site. Évidemment, déplacer une imprimante portique est plus difficile qu'une imprimante robot.
- Vous pouvez imprimer sur du béton et du mortier.

¹⁰¹ Guillaume Campagnet, *Impression 3D de bâtiment : Une révolution ?* Voir sur : <https://www.planradar.com>, 19 novembre 2021.



Figure 70 : COBOD, Premier bâtiment de deux étages imprimé en 3D en Europe, Belgique,, 2020.

L'une des principales idées reçues sur le marché actuel est le fait qu'on puisse construire tout un bâtiment à l'aide d'une imprimante 3D béton. Toutefois, seuls les murs et les fondations sont fabriqués de manière additive. Néanmoins, on ne peut pas dire que les technologies 3D n'ont pas eu un impact énorme sur l'industrie. La société danoise COBOD a construit le tout premier immeuble résidentiel allemand imprimé en 3D à l'aide de son imprimante 3D béton de type portique BOD2. Les imprimantes 3D béton ont été utilisées pour construire des logements dans plusieurs pays.

6.2. L'IMPRESSION 3D SUR CHANTIER PAR UNE IMPRIMANTE DE TYPE BRAS ROBOTIQUE

« L'imprimante 3D à bras robotisé dispose d'un robot ou d'un réseau de robots, comme un manipulateur industriel équipé d'extrudeuses et contrôlé par un ordinateur ».¹⁰²

Le principal désavantage des imprimantes à bras robotisé est la surface d'impression limitée, ce qui rend difficile l'utilisation de ce type d'imprimante pour les tests et l'expérimentation. Les utilisateurs d'imprimantes robots sont pratiquement obligés d'imprimer uniquement des éléments, pas des structures/bâtiments entiers. Le robot dispose

¹⁰² Guillaume Campagnet, Impression 3D de bâtiment : Une révolution ? Voir sur : <https://www.planradar.com>, 19 novembre 2021.

d'une zone d'impression assez réduite car le bras de la machine est plutôt court et elle a besoin de beaucoup d'espace libre.



Figure 71 : CyBe, RC 3Dp, imprimante de construction à bras robotisé, Pays-Bas, 2018.

Ce type d'imprimante 3D a été développé par CyBe, une société néerlandaise active dans le domaine de l'impression depuis 2013. En général, les imprimantes robots ont l'avantage d'être plus mobiles que les imprimantes à portique, et de pouvoir imprimer des constructions très complexes et détaillées grâce à leur mouvement à 6 axes, tandis que les imprimantes à portique auront du mal.



Figure 72 : Constructions-3D, Imprimante 3D MAXI PRINTER, France, 2017.

Développée par la société Constructions-3D, cette imprimante de bâtiment grande échelle « MaxiPrinter » est capable de fabriquer in situ des bâtiments novateurs personnalisables. Cette solution globale d'automatisation est optimisée pour être déployée rapidement sur chantier. Elle permet d'imprimer les ouvrages sur site, limitant ainsi au

maximum les risques humains et financiers de la construction grâce à une répétabilité avancée du procédé.

Avec son bras à 4 axes télescopique et sa capacité à se recroqueviller sur elle-même, l'imprimante 3D de Constructions-3D est optimisée pour pouvoir imprimer sur de très grands volumes tout en étant peu encombrante. Une fois l'impression 3D du bâtiment terminé, elle peut simplement ressortir par la porte ! La maison-sculpture pourrait être ainsi érigée par l'intérieur et l'extérieur afin de faciliter la projection du béton.



Figure 73 : Constructions-3D, Siège de l'entreprise, Valenciennes, France, 2019.

La construction de bâtiments en 3D a déjà commencé : en 2019, Constructions-3D a imprimé le premier ouvrage en 3D en France grâce à sa Maxi Printer. Il s'agit d'un pavillon de démonstration de 60 m² imprimé en 28 heures. Cette réalisation témoigne de la maturité des technologies d'impression 3D.

6.3. L'IMPRESSION 3D SUR CHANTIER PAR UNE IMPRIMANTE DE TYPE DELTA

« Les imprimantes 3D Delta utilisent également le système de coordonnées cartésiennes, mais n'utilisent pas de mouvement linéaire suivi pour déposer le filament ».¹⁰³

Dans une imprimante Delta, la surface d'impression est fixe et les trois moteurs fonctionnent ensemble pour se rencontrer à l'extrémité chaude et la déplacer en fonction des

¹⁰³ Mélanie W., *Fonctionnement d'une imprimante 3D FDM par catégorie*, Voir sur : <https://www.3dnatives.com>, 23 septembre 2021.

coordonnées de latitude et de longitude et de son altitude. Ces moteurs contrôlent trois postes qui sont reliés à l'extrudeuse par des bras qui déplacent celle-ci. Le nom du type d'imprimante Delta vient des bras triangulaires qui maintiennent la forme de l'extrémité chaude. Ce type d'imprimante est conçu pour produire des vitesses d'impression plus rapides.

Son inconvénient est que l'imprimante 3D Delta doit être beaucoup plus haute que son volume de construction en raison de la conception du bras robotique. C'est pourquoi plus d'espace est généralement nécessaire pour cette imprimante qu'avec une imprimante 3D cartésienne.



Figure 74 : WASP, Imprimante 3D Big Delta, Italie, 2015.



Figure 75 : WASP, Imprimante 3D Big Delta, Italie, 2015.

La Big Delta, un projet de WASP (World's Advanced Saving Project), mesure près de 12m et 6m de circonférence, et elle a pour but de construire rapidement et à moindre coût. Cette impressionnante infrastructure fonctionne selon ce système : « *Le but de WASP n'était pas uniquement d'entrer dans le Livre des records mais de créer une imprimante capable d'imprimer des maisons fiables et pas chères pour les personnes n'ayant pas de toit.* »

L'imprimante se servira pour cela de matériaux naturels comme l'argile et la terre et consommera relativement peu d'énergie, surtout au vu de son imposante taille. Si le fait d'imprimer des maisons n'est pas vraiment nouveau, le projet de WASP se veut être un moyen efficace de parer à la croissance galopante. Ainsi, un rapport des Nations-Unies a mis en exergue le fait qu'à partir de 2030, près de quatre milliards d'individus devront être logés, une bonne partie d'entre eux ayant en sus de cela des revenus annuels inférieurs à 3.000 dollars ».¹⁰⁴

6.4. L'IMPRESSON 3D OU L'EXPÉRIENCE COLLECTIVE AUTOUR D'UN MODEL VIRTUEL

La phase de conception devient un chantier virtuel, un espace de prototypage et de collaboration interdisciplinaire qui permet l'optimisation adaptée à la fabrication de topologies complexes. Lorsque le robot effectue la construction sur le chantier, l'homme se retrouve autour du modèle virtuel.

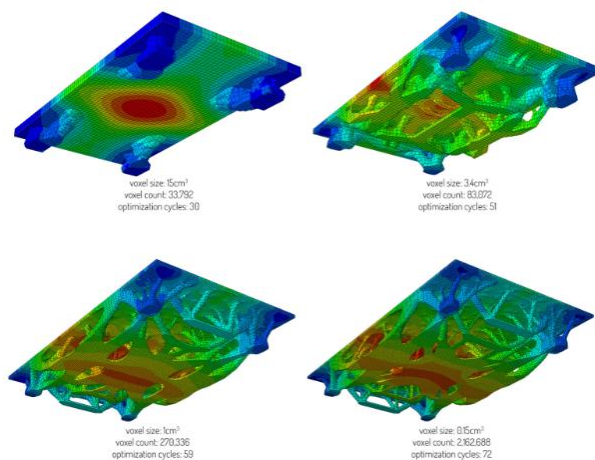


Figure 76 : ETH Zurich, Topologie optimisée de prototypage avec nœuds, 2016.

¹⁰⁴ Reman Max, *La plus haute imprimante du monde*, Voir sur : <https://www.encros.fr>, 2015.

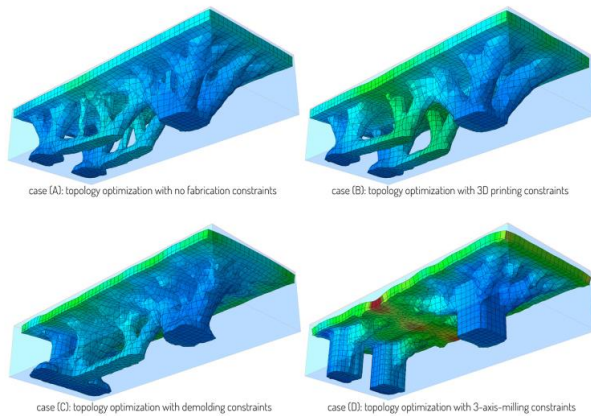


Figure 77 : ETH Zurich, Topologie optimisée avec contraintes de fabrication, 2016.

Dans le secteur de la construction, il existe de nombreuses stratégies afin d'améliorer l'efficacité des matériaux. Un grand potentiel de réduction de l'utilisation des matériaux dans les premières phases de conception serait désormais possible avec l'impression 3D. Dans le cas des matériaux difficiles à recycler tels que le béton, le chantier virtuel serait une bonne réponse anti-gaspillage. En effet, ce type de technologie permet l'optimisation adaptée à la fabrication de topologies complexes.

Des chercheurs de l'ETH Zurich ont mené des recherches sur le chantier virtuel. *« La fabrication additive est un processus qui ne promet presque aucune contrainte de fabrication, permettant potentiellement la production de géométries complexes topologiquement optimisées. L'objectif de cette recherche est de démontrer que des pièces à grande échelle peuvent être fabriquées avec la fabrication additive. Pour étudier cette hypothèse, deux composants de dalles en béton ont été conçus à l'aide d'algorithmes d'optimisation de la topologie et fabriqués à l'aide de l'impression 3D ».*

La phase de conception devient un chantier virtuel. Et, lorsque le robot effectue la construction sur le chantier, l'homme se retrouve autour du modèle virtuel.

7. LA MAISON-SCULPTURE, VERS UN 7^{ème} ORDRE D'ARCHITECTURE

Plusieurs recherches comme « *Histoire de la construction* », « *Imaginaire technique* » et « *Culture constructive* » sont toutes une histoire qui a une finalité pratique : « *une approche technique pour comprendre l'univers du bâti* »¹⁰⁵. Les recherches récentes des historiens sur les techniques sont essentielles pour tous ceux qui travaillent sur le changement technique. Concernant la question de la novation, comment une invention surgit et s'impose dans un domaine ? Comment elle se diffuse et se transforme à son tour dans ce domaine, voire re-définit son contexte ? Elle est à la fois au cœur de l'histoire des techniques et de l'architecture.

À chaque fois qu'une nouvelle technologie de construction fait son apparition, la question de comment retrouver un langage propre à cette nouvelle technique se pose. C'est le cas pour le ciment et le béton armé ainsi que pour l'impression 3D sur chantier. Trois protagonistes de l'architecture nous permettront de voir comment Adolf Loos, Le Corbusier et Leon Krier mettent la société en situation de crise font devenir de l'architecture un projet culturel à travers une nouvelle invention.

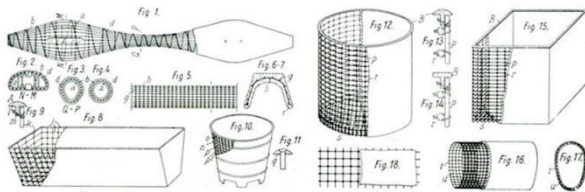


Figure 78 : Joseph Monier, ciment renforcé, brevet, 1867.

¹⁰⁵ Valérie Nègre et Guy Lambert, *L'histoire des techniques, Une perspective pour la recherche architecturale ? dans Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine*, nr 26-27, 2012.



Figure 79 : Joseph Monier, Pont de Chazelet, 1875.



Figure 80 : Joseph et Louis Vicat, Le pont du Jardin des plantes, Grenoble, 1855.



Figure 81 : Joris Laarman Lab, pont en acier, Amsterdam, 2015.



Figure 82 : The Bridge Project, Nimègue, 2020.

Le ciment armé a révolutionné le monde de la construction. Il n'est pas né, comme on pourrait bien le croire, dans le cerveau d'un ingénieur diplômé, mais bien de l'expérience du jardinier Joseph Monier. À son époque, il construisait des rocailles en jetant du ciment sur un grillage. Et puis un jour, il constata que ce matériau avait la capacité d'être à la fois étanche et imputrescible. Ainsi, il eut l'idée de l'utiliser à la place du bois pour les caisses à fleurs. C'est à partir de cette observation qu'il prit conscience de la grande résistance du ciment. Chez Monier, la matière est le béton, mais la forme mime le bois. Dans le pont de Joseph et Louis Vicat, on constate qu'il est également conçu en béton coulé, mais formellement pensé en pierre. Le pont en acier de Joris Laarman Lab est imprimé en 3D à l'aide de bras robotisés multi-axes. Ici, le design s'inspire du style du XVII^e siècle, mais les robots qui lui donnent vie s'appuient sur la structure qu'ils sont en train de créer. Les ponts imprimés en 3D sont actuellement les plus longs du monde. Dans ce cas-ci, on s'aperçoit que la forme est pensée à travers les nouvelles techniques d'impression 3D.

Après une relecture des textes sur l'expérience de la maison-sculpture à la recherche d'un projet culturel d'architecture biomorphe-numérique, la question de langage et d'écriture architecturale se pose. L'hypothèse qui a été suivie dans ce TFE est que le résultat de la collaboration entre Gillet, Roulin et Greisch annonce un futur porteur de connaissances, au sens culturel et technique, pour les nouvelles technologies, y compris l'impression 3D. Dans la lecture dialectique de la maison, entre une recherche pour l'unicité et sa nécessité d'expérimenter les nouvelles technologies, il y a une volonté de reformuler le cadre de la pratique culturelle, afin de retrouver une relation à la nature. Une relecture de quelques textes fondateurs du modernisme et une critique sur ce modernisme s'impose. D'abord, dans

« Ornement et Crime »¹⁰⁶, Adolf Loos plaide pour un dépouillement intégral de l'architecture moderne d'ornement qui doit être issu du matériau même et non être « plaqué » sur l'architecture. Le texte a été publié en français en 1910 et réédité par Le Corbusier en 1920 dans la revue l'Esprit Nouveau avec l'introduction suivante :

« M. Loos est l'un des précurseurs de l'esprit nouveau. En 1900, déjà, au moment où l'enthousiasme pour le modern style battait son plein, en cette période de décor à outrance, d'intrusion intempestive de l'Art dans tout, M. Loos, esprit clair et original, commençait ses protestations contre la futilité de telles tendances. L'un des premiers à avoir pressenti la grandeur de l'industrie et ses apports dans l'esthétique, il avait commencé à proclamer certaines vérités qui paraissent encore aujourd'hui révolutionnaires ou paradoxales. Dans ses œuvres, malheureusement très peu connues, il était l'annonciateur d'un style qui s'élabore seulement aujourd'hui. Nous publions de lui, aujourd'hui, « Ornement et Crime » qui sera suivi de « l'Architecture moderne », deux articles imprimés déjà en France dans les « Cahiers d'aujourd'hui » en 1913 ; ceci, sur la demande expresse de M. Loos qui estime avoir fixé dans ces deux articles le plus clair de ses intentions : nous continuerons alors par la publication d'inédits de M. Loos. »

Dans le texte lui-même, on lit :

« Consolez-vous, ouvrez les yeux, et voyez. Ce qui fait justement la grandeur de notre temps, c'est qu'il n'est plus capable d'inventer une ornementation nouvelle. Nous avons vaincu l'ornement : nous avons appris à nous en passer. Voici venir un siècle neuf où va se réaliser la plus belle des promesses ... Les objets manufacturés changent de forme selon une loi dont j'ai donné la formule suivante : la stabilité des formes est en raison directe de la qualité des matériaux. En d'autres termes, la forme d'un objet manufacturé est satisfaisante si elle nous est aussi longtemps supportable que l'objet peut nous servir... Si tous les produits de notre industrie étaient d'une qualité esthétique correspondante à leur qualité de matière, le consommateur les paierait au prix qu'ils vaudraient et en aurait pour son argent. Et ce prix, je le répète, permettrait à l'ouvrier de gagner davantage en travaillant moins. ... Mais dans ce que l'on appelle "l'art industriel", les mots "bon" et "mauvais" n'ont plus aucun sens. Les prix dépendent de la nouveauté des formes et non de la qualité des matériaux. Puisqu'un meuble

¹⁰⁶ Lecture : *Ornament und Verbrechen*, Akademischer Verband für Literatur und Musik de Vienne, 1910. Et essai: Publié en 1912 dans *Les Cahiers d'aujourd'hui*.

solide ne saurait durer plus longtemps qu'un meuble de camelote, qui donc songerait à le payer quatre fois plus cher ? ... La disparition du travail solide, l'emploi de matériaux peu durables devraient être la conséquence logique de la renaissance artificielle de l'ornement. »

Il est important de remarquer que, pour Loos, l'artisanat et l'itinérance au sein de la matière pour engendrer des formes particulières sont très présents. Alors que Le Corbusier plaide pour une division entre le processus de conception (penser) et de réalisation (faire). Le Corbusier prône les nouvelles techniques et la standardisation afin de réaliser une solution-pour-le-plus-grand-nombre. La confession de ce puriste à la fin de son livre *« L'art décoratif d'aujourd'hui »*¹⁰⁷ commence avec une réflexion sur le livre (doing) et un commandement d'explication (making). Sa démarche est écrite à la troisième personne :

« Vous concluez par la négation de l'art décoratif. Bien. On ne connaît de vous que des œuvres d'architecture totalement dépouillées d'art décoratif. On pensera : cet homme ignore la beauté de la petite fleur et celle du chant de grand Pan faisant tressaillir la nature. Il est nourri de théories ; la sécheresse habite son cœur ; il lui est aisé d'annuler d'un raisonnement de sa plume, un cycle important d'émotions et les multiples arts qui les intègrent et les perpétuent. Vous ne pouvez pas laisser porter un jugement si sommaire sur vos conclusions ; celles-ci résultent d'une longue odyssée à travers les archipels de la connaissance. Vous devez laisser entendre ce qui furent vos doutes et vos élans pendant ces vingt-cinq années où précisément l'époque semble s'être formulée dans l'accélération d'une fin de profonde évolution. Vous devez expliquer la raison de votre idée en vous expliquant vous-même ; vous devez à vos lecteurs, à la fin de votre livre, les excusables divulgations d'une confession. »

Sa confession commence avec une introspection et l'influence des gens qui lui ont montré le chemin, les moments dans la nature, les bibliothèques et le musée où il se trouvait en tête-à-tête avec les œuvres.

« Mon maître avait dit : « Seule la nature est inspirante, est vraie, et peut être le support de l'œuvre humaine. Mais ne faites pas la nature à la manière des paysagistes qui n'en montrent que l'aspect. Scrutez-en la cause, la forme, le développement vital et faites-en la synthèse en créant des ornements. » Il avait une conception élevée de l'ornement qu'il voulait comme un microcosme. »

¹⁰⁷ Le Corbusier, *L'art décoratif d'aujourd'hui*, Grès et Cie, Paris, 1925.

« Recherche de la vérité dans les Bibliothèques. Les livres. Les livres sont innombrables ; où est le commencement ? Ces heures de bibliothèques où l'on poursuit dans les livres, la vérité ! Et l'on tombe tout à coup dans un trou. Il fait nuit, on ne comprend plus rien. »

« Les musées m'ont fourni les certitudes sans trous, sans embûches. Les œuvres sont là comme des entiers, et la conversation est sans fard, le tête-à-tête est à merci de celui qui questionne ; l'œuvre répond toujours aux questions qu'on lui pose. »

« En 1907, j'avais frappé à la porte d'Auguste Perret. Ce fut une heure héroïque. Auguste Perret fut l'homme de cette heure qui faisait du béton armé. Et c'est une place précise qu'il occupe et qui lui demeurera acquise dans le recul des ans. Perret disait « Il faut bâtir dans la perfection ; le décor cache généralement une faute de perfection » et il s'étonnait de me voir ainsi aimer les musées : « Si j'avais le temps, disait-il, je ferais des mathématiques ; elles forment l'esprit. »

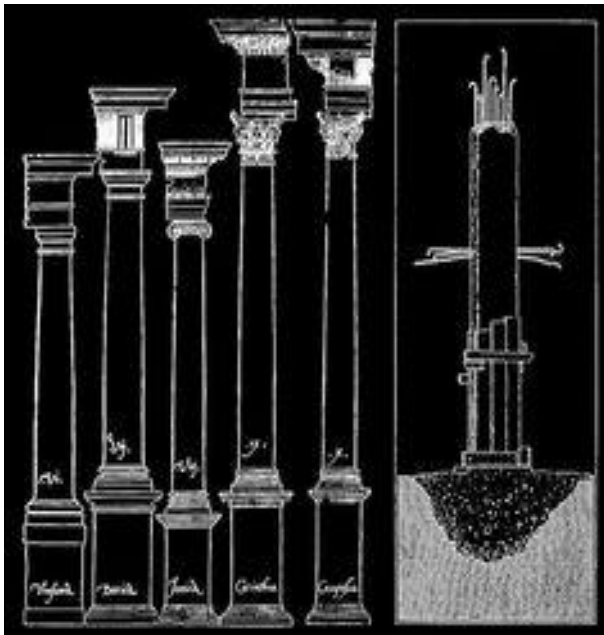


Figure 83 : Leon Krier, *The 6th Order*, 1977.



Figure 84 : Mélanie W., Des robots impriment en 3D des colonnes en béton sans coffrage, 17 juillet 2019.

Là où Loos élargit le premier des « cinq ordres d'architecture »¹⁰⁸ pour son Chicago Tribune Tower en 1923, Le Corbusier s'oppose à l'utilisation éclectique des ordres d'architecture et prône son système DOMINO. En 1977, Leon Krier dessine à l'ombre d'un magnifique tamaris une colonne en béton préfabriqué qui se trouvait sur un petit chantier médiocre dans ce sublime paysage de la baie de Griku en Grèce. Le dessin est connu sous le nom « The 6th Order or the End of Architecture ». Il incarne, pour Krier, le fait que le système DOMINO, phénomène culturel majeur de la condition industrielle et proféré par Le Corbusier, avait aussi gagné la Grèce et éliminé en quelques décennies les pratiques traditionnelles de la maçonnerie et de la charpente. Finalement, il avait surtout délaissé le statut ancestral du pilier vernaculaire et de la colonne classique.

Dans le flamboyant manifeste qu'il écrit avec Maurice Culot, « L'unique chemin de l'architecture »¹⁰⁹, les perspectives de l'industrialisation et le progrès sont, pour eux, désormais évidents : tout sera détruit et consommé. Le rationalisme doit céder la place à la composition organique. Il faut arrêter la division du travail (penser-faire) et participer immédiatement à la reconstruction et à la reconnaissance de l'artisanat en construisant à l'aide de matériaux traditionnels et locaux.

¹⁰⁸ *Les cinq ordres d'architecture (Regola delli cinque ordini d'architettura)* est un livre sur l'architecture classique de Giacomo Barozzi da Vignola de 1562, et est considéré comme « l'un des manuels d'architecture les plus réussis jamais écrits » des cinq ordres d'architecture ; *Règles des Cinq Ordres d'Architecture*.

¹⁰⁹ Léon Krier, Maurice Culot, *L'unique chemin de l'architecture*, dans *aam*, 1978.



Figure 85 : Michael Hansmeyer, *Sixth Order*, 2011.

Pour Hansmeyer, le 6^{ème} Ordre d'architecture ne signifie ni une critique contre les 5 ordres de Vignola ni contre le modernisme ; il s'agit de colonnes contemporaines qui sont conçues à travers des processus qui génèrent des formes. Designboom décrit cet élément de la pratique de Hansmeyer en disant qu'il :

« ... utilise des algorithmes et des processus de subdivision dans son approche formelle pour créer des permutations uniques qui se manifestent comme un système complexe et élaboré d'ornements. Quatre colonnes individuelles ont été générées à partir d'un processus unique, puis construites à partir de couches de feuilles de carton gris de 1 mm qui ont été fraisées ou découpées au laser. Tout en partageant le même processus constitutif, les colonnes n'ont pas une seule surface ou un seul motif en commun. »¹¹⁰

Il n'explore pas la conception d'un objet, mais la conception d'un processus pour générer des objets. Cette approche procédurale déplace intrinsèquement l'attention d'un objet unique vers une famille d'objets : des permutations infinies d'un thème peuvent être générées. La surface de ces colonnes est très ornementée, loin du purisme que prône Le Corbusier, et loin d'être « plaquée » sur la structure, car elle fait intégralement partie de la forme.

¹¹⁰ Michael Hansmeyer, *Designboom*, 14 septembre 2011.



Figure 86 : Patine naturelle du béton méconnaissable sous sa couche de mousse verte.

La surface de l'enfant-béton a, grâce à la technique de gunitage, l'aspect d'une magnifique peau d'éléphant. Elle bénéficie d'une surface bio-réceptive.



Figure 87 : Adrian Rygh Brun, mur imprimé en 3D, 2020.



Figure 88 : 2214, Pattern Predictability Repetition, 2016.



Figure 89 : Olivier van Herpt, *Exploring the limits of digital manufacturing*, 2017.

Le mur d'Adrian Rygh Brun intègre la thermique, la structure, la ventilation et un mur-écran dans une impression continue qui non seulement permet de gagner du temps et des matériaux, mais aussi d'utiliser les possibilités uniques de l'impression 3D pour créer une nouvelle expression architecturale. La combinaison du matériau et du moyen technique crée le langage. Ici, la texture du mur reste composée des traces horizontales de sa production empilée. La collective 2214 nous montre qu'à travers « Pattern Predictability Repetition », de toutes autres expressions de la surface sont possibles et qu'Olivier van Herpt explore un monde d'impression 3D où les imperfections sont célébrées pour leur unicité. Il questionne ainsi la frontière entre l'artisanat et le design, élargissant cette unité de production standardisée en une plate-forme d'exploration créative.

8. CONCLUSION

DES FORMES PLUS VIVANTES

Afin que l'architecture biomorphique-numérique imprimée sur chantier dépasse la phase d'extase sur la possibilité de générer des structures géométriques complexes et que cela devienne de la forme pour la formulation, une culture numérique s'impose. La conception de la Maison Vivante de Jaques Gillet nous montre une direction vers des formes à la fois plus complexes et plus proches des structures naturelles. En utilisant des nouvelles techniques, Gillet a surpassé des similitudes formelles du monde organique et s'est engagé, à travers une approche systémique, à concevoir une maison en symbiose avec les forces, les processus et les écosystèmes naturels. Dans la conception numérique, ces derniers sont appelés éco-physique et sont catégorisés par la naturalisation qui prend le relais après la phase de géométrisation. Si le résultat de ce processus est réalisé dans un béton bio-réceptif, la construction devient (plus) vivante.

UNE MATIÈRE QUI CO-ENGENDRE LES FORMES

La maison-sculpture est une véritable unité entre la forme et la matière. Lors de sa conception et durant sa réalisation, l'espace topologique et la structure situationniste ont co-évolué à travers les interactions matérielles. Comme chez César, il s'agit d'un processus dirigé de donner forme à la matière à travers des gestes en sachant que l'itinérance au sein de la matière a ses propres logiques. Il faut faire avec, et rompre avec l'acte de la fabrication qui impose une forme préconçue à la matière inerte. Dans les dernières technologies de modélisation assistées par ordinateur, on observe que, après une étape de géométrisation, la matérialité prend le relais dans la génération de la forme définitive. On constate également qu'on utilise de moins en moins de coffrages et que la matière, de préférence locale, y est directement imprimée ou pulvérisée par des couches successives de matière liquide. Ici, les normes et les lois naturelles ne sont pas utilisées comme une contrainte mais plutôt comme un moteur de l'individualité dans le processus morphogénétique où la matière donne forme, est « agent ».

LA PERTINENCE ACTUELLE DE LA STRUCTURE EXPERIMENTALE

La recherche de Gillet à travers la construction expérimentale de sa maison-sculpture était une recherche entre matérialité et nouvelles techniques afin de trouver une synthèse entre la structure et la forme. Son œuvre annonce un futur porteur de connaissances, au sens culturel et technique, pour les nouvelles technologies, y compris l'impression 3D. Afin de confronter l'étendue de ses potentialités au domaine de la réalité construite et matérielle à travers la nouvelle génération d'impression 3D ainsi que la construction assistée par robot sur chantier, on observe que cette nouvelle technologie, qui est maintenant également résistante à des forces de tractions et de torsions, revisite de plus en plus des constructions traditionnelles ainsi que des constructions expérimentales. Là où à l'époque, sa construction expérimentale, complexe, longue et coûteuse était critiquée pour le fait qu'elle ne contribuait pas à la production architecturale pour-le-plus-grand-nombre, aujourd'hui, la technique constructive et le principe structurel très similaire de Mesh Mold sont perçus comme une possibilité de contribuer au besoin de durabilité, à l'accélération de la construction et à la maîtrise de coût. Ainsi, ce ne sont pas seulement les technologies d'impression 3D qui redéfinissent une nouvelle architecture mais une relecture de la maison-sculpture pour également donner une direction à l'utilisation des nouvelles techniques d'impression 3D sur chantier.

L'ÉCHANGE ET LA CRÉATION DE CONNAISSANCES SUR LE CHANTIER

Si on lit les témoignages de l'expérience vécue de ceux qui ont eu le privilège de participer aux prototypages et à la construction de cette maison, de participer à ce chantier et de pouvoir observer comment cette œuvre, issue d'un échange interdisciplinaire prend petit à petit forme et comment tous les petits gestes qui visent à manipuler avec beaucoup de soin et d'attention la matière, tout cela s'inscrit dans une grande symphonie. On se trouve face à une forme intrigante et poétique qui surpasse les mathématiques pures d'Auguste Perret. Aujourd'hui, plusieurs cours, workshop, ou masterclass sont organisés où l'on peut également participer à l'auto-construction à caractère participatif sur chantier. La grande différence avec le chantier de la maison-sculpture se trouve dans le fait que ces programmes nous font suivre un processus de réalisation d'un bâtiment. Mais, ils ont très peu l'occasion de diriger également le processus de conception (penser) et de réalisation (faire) comme c'est le cas dans l'artisanat 2.0, qui, quant à lui, comble l'écart entre conception et construction en

assurant la continuité des outils manipulés à travers un chantier virtuel. Dans l'impression 3D sur chantier, une nouvelle pratique et culture architecturale s'installent.

9. BIBLIOGRAPHIE

2214, *Pattern Predictability Repetition*, 2016.

3Dnatives, *Les fabricants d'imprimantes 3D de maisons*, Voir sur : <https://www.3dnatives.com>, 5 mars 2020.

A.S., *Une maison-grotte à Angleur*, La Libre Belgique, 16 avril 1968.

Adrian Rygh Brun, *mur imprimé en 3D*, 2020.

Alisa Andrasek, *Biothing*, Mesonic Fabric, 2009.

Amàco, *Pisé, terre humide compactée dans un coffrage*. (2020, juillet 2), Voir sur : <https://amaco.org>, 2 juillet 2020.

Andy Warhol, *Green Coca-Cola Bottles*, (S. d.), Voir sur : <https://whitney.org>, 1962.

Anthony Vidler, *Architecture's Expanded Field*, 2004.

Antoine Picon, *Culture numérique et architecture : une introduction*, Birkhäuser, Bâle, 2010.

Asymptote, dECOI Architects, DR_D, Greg Lynn FORM, Kol/Mac Studio, Kovac Architecture, NOX, Objectile, Oosterhuis.nl, R&Sie, Servo, UN studio.

Bekaert, G., *Bouwen in België 1945-1970*, Brussel, Nationale confederatie van het bouwbedrijf, pp. 317-318, 1971.

Bernard Espion, Université Libre de Bruxelles, *Voiles minces en béton armé : Genèse et expérimentations dans les années Applications en Région wallonne*, (S. d.), Voir sur : <https://docplayer.fr>, 2011.

BFT international, *Production of the first concrete and reinforced concrete columns by means of 3D printing with concrete*, Concrete Plant Precast Technology, (S. d.), Voir sur : <https://www.bft-international.com>, Juin 2019.

Big Delta, *La plus grande imprimante 3D Delta au monde*, PRIMANTE3D, Voir sur : <https://www.primante3d.com>, 7 septembre 2015.

Brenda, A.F., *3D PRINTING VAULTS AND DOMES*, (S. d.), IAAC Blog, Voir sur : <https://www.iaacblog.com>, 4 mars 2021.

Christophe de Maistre, Faire entrer la France dans la troisième révolution industrielle : le pari de l'innovation, Les nouvelles technologies de production, Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise, Paris, 2014.

Christophe Hompesch, Travail de fin d'études, Habitation-Sculpture, ULiège, 2013-2014.

COBOD, Portique vs systèmes de bras robotiques : Imprimantes de construction 3D, (s. d.), à l'adresse <https://cobod.com>, 2022.

Commission européenne (CE), pp. 2, 2010.

Construction-3D, Le spécialiste français de l'impression 3D béton pose les premières couches de son futur siège, Voir sur : <https://www.primante3d.com>, 10 novembre 2019.

Constructions-3D, MAXI PRINTER, imprimante 3D de ciment mobile. (S. d.), Aniwaa, Voir sur : <https://www.aniwaa.fr>.

Dauphin, D, American Pop Art : Repetition or Difference ? Nouvelle revue d'esthétique, Voir sur : <https://www.cairn-int.info>, pp. 105-116, 2011.

David Sher, Printed Dome 3D prints habitable cement domes, 3D Printing Media Network - The Pulse of the AM Industry. Voir sur : <https://www.3dprintingmedia.network>, 18 mars 2021.

Dimitriadi Leda, L'idéologie du continu et l'architecture hyper-standard. Dans Lefebvre P., Neuwels J., Possoz J.-P. (dirs.), Penser-Faire, Thinking-Making, Quand des architectes se mêlent de construction, When Architects Engage in Construction, Éditions de l'Université de Bruxelles, pp. 181-194, 2021.

ETH Zurich, Robotic Fabrication Lab, Prototype de construction à grande échelle du toit en coque NEST HiLo, 2017.

ETH Zurich, Uses 3D printers and robots to build three-story house | 3D Print Expo. (S. d.), Voir sur : <https://3d-expo.ru>, 3 juillet 2017.

ETH Zurich, Develops formwork from 3D-printed foam to slash concrete use in buildings, Dezeen, Voir sur : <https://www.dezeen.com>, 10 janvier 2022.

ETH Zurich, Mesh Mould Prefabrication, (S. d.), Voir sur : <https://kaufmann.ibk.ethz.ch>, 2022.

Etienne Klein, *Intervention inspirante*, Voir sur : <https://www.youtube.com/watch?v=ISnPQmlmJqM>, 20 octobre 2021.

Filippo Brunelleschi, Voir sur : <https://cultea.fr>.

France 3 Hauts-de-France, Valenciennes : Une maison imprimée en 3D, Voir sur : <https://www.youtube.com>, 22 octobre 2019.

François Coignet, *Constructions économiques en béton pisé*, (S. d.), Extrait du journal *L'ingénieur*, Exposition Universelle, Voir sur : <http://histoire-vesinet.org>, 1^{er} novembre 1855.

Françoise Choay, *L'Urbanisme, utopies et réalités : Une anthologie*, Seuil, Paris, 1965.

Frank Lloyd Wright, *Une architecture organique*, 1939.

Frank Lloyd Wright cité par Jacques Gillet, Dans *Précision sur l'expression et l'architecture organique*, Arch&Life nr 33, pp. 9, 1989.

Geert Bekaert et Francis Strauven, *La Construction en Belgique 1945–1970*, pp. 317-318, 1971.

Geert Bekaert, *Blind Architecture Criticism*, Dans OASE, pp. 127-132, 1971.

Gillet, J., *Habitat selon la nature*, Neuf, 18, pp. 12-15, 1969.

Gillet, J. & Roulin, F., *Habitation-sculpture près de Liège*, *Environnement*, 3, pp. 115-120, 1971.

Gillet J., *Mes deux ans à Rennes ; sept écrits*, Editions Rennes, 1972.

Gillet, J., *The Sculpture House*, (unedited paper), 1978.

Gillet, J., *Personal communication*, 4 Janvier 2006.

Gramazio & Kohler, *Façades en briques non-standard*, ETH Zurich, 2006.

Guillaume Campagnet, *Impression 3D de bâtiment : Une révolution ?* Voir sur : <https://www.planradar.com>, 19 novembre 2021.

Guillemant, S., *La cathédrale de Florence et l'impossible construction de son dôme*, Cultea, Voir sur : <https://cultea.fr>, 29 juillet 2021.

Henel, *Big Delta : Une imprimante 3D de 12 mètres pour imprimer des maisons*, *Journal du Geek*, <https://www.journaldugeek.com>, 18 septembre 2015.

Henrion, P., *La maison-sculpture d'Angleur*, *Art & Fact*, 12, pp. 185-190, 1993.

IAAC, *Institute for advanced architecture of Catalonia, Digital Adobe, (S. d.)*. Voir sur : <https://iaac.net>.

ICON, *Photo Galery, teams up with DoD on 3D printed military structures, (S. d.)*, Austin Inno, Voir sur : <https://www.bizjournals.com>, 1^{er} janvier 2021.

Jackie Craven, *Why You Should Know About the Pantheon in Rome, (S. d.)*, ThoughtCo, Voir sur : <https://www.thoughtco.com>, 30 juillet 2019.

Jacques Donjean, *Le Réseau, Production: Famille Gillet Les Films de La Passerelle, 2018*.

Jean Nouvel, *Anthologie par Jean Nouvel César, Bernard Blistène, Fondation Cartier pour l'art contemporain, Voir sur : https://www.fondationcartier.com, Paris, 2008*.

Jean-Pierre Leac, *Innovation et Progrès. Le progrès est mort, vive l'innovation ! Les cahiers de l'innovation, 2020*.

Jipa, A., Aghaei Meibodi, M., Dillenburger, B. & Bernhard, M. (S. d.), *3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs, ETH Zurich, 2016*.

John Cage cité par Kinaston McShine dans *Andy Warhol Rétrospective, Paris, Centre Georges Pompidou, pp. 13, 1989*.

Joly, P., *Architectures de Sculpteurs, L'Architecture d'aujourd'hui, 115, pp. 85, 1964*.

Kleczinski, N., *Impression 3D : En 3 ans, le danois COBOD devient le leader mondial de la construction 3D, NeozOne, Voir sur : https://www.neozone.org, 15 avril 2021*.

KUKA AG, *Impression 3D avec du béton projeté, (S. d.)*, Voir sur : <https://www.kuka.com>, 2022.

Lars Spuybroek, *The Structure of Vagueness, Dans Textile The Journal of Cloth and Culture, pp. 352-355, Janvier 2005*.

Lars Spuybroek, *Research & Design: The Architecture of Variation, Thames & Hudson, London, 2009*.

Le Corbusier, *Maison Dom-INO, construction standardisée, 1914*.

Le Corbusier, *Maison en série « Citrohan », 1920*.

Le Corbusier, *Vers une architecture, éditions Vincent Féal & C°, Paris, pp. 188, 1920*.

Le Corbusier, *L'art décoratif d'aujourd'hui, Grès et Cie, Paris, 1925*.

Leandro, Vers une construction plus vivante, Du Côté de Chez Vous - Tous créatifs, Voir sur : <https://www.ducotedechezvous.com>, 30 avril 2019.

Luc Merx, Christian Holl, Closeness to Nature and Alienation from Nature. The Sculpture House by Jacques Gillet, René Greisch and Felix Roulin in Liège and its significance in the current architectural discourse, in Graz Architektur Magazin Springer Wien, pp. 28-42, 2005.

Marie-Ange Brayer, Frédéric Migayrou, Naturaliser l'architecture, Editions HYX, Orléans, pp. 59, 2013.

Mario Carpo, L'Architecture à l'âge de l'imprimerie : culture orale, culture écrite, livre et reproduction mécanique de l'image dans l'histoire des théories architecturales, Editions de la Villette, Paris, 2008.

Mario Cucinelle, 3D-printed house in Italy is made from locally-sourced clay | Inexhibit, (S. d.), Voir sur : <https://www.inexhibit.com>, 2020.

Mélanie W., Fonctionnement d'une imprimante 3D FDM par catégorie, Voir sur : <https://www.3dnatives.com>, 23 septembre 2021.

Michael Hansmeyer, Approche expérimentale de l'architecture numérique, FRAC centre Val De Loire, 2010.

Michael Hansmeyer, Subdivided columns, including information on Sixth Order at Gwangju Design Biennale and Astana Columns, Voir sur : <http://www.michael-hansmeyer.com>, Grand Palais, Paris, France, 2010.

NCCR Digital Fabrication, In situ Fabricator & Mesh Mould, Voir sur : <https://www.youtube.com>, 29 juin 2017.

Olivier van Herpt, Exploring the limits of digital manufacturing, 2017.

Pauline Lefebvre, Julie Neuwels, Introduction Des valorisations du faire en architecture dans Penser-Faire Quand des architectes se mêlent de construction, Edition de l'université de Bruxelles, pp. 25, 2021.

Philippe Block, Architecture and Structures (BRG), (S. d.), Voir sur : <https://ita.arch.ethz.ch>, 2017.

Pierre Henrion, La maison sculpture d'Angleur, Art&fact, n°12, pp. 185 à 190, 1993.

Pierre Veltz, *LA SOCIÉTÉ HYPER-INDUSTRIELLE. Le nouveau capitalisme productif*, Seuil, 2017.

Pieter Knauff, *Chief Investment Officer du projet Milestone*, 2021.

Priest, I, (S. d.), *3D-printed concrete components*, Voir sur : <https://www.ribaj.com>, 23 décembre 2015.

Printed Dome, *Le dôme imprimé en 3D*, Voir sur : <https://www.3dprintingmedia.network>, 2021.

Prusa Research a.s., *Types d'imprimantes et leurs différences*, Prusa Knowledge Base, (S. d.), Voir sur : <https://help.prusa3d.com>, 2022.

Reman Max, *La plus haute imprimante du monde*, Voir sur : <https://www.encros.fr>, 2015.

Roger Pierre Turine, *Hors les murs et stupéfiant*, Arts Libre, pp. 12, mercredi 4 septembre 2019.

S. Van de Voorde, R. De Meyer, E. De Kooning, L. Taerwe and R. Van De Walle, *Sculpture House in Belgium by Jacques Gillet*, Université de Gand, Belgique, 2006.

Team DBT, *Printed slab*, ETH Zurich, 2016.

Tim Ingold, *Faire - anthropologie, archéologie, art et architecture*, Dehors, Bellevaux, 2014.

Tractus3D, *Technologie d'impression 3D : Delta versus Cartésien*, (S. d.), Voir sur : <https://tractus3d.com>, 2020.

TU Braunschweig, *Production des premières colonnes en béton armé par impression 3D*, 2019.

Valérie Nègre et Guy Lambert, *L'histoire des techniques, Une perspective pour la recherche architecturale ? dans Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine, nr 26-27*, 2012.

Villon, G., *Innovation et Progrès : est-ce la même chose ?* Publié le 9 juillet 2014.

Weber Belgium, *La première maison en béton imprimé 3D a accueilli ses premiers locataires*, (S. d.), Voir sur : <https://www.belgium.weber>, Mai 2021.

X, *La maison sur mesure*, Moustique, 5 Novembre 1967.

X, *Habitacle pour une famille sur un promontoire bien dégagé*, La Maison, 2, pp. 59-60, 1967.

X, *Architecture et impression 3D : Imprimerons-nous des immeubles ?* Connections By Finsa,

Voir sur : <https://www.connectionsbyfinsa.com>, 13 octobre 2021.

X, *Les imprimantes 3d Delta sont-elles meilleures ? Impression En 3D.* (s. d.), Voir sur : <https://www.impressionen3d.com>.

Zaffagni, M, (S. d.), *Un toit en béton qui ne fait que 5 cm d'épaisseur, Futura,* Voir sur : <https://www.futura-sciences.com>, 13 octobre 2017.