



**HAL**  
open science

# L'idéologie du continu et l'architecture hyper-standard

Dimitriadi Leda

► **To cite this version:**

Dimitriadi Leda. L'idéologie du continu et l'architecture hyper-standard. Pauline Lefebvre; Julie Neuwels; Jean-Philippe Possoz. Penser-Faire. Quand des architectes se mêlent de construction / Thinking-Making. When Architects Engage in Construction, Éditions de l'Université de Bruxelles, pp.181-194, 2021, Architecture, Urbanisme, paysagisme, 978-2-8004-1757-8. halshs-03410040

**HAL Id: halshs-03410040**

**<https://shs.hal.science/halshs-03410040>**

Submitted on 22 Apr 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **L'idéologie du continu et l'architecture hyper-standard**

Léda Dimitriadi

*in* Lefebvre P., Neuwels J., Possoz J.-P. (dirs.), *Penser-Faire, Thinking-Making. Quand des architectes se mêlent de construction, When architects engage in construction*, Bruxelles, Editions de l'Université de Bruxelles, 2021, p. 174-189.

### ***Version auteur / sans images***

#### Résumé

Malgré le caractère discret de l'ordinateur, l'idéologie architecturale portée par les milieux investis dans les technologies avancées au tournant du XXI<sup>e</sup> siècle s'appuie sur le concept du 'continu', décliné en différents aspects. L'idéal de la continuité conception-fabrication, qui suppose un processus ininterrompu de la conception/représentation informatique du projet à sa production par des machines automatisées, ancre davantage cette rhétorique dans le 'faire'. Le protagoniste devient ainsi la machine à commande numérique, souple, précise, accomplissant la promesse d'une production en série diversifiée, opposée à celle de l'industrialisation de l'après-guerre. Or standardisation et normalisation ont plusieurs visages. La mécanisation intensive peut-elle s'en affranchir ? Suivant Pierre Veltz, qui parle d'une société hyper-industrielle plutôt que d'une société post-industrielle, nous nous interrogeons si l'horizon qui se profile ne risque pas de se pencher plutôt du côté de l'hyper-standard que du non-standard.

#### Abstract

In spite of the discrete nature of digital computers, the architectural ideology in the milieus invested in advanced technologies at the turn of the 21<sup>st</sup> century is based upon the concept of the 'continuous' in various aspects. The ideal of continuity between design and manufacturing, also known as 'file-to-factory', meaning an uninterrupted process from the computer-aided design of the project to its production by automated machines, further attaches this concept to the 'making'. The flexible, precise computer numerically controlled machine plays then a key role, fulfilling the promise of diversified mass production, opposed to that of post-war industrialisation. However, standardisation has multiple faces; can intensive mechanisation be separate from it? Following Pierre Veltz talking about a hyper-industrial society rather than a post-industrial one, we question whether computer-aided construction is not likely evolving towards 'hyper-standard' rather than 'non-standard' production.

## Introduction

Au tournant du XXI<sup>e</sup> siècle, l'informatique et les technologies numériques, qui avaient déjà progressivement investi le champ de l'architecture dans le domaine de la représentation d'abord, de la conception plus généralement ensuite, s'étendent maintenant également dans le champ de la fabrication. Les machines commandées numériquement par ordinateur apportent la promesse d'une continuité entre conception et fabrication. Les fichiers informatiques qui codent la représentation graphique de l'objet architectural sont, ou seraient au prix de quelques transformations automatisables plus ou moins laborieuses selon les cas, susceptibles d'être transférées aux machines de fabrication sans besoin d'interprétation humaine intermédiaire.

Dans les discours théoriques, l'idée de ce *continuum* semble marquer l'accomplissement de la révolution informatique amorcée, considérée longtemps surtout 'logicielle', presque dématérialisée, et l'ancrer davantage dans le 'faire'. Des recherches et expérimentations sur l'implication de l'architecte dans la production mécanisée et informatiquement assistée se multiplient alors dans les institutions d'enseignement supérieur et les laboratoires de recherche. Mais, contrairement à l'enjeu majeur de la mécanisation de l'après-guerre qui portait sur la productivité, celui des architectes à l'ère numérique semble attaché à la volonté de renouveler l'éventail des formes architecturales et de rendre constructibles les objets géométriques que les logiciels de modélisation permettent de concevoir, représenter et calculer. Cet enjeu est déjà bien perceptible lors de l'exposition sur les *Architectures non standard* au Centre Pompidou à Paris en 2003-2004 : l'idée-force mise en avant alors est que, 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 différentes sur la forme architecturale.

L'idée d'un processus ininterrompu, idéalement géré entièrement par l'architecte, depuis la conception/représentation du projet jusqu'à sa production, sert effectivement l'objectif d'une diversification formelle maximale, que l'on désigne par l'expression 'non standard'. La machine à commande numérique, à la fois souple et automatisée, est le catalyseur dans cette situation . En outre, dans la mesure où dans un tel processus de fabrication on imagine possible d'utiliser des machines technologiquement avancées appartenant à des unités de production de petite taille sans dépendre d'une véritable chaîne d'échelle industrielle, il s'agit, selon certains auteurs, d'un retour vers une perception artisanale de la production, un 'artisanat numérique' (*digital craft*)<sup>1</sup>.

Nous essaierons de montrer que le déterminisme technologique induit par les acceptions susmentionnées est assez imprécis. Si cette idéologie du 'continu' veut marquer une rupture, elle masque en même temps certaines persistances sous-jacentes du système technico-économique lors du passage de l'industrialisation présentée sous le signe du standard à la mécanisation numérique 'non standard' de la production.

### **Discret et continu**

Dans un système continu, entre deux éléments ou valeurs, il y a toujours un autre élément ou valeur qui appartient au système. Dans le cas inverse, le système est discret. Un exemple très simple qui illustre cette distinction est celui du nuancier de couleurs : le spectre analogique de la lumière naturelle est un système continu, car il existe toujours une nuance intermédiaire entre deux couleurs ; au contraire, un nuancier commercial est un système discret, car un nombre fini de nuances se présentent sous forme de petites cases et il n'y a pas de nuance intermédiaire entre deux cases consécutives. Le partage entre continu et discret est fondamental dans certaines approches théoriques de la science<sup>2</sup>, notamment en mathématiques, ainsi qu'en technologie, avec la distinction entre analogique (continu) et numérique (discret). Que ça soit en télécommunications (téléphonie, radiophonie, télévision...) ou au domaine du calcul mécanisé (ordinateurs, calculatrices...), le codage analogique utilise des grandeurs physiques (par exemple des courants électriques) qui peuvent prendre n'importe quelle valeur, tandis que le numérique utilise des valeurs provenant d'un système discrétisé (le cas le plus élémentaire de ce point de vue étant celui qui utilise deux valeurs seulement, par exemple ouvert/fermé quand il s'agit de circuits électroniques).

La révolution numérique ne peut être placée de manière évidente sous le signe du continu . Contrairement aux machines à calculer analogiques, l'ordinateur numérique est, par définition et par construction, une machine à états discrets (*Discrete State Machine*). Par ailleurs, en architecture, des travaux pionniers articulant conception architecturale et informatique, comme ceux de John Frazer depuis les années 1960<sup>3</sup>, sont souvent basés sur des

---

<sup>1</sup> F. Gramazio, M. Kohler, J. Willmann, *The Robotic Touch. How Robots Change Architecture*, Zurich, Park Books, 2014, p. [187-189].

<sup>2</sup> J.-M. Salanskis, H. Sinaceur, *Les labyrinthes du continu*, Paris, Berlin, New York, Springer, 1992.

<sup>3</sup> J. Frazer, *An Evolutionary Architecture*, Londres, AA Publications, 1995.

conceptions modulaires, essentiellement discrètes. Les automates cellulaires, les algorithmes génétiques, plus tard les systèmes multi-agents vont plutôt dans ce sens. Toutefois, nombre de discours portés par des architectes investis dans les technologies avancées à la fin du XX<sup>e</sup> siècle sont basés, de manière plus ou moins affirmée, sur le concept du continu, et ce pour bien des raisons, que nous résumons ci-dessous.

Le concept est riche et se décline en plusieurs aspects. L'aspect proprement architectural oppose les processus de conception d'objets architecturaux résultant de variations continues (en réalité, pseudo-continues) aux démarches des périodes précédentes : celles modulaires et répétitives qui supposent des découpages de l'objet en unités plus ou moins élémentaires identiques, ou celles typologiques qui supposent une discrétisation au niveau du classement des objets. Il y a un autre aspect, celui géométrique : l'architecture dite « numérique » présente souvent des formes courbes, lisses, donc des continuités géométriques de différents degrés (de tangente, de courbure), qui sont facilitées par certains logiciels de modélisation tandis qu'elles sont souvent difficiles à obtenir avec les outils de dessin traditionnels. Il y a enfin un aspect plus généralement mathématique : des auteurs commentant le tournant computationnel en architecture mettent en avant une modélisation qui s'appuie davantage sur le calcul infinitésimal<sup>4</sup>, donc des mathématiques du continu, que sur l'algèbre, mathématique considérée historiquement discrète ; en même temps, les variations d'apparence continue des formes produites par les logiciels paramétriques et associatifs conduisent les architectes qui s'y intéressent à opposer la géométrie, discrète, à la topologie, qui traite du continu<sup>5</sup>. Bref, le continu devient même presque un mot d'ordre, comme le démontre le titre *The architecture of continuity* que Lars Spuybroek choisit pour l'un de ses ouvrages<sup>6</sup>.

Le « *continuum numérique* du design à la production »<sup>7</sup> se veut une réponse au processus segmenté de l'industrialisation de la construction de la majeure partie du XX<sup>e</sup> siècle. Il vient s'ajouter à cette liste de déclinaisons du concept du continu avancées par la rhétorique autour de l'architecture computationnelle. Il se concrétise à deux niveaux : premièrement, le « *file to factory* »<sup>8</sup> (abrégé parfois 'F2F'), 'du fichier à l'usine', c'est-à-dire un processus supposé ininterrompu de la conception/représentation à la fabrication ; deuxièmement, le processus de fabrication lui-même, qui est capable de conduire à la production en série d'éléments différents sans besoin d'interrompre la chaîne de production pour régler des machines. C'est de ce deuxième point qu'émerge la notion d'architecture dite non standard. Dans la dialectique entre standard et non standard, on retrouve l'opposition entre discret et continu à un autre niveau encore, celui du dimensionnement. La normalisation dans l'industrie du bâtiment a souvent conduit à des systèmes dimensionnels discrets, appuyés sur

---

<sup>4</sup> G. Lynn, *Animate Form*, New York, Princeton Architectural Press, 1999.

<sup>5</sup> Voir B. Cache, *Terre meuble*, Orléans, HYX, 1997 (1995) ; G. Lynn, *Animate Form*, *op. cit.* ; S. Perrella, « Topological architecture and the ambiguous sign [the work of Bernard Cache and Objectile] », S. Perrella (dir.), « Hypersurface Architecture », *Architectural Design*, Profile 133, vol.68 n. 5/6, May-June 1998 p. [66-69].

<sup>6</sup> L. Spuybroek, *The architecture of continuity*, Rotterdam, V2\_Publishing, 2008

<sup>7</sup> B. Kolarevic, « Introduction », in B. Kolarevic (dir.), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York, Taylor & Francis, 2003, p. [7], trad. par nos soins.

<sup>8</sup> K. Oosterhuis, *Hyperbodies. Towards an E-motive architecture*, Bâle ; Boston ; Berlin ; Birkhäuser, 2003, p. 92 ; K. Oosterhuis, H. Bier, C. Aalbers, S. Boer, « File to Factory and Real-Time Behavior in ONL-Architecture », in *Proceedings of the ACADIA '04*, « Fabrication: Examining the digital practice of architecture », Canada, 2-5 July 2004 ; M. Vogiatzaki (dir.), *File to factory: The design and fabrication of innovative forms in a continuum*, Proceedings of the International Conference Erasmus LLP, Thessaloniki, Art of Text, 2010.

l'idée de module ou unité de base<sup>9</sup>, qui contraignent la marge de manœuvre voire la créativité de l'architecte<sup>10</sup>. Inversement, la production dite non standard favorise *a priori* les systèmes dimensionnels continus, qui autorisent l'usage de n'importe quelle dimension dans le projet.

Par une coïncidence terminologique, la formalisation rigoureuse, au début des années 1960, du calcul infinitésimal, l'un des piliers des mathématiques du continu, est appelée 'analyse non standard'. Ainsi, Frédéric Migayrou, qui met en scène le concept d'architecture non standard avec l'exposition éponyme au Centre Pompidou, fait résonner, à l'aide d'une pirouette théorique, le non standard perçu dans le contexte de la production industrielle en architecture avec l'analyse non standard en mathématiques<sup>11</sup>, sachant que certains résultats du calcul infinitésimal sont utilisés, comme nous l'avons évoqué plus haut, pour la modélisation de nouveaux types de formes géométriques. Au prix d'un saut conceptuel, la boucle est fermée.

## Historique

La continuité conception-fabrication se présente en architecture en tant que l'aboutissement des mutations technologiques dans le domaine de la conception et fabrication assistées par ordinateur, puisqu'elle permet ou promet de faciliter la concrétisation matérielle des formes géométriques modélisées à l'aide de l'informatique. Dans l'histoire de l'industrie du XX<sup>e</sup> siècle, elle est en réalité le point de départ : les premiers logiciels de dessin sont conçus pour programmer et manipuler par ordinateur les machines à commande numérique, qui utilisaient jusque-là des cartes perforées. Or, l'évolution des logiciels de modélisation géométrique s'est par la suite détachée, en grande partie, de la fabrication et elle s'est plus ou moins alignée pendant près de trois décennies aux pratiques courantes de représentation architecturale, comme le géométral conventionnel. Le '*file to factory*' et la production en série d'objets différents à l'aide de la commande numérique par ordinateur apparaissent alors, au tournant de notre siècle, comme une avancée technologique ultime. En réalité ils sont présents dans les propos de certains architectes et ingénieurs depuis les années 1960<sup>12</sup>.

L'idée que la standardisation s'identifie de manière univoque à l'industrialisation pré-numérique conduit à des schématisations de l'histoire de la production en architecture selon lesquelles l'architecture préindustrielle, artisanale, est diversifiée, à la demande (non standard avant la lettre) ; l'architecture industrialisée est standardisée, basée sur la répétition d'objets identiques ; et l'architecture non standard produite avec les moyens de la technologie numérique est de nouveau variée, singulière, échappe à la répétition<sup>13</sup>.

---

<sup>9</sup> La norme NF P 01-101 de 1964, portant sur le dimensionnement des constructions industrialisées, basée sur des modules de 30 cm. pour les dimensions horizontales, de 10 cm. pour les verticales, en est un exemple.

<sup>10</sup> A. Dupire *et al.*, *Deux essais sur la construction. Conventions, dimensions et architecture*, Bruxelles, Mardaga, 1981.

<sup>11</sup> F. Migayrou, « Les ordres du non standard », F. Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, Paris, Centre Pompidou, 2003.

<sup>12</sup> L. Dimitriadi, « La place de l'automatisation et de la computation dans les discours sur l'industrialisation du bâtiment en France entre 1960 et 1980 », Rousteau-Chambon H. *e.a.* (dirs), *Construire ! Entre antiquité et époque moderne*, Picard, Paris, 2019.

<sup>13</sup> M. Carpo, *The Alphabet and the algorithm*, Cambridge Mass., The MIT Press, 2011.

Il convient de nuancer ces idées reçues. Si les mots standardisation et préfabrication apparaissent avec l'industrialisation, les principes qu'ils décrivent les précèdent de plusieurs siècles. Des recherches montrent qu'il existe bien des bâtiments de l'ère préindustrielle réalisés grâce à des processus qui s'apparentent à ceux de la standardisation<sup>14</sup>. Concernant l'architecture industrialisée, la standardisation ne découle pas, ou pas uniquement, d'impératifs techniques, c'est-à-dire des machines utilisées, mais elle est le résultat d'un contexte technico-économique plus large, qui a davantage à voir avec l'organisation de la production et sa logistique, qu'avec le type des machines utilisées<sup>15</sup>. En effet, certaines constructions supposées industrialisées sont en réalité produites de manière traditionnelle, et le gain au niveau de la productivité n'en est pas moins important<sup>16</sup>. La rationalisation de la production – basée sur la répétitivité – nécessaire à l'industrialisation suit des logiques qui sont, en grande partie, préindustrielles et ne dépendent pas de la mécanisation. En somme, malgré les évidences et si paradoxal que cela puisse paraître, et même si c'est l'industrialisation qui introduit le terme de standard et systématise la normalisation, on ne peut trouver une correspondance *exclusive* entre répétitivité des formes et mécanisation de la production.

### Standard et non standard

Le standard est, selon l'International Standardization Organization (ISO), « une formule qui décrit la meilleure manière de faire quelque chose »<sup>17</sup> ; selon l'Association française de normalisation (AFNOR), « un cadre de référence qui vise à fournir des lignes directrices, des prescriptions techniques ou qualitatives pour des produits, services ou pratiques au service de l'intérêt général »<sup>18</sup>. Plus concrètement, le standard est un référentiel qui spécifie un objet, une opération, un processus, en vue de sa reproduction plus ou moins exacte ou de sa conformité à certaines exigences. Le standard intègre la notion de répétition mais ne concerne pas obligatoirement le produit fini, même si c'est le cas dans plusieurs filières industrielles. Pourtant, en architecture, selon une interprétation partagée mais réductrice, la standardisation est associée à la répétitivité des formes architecturales, qui découle souvent des processus industrialisés. L'architecture non standard, quant à elle, est par conséquent basée sur l'idée de production industrielle en série d'objets tous différents<sup>19</sup>. L'architecture non standard se définit ainsi par rapport à une perception spécifique de l'architecture industrialisée.

Il faut observer qu'en architecture la production industrielle en série d'objets différents est évoquée au moins depuis la fin des années 1960<sup>20</sup>.

---

<sup>14</sup> Voir R. Bechmann, « Comment la standardisation et la préfabrication, développées aux XII<sup>e</sup>-XIII<sup>e</sup> siècles dans le système de construction, ont permis l'extraordinaire floraison des cathédrales "gothiques" ? », in R. Carvais, *et al.* (dir.), *Édifice & artifice. Histoires constructives*, Paris, Picard, 2010.

<sup>15</sup> L. Dimitriadi, « Le bâtiment industrialisé face au défi de la diversité architecturale : techniques, machines, processus », A. Mastrorilli, E. Monin (dirs.), « Technologie et bâtiment : un patrimoine silencieux », *Cahiers Thématiques* n. 19, ENSAP Lille, 2020 (à paraître).

<sup>16</sup> G. Blachère, *Technologies de la construction industrialisée*, Paris, Eyrolles, 1975, p. [86].

<sup>17</sup> <https://www.iso.org/standards.html>

<sup>18</sup> <https://normalisation.afnor.org/normes-definition/>

<sup>19</sup> B. Cache, *Terre Meuble*, *op. cit.* ; F. Migayrou, « Les ordres du non standard », *op. cit.*

<sup>20</sup> C. Abel, « Ditching the Dinosaur Sanctuary », *Architectural Design*, vol. 38, août 1969.

Depuis, des auteurs ont remarqué que l'industrialisation ne s'identifie pas de manière univoque à l'idée de grande série. En réalité, les séries doivent être variées pour rentabiliser, des produits à la demande peuvent être (et sont) produits industriellement et, contrairement aux idées reçues<sup>21</sup>, au-delà d'un certain seuil, la standardisation du produit peut même devenir anti-économique<sup>22</sup> dans le sens où elle ne peut pas toujours, ou ne pourrait plus, garantir des gains financiers suffisants à cause de l'inadéquation des grands stocks par rapport au marché, de l'absence de variation, des coûts logistiques (déséconomies d'échelle), etc. La sortie de la standardisation au niveau des produits finis est une réalité industrielle depuis les années 1980, lorsque le demi-produit, puis l'automatisation et la commande numérique, ainsi que l'aide logistique de l'informatique, permettent progressivement le déblocage de la situation, avec la réduction des séries ou le développement de systèmes plus souples. Mais l'évolution du système de production ne conduit pas à ce stade à des formes architecturales en rupture radicale avec l'architecture industrialisée de la période précédente. Le concept d'architecture non standard acquiert une valeur idéologique du moment où elle est associée à de nouveaux types de formes architecturales, permises par les programmes informatiques de modélisation associatifs et paramétriques, d'une haute performance mathématique. Les prises de position en faveur de l'architecture non standard sont donc avant tout motivées par une évolution logicielle.

Concernant la production, tant que l'on parle de production mécanisée en série, la question de la standardisation n'est pas effacée, mais déplacée à un autre niveau, souvent celui du processus. À la Fondation Louis Vuitton à Paris (2014), 3 527 vitrages courbes tous différents sont cintrés par une machine commandée informatiquement ; elle permet de faire l'économie de milliers de moules<sup>23</sup>. Le produit est indubitablement 'non standard' en ce qui concerne ses caractéristiques géométriques. Or le processus est scientifiquement connu avec précision, il est donc hautement standardisé, selon la définition générique donnée plus haut, en ce qui concerne le fonctionnement de la machine, les protocoles, le matériau, les conditions de température, etc. Qui plus est, la machine utilisée impose des contraintes au niveau géométrique. Tous les types de surfaces courbes ne sont pas possibles, celles résultantes étant des surfaces de translation. Ainsi, tous les vitrages courbes du bâtiment ont été dessinés en tant que parties de cylindres<sup>24</sup>. Si l'architecte composant avec les objets standardisés des catalogues devait prendre en compte leurs caractéristiques lors de la conception, l'architecte envoyant les fichiers à la machine commandée par ordinateur doit tenir compte en amont des spécificités du processus de fabrication.

---

<sup>21</sup> Selon M. Carpo, plus on augmente la série, plus son prix baisse ; Carpo va jusqu'à dire que pour un nombre de copies infini le prix du moule serait zéro (!), (*The Alphabet and the Algorithm*, op. cit. p. [98]) ; ce n'est vrai ni dans toute industrie, ni à toute échelle – d'où la notion de « déséconomies d'échelle ».

<sup>22</sup> G. Blachère, *Technologies de la construction industrialisée*, op. cit. ; M. Litaudon, *La bataille de la productivité se gagnera dans les usines. Les installations de production de composants, critiques et voies d'innovation, une chance, l'informatique moderne*, Paris, Plan Construction, 1981.

<sup>23</sup> « Glaston ProBend for cylindrical safety glass », <https://www.youtube.com/watch?v=BgvA718osh8> (vu le 01/05/2020).

<sup>24</sup> Conférence N. Leduc, 6 novembre 2018 à l'EAV&T, <https://www.youtube.com/watch?v=5klo0H33Fo0&t=2057s> (31'30''-36'37'') (vu le 01/05/2020).

Gramazio, Kohler et Willmann reconnaissent, à juste titre, qu'en dépit des interprétations concernant l'artisanat numérique, les processus robotiques ne mettent pas en cause le concept de standardisation dans le sens large, quoique celle-ci ne soit plus reconnaissable dans l'objet produit. Ils parlent alors de « *Soft Standards* »<sup>25</sup>. En effet, l'application du terme « non standard » au produit fini est non seulement éloquent mais aussi légitime et peut justifier la rhétorique qui y est associée, à condition de ne pas conduire à des représentations fausses du monde industriel de la production et de ne pas masquer les problèmes et enjeux de la mécanisation automatisée.

### **Cas d'étude : la robotique dans la construction**

La commande numérique a permis, dans un premier temps, l'automatisation des techniques existantes. Au tournant du XXI<sup>e</sup> siècle, l'évolution des applications de la robotique introduisent dans le domaine de la construction de nouveaux paradigmes techniques, comme celui de l'impression 3D à l'échelle de composants de grande taille ou même du bâtiment lui-même, innovation qui permet de s'affranchir du moulage.

Un exemple de telle fabrication innovante est celle d'un poteau qui soutient l'auvent du gymnase d'un collège à Aix-en Provence<sup>26</sup>. Le poteau en treillis irrégulier, aux formes légèrement curvilignes, d'apparence monolithique, en béton, est imprimé par un robot. En réalité, il s'agit d'un objet composé de quatre parties assemblées, ne pouvant être imprimé d'un seul tenant à cause de sa taille (4m de hauteur). Il a été ensuite recouvert d'enduit. Le béton imprimé par le robot n'est pas structurel vu que, comme il n'existe pas de normes pour ce type de système constructif, il était compliqué d'obtenir les certifications nécessaires, même si cela n'était pas *a priori* impossible. Le béton structurel – un béton fibré ultra-performant qui permet d'éviter la pose d'armatures – est coulé à l'intérieur des couches du béton imprimé qui donne la forme.

---

<sup>25</sup> F. Gramazio *et al.*, *The Robotic Touch*, *op. cit.*, p. [189].

<sup>26</sup> <https://xtreee.com/project/krypton/>

[Page avec images au document publié, suite page 183]

Le commanditaire du projet était la métropole Aix-Marseille et l'architecte en charge du bâtiment d'équipement sportif était Marc Dalibard. Le design algorithmique et la fabrication numérique étaient assumés par EZCT Architecture & Design Research (Philippe Morel et Félix Agid) et par XtreeE, sociétés fondées par des architectes basés à Paris. Les autres acteurs principaux du projet étaient le bureau d'études Artelia, en charge de l'étude et des vérifications statiques, LafargeHolcim qui a procuré le béton d'impression, et Fehr Architectural pour la réalisation du béton ultra-performant.

Le processus de conception et fabrication suppose une démarche qui utilise des moyens numériques avancés à certaines étapes importantes du projet. Le nombre d'acteurs impliqués fait penser, à ce stade de recherche et d'expérimentation, à un processus relativement segmenté – d'ailleurs les étapes de fabrication ont même eu lieu à des endroits (voire des pays) différents. La production des fichiers pour la machine, le '*file-to-factory*', est alors un maillon d'une procédure qui ne présente pas de continuité parfaite entre conception et fabrication mais suppose des échanges entre les parties impliquées. En outre, l'objet à construire était traité, à l'instar d'un prototype, dans ses particularités, en tant qu'objet singulier. Toutefois, rien n'exclut que le même processus puisse servir à produire des objets similaires mais variés ; l'horizon pourrait être en effet une production 'non standard'.

Une technique un peu différente d'usage de la robotique dans la fabrication d'un objet architectural est celle de la mise en forme du béton par extrusion à l'aide d'un coffrage glissant et tournant, manipulé par un robot<sup>27</sup>. Elle fait écho aux coffrages coulissants, assez répandus dans l'industrie du bâtiment de l'après-guerre. La recherche est menée par Lei Yu, Dan Luo et Weiguo Xu à l'Ecole d'architecture du Tsinghua University à Beijing, et elle est initialement basée sur une méthode développée à l'ETH de Zurich, dont elle essaie de faire évoluer le procédé. Elle vise notamment à mettre en place une production continue avec un *workflow* constant lors du fonctionnement du robot entre les différentes étapes : coulage du béton, vibration, transport automatisé sur des rails, mise en forme et humidification pendant la prise. Sont produits ainsi 115 piliers vrillés en béton fibré ultra performant, qui servent à un projet de mur de séparation dans un espace public. Ils sont tous différents et calculés pour un résultat visuel ondulant.

---

<sup>27</sup> L. Yu, D. Luo et W. Xu, « Dynamic Robotic Slip-form Casting and Eco-friendly Building Façade Design », in J. Willmann et al. (eds), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Cham, Springer, 2019, p. [421-433].

[Page avec images au document publié, suite page 185]

Des conditions spécifiques doivent être respectées concernant surtout la rhéologie et la consistance du béton – enjeu majeur également dans l'impression 3D. Le béton doit être assez liquide pendant le coulage et se stabiliser assez vite pendant que le coffrage se déplace, tout en restant assez souple pour qu'il n'en entrave pas le mouvement. La difficulté du procédé réside donc surtout dans la définition du mélange adapté au processus. Il faut également gérer le temps avec une grande précision. Les expérimentations sur des prototypes visent à définir avec un maximum d'exactitude les caractéristiques du matériau et du processus en vue de sa reproductibilité ; autrement dit, est visée une standardisation concernant le processus et certaines caractéristiques du produit, même si le produit lui-même n'est pas complètement standardisé quant à ses caractéristiques géométriques.

En comparant cette technique à celle des coffrages coulissants de l'après-guerre, nous remarquons qu'un dispositif mécanique qui puisse glisser verticalement le coffrage en le tournant serait possible sans recours à la technologie numérique. L'usage du robot peut faciliter la mise en œuvre si l'objectif est de produire plusieurs piliers de la même famille mais de formes toutes légèrement différentes, en changeant le rapport entre vitesse de rotation et vitesse de translation, quoique cela soit possible avec des moyens électromécaniques moins avancés. Mais l'innovation de cette recherche concerne surtout le caractère intégratif de la chaîne, la continuité et l'automatisation maximale des processus lors des différentes étapes, du fichier de conception à la machine.

Dans les deux exemples étudiés, des architectes sont impliqués dans l'élaboration d'un procédé qui conjugue créativité architecturale et efficacité technique. La continuité conception-fabrication de type *'file to factory'* se concrétise par le fait que les instructions pour le robot proviennent directement des fichiers qui décrivent la forme géométrique de l'objet. Il ne s'agit en réalité que d'une condition minimum mais probablement insuffisante à elle seule pour aboutir à une production en série d'objets variés en vue d'une architecture dite non standard. Elle fait ou doit faire partie d'une continuité technique plus large, qui devrait inclure aussi la question logistique. Et si production non standard signifie également production en série, se pose aussi la question de la continuité économique (régularité et fluidité du marché, constance de la commande etc.), qui est celle qui a préoccupé particulièrement les acteurs de l'industrialisation du bâtiment de l'après-guerre et qui semble négligée dans les discours contemporains sur l'architecture « non standard ».

## Conclusion : la production « hyper-standard » et l'économie du travail

La continuité conception-fabrication, qui promet un nouveau rôle à l'architecte, permet-elle de libérer le concepteur des contraintes de l'industrialisation, comme le suggère l'idée d'un « artisanat numérique » ?

Tout d'abord, dans les exemples étudiés plus haut, les architectes sont impliqués activement dans la mise au point du processus de fabrication. On peut citer également à ce sujet l'architecte Marc Fornes, qui développe une pratique basée sur la fabrication numérique. Il affirme que le travail de l'architecte qui produit lui-même les fichiers de fabrication, voire développe lui-même certaines machines à commande numérique, est bien différent de la pratique conventionnelle de l'architecture qui s'arrête aux dessins d'exécution<sup>28</sup>. Tout cela ouvre bien entendu de nouveaux débouchés pour la pratique architecturale. Au contraire, si l'architecte n'intervient pas dans le processus, même s'il ou elle a, grâce à l'évolution technique, la possibilité d'élargir son vocabulaire morphologique, son rôle ne change pas *a priori* radicalement.

Revenant aux trois milliers et demi de vitrages de la Fondation Louis Vuitton, nous remarquons que la machine à commande numérique permet une variété géométrique tout à fait exceptionnelle et un gain certain au niveau du temps et du coût de la fabrication, sans doute de sa précision aussi. Mais en les comparant aux 2 000 dalles préfabriquées en béton, toutes à double courbure et toutes différentes, du Pavillon Philips conçu par Le Corbusier et Xenakis (Bruxelles, 1958), coffrées selon les plans de l'architecte par des ouvriers sur des lits de sable, les exploits récents dus à la sophistication mécanique et à l'informatique sont techniques, quantitatifs. Le rôle de l'architecte ne change pas forcément selon que le vitrage est cintré par une machine ou par des ouvriers à l'aide de moules. En outre, l'idée d'un *continuum* dans le processus de conception-production, qui laisserait penser qu'on envoie un fichier à la machine et l'on fait sortir l'objet imaginé par l'architecte, masque une réalité nettement plus segmentée : les vitrages en question sont fabriqués, découpés, mise en forme, traités de nouveau à tour de rôle par différents intervenants (et même dans différents pays)<sup>29</sup> avant d'arriver sur le chantier, où ils sont assemblés.

La technologie du '*file to factory*' écrase des étapes intermédiaires et réduit à presque zéro les marges d'intervention de tout acteur dont les contraintes et spécifications ne sont pas intégrées par avance de la manière la plus précise possible dans le processus. Dans ce sens, l'horizon de la continuité conception-fabrication n'est pas de réinventer l'artisanat, de promouvoir un 'artisanat évolué', mais elle parachève le passage de la technologie prescriptive à la technologie normative<sup>30</sup>, qui, en codant et figeant les prescriptions en amont, permet de reléguer le travail d'exécution aux machines.

L'artisanat est basé sur des connaissances empiriques liées au savoir-faire transmis et appris, et sur un accord plus ou moins implicite entre le concepteur

---

<sup>28</sup> M. Fornes, entretien dans *Interior Design*, « Q&A: Marc Fornes on Creating Intricate Sculptures With Code », <https://www.interiordesign.net/articles/13931-q-and-a-marc-fornes-on-creating-intricate-sculptures-with-code/>.

<sup>29</sup> Voir <https://www.saint-gobain.com/fr/du-verre-saint-gobain-habille-la-fondation-louis-vuitton> (vu le 3 mai 2020).

<sup>30</sup> Sur la technologie prescriptive et la technologie normative, voir A. Dupire *et al.*, *Deux essais sur la construction*, *op. cit.*

et l'exécutant, l'artisan, qui a une marge de manœuvre sur des détails de l'objet ou du processus qui ne lui sont pas dictés. Cette marge se rétrécit considérablement avec la technologie prescriptive (où les détails sont précisés notamment par des documents graphiques). Elle est carrément annihilée avec la technologie normative dans le contexte de la construction industrialisée, où l'exécuteur est l'ouvrier non spécialisé. La continuité conception-fabrication représente l'apogée du principe de prescription, normalisée à un niveau supérieur par la spécification exhaustive des procédés, des protocoles d'échange des fichiers numériques, des propriétés et performances des matériaux. Elle fait appel à une standardisation peut-être moins visible dans le produit fini, mais plus précise, plus fine, probablement bien plus élaborée. Suivant Pierre Veltz, qui propose de parler d'une société hyper-industrielle plutôt que d'une société post-industrielle<sup>31</sup>, nous pourrions parler plutôt d'"hyper-standard" que de "non standard".

Le pronostic est fait depuis une quarantaine d'années, lorsque la tendance vers le transfert d'information direct de l'ordinateur à la machine commence à se confirmer dans l'industrie : il n'y aura pas, dans ce cas, de connaissance, ni acquis supposés de certains corps des métiers, qui seront évacués de la chaîne de production, puisque tout doit être algorithmiquement communicable sans ambiguïté<sup>32</sup>. Le protagoniste devient la machine à commande numérique, souple, précise, venant accomplir la promesse d'une production en série à la fois automatisée et diversifiée. Toutefois, là encore, il faut réfuter le déterminisme technologique : la machine commandée numériquement n'est pas à elle seule déterminante pour la diversification de la production et elle est loin d'en être la seule condition ou garantie – rappelons que l'industrie automobile, qui est parmi les premières à avoir eu recours aux robots et à la commande numérique, s'en sert pour produire des objets de formes identiques. À plus forte raison, le type de machine de production ne prédétermine le rôle de l'architecte non plus. Le type de machine doit être appréhendé, réfléchi, évalué en rapport avec le contexte de production où il opère.

Ainsi, on pourrait, de manière un peu optimiste, avancer que des processus comme ceux mis en œuvre par EZCT Architecture & Design Research et XtreeE pour la fabrication du poteau de l'auvent à Aix-en-Provence ouvrent de nouvelles perspectives pour l'architecte : l'équipe d'architectes impliqués dans le processus de fabrication joue un rôle intermédiaire entre la conception et la construction, étant dépositaire d'un savoir-faire conceptuel et technique ; le robot est davantage un outil (manipulé, fût-il informatiquement, par l'humain) qu'une machine (qui remplacerait l'humain).

En même temps, plus le processus est informatisé, mécanisé, automatisé, donc connu scientifiquement et avec précision, plus il se prête à être réitéré, donc plus sa standardisation est imminente – immanente aussi. La standardisation risque d'être stimulée par les perpétuels avantages techniques et économiques de la répétition, et ce même pour des produits "non standard". Vu la complexité de l'objet de la construction architecturale, vu aussi les caractéristiques

---

<sup>31</sup> P. Veltz, *La Société hyper-industrielle*, Paris, Seuil, 2017.

<sup>32</sup> Y. Déforge, *Le graphisme technique : son histoire et son enseignement*, Seyssel, Champ Vallon, 1981, p. [136].

des machines à commande numérique industrielles nées à la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, le *file-to-factory* et l'artisanat numérique risquent d'être incompatibles. La prescription poussée à son point culminant par l'idéal de la continuité conception-fabrication fait basculer les processus de la construction informatisée du non standard vers l'hyper-standard. D'une part, la construction de bâtiments doit, pour des raisons de faisabilité et de sécurité, répondre à des normes et respecter des spécifications réglementaires. D'autre part, les machines industrielles doivent être programmées selon des cahiers de charge bien précis, ce qui oblige à normaliser les processus en vue de leur reproduction. Savoir si des machines encore plus évoluées, dotées de fonctions de rétroaction fines et d'intelligence artificielle (comme il en existe dans d'autres domaines), pourront adapter leur fonctionnement de manière automatique au cours de processus de fabrication fondamentalement différents, et changer ainsi la donne dans le domaine de la construction, est une question ouverte.

## Bibliographie

- C. Abel, « Ditching the Dinosaur Sanctuary », *Architectural Design*, vol. 38, août 1969.
- R. Bechmann, « Comment la standardisation et la préfabrication, développées aux XII<sup>e</sup>-XIII<sup>e</sup> siècles dans le système de construction, ont permis l'extraordinaire floraison des cathédrales "gothiques" ? », in R. Carvais, et al. (dir.), *Édifrice & artifice. Histoires constructives*, Paris, Picard, 2010.
- G. Blachère, *Technologies de la construction industrialisée*, Paris, Eyrolles, 1975.
- B. Cache, *Terre meuble*, Orléans, HX, 1997 (1995).
- M. Carpo, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge Mass., MIT Press, 2011.
- Y. Déforge, *Le graphisme technique : son histoire et son enseignement*, Seyssel, Champ Vallon, 1981.
- L. Dimitriadi, « La place de l'automatisation et de l'informatique dans les discours sur l'industrialisation du bâtiment en France entre 1960 et 1980 », G. Bienvenu et al. (dir.), *Construire ! Entre Antiquité et époque moderne*, Picard, Paris, 2019.
- L. Dimitriadi, « Le bâtiment industrialisé face au défi de la diversité architecturale : techniques, machines, processus », Mastroilli A., Monin E. (dirs.), « Technologie et bâtiment : un patrimoine silencieux », *Cahiers Thématiques* n. 19, ENSAP Lille, 2020 (à paraître).
- A. Dupire et al., *Deux essais sur la construction. Conventions, dimensions et architecture*, Bruxelles, Liège, Mardaga, 1981.
- J. Frazer, *An Evolutionary Architecture*, London, AA Publications, 1995.
- F. Gramazio et al., *The Robotic Touch. How Robots Change Architecture*, Zurich, Park Books, 2014.
- J. Guillerme (dir.), *Amphion. Etudes d'histoire des techniques 1*, « Le droguier du fonctionnalisme », Paris, Picard, 1987.
- B. Kolarevic (dir.), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York, Taylor & Francis, 2003.
- M. Litaudon, *La bataille de la productivité se gagnera dans les usines. Les installations de production de composants, critiques et voies d'innovation, une chance, l'informatique moderne*, Paris, Plan Construction, 1981.
- G. Lynn, *Animate Form*, New York, Princeton Architectural Press, 1999.
- F. Migayrou (dir.), *Architectures non standard*, Paris, Centre Pompidou, 2003.
- J.-M. Salanskis, H. Sinaceur, *Les labyrinthes du continu*, Paris ; Berlin ; New York, Springer, 1992.
- K. Oosterhuis, *Hyperbodies. Towards an E-motive architecture*, Bâle ; Boston ; Berlin ; Birkhäuser, 2003.
- K. Oosterhuis, H. Bier, C. Aalbers, S. Boer, « File to Factory and Real-Time Behavior in ONL-Architecture », in *Proceedings of the ACADIA '04*, « Fabrication: Examining the digital practice of architecture », Canada, 2-5 July 2004.
- L. Spuybroek, *The architecture of continuity*, Rotterdam, V2\_Publishing, 2008.
- P. Veltz, *La Société hyper-industrielle*, Paris, Seuil, 2017.
- M. Vogiatzaki (dir.), *File to factory: The design and fabrication of innovative forms in a continuum*, Proceedings of the International Conference Erasmus LLP, Thessaloniki, Art of Text, 2010.
- J. Willmann et al. (dir.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Cham, Springer, 2019.

## Sources internet

- AFNOR <https://normalisation.afnor.org/normes-definition/>
- Conférence N. Leduc, 6 novembre 2018 à l'EAV&T, [https://www.youtube.com/watch?v=5klo0H33Fo0&t=2057s\(31'30''-36'37''\)](https://www.youtube.com/watch?v=5klo0H33Fo0&t=2057s(31'30''-36'37'')) (vu le 01/05/2020).
- « Du verre Saint-Gobain habille la Fondation Louis Vuitton » <https://www.saint-gobain.com/fr/du-verre-saint-gobain-habille-la-fondation-louis-vuitton>
- M. Fornes, entretien dans Interior Design, « Q&A: Marc Fornes on Creating Intricate Sculptures With Code », <https://www.interiordesign.net/articles/13931-q-and-a-marc-fornes-on-creating-intricate-sculptures-with-code/>.
- « Glaston ProBend for cylindrical safety glass », <https://www.youtube.com/watch?v=BgvA718osh8>
- ISO <https://www.iso.org/standards.html>
- XtreeE <https://xtreee.com/project/krypton/>