

FABRIQUER POUR CONCEVOIR:
RETOUR A LA MATERIALITE

processus de conception et fabrication digitale

FEV14

SEMINAIRE DE MASTER
« La Connaissance Computationnelle »

Mémoire de Master sous la direction
de Christian Girard

JIM RHONE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	05	
BITS ET ATOMES	07	
		VERS UNE PERTE DE MATÉRIALITÉ 07
		L'EXPRESSION D'UNE NOUVELLE MATÉRIALITÉ 11
MATÉRIALISATION DU DIGITAL ET POTENTIELS	14	
		DE LA MAIN A L' « END - EFFECTOR » 14
		EXPÉRIMENTATION D.I.Y 17
		AU DELÀ DU NON STANDARD 21
NOUVEAUX PROCESSUS, NOUVELLES STRATÉGIES	27	
		L'ARCHITECTE, ARTISAN DIGITAL ? 27
		FABRIQUER POUR CONCEVOIR ? 29
DIGITALISATION DE LA MATIÈRE ET PERSPECTIVES	37	
		FEEDBACK ET EMPIRISME 37
		PROFONDEUR DE LA SIMULATION AVANCÉE 45
		SYSTÈMES MATÉRIELS 49
CONCLUSION	53	
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	55	
ANNEXE - QUESTIONS TRAITÉES	59	

INTRODUCTION

Avec l'évolution considérable des technologies et des outils informatiques, les différentes formes de design (au sens bien entendu anglo-saxon de « projet », et non de conception de mobilier ou d'objet) changent. Le design actuel est désormais computationnel : non plus assisté par ordinateur mais fondé sur l'existence même de ce dernier. Il est en effet inconcevable d'imaginer concevoir des bâtiments sans l'utilisation des ordinateurs ; et ils sont aujourd'hui utilisés à chaque étape du processus architectural, du design conceptuel à la construction.

Ce design digital, qui regroupe donc la modélisation 3D, la visualisation, mais aussi, pour une minorité de projets aujourd'hui, le design paramétrique, scripté, génératif et évolutif est, comme l'explique Antoine Picon, « souvent considéré comme une menace pour l'une des dimensions essentielles de l'architecture : l'aspect concret de la construction et des technologies du bâtiment, en un mot, sa matérialité »¹.

Ces considérations sur la matérialité sont pourtant d'un intérêt permanent pour les ingénieurs qui en parallèle des maquettes de structure digitales réalisent presque toujours des tests physiques, à l'image de Nervi, dont la méthode de travail consistait à remplacer ou à intégrer le calcul mathématique par l'expérimentation : « il

*construit le modèle d'une forme et le soumet à une série de poussées physiques qui reproduisent avec la plus grande fidélité possible celles que la structure devra supporter dans la réalité. Sur la base de ces épreuves de charge, il procède aux modifications nécessaires et détermine la forme finale de sa structure de ciment »*².

Ces tests physiques rendent possible l'anticipation des modes de comportements structurels et matériels inconnus que les maquettes digitales sont incapables de prendre en compte, puisque construites en fonction de schémas et paramètres connus. « *Le modèle de l'ingénieur est ainsi là pour illustrer un argument ou pour remplacer un calcul par une mesure directe sur le modèle* »³.

Construire et tester reste donc toujours le moyen le plus pertinent pour obtenir un sens réel de la matérialité et des structures ; en entretenant un lien essentiel entre deux domaines abstraits/idéaux (digital) et réel (physique et matériel). Il faut cependant noter qu'en aéronautique, des avions sont désormais intégralement conçus sans essais grandeur nature multiples ni prototypes.

Les outils digitaux actuels permettent un processus dans lequel la création et la collaboration entre architectes et ingénieurs

1 PICON (Antoine), "Architecture and the Virtual, Towards a New Materiality", dans *Praxis: Journal of Writing and Building*, n°6: New Technologies://New Architectures (mars 2004), Praxis Inc. , p. 114. « *The development of digital design is often presented as a threat to one of architecture's essential dimensions: the concrete aspects of construction and building technologies, in a word, its materiality* ».

2 ARGAN (Giulio Carlo), "Pier Luigi Nervi", dans *Projet et Destin. Art, architecture et urbanisme*, Paris, Les Editions de la Passion, 1993 (1955), p. 191.

3 VARENNE (Franck), *Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances* [en

sont facilitées, pour le cas de la recherche par exemple, et par extension dans la pratique d'un design de projet optimum. L'optimisation, étudiée dans le domaine de l'ingénierie et motivée par des facteurs allant de l'esthétique, aux structures, à l'économie et à des considérations environnementales, a une influence et une emprise importante sur la création architecturale. Ces nouveaux outils digitaux ont ainsi rendu possible la coordination et la réalisation de bâtiments d'une complexité sans précédent. Simultanément, en architecture, ils sollicitent des pratiques du design faisant intervenir des géométries parfois abstraites et sans considération pour le comportement des matériaux, les restrictions de fabrication, et les implications lors de la construction ; imposant souvent de vastes opérations de rétro-ingénierie.

Il semble donc nécessaire qu'une nouvelle pratique soit imaginée pour les outils digitaux et le design computationnel, dans laquelle les architectes envisagent leur discipline comme une pratique matérielle et considèrent matériaux et machines comme des médiums de l'architecture. Ces outils pourraient alors devenir un moyen pour mieux comprendre les matériaux, les potentiels de la fabrication, ainsi que pour développer des nouveaux systèmes de construction au sein même du processus de conception d'un projet.

ligne], Colloque "Les modèles : possibilités et limites" organisé par la Société française de Physique (Bibliothèque Nationale de France, Paris, 10 décembre 2008), Paris, 2008, p. 4. Extrait le 26 juillet 2013 du site < <http://hal.archives-ouvertes.fr>>.

BITS ET ATOMES ⁴

VERS UNE PERTE DE MATÉRIALITÉ ?

« Dès qu'un concept de structure a trouvé une réalisation plus ou moins heureuse par la construction, nous pouvons observer, au résultat visible, des phénomènes qui concernent apparemment le jeu des forces et l'ordonnance des parties individuelles correspondantes, mais qui ne peuvent être suffisamment décrits ni expliqués par les seuls concepts de la structure et de la construction. Pour ces phénomènes où un rapport direct entre forme et force trouve son expression, la désignation « architectonique » devrait seule être employée » ⁵.

Avec cette définition du terme « architectonique », Eduard Sekler, et plus tard Kenneth Frampton dans *Studies in Tectonic Culture : The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture* (Cambridge : MIT Press, 2001), explicitent la relation fondamentale qui existe entre architecture, structure, forme et forces.

Or compte tenu de la nature souvent très formaliste de la production digitale de nombreux architectes, c'est précisément cette dimension physique, ou matérielle, que le design computationnel semble

négliger, de même que sa relation étroite avec des propriétés physiques inhérentes à son existence, comme le poids, la portée, la résistance. L'agence d'architecture expérimentale Kokkugia (Melbourne et Londres), dirigée par Roland Snooks et Robert Stuart-Smith, en est l'exemple. En effet, à l'exception du projet Material Agencies Installation (St Louis, USA, 2012), qu'il s'agisse des maquettes, des géométraux ou des rendus des projets publiés, aucun ne témoigne réellement d'un rapport à la matérialité.

Dans son article « Volatile Formation » publié dans Log 25 (2012), Roland Snooks reconnaît « la tendance qui contribue à une perception de l'architecture algorithmique comme obsédée par des questions formelles et esthétiques – une perception qui est contraire à la logique d'organisation des systèmes complexes ». En insistant sur les aspects organisationnels de l'architecture comme le programme et la structure, il semble au contraire vouloir dépasser cette question formaliste pour s'orienter vers la performance et avance l'idée que « l'émergence de la forme peut être vue comme l'organisation de la matière » ⁶.

Pourtant, dans ce projet d'habitation relativement récent (Figure 1), peu d'éléments

4 Création en 2001 du CBA (Center for Bits and Atoms) au MIT (Massachusetts Institute of Technology). Dirigé par le professeur d'architecture et chercheur Neil Gershenfeld, le CBA est une initiative interdisciplinaire explorant les limites entre sciences computationnelles et sciences physiques et étudiant les intersections et les liens entre une information, sa représentation physique, ainsi que les manières de passer de l'un à l'autre.

5 SEKLER (Eduard), «Structure, Construction et Architectonique», dans *La Structure dans les Arts et les Sciences*, sous la direction de Gyorgy Kepes, Bruxelles, Les Editions de la Connaissance, 1967, p. 89.

6 SNOOKS (Roland), « Volatile Formation », dans Log 25, New York, Any Corporation, juillet 2012,

ou de détails promettent véritablement de la performance. En s'appuyant sur les différentes images produites, s'il est certes possible de distinguer une hiérarchie structurelle ainsi qu'un éventuel rapport au site, le passage du computationnel au matériel reste en revanche difficile à envisager. Un tel projet peut donc selon moi être qualifié de « formaliste », d'autant plus que la production est sans doute en deçà

des ambitions déclarées par ses auteurs.

Ainsi, lorsqu'il est question de production digitale, l'accusation d'une dématérialisation opposant explicitement le virtuel au réel y est parfois associée. Principalement visée, l'architecture de « blobs », dont le concept a été développé par l'architecte Greg Lynn et défini ainsi : « *Les Blobs constituent une intervention formelle dans les dis-*



Figure 1. Cliff house, Kokkugia, Nevada, USA, 2012 (projet spéculatif) © Kokkugia (www.kokkugia.com/cliff-house).

160 pp. « *It is perhaps this tendency that contributes to the perception of algorithmic architecture as obsessed with formal and aesthetic concerns [...] the emergence of form can be understood as the organization of matter* ».

cussions contemporaine sur la tectonique. C'est-à-dire que les blobs interviennent au niveau de la forme, mais promettent de s'insérer dans les espaces de la représentation, où le particulier et le général ont été forcés de se réconcilier – non pas pour reboucher ces trous avec leur surface collante, mais pour attirer l'attention sur l'existence nécessaire de trous dans la représentation. Les blobs suggèrent des stratégies alternatives d'organisation structurelle et de construction qui créent de nouvelles manières complexes pour relier l'homogène, ou le général, à l'hétérogène, ou au particulier »⁷.

La raison pour laquelle la digitalisation progressive de l'architecture est actuellement soumise aux critiques de nombreux théoriciens classiques est compréhensible selon Antoine Picon, car « *sur un écran, les formes semblent flotter librement, sans contraintes autres que celles imposées par le logiciel et par l'imagination de l'architecte. Il y a donc quelque chose de profondément indéfini dans cette apparente liberté qui paraît remettre en question notre principe le plus fondamental concernant la discipline architecturale* »⁸. La notion d'échelle est également à prendre en compte : quelle est la vraie échelle des espaces qui

apparaissent sur un écran d'ordinateur ? Malgré l'intégration de figures d'échelle, il est souvent difficile de répondre à cette question, et cette ascalarité apparente crée également débat. Pour l'architecte et chercheur Peter Trummer, Greg Lynn a d'ailleurs été « *l'un des premiers à revendiquer l'émergence de nouvelles formes grâce à des processus morphogénétiques, en rejetant l'introduction de contraintes matérielles et donc en idéalisant le processus de l'objet architectural en soi* »⁹.

N'a-t-on donc pas excessivement congédié le réel pour lui préférer ce qui passe le plus souvent pour sa représentation ou sa copie, à savoir le modèle ou la simulation numérique ?

Il y a là une distinction à établir entre ce que l'on désigne par modèle et par simulation. Selon l'épistémologue Franck Varenne, on peut dire que les modèles sont des constructions matérielles ou formelles servant à représenter quelque chose de réel ou de fictif. « *On comprend alors qu'une fois mis en rapport avec des dispositifs de conception, de construction ou d'intervention, les modèles servent à transformer le réel ou à l'anticiper, voire, peut-être dans*

7 LYNN (Greg), "Blobs : Why Tectonics is Square and Topology is Groovy", dans *Any Magazine*, n°14 (mai 1996), pp. 58-61 ; repris sous le titre "Blob tectonics, or why tectonics is square and topology is groovy", dans LYNN (Greg), *Folds, Bodies and Blobs, Collected Essays*, sous la direction de Michèle Lachowsky et Joël Benzakin, Bruxelles, La lettre volée, 2004 (1998), pp. 169-182, p. 169. « *Blobs constitute a formal intervention in contemporary discussions of tectonics. That is, blobs intervene on the level of form, but they promise to seep into those gaps in representation where the particular and the general have been forced to reconcile – not to suture those gaps with their sticky surfaces, but to call attention to the necessary existence of gaps in representation. Blobs suggest alternative strategies of structural organization and construction that provide intricate and complex new ways of relating the homogeneous or general to the heterogeneous or particular* ».

8 PICON (Antoine), op. cit. , p. 114. « *On a computer screen, forms seem to float freely, without*

certain cas, à le supplanter. [...] Pendant longtemps, le terme « simulation » n'a servi qu'à désigner un type particulier de modèle : un modèle à la fois physique et phénoménologique. Une simulation a donc d'abord été conçue comme un modèle non symbolique, c'est-à-dire un modèle présentant une réalité physique d'une part, dont le principe de fonctionnement, d'autre part, ne vise pas à imiter celui de l'objet modélisé, mais dont les performances observables (la phénoménologie) visent, en revanche, à imiter les performances observables de l'objet modélisé [...] Les simulations dites « numériques » n'apparaissent justement pas quand il n'y a pas de modèle. Au contraire, elles sont bien souvent des calculs de modèles »¹⁰.

Sur cette question des modèles et des simulations numériques, Picon considère que le stade auquel se trouve l'architecture digitale aujourd'hui n'est certainement pas définitif et que cette tendance vers une certaine immatérialité est probablement éphémère. Loin d'être menacée par la généralisation de l'ordinateur et le développement des mondes virtuels, la matérialité resterait donc une caractéristique fondamentale de la production architecturale. Pourtant, dans les premières et décisives

étapes du design, la matérialité est souvent conceptualisée comme une simple propriété passive appliquée à des éléments définis géométriquement ; conduisant la matérialisation à être envisagée comme un processus secondaire pour la réalisation d'un système dans le monde physique.

L'architecte allemand Achim Menges, sans désigner spécifiquement l'architecture digitale, et de ce fait, sans donner tant d'importance aux critiques classiques, interroge cette idée de la primauté de la forme et affirme que « *L'Architecture en tant que discipline matérielle, est toujours basée sur des approches du design caractérisées par une relation hiérarchique qui privilégie la définition et la génération de la forme au dépens de sa matérialisation [...] Particulièrement emblématique, la référence à la notion de morphogénèse. Presque devenue un cliché, ce terme réfère aux différents processus de génération de forme dont le résultat reste évasif vis-à-vis de la matérialité et des logiques de construction. En plaçant la géométrie obtenue au premier plan, ces techniques sont parfaitement identiques à des techniques de représentation plus conventionnelles et établies depuis longtemps* »¹¹. Plus que de se limiter au constat

constraint other than those imparted by the program and by the designer's imagination. there is something deeply unsettling in this apparent freedom that seems to question our most fundamental assumptions regarding the nature of the architectural discipline ».

9 TRUMMER (Peter), "Associative Design, From Type to Population", dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction de Achim Menges et Sean Ahlquist, Londres, John Wiley & Sons, 2011, p. 180. « *Greg Lynn, who probably was one of the first to argue for the emergence of new forms by means of a morphogenetic process, still rejected the introduction of material constraints and therefore idealised the process of the architectural object itself* ».

10 VARENNE (Franck), op. cit. , p. 4.

11 MENGES (Achim), "Integral Formation and Materialisation – Computational Form and Material Gestalt", dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction de

d'un état transitoire dans lequel la production architecturale aurait une tendance à être trop immatérielle, Menges considère que l'information matérielle est interprétée à tort comme « *facilitatrice plutôt que comme génératrice* »¹², et suggère donc la nécessité d'une évolution de la discipline favorisant son rapport à la matière ainsi que le développement de processus de conception alternatifs réconciliant la génération formelle computationnelle et la matérialisation.

L'EXPRESSION D'UNE NOUVELLE MATÉRIALITÉ

Bien que le design architectural dépende des réalités de l'environnement construit, cette relation reste ambiguë. Les dessins et spécifications évoquent des effets de matière plutôt qu'une réalité matérielle précise et sans équivoque. L'ambiguïté du design architectural se reflète donc sur sa représentation : même la technique de représentation la plus convaincante ne correspond pas totalement à la réalité construite.

Sur cette question, la sphère digitale offre de nombreuses nouvelles opportunités pour concevoir la matérialité et définir des propriétés et des apparences. Les récentes avancées en science des matériaux et sur les méthodes innovantes de production de matériaux synthétiques ont eu un impact radical sur les industries de pointe : de nouveaux matériaux composites sont en train d'être développés et possèdent une structure interne extrêmement complexe basée sur des modèles biologiques.

Dans « Self-Organisation and Material Construction »¹³, Michael Weinstock, architecte britannique et directeur du programme Emergent Technologies and Design à la Architectural Association School of Architecture (London), étudie à ce sujet la fabrication de matériaux cellulaires inspirés des concepts de processus auto-organisationnels dans les structures biologiques. De nouveaux matériaux cellulaires comme les mousses métalliques, les céramiques, les polymères et le verre, constituent un témoin du changement significatif qui opère dans le design des matériaux, où les frontières entre naturel et artificiel commencent à s'effacer.

Achim Menges et Sean Ahlquist, Londres, John Wiley & Sons, 2011, p. 199. « *Architecture as a material practice is still mainly based on design approaches characterised by a hierarchical relationship that prioritises the definition and generation of form over its subsequent materialisation [...] Particularly emblematic is the one-dimensional reference to the notion of digital morphogenesis. By now almost a cliché, this term refers to various processes of form generation resulting in shapes that remain elusive to material and construction logics. In foregrounding the geometry of the eventual outcome as the key feature, these techniques are quintessentially not dissimilar to more conventional and long-established representational techniques* ».

12 MENGES (Achim), "Material Computation – Higher Integration in Morphogenetic Design", dans *Architectural Design – Material Computation*, profile n°216 (mars – avril 2012), John Wiley & Sons, p. 17. « *material information is understood as facilitative rather than generative* ».

13 WEINSTOCK (Michael), "Self-Organisation and Material Constructions", dans *Architectural De-*

La révolution digitale est contemporaine d'une révolution dans les matériaux que nous produisons et utilisons. La production digitale de matériaux semble abolir la distance entre représentation et production, et c'est en ce sens que Picon évoque l'idée d'une nouvelle matérialité.

Pour Branko Kolarevic, professeur d'architecture à l'Université de Calgary au Canada, « *cette capacité à générer et à analyser numériquement les informations du design, puis à les utiliser directement pour fabriquer et construire des bâtiments, redéfinit fondamentalement les relations entre conception et production – elle permet un continuum informationnel du design à la construction* »¹⁴. Ces nouvelles méthodes permettant de générer des informations constructives directement à partir d'informations provenant du design sont ce qui définirait l'aspect le plus profond et essentiel de l'architecture contemporaine. Enfin, en plus de la possibilité d'établir un processus continuellement documenté entre la pure représentation architecturale et les spécifications techniques, la computation remplace la représentation par la simulation.

Le monde modelé par les technologies digitales est donc complexe à tous les niveaux du fait de l'écart qui sépare souvent la modélisation computationnelle et la tectonique. Pour Picon, « *l'antagonisme des critiques comme Kenneth Frampton est directement lié à la reconnaissance de cet écart entre représentation digitale et tectonique traditionnelle. Aussi surprenant que cela puisse paraître, un tel écart n'est pas nécessairement synonyme de dématérialisation de l'architecture. L'ordinateur redéfinit la matérialité plutôt que de l'abandonner au profit de la séduction des images* »¹⁵. Plutôt qu'une perte de matérialité, l'influence de la sphère computationnelle en architecture aurait conduit à sa transformation.

Dans quelle mesure cette dernière a donc évolué ?

En se détachant complètement d'une définition sociologique de la matérialité évoquée par Picon et selon laquelle l'idée de matérialité, comme tous les autres éléments de notre environnement, serait une construction culturelle ; les deux architectes Fabio Gramazio et Matthias Kohler vont plus loin en utilisant la formulation

sign – Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, vol. 76 – issue 2 (mars - avril 2006), John Wiley & Sons, pp. 34-41.

14 KOLAREVIC (Branko), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York, Taylor & Francis, 2003, p. 59. « *The ability to digitally generate and analyze the design information, and then use it directly to manufacture and construct buildings, fundamentally redefines the relationships between conception and production - it provides for an informational continuum from design to construction* ».

15 PICON (Antoine), op. cit. , p.114, « *The antagonism of critics like Kenneth Frampton is directly related to the recognition of this gap between digital representation and traditional tectonics. However disturbing it may be, such a gap is not necessarily synonymous with a dematerialization of architecture. The computer redefines materiality rather than abandoning it in favor of the seduction of pure images* ».

« matérialité digitale » afin de décrire une transformation émergente dans l'expression de l'architecture. « *La matérialité est de plus en plus enrichie par des caractéristiques digitales qui affectent substantiellement la nature même de l'architecture. La matérialité digitale évolue au travers de l'interaction entre processus digital et matériel dans le design et la construction. La synthèse de deux mondes apparemment distincts – le digital et le matériel – génère de nouvelles et évidentes réalités. Données et matériaux, programmes et construction sont entremêlés* »¹⁶. Avec l'arrivée des technologies et des outils digitaux, de nouvelles perspectives s'offriraient à l'architecture : celle de faire fonctionner données et matériaux en symbiose, créant ainsi une matière informée et une information matérialisée.

Comment est-il possible de faire le lien entre la matérialisation du digital et la digitalisation de la matière ? Quels en sont les potentiels ?

16 GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, p. 7. « *Materiality is increasingly being enriched with digital characteristics, which substantially affect architecture's physis. Digital materiality evolves through the interplay between digital and material processes in design and construction. The synthesis of two seemingly distinct worlds – the digital and the material – generates new, self-evident realities. Data and material, programming and construction are interwoven* ».

MATÉRIALISATION DU DIGITAL ET POTENTIELS

DE LA MAIN À L' « END-EFFECTOR »

Pour Gramazio et Kohler, données et matériaux sont donc indissociables, et ce du fait de l'émergence de nouveaux processus de conception fondés sur la relation directe entre modèle informatique et prototype physique. Avec leurs travaux, la digitalisation de l'architecture ne se limite plus à la représentation et à la conception, mais s'adresse aussi à la fabrication.

En ce sens, comparer la fonction et l'intérêt d'un modèle digital à ceux d'un modèle physique permet de mettre en évidence la complémentarité qu'il existe entre les deux, et donc le potentiel offert par un lien qui permettrait de passer de l'un à l'autre.

Pour l'architecte et professeur Mark West (University of Manitoba, Winnipeg, Canada), « *un modèle physique est excellent parce que, contraint dans sa réalité, il est qualitativement riche : détenteur d'informations sur les forces et les contraintes, les étapes et les détails de construction. Il est cependant très difficile d'obtenir des infor-*

*mations quantitatives de ce type de modèle. Les modèles digitaux, d'autre part, sont excellents car ils sont riches en quantité : ils sont en effet composés de quantités, et ce contenu les rend inestimables dans toute culture constructive qui doit calculer avant de construire. [...] Les formes architecturales générées digitalement, aussi riches qu'elles peuvent l'être en quantité et calcul, restent en revanche déconnectées du monde de la construction physique en vertu de leur taille. De manière générale, les formes complexes générées digitalement sont extrêmement difficiles à sortir de l'ordinateur et à faire rentrer dans le monde physique. [...] Compte tenu de ces considérations, les modèles et prototypes physiques sont de loin le meilleur moyen de trouver et développer de nouvelles formes architecturales. [...] Leur plus grande vertu reste que quelque soit le type de forme que nous trouvons, nous savons déjà comment les construire car la forme a été trouvée en construisant »*¹⁷.

C'est justement cette continuité entre la sphère digitale et le monde physique qui est désormais rendue possible en architecture par la fabrication digitale.

17 WEST (Mark), "With Matter", dans *Architectural Design – Protoarchitecture : Analogue and Digital Hybrids*, vol. 78 - issue 4 (juillet - août 2008), sous la direction de Bob Sheil, John Wiley & Sons, p. 5. « *A physical model (as verb) is excellent because, bound as it is in actual reality (AR), it is qualitatively rich: full of dense information about physical forces and strains, construction sequence and detail. It is very difficult, however, to get quantitative information out of this kind of model. Digital models, on the other hand, are excellent because they are rich in quantity: indeed, they are composed of quantities, and this content makes them invaluable in any building culture that must calculate before constructing. [...] Digitally generated architectural form, rich as it may be in quantity and calculation, remains in this sense disconnected from the world of physical construction by virtue of its size. By and large, complex digitally generated forms are extremely difficult to get out of the computer and into the physical world. [...] Based on these considerations, physical model prototypes are by far the best way to find and develop new, buildable architectural forms. [...] Nevertheless, their greatest virtue remains that no matter what kind of form we find, we already know how to build it because the form was found by building* ».

La fabrication digitale désigne un mode de production utilisant des données digitales pour contrôler, comme son nom l'indique, un processus de fabrication. Résultant de la coopération entre CAD (Computer-Aided-Design) et CAM (Computer-Aided-Manufacturing), elle repose sur des machines-outils commandées via des ordinateurs pour construire ou transformer des éléments conçus numériquement. Suivant un processus très efficace, la combinaison CAD/CAM est d'ailleurs un pilier du design industriel – particulièrement des industries automobile et aéronautique – depuis plus d'un demi-siècle. Des éléments allant du moteur au téléphone portable sont conçus et construits avec l'utilisation de logiciels de modélisation 3D. Des maquettes à échelle réduite sont ensuite fabriquées rapidement en utilisant des machines de prototypage rapide qui à partir de données digitales fabriquent des modèles physiques précis. Une fois le modèle numérique affiné et achevé, les données sont transférées à des machines contrôlées par ordinateur capable de produire des éléments à leur taille réelle, ainsi que des moules, obtenus à partir d'aluminium, d'acier, de bois ou encore de plastique. Cette pratique entièrement informatisée rationalise considérablement la production, en fusionnant des processus d'habitude compartimentés en amont ou en aval, et en éliminant des étapes intermédiaires entre le design et

la production finale. C'est probablement dans ces nouvelles logiques que se trouve le potentiel de rendre plus fluide le processus entre design et construction en architecture.

Cet aller-retour entre logiciels et tests physiques est désormais possible grâce à la maîtrise de plus en plus précise d'un outil, le robot. « *Dans un esprit purement Dadaïste, Gramazio & Kohler ont transformé le bras robotisé industriel en lui donnant un nouveau contexte (le studio de design architectural) et une nouvelle fonction (l'outil de l'artisan)* »¹⁸.

Le robot industriel est devenu standard dans l'automatisation précisément parce qu'à la manière des ordinateurs individuels, il n'a pas été optimisé pour une tâche unique, mais pour un large spectre d'applications. Plutôt que d'être contraint d'opérer avec les paramètres prédéfinis d'une machine spécialisée, il est maintenant possible de définir et de programmer la compétence « manuelle » d'un robot générique. « *On ne fait pas que le guider vers un point particulier dans l'espace, mais on détermine également ses capacités en vue de manipulations et de transformations d'ordre physique. En définissant la main du robot – également appelée « effecteur terminal » - et en déterminant ses mouvements, nous enseignons au robot un type de construction souhaité.*

18 EDGAR (Brenda Lynn), « A Short Biography of KR150 L110 », dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, p. 49. « *In true Dadaist spirit, Gramazio & Kohler have transformed the industrial robotic arm (an as-found artifact) by giving it a new context (the architectural design studio) and a new function (the craftsman's tool)* ».

EXPÉRIMENTATION D.I.Y

Nous lui apprenons à enregistrer son environnement grâce à des détecteurs, et à le toucher grâce à sa main. Le robot connecte par conséquent le monde immatériel de la logique avec le monde matériel de la construction, de la façon la plus directe »¹⁹.

R-O-B, le robot développé par Gramazio & Kohler, met en œuvre une approche de la robotique très différente de celle appliquée à la production industrielle classique. En utilisant un robot non seulement pour son automation mais aussi comme un outil de design, des processus uniques peuvent être opérés. Un processus de fabrication est la combinaison de plusieurs facteurs spécifiques - un matériau choisi, un outil le manipulant, et des données contrôlant l'outil - , il y a donc dans chaque projet une grande diversité de solutions et des techniques mises en jeu, où les procédés robotiques pourraient peut-être permettre des processus de construction adaptatifs et ainsi enrichir le domaine de la construction et de l'architecture.

A travers une robotique flexible, les procédés de construction et les manipulations matérielles, associés à la géométrie, sont donc les guides du design, et on peut ainsi envisager le développement d'une architecture innovante, comme interaction entre des intentions de design spécifiques, le contrôle des procédés de fabrication et des techniques adaptées.

Les modèles et les simulations sont aujourd'hui omniprésents. « *Que l'on se renseigne sur le changement climatique, sur les méthodes de prévisions météorologiques, sur les méthodes de l'archéologie expérimentale, sur les procédés de conception d'un avion, d'une voiture ou d'un immeuble, ou encore sur les méthodes de l'ingénierie de la connaissance – pour ne donner qu'une liste limitée de domaines très différents – on tombera à un moment ou à un autre sur des pratiques de modélisation et de simulation* »²⁰. A tel point que l'on peut se demander, dans certains cas, ce qu'est devenue la pratique expérimentale réelle et ce, dans la mesure où le recours à l'ordinateur a partout démultiplié les dimensions et les pouvoirs de la modélisation.

A cette question, des pratiques récemment définies et émergentes viennent apporter quelques éléments de réponse. Il s'agit de la construction des pavillons expérimentaux, conçus sur le mode du « Do It Yourself » (Fais-le toi-même). La typologie de ces pavillons conçus par des équipes de designers et chercheurs via des outils informatiques et paramétriques et avec une logique d'expérimentation « design-construction » à l'échelle 1 : 1, est une des plus intéressantes pour étudier

19 GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), op. cit. , p.9. « *We do not just steer it to a particular point in space, but also determine its capacities for physical manipulation and processing. By defining the robot's hand — also called the “end-effector” — and determining its movements, we teach the robot a desired type of construction. We teach it to register its surroundings through sensors, and to affect the environment through the robot hand. The robot thus connects the world of immaterial logic with that of material construction in the most direct way* ».

20 VARENNE (Franck), op. cit. , p. 1.

et comprendre les mécanismes, les interactions et les étapes qui relient le design digital CAD à la fabrication digitale CNC (Computer Numerical Control). En effet, l'objet premier de ces pavillons est souvent l'expérimentation matérielle, structurelle voire paramétrique. Ces pavillons ayant également pour vocation d'être construits, leur design confronte ainsi efficacité digitale et nécessité physique. Les architectes en charge de ces projets innoveront en imaginant de nouvelles techniques de fabrication et en les testant physiquement.

Le projet architectural prend alors la tournure d'une recherche de design appliquée, au cours duquel les architectes tentent de combiner design et fabrication digitale en vue d'effets spatiaux et formels ; et devient un prototype architectural : « *'Protoarchitecture' n'est pas un mot reconnu. Elle n'est pour cela qu'en partie réelle, et c'est en ce sens que je l'entends – en partie réelle et en partie idéale. Elle rappelle des propositions provoquées par vision plus que par commodité. Elle peut être plurielle ou singulière, évolutive ou révolutionnaire, temporaire ou permanente. Elle est à la fois une construction du physique et du virtuel. Elle ne se conforme pas, elle est, par définition, une exception. Pour rendre les choses plus claires, protoarchitecture est un dérivé de 'prototype', terme qui appelle des compréhensions courantes du design sur les questions de modélisation, d'expérimentation et de variation, la base pour d'autres choses, et ainsi de suite* »²¹.



Figure 2. Petting Zoo Prototype, FRAC Centre, Orléans, 2013 © Minimaforms (minimaforms.com).

tation et de variation, la base pour d'autres choses, et ainsi de suite »²¹.

L'échelle de ces pavillons ou de ces expérimentations structurelles permet d'appréhender bien mieux ce passage du virtuel au réel, du digital au matériel ; et surtout, leur diversité permet d'analyser les principales clés de ce processus. C'est dans ce contexte, et en parallèle de son projet Petting Zoo Prototype (Figure 2) que l'architecte Theodore Spyropoulos (Minimaforms, Londres) a fait le constat

21 SHEIL (Bob), "Protoarchitecture Between the Analogue and the Digital", dans *Architectural Design – Protoarchitecture : Analogue and Digital Hybrids*, vol. 78 - issue 4 (juillet - août 2008), sous la direction de Bob Sheil, John Wiley & Sons, p. 7. « *'Protoarchitecture' is not a recognised word. It is therefore only part real, and that is how I see it – part real, part ideal. It recalls propositions that are prompted by vision rather than convenience. It may be plural or singular, evolutionary or revolutionary, temporary or permanent. It is at once a construct of the physical and the virtual. It does not*



Figure 3. Radical Wood Pavilion, Design+Analysis Research Group, Shanghai, Chine, 2012 © Markus Wikar (<http://eerolunden.com/2012/12/18/radical-wood-pavilion/>).

du « *passage de la représentation aux prototypes* »²², lors de sa conférence pour le Colloque ArchiLab 2013 « Architecture et sciences : Une nouvelle naturalité ».

Sur la question de la matérialité, le Radical Wood Pavilion réalisé à la Aalto University of Helsinki par le Design+Analysis Research Group, témoigne de l'impossibilité d'un « workflow » unidirectionnel et linéaire passant de l'objet virtuel à l'objet réel. L'objectif pédagogique du projet était d'étudier et d'enseigner l'utilisation du

design computationnel et des méthodes d'analyse en architecture, l'ingénierie structurelle ainsi que l'utilisation de nouveaux matériaux et des méthodes de production contrôlées par ordinateur.

Le projet du Radical Wood Pavilion avait pour but précis de développer de nouvelles solutions innovantes et une nouvelle architecture pour la construction en bois, en gardant comme impératif sa construction en octobre 2012 à Shanghai pour la Radical Design Week (Figure 3).

conform; it is, by definition, an exception. To make things clearer, protoarchitecture is a self-made derivative of 'prototype', a term that conjures up more familiar understandings in design on matters of modelling, experimentation, versioning, the basis for other things, and so on ».

22 SPYROPOULOS (Theo), Conférence lors du Colloque ArchiLab « Architecture et sciences : Une nouvelle naturalité », Orléans, Octobre 2013, « *A shift from representation to prototypes* ».

La structure finale et en particulier certains éléments comme les bandes de contre-plaqué courbées, ont pris forme au cours d'un processus de design multidisciplinaire : brainstorming, essais de différentes formes sur les logiciels, constructions et tests de prototypes, analyses computationnelles des composants et tests expérimentaux. C'est de cet ensemble que résultent les solutions structurelles et architecturales du projet. L'influence sur le choix des matériaux, comme par exemple le choix du contre-plaqué, préféré au laminé, en est la preuve. « *Après plusieurs tests, ce contre-plaqué très fin s'est révélé être structurellement intéressant car sa*

flexibilité, permettant d'atteindre la courbure nécessaire aux éléments structurels, participe de la rigidité de l'ensemble de la structure par un procédé de pré-torsion. [...] Le contre plaqué a également joué un rôle architectural important car la torsion et la courbure d'éléments structurels crée la forme basique de la structure mais aussi beaucoup de détails pour les composants eux-mêmes »²⁵. Contrairement aux types de processus généralement associés au design computationnel, le modèle numérique à cette fois été guidé par les caractéristiques et les comportements physiques des matériaux, obtenus à partir des prototypes réalisés (Figure 4). Avec ces données,



Figure 4. Test et analyse structurelle des éléments en contre-plaqué du Radical Wood Pavilion, Helsinki, Finlande, 2012 © Markus Wikar (<http://eng.aalto.fi/en/current/news/view/2012-12-12-002/>).

25 NIIRANEN (Jarkko), “Wood transformed into pavilion“ [en ligne], 2012, « *Plywood proved to be a structurally challenging but also versatile material: the flexibility of thin plywood lent itself to twisting structural components, which served to give rigidity to the whole structure. Plywood also played an important architectural role: twisting and bending structural elements created both the basic form of the structure as well as many of the components' details* ». Extrait le 20 juin 2015 du site <<http://eng.aalto.fi/en/current/news/view/2012-12-12-002/>>.

une géométrie exploitant le potentiel du matériau utilisé a ainsi pu être développée. Le choix structurel et matériel, combiné à une tentative d'optimisation du projet, a donc été la source d'un aller-retour permanent entre CAD et CNC.

C'est en ce sens que l'équipe de recherche expérimentale du cabinet de conseil en ingénierie civile et structurelle Adams Kar Taylor (Londres) « p.art » (parametric applied research team) mentionne l'idée d'une seconde révolution digitale, qui « *iraît au delà des réalités de fabrication offertes actuellement par l'ordinateur qui permettent simplement aux designers de rationaliser ce qui a déjà été conçu* »²⁴.

Le projet du Swissbau Pavilion est de son côté très révélateur de l'évolution possible dans les processus de conception et de production architecturale. En effet, conçu pour exposer les résultats de la recherche du département CAAD de l'ETH Zürich durant l'exposition Swissbau à Basel en 2005, il est le premier projet dans lequel l'équipe de designers et chercheurs « designtoproduction » (Zürich) a intégré toutes les étapes entre le tout et ses parties, entre le design et la fabrication, en une chaîne continue de processus d'information digitale (Figure 5). A ce sujet, designtoproduction explique que « *toutes les structures architecturales ont cette chose en commun d'être une assemblée de nombreuses parties*

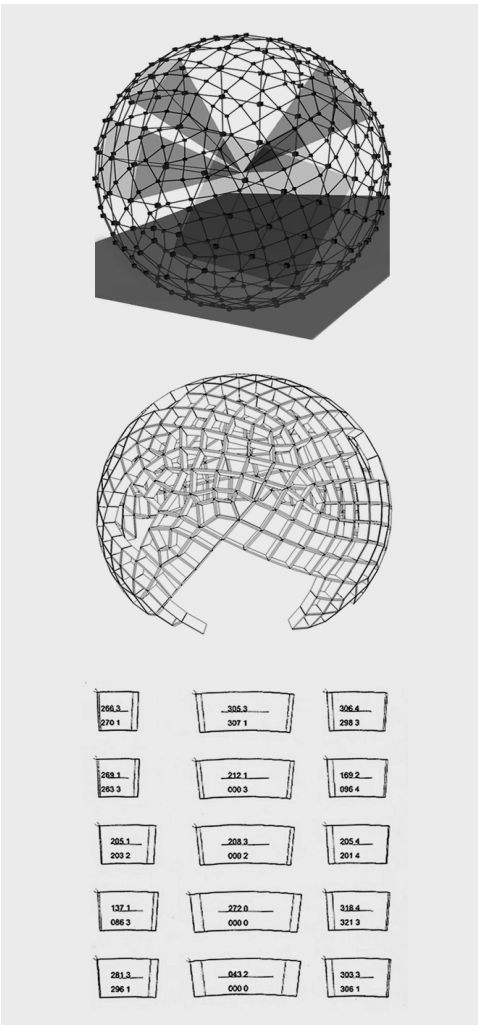


Figure 5. Différentes étapes de la chaîne digitale continue du Swissbau Pavillon, Basel, Suisse, 2005 © designtoproduction (www.designtoproduction.ch).

24 BRUCKERMANN (Olivier) pour p.art, "Digital Efficiency vs. Physical Necessity", dans *From Control to Design :Parametric/Algorithmic Architecture*, sous la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, p. 151. « *One that goes beyond the realities of fabrication currently offered by the computer that merely allows designers to rationalize what has already been conceived* ».

*unies ensemble [...] Les outils de modélisation informatiques aident à définir le tout, alors qu'une machine CNC fabrique des parties »*²⁵. Entre cet outil de modélisation et cet outil de fabrication existe donc un processus architectural complet incluant la décomposition en parties, l'optimisation selon différentes contraintes, le détail et la préparation de la fabrication.

Le pavillon est une sphère de quatre mètres de diamètre, composée de 320 composants en bois, chacun constitué de quatre planches en bois, placées perpendiculairement à la surface de la sphère. Alors que pour un dôme traditionnel, une structure régulière dicte la disposition des ouvertures, pour ce pavillon, la taille et l'angle des composants doit s'adapter au placement volontairement asymétrique des fenêtres. Une simulation de croissance interactive optimise les composants structurels en fonction des ouvertures et des contraintes structurelles. Les 1280 éléments constitutifs de la structure sont ensuite automatiquement détaillés et préparés pour la fabrication par un robot 5-axes.

Au cours de ce projet, l'équipe de design-to-production a distingué quatre étapes intermédiaires et interconnectées permettant de faire le lien entre le design digital et la fabrication digitale du projet. Ces étapes s'influencent mutuellement, du tout aux parties et des parties au tout jusqu'à ce qu'information et matérialité soient har-

monisées. La première étape consiste en l'organisation des relations entre le tout et ses parties via des modèles numériques paramétriques. Elle est suivie de l'optimisation du tout, dépendant des interrelations parmi ses parties, et ce à l'aide d'outils d'optimisation algorithmiques. Les parties doivent ensuite faire l'objet d'une simplification et d'une rationalisation afin de finaliser la conception. Il s'agit enfin d'une matérialisation de l'information afin de produire des données pour la fabrication des parties.

L'exemple de ces deux pavillons construits relativement récemment démontre donc le potentiel de la fabrication digitale à plusieurs niveaux : intégrée au processus de conception, elle favorise l'innovation et assure une meilleure maîtrise de l'ensemble du projet en permettant la production efficace de tests physiques, et utilisée en fin de chaîne, elle permet la production rationalisée d'éléments tous différents.

AU DELÀ DU NON STANDARD

Cette nouvelle manière d'appréhender le projet, la construction et la matérialité change profondément le design architectural. En effet, avec le concours des technologies CAD/CAM, la capacité à créer des composants différents avec la facilité

25 SCHINDLER (Christoph), SCHEURER (Fabian) & WALZ (Arnold) pour design-to-production, "The Whole and its Parts", dans *From Control to Design : Parametric/Algorithmic Architecture*, la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, p. 161. « *All architectural structures [...] have this one thing in common : they are assemblies of numerous parts joined together [...] CAD modeling-tools help to define the whole, while a CNC-machine fabricates parts* ».

et la rapidité de création d'éléments standardisés fait disparaître les restrictions pragmatiques traditionnelles du design, en permettant la « customisation » de masse. La production en masse d'éléments singuliers pouvant être articulée efficacement pour construire un tout complexe mène à ce que Bernard Cache définit comme la création d'un mode de production non-standard :

« [...] nous pouvons envisager des systèmes de deuxième génération dans lesquels les objets ne sont plus dessinés mais calculés. Alors l'usage de fonctions paramétriques nous ouvre deux grandes possibilités. En premier lieu ce mode de conception permet de projeter des formes complexes qu'on saurait difficilement représenter par le dessin. Au lieu des compositions de primitives ou des profils simples, nous aurons des surfaces à courbure variable et des volumes quelconques. Visualisée sur écran, la variation des paramètres de ces surfaces et de ces volumes génère une séquence vidéo, dont chaque arrêt sur image peut donner lieu à la production d'un objet. Ensuite ces systèmes de deuxième génération jettent les bases d'un mode de production non-standard. En effet l'écriture automatique des programmes d'usinage permet de fabriquer une forme différente pour chaque exemplaire d'une même série. On produit alors industriellement des objets uniques. Nous nommerons « subjectiles » les objets variables calculés comme des surfaces

*ouvertes, et « objectiles » les objets variables calculés comme des surfaces qui se rebouclent sur elles-mêmes et forment ainsi des volumes »*²⁶.

Les objets peuvent donc être paramétrés et calculés, mais aussi prototypés, testés et analysés numériquement, créant une boucle via laquelle la structure et la matérialité d'un élément peuvent être modifiées à volonté, jusqu'à ce qu'elles remplissent les contraintes du design et des performances attendues.

L'application de l'outil computationnel à la matière, en permettant l'optimisation et la rationalisation, permet ainsi la production d'une série de pièces uniques avec presque le même effort qu'il en faudrait pour produire en masse une série d'éléments identiques. Ces nouvelles méthodes de production ou de construction ont de plus révélé que la complexité et l'unicité des géométries conçues n'affecteraient que très peu les coûts de fabrication. L'agence d'architecture SHoP, basée à New-York, et dont les principaux architectes sont Christopher, Coren et William Sharples, Gregg Pasquarelli, John L. Mallie, Kimberly J. Holden et Vishaan Chakrabarti, maintient que le développement parallèle de la forme pour son projet Camera Obscura à Greenport (New York), utilisant des processus de fabrication standard pour des éléments de construction non standards a permis au design d'être compétitif économiquement,

26 CACHE (Bernard), *Terre meuble*, Ed. Hyx, Orléans, 1997, p.94 (première édition : *Earth Moves: The Furnishing of Territories*, Ed. M. Speaks, London : MIT Press, 1995, p. 87.).

lorsqu'il est comparé aux designs conventionnels utilisant des composants « off the shelf ».

Là où aucune solution standard n'est déjà disponible, une solution spécifique doit être trouvée. Et c'est ici que se trouve le réel avantage des outils computationnels (conception et fabrication confondues) : ce sont des machines universelles. Si le composant requis n'existe pas, la combinaison de ces différents outils permet de les produire spécifiquement pour un coût relativement proche de celui des composants industriels standards.

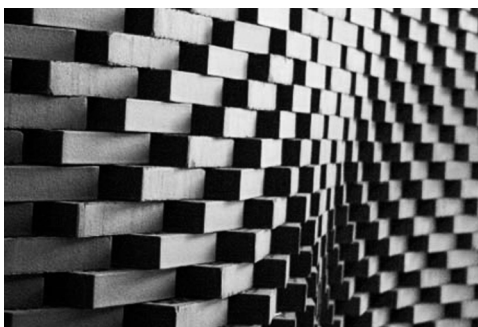
De ce point de vue, la fabrication digitale permet de dépasser les questions de standard et de non standard en favorisant l'innovation. En effet, si la possibilité du passage à un mode de production non standard est acceptée, la dé-standardisation des outils de fabrication constitue une révolution : pouvant être programmés, leur utilisation devient unique et spécifique. De nouvelles stratégies se développent pour explorer la diversité d'utilisations possibles de ces outils. Lisa Iwamoto a classé ces stratégies en cinq types différents : *sectionner*, *fragmenter*, *plier*, *profiler* et *former*²⁷. Ces dernières réfèrent toutes à l'articulation des surfaces, mais correspondent aussi à des stratégies digitales visant à rendre les processus de production plus intelligents, simples et rationnels. La mise en commun de ces logiques de fabrication et de la liberté qu'offrent ces nouveaux outils donne

un aperçu du potentiel de la fabrication digitale dans l'expérimentation matérielle et structurelle.

Dans cette perspective, certaines réalisations de Gramazio et Kohler illustrent par exemple comment les méthodes de constructions traditionnelles peuvent être digitalisées, manipulées, transformées et ré-imaginées, pour arriver à des résultats où le matériau lui-même semble réinterprété, et où ordre structurel et expression ornementale se confondent. Que ce soit le Programmed Wall (Figure 6.), le Sequential Wall (Figure 7.), ou le Resolution Wall (Figure 8.), tous possèdent en effet une qualité esthétique nouvelle, résultant de la complexité dans l'agencement de la matière et des composants qui forment un ensemble uni, logique et cohérent.

Bien que le résultat de ces opérations digitales soit novateur, les logiques de construction utilisées sont finalement restées assez proches des méthodes de construction connues. Ainsi, une critique pouvant être adressée aux travaux de Gramazio et Kohler est qu'à travers la manipulation de ces modes de construction traditionnels, leur travail semble s'être focalisé sur l'effet visuel produit, sans réellement révolutionner l'intérêt structurel des systèmes de construction étudiés. Le constat de Marc Angélil, sur l'émergence en architecture d'une « *tendance à reléguer la différence au domaine de l'apparence des surfaces, de la subtile manipulation*

27 IWAMOTO (Lisa), *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*, New York, Princeton Architectural Press, 2009, 144 pp.



De haut en bas : Figure 6. Programmed Wall (2006), Figure 7. Sequential Wall (2007), Figure 8. Resolution Wall (2008), Zürich, Suisse © Gramazio & Kohler (<http://www.gramaziokohler.com>).

de couches décoratives, et de l'effet produit par l'aspect spectaculaire d'une forme »²⁸, paraît en ce sens justifié et révélateur de l'orientation suivie par Gramazio & Kohler.

La fabrication digitale devrait justement permettre l'expérimentation du rapport entre structure et ornement, entre performance et esthétique. Ces technologies favorisent en effet une pratique alternative de l'architecture, qui devrait repenser les solutions constructives utilisées jusqu'ici pour en développer de nouvelles.

A une échelle certes très différente de celles auxquelles les architectes ont l'habitude d'être confrontés, le travail de recherche mené par Norbert Palz (CITA - Centre for Information Technology and Architecture, Copenhague) explore de nouvelles applications des technologies de fabrication additive pour la création de matériaux définis numériquement.

En bénéficiant de la précision et de la vitesse des outils de fabrication digitale, mais aussi de la complexité des éléments qu'ils sont capables de produire, l'objectif est de développer des systèmes structurels du matériau lui-même, contrôlés numériquement et avec des variations locales qu'il serait très difficile, voire impossible d'obtenir avec les technologies de fabrication conventionnelles. Les expériences physiques conduites visent à créer des *« matériaux hétérogènes avec une rigidité graduée, une performance dynamique définie localement, et une hiérarchie structurale »*.

28 ANGELIL (Marc), "Interjections I", dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, p. 35. « [...] tendency to relegate difference to the domain of surface appearances, to subtle manipulations of decorative layers, and to the effect of spectacular form-to the point of indifference ».

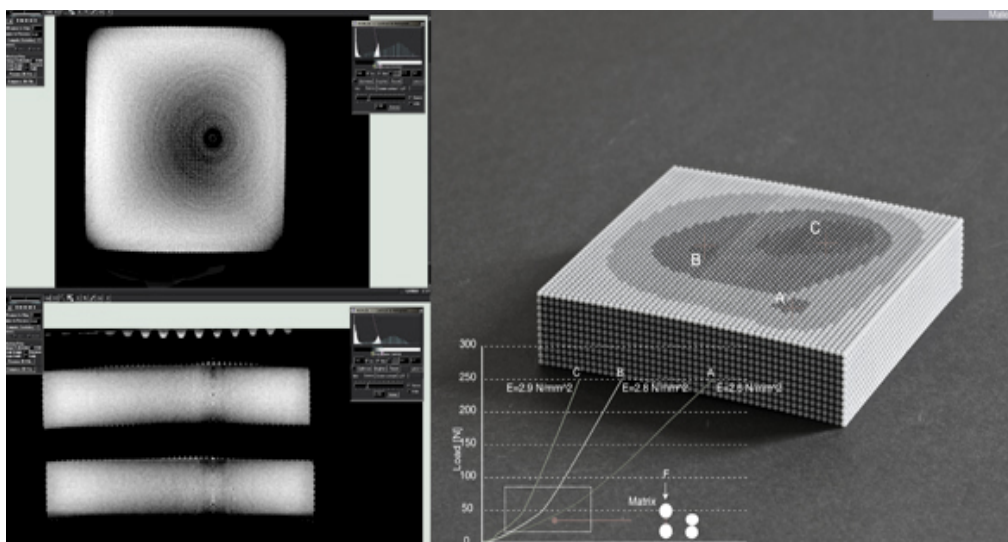


Figure 9. Tomographie et détail d'un échantillon constitué d'un polymère aux propriétés hétérogènes et fabriquée via un processus additif, Copenhague, Danemark, 2009 © Norbert Palz (cita.karch.dk).

relle »²⁹. Appliquée à l'architecture, une telle technique de fabrication permettrait d'envisager l'échelle microscopique de la composition des matériaux et l'échelle macroscopique des systèmes matériels comme un continuum, et ouvre ainsi un vaste champ de recherche, puisque la plupart des matériaux présentent un comportement non-linéaire lorsqu'ils sont exposés à des influences et des forces environnementales dynamiques.

Plus spécifiquement, un des projets menés par Palz est orienté sur les procédés de fabrication textile et a pour objectif d'étudier le contrôle paramétrique de la perfor-

mance matérielle à l'échelle de l'aiguille. Il tente ainsi d'étendre les techniques de fabrication spécifiques au domaine en convertissant des méthodes analogues existantes en informations digitales permettant l'impression de couches successives via des outils de prototypage rapide.

L'intégration de la connaissance existante de cet artisanat se fait directement dans les relations des paramètres qui configurent les différentes situations présentes dans les structures complexes que sont les structures textiles. Ce projet repense l'outillage et la connaissance historique de cet artisanat en étendant l'expression maté-

29 PALZ (Norbert), *Emerging Architectural Possibilities of a Tuneable Materiality through Additive Fabrication Technologies* [en ligne], Thèse de doctorat, Copenhague, 2012, « *heterogeneous materials with a graded stiffness, a locally defined dynamic performance and a structural hierarchy* ». Extrait le 14 juin 2015 du site <<http://cita.karch.dk/Menu/PhD+Projects/Norbert+Palz>>.

rielle et sa conceptualisation avec l'aide du design computationnel, mais aussi en étudiant les performances structurelles grâce à différentes méthodes d'analyse, comme la tomographie par exemple (Figure 9). La démarche de Palz, en intervenant directement sur l'organisation interne du matériau exploré et en agissant à la fois sur son apparence et ses performances, apporte peut-être un début de réponse à l'« interjection » d'Achim Menges :

« Conduites par des processus génératifs et évolutifs, ces technologies permettent des systèmes de constructions très perfectionnés, qui, en interaction avec l'environnement lumineux, acoustique et thermique, offrent une richesse spatio-temporelle qui, pour être maîtrisée et appréhendée, nécessite des compétences, une sensibilité et une approche intellectuelle différentes. Comment les architectes peuvent-ils utiliser ces opportunités et challenges comme des manière de re(penser) l'architecture, plutôt que de seulement avancer notre manière de construire ? »³⁰.

30 MENGES (Achim), "Interjections II", dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, p. 58. *« Being driven by truly generative, evolutionary processes they enable highly articulated material and construction systems, which in interaction with the luminous, acoustic and thermal environment, open up a tempo-spatial richness that requires a different skill set, sensitivity and intellectual approach to be comprehended and instrumentalized. How can designers embrace these opportunities and challenges as modes of (re)thinking architecture rather than just advancing the way we build ? ».*

NOUVEAUX PROCESSUS, NOUVELLES STRATÉGIES

L'ARCHITECTE, ARTISAN DIGITAL ?

Sur la question du rôle de l'architecte dans la sphère digitale et du potentiel qui lui est offert, l'architecte et chercheuse britannique Joanne Aitchison considère que « *les processus intervenant dans la sphère de l'architecture digitale semblent de plus en plus réduire la distance entre l'« architecte-penseur » et l'« artisan-constructeur ». Les architectes apprennent des ingénieurs, des constructeurs, des programmeurs et cela d'une manière collaborative qui semble pourtant en désaccord avec l'image traditionnelle de l'architecte-artiste. Ces processus modifient également l'approche que les architectes peuvent avoir du design : concevoir et fabriquer semblent étroitement liés de part l'intégration de ces processus de fabrication au sein de la conception et de la démarche d'apprendre via l'expérimentation* »⁵¹.

Cependant, comme l'expliquait Christopher Alexander, concevoir en architecture c'est « *penser en systèmes : tous les aspects*

de la forme, élément ou motif, peuvent être interprétés comme une structure de composants, les plus grands spécifiant le motif de distribution des petits, et eux-mêmes, spécifiant une nouvelle fois l'arrangement et la distribution de plus petits composants encore »⁵². Là où les corps d'artisans construisent des composants et développent les potentiels individuels, leur coordination et développement en un système est donc pensé par l'architecte. Pour Sean Ahlquist et Achim Menges, « *Alexander décrit un système focalisé sur un comportement général rendu possible par l'« interaction entre les composants ». Le comportement du système n'émerge que par la dynamique des interactions entre les composants* »⁵³. C'est cette poursuite d'un système au delà du composant qui continue de séparer les architectes des artisans. A l'ère du digital, l'architecte n'est donc pas un artisan mais celui capable d'appliquer le raisonnement de l'artisan à la fabrication digitale.

Pour Menges, « *employer un tel système computationnel interroge la nature des*

51 AITCHISON (Joanne), *Craft Thinking & Digital Making, The Role of the Architect in the Digital Era* [en ligne], Thèse de doctorat, 2009, p. 38. « *Digital processes would appear to illustrate a closing of the distance between the architect-thinker and craft-maker. Architects are learning from mechanical engineers, fabricators, computer programmers and each other in a collaborative fashion which is at odds with the singling out and authorship of the architect-the-artist. Digital processes also embody a shift in the design approach of digital architects – thinking and making appear closely linked both through the incorporation of the fabrication process into the design and learning through testing and experimentation* ». Extrait le 2 août 2013 du site <<http://www.frrarchitects.co.uk>>.

52 ALEXANDER (Christopher), *Notes on the Synthesis of Form*, Cambridge, Harvard University Press, 1964, p. 130. « *Systems thinking : Every aspect of form, whether piecelike or patternlike, can be understood as a structure of components. Every object is a hierarchy of components, the large ones specifying the pattern of distribution of the small ones, the small ones themselves, though at first sight more clearly piecelike, in fact again patterns specifying the arrangement and distribution of still smaller components* ».

53 AHLQUIST (Sean) & MENGES (Achim), "Preface", dans *Architectural Design Reader – Compu-*

*approches du design établies actuellement, mais n'implique pas le retrait de l'architecte en faveur de la computation. Au contraire, cela souligne l'importance du designer dans un rôle alternatif, central afin de permettre, de modérer et d'influencer les processus de design réellement intégraux, et qui requiert de nouvelles compétences et sensibilités »*⁵⁴.

Cela implique-t-il la maîtrise de nouveaux outils ? Est-il par exemple nécessaire pour les architectes de comprendre les processus algorithmiques et le script ? Beaucoup considèrent qu'il serait plus évident pour l'architecte de collaborer avec un ingénieur en informatique pour effectuer ces derniers. Cela permettrait à chaque professionnel de faire ce qu'il fait de mieux : l'architecte de concevoir, et le programmeur d'écrire des logiciels répondant aux besoins de l'architecte. Mais Casey Reas, artiste américain dont le travail conceptuel explore l'idée à travers les logiciels et ayant collaboré au développement du programme Processing, réfute cette idée en opposant des situations similaires entre artistes et programmeurs durant les

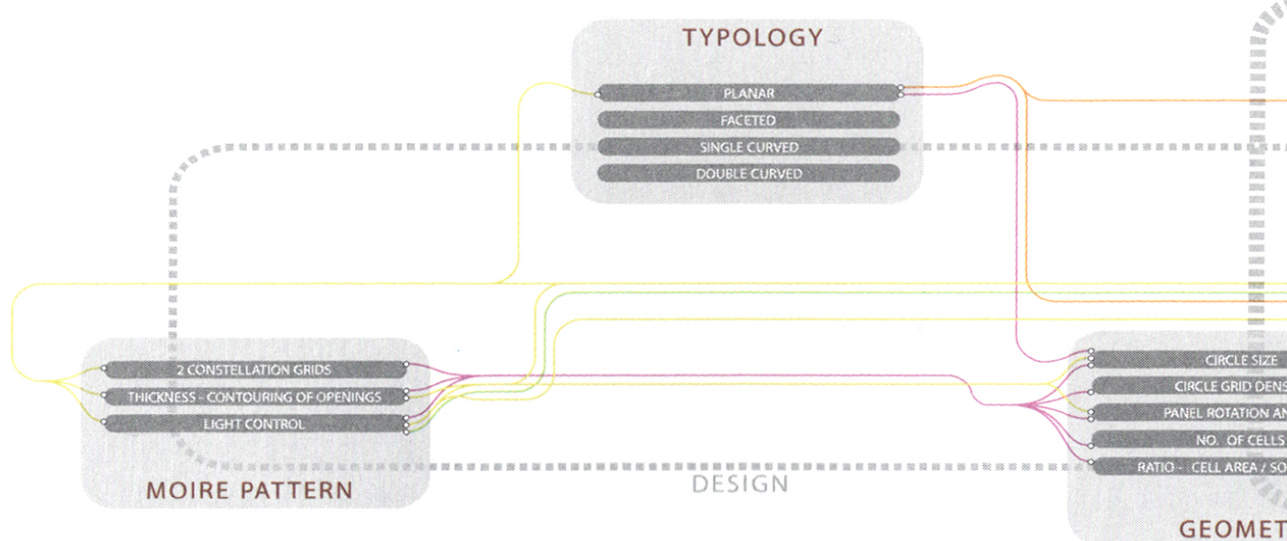
années 1960. La plupart de l'art généré via des ordinateurs à cette période était produit en collaboration entre artistes et scientifiques, et il était difficile pour les artistes de décrire ce qu'ils souhaitaient que le scientifique effectue. Reas considère que « *tout artiste doit décider si il ou elle travaille en collaboration ou directement avec le logiciel... Travailler directement avec le code mène à une meilleure compréhension du potentiel du médium* »⁵⁵.

De manière similaire, il est aussi important pour l'architecte d'être capable d'écrire son propre code afin de profiter pleinement de ses bénéfices et de pouvoir exprimer précisément ce qu'il veut plutôt que de ne le traduire à un programmeur. Car la situation est relativement semblable pour l'architecte : pour passer du design à la construction, il est nécessaire de traduire des données graphiques de dessins 2D et de modèles 3D en données digitales qu'une machine CNC puisse comprendre. Cela nécessite que les architectes apprennent un nouveau langage. Certains aspects de cette traduction sont presque automa-

tational Design Thinking, sous la direction de Achim Menges et Sean Ahlquist, John Wiley & Sons, 2011, p. 15. « *Alexander describes a system as that which focuses on an overall behaviour accomplished through the « interaction among parts ». The system behaviour emerges only in the dynamics of the interactions of the parts* ».

54 MENGES (Achim), "Integral Formation and Materialisation – Computational Form and Material Gestalt", dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction d'Achim Menges et de Sean Ahlquist, John Wiley & Sons, 2011, p. 207. « *Employing such a computational framework challenges the nature of currently established design approaches, yet it does not invoke the retirement of the architect in favour of computation. On the contrary, it highlights the importance of the designer in an alternative role, one that is central to enabling, moderating and influencing truly integral design processes and requires novel abilities and sensitivities* ».

55 REAS (C.E.B.), "Process/Drawing", dans *Architectural Design - Programming Cultures: Architecture, Art and Science in the Age of Software Development*, vol. 76 – issue 4 (juillet – août 2006), p. 33. « *every artist must decide whether he or she will work collaboratively or directly with software... working directly with code leads to a deeper understanding of the conceptual potential of the medium* ».



tiques et font appel à l'usage de logiciels spécifiques à certaines machines ; d'autres sont beaucoup plus dans la logique de design elle-même : les décisions telles que le choix des machines et méthodes à utiliser doivent permettre d'adapter les intentions aux capacités des machines. Il est donc devenu nécessaire pour les architectes de comprendre comment ces outils fonctionnent, pour quels matériaux ils sont les plus adaptés, et où les possibilités existent dans le processus de fabrication, afin de maîtriser le développement d'un design computationnel impliquant la simulation et la programmation.

Plus que de redéfinir le rôle de l'archi-

tecte, il faut accepter le rôle essentiel de l'ordinateur comme outil indispensable. Combiné aux machines comme le robot, il représente surtout un moyen stratégique de redonner à l'architecte la possibilité de maîtriser ce qu'il dessine en le fabriquant.

FABRIQUER POUR CONCEVOIR ?

« Ce que ni l'homme sage, ni le voyant n'avait anticipé, ce sont les développements miraculeux que cette formulation (la formulation de l'arithmétique) a par la suite entraînés. En comprenant d'abord la forme

36 ALEXANDER (Christopher), op. cit. , pp .133-134. « What neither the wise men nor the seers foresaw, however, was the miraculous developments that this formulation [the formulation of arithmetic] later led to. By first understanding the shape of the technique which produced the form of the result, man found further insight. He found that it is not only the result which is important, but the process too. Not only the form of the results, but the form of the path which led to them ».

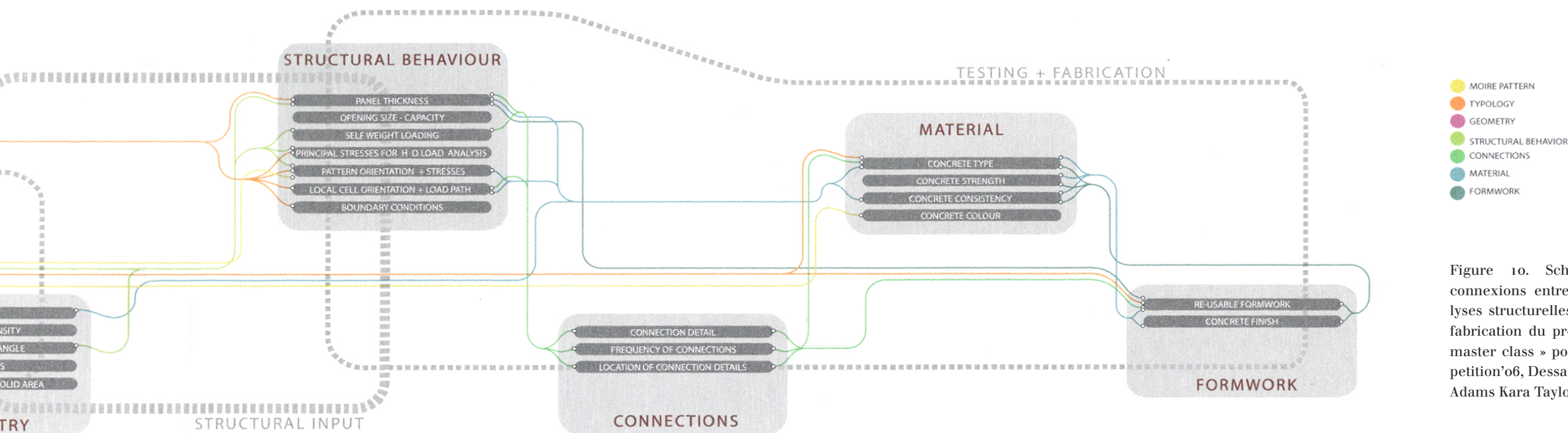


Figure 10. Schéma illustrant les connexions entre le design, les analyses structurales et les processus de fabrication du projet de la « concrete master class » pour la Concrete Competition'06, Dessau, Allemagne, 2006 © Adams Kara Taylor / p.art

de la technique qui produisit ensuite la forme du résultat, l'homme trouva une vision plus profonde. Il trouva qu'il n'y a pas que le résultat d'important, et que le processus l'est aussi. Pas seulement la forme des résultats, mais la forme du chemin qui y a mené »⁵⁶.

Peut-on produire pour concevoir ? En d'autres termes, peut-on réellement envisager d'utiliser la fabrication digitale dans la conception d'un projet architectural ? La notion de processus prend ici toute son importance.

La réalisation des prototypes échelle 1 : 1 évoquée précédemment est la preuve que

la digitalisation de l'architecture peut aujourd'hui s'accompagner d'un double processus : conception/design et production/construction ; la particularité étant que les idées et connaissances liées à la production peuvent être incorporées directement au moment de la conception grâce à l'intervention de la fabrication digitale. « En tant que designers, il est nécessaire que nous cultivions les processus pour intégrer la fabrication de matériaux complexes au sein de la sphère paramétrique. L'utilisation des techniques d'examen et des méthodes d'évaluation provenant de l'ingénierie structurale, discipline fondée sur l'exploration et le test de la matière, constitue une clé pour l'introduction de restrictions consistantes et

précises sur les formes paramétriques. Ces dernières permettent la génération de nouveaux médiums, la création de matériaux, et permettent la mesure des performances »⁵⁷.

Dans cette ère de la « tectonique digitale »⁵⁸, avec des techniques de conception et des formes de production digitalisées, le challenge est de définir de nouveaux scénarios d'usage de cette combinaison entre processus génératif et fabrication digitale, de l'intégration de connaissances matérielles et constructives et du développement d'un sens de l'esthétique au sein de ce médium combiné. « Les questions de structure et de comportement des matériaux ne peuvent plus être si facilement séparées de l'orne-

ment et de l'esthétique »⁵⁹.

En ce sens, le double workshop mené par AKT (Adams Kara Taylor) pour la International Concrete Competition'06 et le Fibrous Pavilion Workshop'07 est intéressant. Alors que l'un était focalisé sur des questions spécifiques de matérialité, de cinématique et de structure, l'autre étudiait les structures paramétriques conjointement à leur équivalent physique. Explorer le paramétrique dans le contexte de la matérialité et inversement, explorer la matérialité dans la sphère paramétrique avait pour but de questionner le processus digital dans son ensemble, ainsi que la possibilité des interactions avec la fabrication (Figure 10).

57 BRUCKERMANN (Olivier) pour p.art, "Digital Efficiency vs. Physical Necessity", dans *From Control to Design : Parametric/Algorithmic Architecture*, sous la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, p. 151. « We as designers need to cultivate processes for intricate material crafting within the parametric realm. The utilization of techniques of examinations and methods of evaluation from structural engineering, a discipline founded on the exploration and testing of matter is key for the introduction of consistent and precise material restrictions to 'parameterized' forms.

These allow for the generation of mediums for creating materials, and allow for the measurement of performance ».

58 LEACH (Neil), "Interjections I", dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, p. 35. « digital tectonics ».

59 LEACH (Neil), *ibid.*, p. 35. « Questions of structure and material behaviour can no longer be divorced so easily from ornament and aesthetics ».

Le premier projet « Material to Parametric » illustre le rôle déterminant que les tests physiques peuvent avoir au cours de la conception d'un projet. C'est en effet l'« *incident intéressant* »⁴⁰ et donc imprévisible qui s'est produit lors de la manipulation des plaques de béton percées, en créant des jeux de lumière et de réflexion, qui a guidé les étudiants vers la conception du projet final.

Le second projet « Parametric to Material » démontre la possibilité d'un échange efficace entre design digital et test physique. Ce sont en effet les prototypes réalisés à partir de modèles numériques paramétriques, qui ont permis de se rendre compte des failles du design initial, mais surtout de modifier et ré-informer ce dernier via le modèle numérique afin qu'il soit « *cohérent structurellement et qu'il puisse conserver les caractéristiques qualitatives révélées par le modèle physique* »⁴¹.

Une nouvelle approche du projet architectural consisterait donc à s'employer à utiliser les potentiels des nouvelles technologies afin d'informer le processus de conception et de maîtriser l'évolution du

design et d'y combiner l'expérimentation à l'échelle 1 : 1. Cette approche va en faveur de ce Michael Speaks, professeur d'architecture à l'Université du Kentucky, a nommé design intelligence: « *fabriquer devient connaissance ou intelligence de création. De cette manière, penser et faire, conception et fabrication, et prototype et design final s'entremêlent, deviennent interactifs et prennent part à un processus d'innovation non linéaire* »⁴².

Introduire la fabrication digitale et l'expérimentation physique dans la conception d'un projet architectural nécessite de repenser son processus en profondeur. En effet, si depuis plusieurs années, les procédés de représentation, en passant de l'analogique au digital, ont considérablement évolué, les processus de conception sont en revanche restés très classiques. A l'ère du post-digital, la manière dont nous concevons est donc devenue aussi importante que ce que nous concevons.

Deux approches distinctes sont principalement utilisées, l'approche « top-down » et l'approche « bottom-up ». L'approche « top-down », utilisée par la plupart des

40 CHAN (Mei) & SERTZU (Adiam) pour p.art, "Workshop", dans *From Control to Design :Parametric/Algorithmic Architecture*, sous la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, p. 154. « *interesting incident* ».

41 CHAN (Mei) & SERTZU (Adiam) pour p.art, "Workshop", dans *From Control to Design :Parametric/Algorithmic Architecture*, sous la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, p. 157. « *structurally successful and also [...] able to retain some of the qualitative features e discovered the physical model to have embodied* ».

42 SPEAKS (Michael), Conférence "Design: Intelligence vs. Ideology" [en ligne], Hong-Kong, février 2012, « *Making becomes knowledge or intelligence creation. In this way, thinking and doing, design and fabrication, and prototype and final design become blurred, interactive, and part of a non-linear means of innovation* ». Extrait le 10 août 2013 du site <<http://fac.arch.hku.hk/event/michael-speaks-design-intelligence-vs-ideology/>>.

architectes qui pratiquent aujourd'hui, est une méthode linéaire et conduite hiérarchiquement. Elle consiste en une prise de parti initiale, une idée forte, progressivement rationalisée et affinée au cours de phases successives. L'approche « bottom-up », comme son nom l'indique, correspond au raisonnement inverse de l'approche « top-down ». Souvent associée au design génératif, elle peut être décrite comme la combinaison et l'assemblage de composants plus petits, dans le but de créer un système plus grand et élaboré.

Dans sa thèse, Alex Hogrefe soutient que, « *les technologies digitales ont la possibilité d'inverser, de réarranger et de modifier les processus de conception analogues communs. La plupart des architectes pratiquant aujourd'hui conservent un processus linéaire, limitant la flexibilité et la liberté dans les phases intermédiaires du design. L'introduction au design paramétrique et génératif via le script modifie le processus de conception en parcours non linéaire qui étend la manipulation des idées et l'exploration jusque tard dans le développement du projet* »⁴³. Ainsi, là où les processus conventionnels passent du design à la

rationalisation et enfin à la représentation d'une manière linéaire, les méthodes paramétriques permettent aux designers de revenir en arrière, de la rationalisation au design, ou de la représentation à la rationalisation. Cela permet d'envisager plusieurs alternatives, et de les tester avec très peu d'efforts. En intégrant les techniques génératives et paramétriques, il est alors possible d'éviter des processus de conception linéaires et finalement très peu flexibles, pour entrer dans une exploration bien plus riche des possibilités rattachées au design.

Si on quitte un instant les réalisations purement expérimentales et les projets de pavillons D.I.Y, pour penser l'intégration de la fabrication digitale dans les processus de conception de projets d'architecture d'échelle plus importante, combiner les deux approches mentionnées précédemment paraît être une piste envisageable. Selon Lynn, « *la relation entre un tout et ses parties est essentielle dans l'évaluation de la qualité, du sens et de l'expérience de n'importe quel projet architectural* »⁴⁴. C'est justement cette relation qu'il convient de redéfinir si les processus doivent évoluer.

43 HOGREFE (Alex), *Evaluating the Digital Design Proces : Bottom-up vs. Top-down* [en ligne], Thèse de doctorat, Faculty of Miami University, Oxford, Ohio, 2010, p. 5. « *Digital technologies have the ability to reverse, rearrange, and modify common analog design processes. Today's practicing architects still generally maintain a linear process, limiting flexibility and freedom in intermediate design steps. The intrduction of parametric and generative design through scripting alters the design process into a non linear path that extends idea manipulation and exploration late into the project development. A look at both the bottom-up approach and the top-down-approach reveal a deeper understanding of common digital typologies* ». Extrait le 2 juillet 2013 du site <<http://sc.lib.muohio.edu/handle/2374.MIA/4440>>.

44 ROCKER (Ingeborg), "Calculus-based form: an interview with Greg Lynn", dans *Architectural Design - Programming Cultures: Architecture, Art and Science in the Age of Software Development*, vol. 76 – issue 4 (juillet – août 2006), John Wiley & Sons, pp. 88-97. « *The relationship between parts and whole is essential to the evaluation of quality, meaning and experience of any architectural design* ».

Pour des architectes associant le projet architectural à une logique d'exploration, d'expérimentation, et d'innovation matérielle, physique et structurelle ; la fabrication digitale se montre extrêmement efficace lorsqu'elle est associée aux designs paramétriques et/ou génératifs qui, par leur liberté et flexibilité, permettent l'aller-retour entre tests physiques et design.

Un projet dont la conception est compatible avec la fabrication digitale est donc un projet géré de manière paramétrique, mais dans lequel, à la différence du design digital expérimental, le produit paramétrique est considéré comme un composant et non comme un tout. Cette façon « bottom-up » de penser, qui partage des ressemblances avec le travail collaboratif des artisans et consiste à travailler des parties vers un tout, doit s'accompagner d'une vue d'ensemble sur l'approche et le projet.

Développer une approche alternative du design, où la matérialité d'un projet peut être envisagée et testée via la fabrication digitale au sein même de son processus de conception, appelle donc finalement à un équilibre entre des logiques de conception « classiques » d'un projet d'architecture, liées au développement et à l'enrichissement d'une idée, d'un concept ; et des

logiques rattachées aux processus génératifs et adaptées aux expérimentations physiques, matérielles et structurelles.

Ces logiques, DeLanda les distingue comme deux philosophies du design opposées : « *d'après une certaine philosophie, l'un considère la forme ou le design comme essentiellement conceptuel et cérébral, quelque chose générée comme une pure pensée, isolée du monde désordonné de la matière et de l'énergie. Une fois le design conçu, une forme physique peut lui être donnée simplement en lui imposant un substrat matériel, envisagé comme homogène, obéissant et réceptif aux volontés de l'architecte. [...] La position opposée pourrait être associée à une philosophie du design d'après laquelle les matériaux ne sont pas des réceptacles inertes pour une forme cérébrale imposée de l'extérieur; mais des participants actifs dans la genèse de la forme. Cela implique l'existence de matériaux hétérogènes, aux propriétés et particularités variables que l'architecte doit respecter et dont il doit faire une part intégrale du design qui par conséquent, ne peut devenir une routine* »⁴⁵.

C'est pourtant par le développement du rapport entre ces deux processus que peut s'effectuer la synthèse entre conception, génération formelle et matérialisation.

45 DELANDA (Manuel), "Philosophies of Design – The Case of Modelling Software", dans *Verb Processing : Architecture Boogazine*, sous la direction de Jaime Salazar, Barcelone, Actar-D, 2001, p. 132-33. « *In one philosophy, one thinks of form or design as primarily conceptual or cerebral, something to be generated as a pure thought in isolation from the messy world of matter and energy. Once conceived, a design can be given a physical form by simply imposing it on a material substratum, which is taken to be homogenous, obedient and receptive to the wishes of the designer. [...] The opposite stance may be represented by a philosophy of design in which materials are not inert receptacles for a cerebral form imposed from the outside, but active participants in the genesis of form. This implies the existence of heterogeneous materials, with variable properties and idiosyncrasies which the designer must respect and make an integral part of the design which it follows, cannot be routinized* ».

DIGITALISATION DE LA MATIÈRE ET PERSPECTIVES

FEEDBACK ET EMPIRISME

Si le passage d'un modèle informatique à un prototype physique est rendu possible par les techniques et technologies associées à la fabrication digitale, envisager le rôle de ce prototype dans la conception d'un projet est en revanche dépendant du processus inverse, à savoir la digitalisation de la matière.

Un des circuits d'information indispensables dans ce processus est donc la capacité dont dispose le prototype à « communiquer » avec l'architecte, et à constituer ce que l'on appelle un feedback. Pour Ludwig Von Bertalanffy, créateur de la Théorie des

Systèmes, « là où le système est en constante transformation, [un feedback] instaure un mécanisme par lequel l'information est réinvestie dans le système afin de permettre un rééquilibrage et un re-calibrage constants de son état de fonctionnement »⁴⁶; et dont la boucle peut être représentée par le schéma ci-dessous (Figure 11).

« Le système comprend d'abord un récepteur, ou 'organe sensoriel', pouvant être une cellule photoélectrique, un écran de radar, un thermomètre, ou un organe sensoriel au sens biologique du terme. Le message peut être un courant faible dans les appareils technologiques, ou représenté par une conduction nerveuse dans un organisme vivant, etc. Il y a ensuite un centre

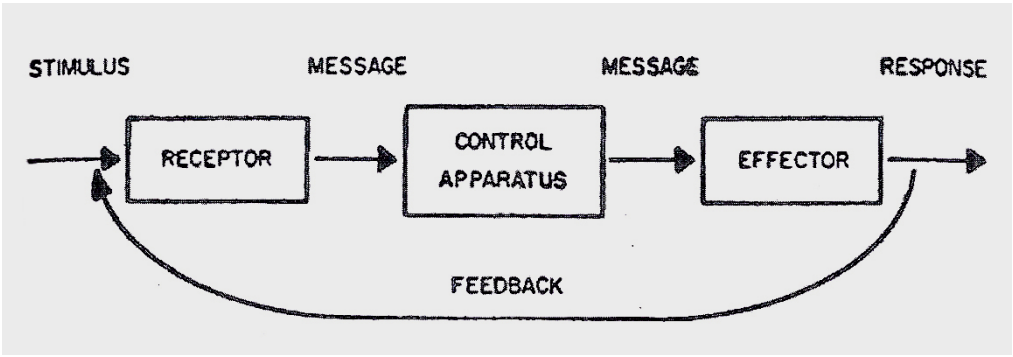


Figure 11. Schéma d'un simple feedback, Ludwig Von Bertalanffy, ré-imprimé pour publication originale, 1950 © George Braziller.

46 VON BERTALANFFY (Ludwig), "The Meaning of general System Theory", dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction de Achim Menges et Sean Ahlquist, John Wiley & Sons, 2011, p. 50. « whereby the system is in constant transformation, poses a mechanism by which information is reinvested into the system to provide a constant rebalancing and recalibration of its functioning state ».

recombinant les messages entrants pour les transmettre à un effecteur, qui consiste en une machine comme un moteur électrique, un radiateur de chauffage ou un solénoïde, ou en un muscle qui répond au message entrant de telle manière qu'il y ait production d'énergie. Enfin, le fonctionnement de l'effecteur est renvoyé au récepteur, ce qui permet au système de s'autoréguler, c'est-à-dire de garantir sa stabilisation ou sa direction d'action »⁴⁷.

La conception d'un projet architectural s'articule selon un cycle de génération de solutions possibles à un problème ou objectif donné, à travers la poursuite, le test et l'approfondissement de différentes alternatives. Au cours de ce développement, les différents outils mis en œuvre ont pour point commun le feedback permettant d'affiner une solution ou d'en rechercher de nouvelles. Dans les phases initiales d'un projet développé avec des outils computationnels, l'architecte reçoit d'abord essentiellement un feedback visuel et géométrique provenant de la visualisation du modèle digital.

Le processus de digitalisation de la matière évoqué précédemment implique en revanche un autre type de feedback, matériel. L'objectif de la fabrication (digitale ou analogue) d'un prototype ne se limitant

pas à la seule production physique d'une modélisation informatique, il doit en effet être possible de le tester pour valider les informations relatives à ses performances et à son comportement structurel, mais aussi pour obtenir de nouvelles données, dépendantes du processus de fabrication, des outils utilisés, des caractéristiques des matériaux et des assemblages qui le composent. Ces dernières, une fois « digitalisées », peuvent ainsi être rendues exploitables dans le développement du projet.

A la différence d'un feedback entièrement électronique, un feedback matériel suppose le passage d'un stimulus physique à une réaction matérielle devant être convertie électroniquement ou numériquement afin qu'elle puisse être lue, quantifiée, évaluée et interprétée.

En se replaçant dans la perspective et la logique d'un design architectural expérimental, la part d'empirisme associée au test d'un prototype et matérialisée par l'existence de ce feedback primaire constitue une clé dans la possibilité de simuler informatiquement le comportement structurel et les performances matérielles d'un système.

Dans le studio de projet master « introduction à la robotique » (octobre 2013 - jan-

47 VON BERTALANFFY (Ludwig), op. cit. , p. 52. « *The system comprises first, a receptor or 'sense organ', be it a photoelectric cell, a radar screen, a thermometer, or a sense organ in the biological meaning. The message may be, in technological devices, a weak current, or, in a living organism, represented by nerved conduction, etc. Then there is a center recombining the incoming messages and transmitting them to an effector, consisting of a machine like an electromotor; a heating coil or solenoid, or of a muscle which responds to the incoming message in such a way that there is power output of high energy. Finally, the functioning of the effector is monitored back to the receptor, and this makes the system self-regulating, ie, guarantees stabilisation or direction of action* ».

vier 2014), encadré par Philippe Morel et Félix Agid (EZCT, Paris), la fabrication et l'évaluation de modèles physiques intermédiaires durant la phase de conception a ainsi été décisive, et ce pour deux raisons : d'une part, s'agissant d'une recherche, l'utilisation de prototypes physiques était nécessaire pour appréhender le système conçu et envisager de le développer et de l'optimiser ; d'autre part, lors du passage à la simulation du comportement structurel du système, ces prototypes se sont révélés indispensables pour le calibrage et la validation des résultats obtenus informatique-

ment, mais aussi pour être capable, à partir des données recueillies, de rapprocher le comportement observé de principes physiques et mathématiques.

A posteriori, cette rationalisation doit permettre d'apporter des modifications au système dans le modèle digital, et d'évaluer les conséquences sur son comportement directement via la simulation informatique.

Avec pour objectif de travailler sur les structures cinétiques et les surfaces

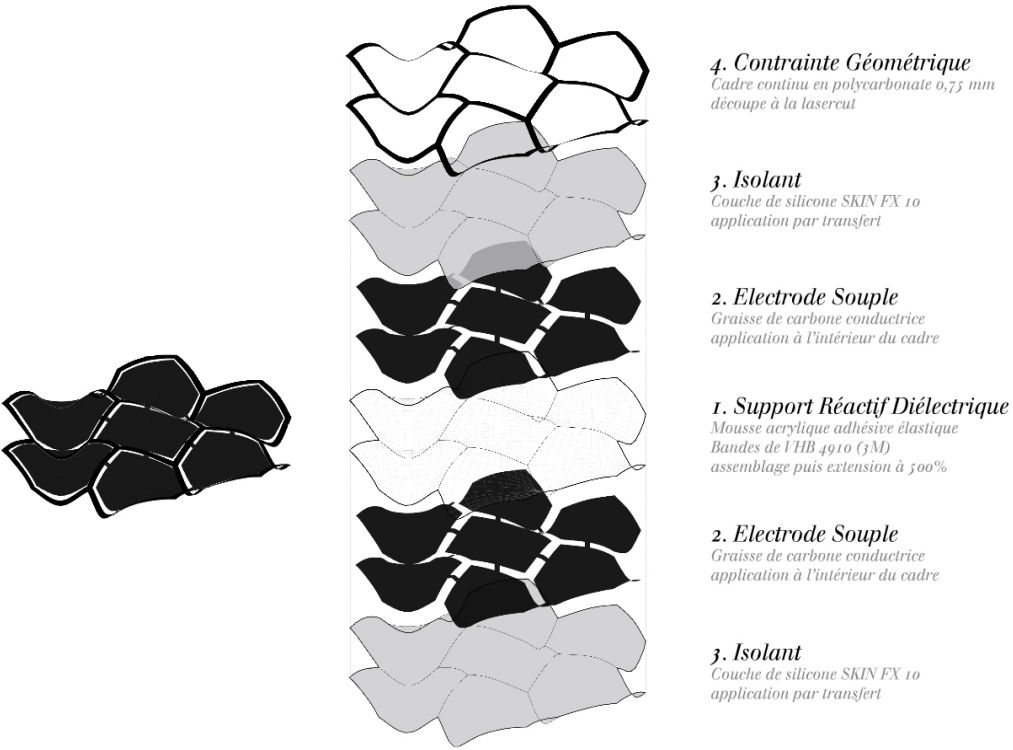


Figure 12. Détail de la composition d'un polymère électro-actif (grille hexagonale constituée de 7 éléments, 640 mm * 680 mm), Projet « Information », Paris, 2014 © Martin Genet & Jim Rhoné.

dynamiques, nous avons rapidement focalisé notre projet sur l'étude de polymères électro-actifs (EAP), dont l'une des propriétés est de réagir à la haute tension en se déformant. Plus précisément, les EAP sont la combinaison d'un élastomère et d'électrodes souples positives et négatives (Figure 12).

L'élastomère (une mousse acrylique dans le cadre de notre recherche) est diélectrique, c'est-à-dire qu'il ne peut pas conduire le courant électrique, mais que les atomes qui le composent ont la caractéristique de pouvoir présenter des dipôles électrostatiques susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Le principe de fonctionnement d'un EAP sous haute tension peut être représenté selon le schéma ci-dessous (Figure 13).

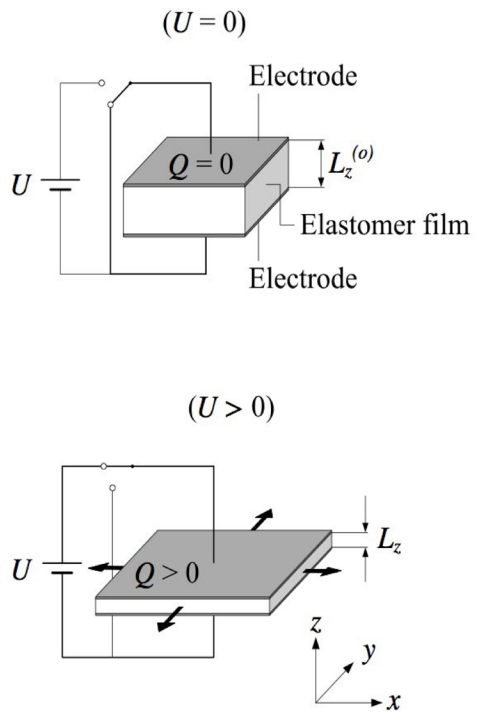


Figure 13. Schéma de fonctionnement d'une unité EAP, « Development of a Shell-like Electroactive Polymer (EAP) Actuator », ETH Zürich, 2007 © Patrick Lochmatter.

téristique de pouvoir présenter des dipôles électrostatiques susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Le principe de fonctionnement d'un EAP sous haute tension peut être représenté selon le schéma ci-dessous (Figure 13).

La fabrication des premiers prototypes a été suivie de la simulation du comportement d'un EAP en s'appuyant sur le test d'un module hexagonal (Figure 14). De ce test, nous avons extrait trois catégories d'informations indispensables pour la simulation du système :

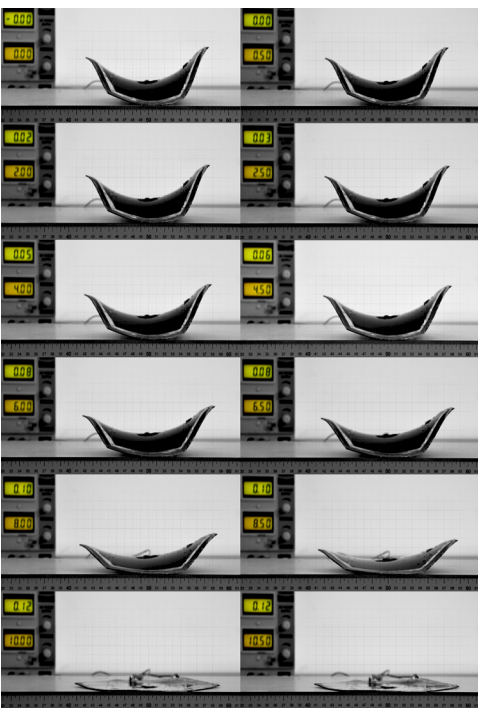
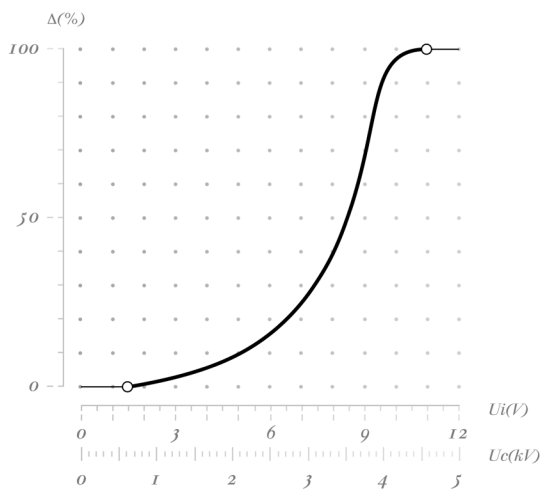
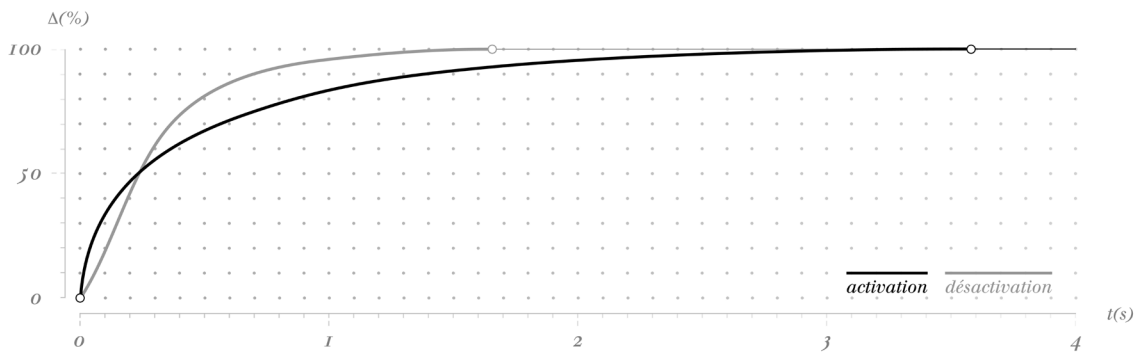
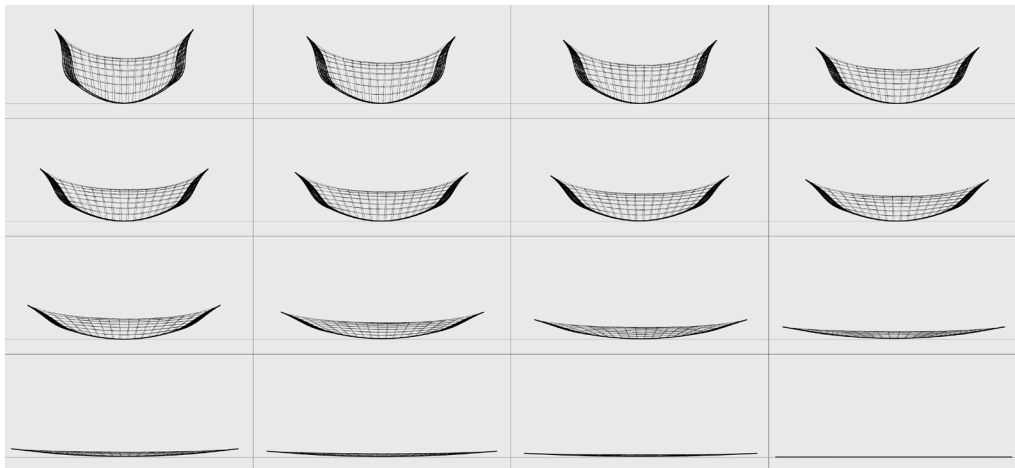


Figure 14. Photographies des tests réalisés sur un prototype hexagonal avec relevé de la déformation tous les 0,5 V, Projet « Information », Paris, 2014 © Martin Genet & Jim Rhoné.



De haut en bas :

Figure 15. Visualisation de la déformation du module hexagonal (Rhino 3D) après calibrage et validation de la géométrie obtenue dans la simulation informatique.

Figure 16. Graphique du pourcentage relatif de déformation Δ (%) d'un élément hexagonal simple, en fonction du temps t (secondes).

Figure 17. Graphique du pourcentage relatif de déformation Δ (%) d'un élément hexagonal simple, en fonction de la tension U (Volts), avec U_i tension initiale et U_c tension convertie.

Projet « Information », Paris, 2014

© Martin Genet & Jim Rhoné.

- La géométrie et la mesure précise de la déformation à intervalles de tension réguliers afin de calibrer et de valider les résultats de la simulation, obtenue par combinaison de la précontrainte appliquée au cadre (avec le plug-in Karamba) et de la génération d'une surface minimale sur ce cadre déformé (Figure 15).
- Le pourcentage de déformation en fonction du temps lors de l'activation (de 0 V à 5 KV) et de la désactivation (de 5 KV à 0 V) (Figure 16).
- Le pourcentage de déformation en fonction de la tension imposée (0 V-12 V pour la tension initiale U_i , soit 0 V - 5 KV pour la tension convertie U_c) avec étalonnage

tous les 0,5 V pour la tension initiale U_i , soit tous les 200 V pour la tension convertie U_c (Figure 17).

Une fois le prototype testé, c'est l'action de réintégrer l'ensemble des informations obtenues dans le modèle informatique et la capacité à le faire évoluer en fonction de ces dernières, qui est devenue essentielle. L'installation électrique mise en place a rendu possible le contrôle de l'activation des prototypes par gestion de la tension du courant délivré directement avec des valeurs rentrées dans Grasshopper (et par l'intermédiaire du plugin Firefly et d'une plaque Arduino) (Figure 18). En utilisant

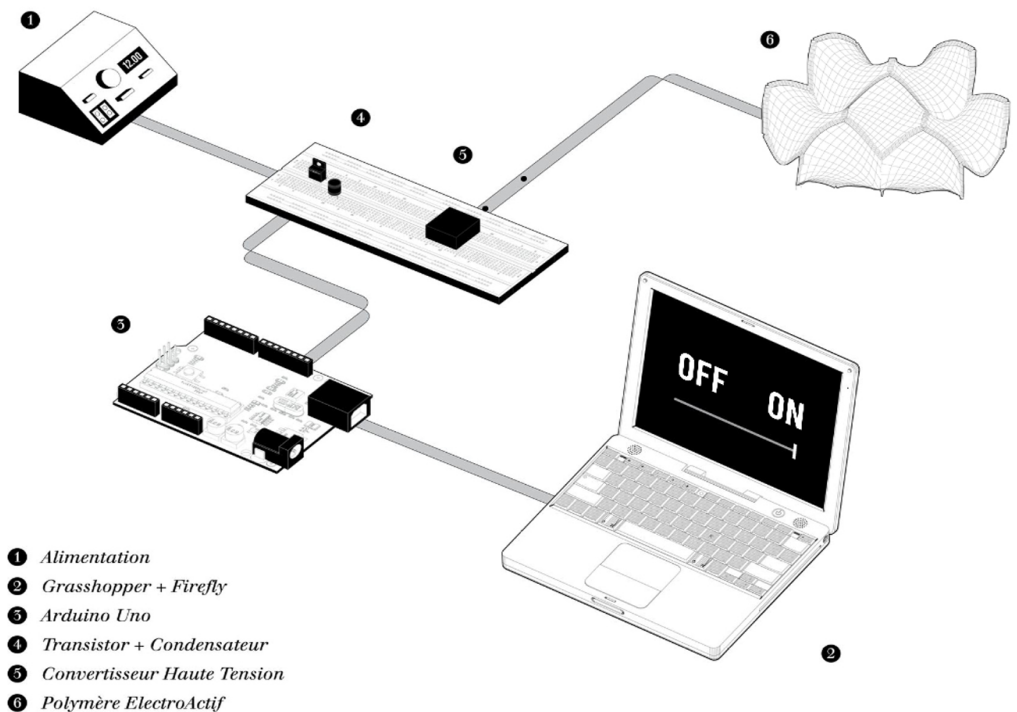


Figure 18. Schéma du circuit électrique permettant le contrôle du mouvement du prototype (EAP) directement depuis Grasshopper, Projet «Information», Paris, 2014 © Martin Genet & Jim Rhoné.

ces mêmes valeurs pour la simulation et en intégrant les deux courbes obtenues comme input de la déformation (une fois celle-ci calibrée selon les mesures du prototype), nous avons pu synchroniser le mouvement du prototype physique et celui de sa simulation et faire correspondre leur géométrie le plus précisément possible.

Ce n'est qu'après cette étape empirique de la simulation, ayant permis la rationalisation et le calibrage géométrique de la déformation ainsi que l'intégration d'une échelle temporelle dans la simulation, que nous avons pu envisager la développer et l'appliquer à des systèmes plus complexes ; en l'occurrence un système continu de grille.

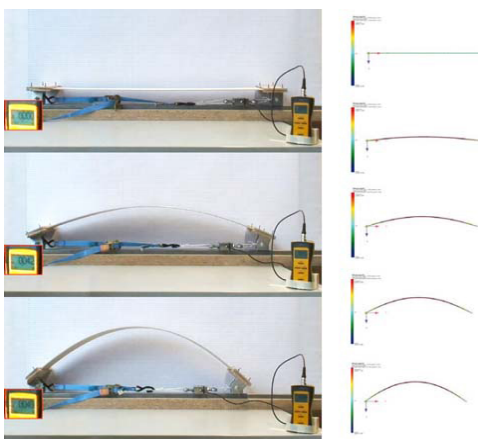
L'intérêt de la simulation informatique des comportements et des performances matériels obtenus par test d'un prototype physique étant, à terme, d'être capable de le modifier à volonté tout en sachant que ce qui apparaît sur l'écran se rapproche d'un état réel; ce type de test physique s'avère donc nécessaire dans le processus de simulation informatique, comme condition préalable à l'intellectualisation du comportement d'un système.

A une échelle différente, l'analyse du processus de conception de l'ICD/ITKE Research Pavilion 2010 amène aux mêmes

conclusions sur le rôle des tests physiques : *« la conception a commencé par le développement d'un outil de design computationnel. Dans cet outil, toutes les caractéristiques de comportement pertinentes ont été intégrées comme des dépendances paramétriques basées sur un nombre important de tests computationnels et physiques. Le test a été concentré sur la mesure de la déflexion de bandes de contreplaqué courbées élastiquement, en relation avec les différentes spécifications des paramètres ainsi que le calibrage et la corroboration des résultats obtenus avec les FEMs (Finite Element Methods for simulation). L'outil computationnel développé a permis de générer des morphologies de systèmes possibles accompagnées d'informations géométriques pertinentes et d'extraire directement les données nécessaires aux simulations FEM ultérieures et à la fabrication avec un robot 6 axes industriel »*⁴⁸ (Figures 19 & 20).

Même pour un processus de conception dans lequel la simulation informatique permet de fournir des feedbacks visuels, matériels et de performance, il est donc pertinent, voire indispensable, de préserver la fonction générative et informative des prototypes physiques, surtout s'ils sont fabriqués selon le continuum modèle digital – end effector.

48 MENGES (Achim), "Material Behaviour – Embedding Physical Properties in Computational Design Processes", dans *Architectural Design – Material Computation*, profile n°216 (mars – avril 2012), John Wiley & Sons, p. 47. « *The design of the prototype pavilion began with the development of a computational design tool. In this tool all relevant material behavioural characteristics are integrated as parametric dependencies based on a large number of physical and computational tests. The test focused on measuring the deflections of elastically bent plywood strips in relation to various specification parameters as well as the calibration and corroboration of the resulting data with FEMs. The developed integrative computational tool generated possible system morphologies together with all*



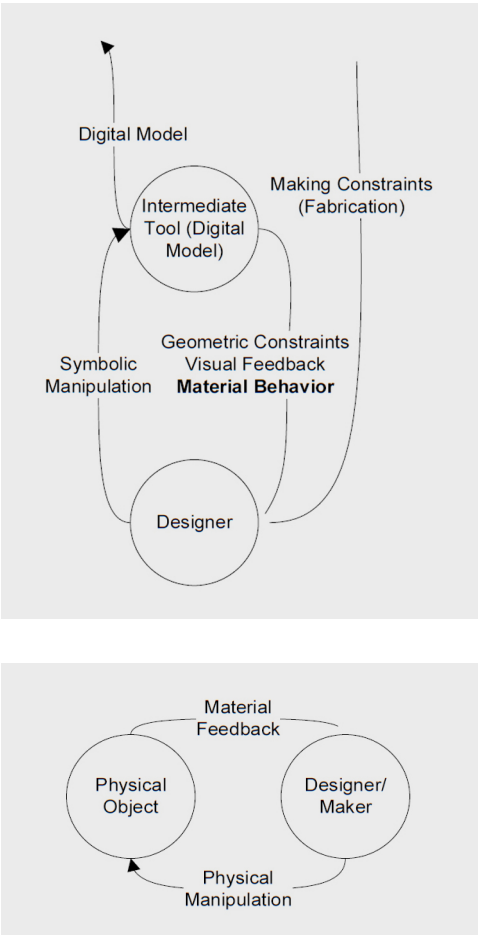
De haut en bas : Figure 19. ICD/ITKE Research Pavilion 2010, Stuttgart University, 2010 © Roland Halbe. Figure 20. Test et mesure de la déflexion des bandes de contreplaqué et comparaison des résultats obtenus avec les FEMs, Stuttgart University, 2010 (<http://www.achim-menges.net>).

Dans cette perspective, l'architecte américain Christian J Stanton explique dans sa thèse « Material Feedback in Digital Design Tools » que ce feedback matériel doit être considéré comme « *une introduction à un processus représentationnel et évaluatif intégré capable de fournir à l'architecte un feedback en temps réel au sein même de ses outils de conception plutôt que dans un processus séparé* » et que par comparaison, dans les outils dont nous disposons actuellement, ce flux de feedback en temps réel serait « *comparable aux solutions surfaciques guidées par une géométrie comme les lofts, sweeps et autres NURBS, via lesquelles l'architecte obtient et peut agir sur une géométrie qui est une réponse directe à l'input qu'il a choisi* »⁴⁹.

Succédant au feedback matériel primaire qui rend possible le passage du prototype physique à des données informatiques exploitables, les feedbacks inclus dans la simulation d'un modèle assureraient ainsi un prototypage virtuel continu, c'est-à-dire la possibilité de faire varier un système et d'obtenir l'actualisation de ses performances. Avec cette logique, le comportement structurel et matériel d'un système devient un input que l'architecte peut contrôler ; et par conséquent, les matériaux ne sont plus des récepteurs passifs du modèle digital mais deviennent

relevant geometric information and directly outputted the data required for both subsequent FEM simulations and the manufacturing with a six-axis industrial robot ».

49 STANTON (Christian J), op. cit. , p. 27. « [...] *an introduction of an integrated representational and evaluative process that provides real-time feedback to the designer within the design tool rather than a separate process* » & « [...] *this is similar to geometry driven surface solutions like lofting, sweep and other NURBS geometry where the designer receives and can respond to geometry that is a response to the designers direct input* ». Extrait du site < <http://dSPACE.mit.edu/> > le 18 novembre 2013.



De haut en bas : Figure 21. Processus de design digital - prototypage et simulation virtuels.
Figure 22. Processus artisanal, « Material Feedback in Digital Design Tools », 2009 © Christian J Stanton.

des générateurs actifs dans la conception architecturale.

En s’inspirant du travail mené par Rivka Oxman dans « Theory and design in the first digital age » (2006) sur les différentes logiques et approches du design, Stanton propose ce diagramme de flux d’informations pour illustrer un processus de conception digital dans lequel le prototypage et la simulation sont entièrement virtuels (Figure 21).

Envisager la possibilité d’un tel processus, dont la simplicité apparente le rapproche d’ailleurs du processus artisanal exposé dans sa thèse quelques pages plus tôt (Figure 22), à la différence que l’« objet physique » est remplacé par un « modèle digital », suppose en fait l’intervention d’une simulation complexe et très complète, presque totale. Avec les outils dont nous disposons actuellement une telle simulation est-elle possible ?

PROFONDEUR DE LA SIMULATION AVANCÉE

Développer des outils computationnels permettant la représentation d’un système ainsi que la simulation précise et instantanée de son comportement lorsqu’il est

50 MENGES (Achim), “Integral Formation and Materialisation – Computational Form and Material Gestalt”, dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction d’Achim Menges et de Sean Ahlquist, John Wiley & Sons, 2011, p. 199. « *The underlying logic of computation strongly suggests such an alternative, in which the geometric rigour and simulation capability of computational modelling can be deployed to integrate manufacturing constraints, assembly logics and material characteristics in the definition of material construction systems. Furthermore, the development of versatile analysis tools for structure, thermodynamics, light and acoustics provides for integra-*

soumis à des contraintes et/ou à un environnement constitue une clé dans le F2F et dans la prise en compte de contraintes matérielles et structurelles dès les premières phases du développement d'un projet.

Pour Menges, « *la logique de la computation suggère fortement une telle alternative, dans laquelle la rigueur géométrique et la capacité de simulation d'un modèle computationnel peuvent être déployées pour intégrer des contraintes de fabrication, des logiques d'assemblages et des caractéristiques matérielles dans la définition des systèmes matériels. De plus, le développement d'outils d'analyse pour la structure, la thermodynamique, la lumière et l'acoustique permettent l'intégration de boucle de retour (« feedback ») pour l'évaluation du comportement du système, en interaction avec l'environnement simulé, comme des éléments générateurs dans le processus de conception. Bien au-delà de la capacité de représentation des modèles digitaux qui privilégient principalement la géométrie, de tels modèles computationnels définissent un comportement plutôt qu'une forme* »⁵⁰.

Aujourd'hui, l'essentiel de l'environnement physique peut être simulé sur ordinateur et il existe déjà de nombreuses simulations interactives de principes physiques. Dans de telles simulations, les paramètres des objets ou du système modélisés

peuvent être modifiés et ainsi influencer le comportement observé. La plupart des logiciels de conception architecturale sont par exemple dotés d'une simulation de la lumière du soleil pour n'importe quel endroit sur la planète, et d'un nombre croissant de plug-ins ou scripts permettant de simuler le comportement d'éléments soumis à la force de gravité.

Des simulations plus sophistiquées, comme la réponse d'une structure soumise à des contraintes imposées sont des modules standards dans les logiciels d'ingénierie et apparaissent progressivement sur des logiciels plus communs en architecture.

Simuler un comportement implique la réaction ou la réponse d'un système aux changements de conditions qu'on lui impose. Comme l'expliquent Michael Weinstock et Nikolaos Stathopoulos, « *travailler avec des simulations requiert le développement du modèle mathématique de processus physiques, tout en gardant à l'esprit que le design computationnel génératif peut maintenant intégrer les propriétés physiques avancées d'un comportement non linéaire afin d'explorer les changements dynamiques que les structures et matériaux subissent en réponse aux changements de conditions* »⁵¹. Ce conditionnement, ou « conditionning », réfère à un processus d'apprentissage dans lequel le comporte-

ting feedback loops of evaluating the system's behaviour in interaction with a simulated environment as generative drivers in the design process. Far beyond the aptitude of representational digital models, which mainly focus on geometry, such computational models describe behaviour rather than shape ».

51 WEINSTOCK (Michael) & STATHOPOULOS (Nikolaos), "Advanced Simulation in Design", dans *Architectural Design – Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, vol. 76 – issue 2 (mars - avril 2006), John Wiley & Sons, pp. 54-59.

ment d'un organisme devient dépendant de l'occurrence d'un stimulus dans son environnement. Cela implique un calibrage précis entre le champ comportemental, et par extension performatif, et un éventail spécifique de conditions environnementales.

Appliquée à la conception de systèmes complexes, la simulation comportementale avancée s'avère donc très utile pour l'analyse de leur comportement sur des périodes de temps étendues.

Le potentiel est en effet de pouvoir utiliser le comportement simulé pour modifier et influencer la composition des matériaux et la logique des assemblages qui les composent. La capacité auto-organisationnelle et comportementale de l'environnement construit pourrait ainsi être facilitée par ces derniers, basée sur la compréhension et l'utilisation de caractéristiques matérielles, sur des comportements, des propriétés, en allant de la mise en œuvre variée de matériaux existants, à l'utilisation stratégique de la fabrication digitale, et enfin à la conception de matériaux plus performants.

En poursuivant ce raisonnement, combiner et synchroniser la modélisation et la simulation d'un système matériel au

sein d'un même outil a une fonction anticipative dans la conception d'un projet. L'ingénieur Al Fisher, membre de l'équipe SMART Solutions du bureau d'études techniques britannique Buro Happold et spécialisé dans l'étude des géométries complexes, utilise justement l'expression de « design prédictif » pour désigner l'influence des techniques paramétriques, des simulations et des analyses de données sur le développement d'un projet d'architecture.

En effet, combinés et intégrés au design, ces processus permettent une pré-rationalisation des systèmes matériels, et offrent par conséquent une plus grande liberté de conception aux architectes, tout en assurant une continuité entre les phases de conception et de construction qui limite la post-rationalisation matérielle et structurelle souvent nécessaire au terme du design.

Avec pour objectif de développer des logiciels permettant un design conceptuel rapide et une expérimentation efficace des options envisagées, l'équipe SMART Solutions a travaillé sur la mise en place de feedbacks instantanés, devenus indispensables pour que les outils puissants de design analytique soient capables d'influencer la conception au moment oppor-

52 FISCHER (Al), "Engineering Integration – Real-time Approaches to Performative Computational Design", dans *Architectural Design – Material Computation*, profile n°216 (mars – avril 2012), John Wiley & Sons, p. 113. « *To enable true performative-based design, performance criteria need to be fully integrated within the design development and thought processes during the early concept stages. It is at this point that experimentation is key. However, free experimentation, while maintaining detailed coordination across multiple specialist disciplines, can be seen as contradictory. It is therefore a challenge to explore concepts based on advanced simulation. Adopting a hierarchical approach to calculation as well as design is therefore essential. The depth of the modelling and accuracy levels should reflect the stage of design, with analysis during the early stages kept mobile, flexible and receptive to change.* ».

tun. Développé en 2011, le plug-in SMART Form pour Rhino3D permet l'analyse et l'optimisation de formes fluides, l'application et la manipulation de contraintes ainsi que l'analyse de performances en temps réel. Considéré comme un outil sculptural de « form finding », il a certainement constitué un point de départ pertinent dans ce domaine de la simulation avancée, mais est à mon sens dépassé par des outils comme Karamba (Clemens Preisinger), évoqué précédemment, et qui exploite directement l'interface de Grasshopper.

Dans « Material Computation », Al Fisher explique à ce sujet que le développement de simulations en temps réel permettant l'actualisation de modèles de manière directe lorsque les paramètres et les contraintes sont modifiés nécessite d'adapter les données produites au degré d'avancement du design afin que ces dernières soient pertinentes et cohérentes à tout niveau du projet.

« Afin de rendre possible rendre possible un design réellement performatif, les critères de performance doivent être entièrement intégrés au développement du design et aux processus de pensée durant les premières phases de conception. C'est à ce moment que l'expérimentation est décisive. Cependant,

*l'expérimentation libre, conservant une coordination détaillée dans de multiples disciplines spécialisées, peut être considérée comme contradictoire. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'explorer des concepts basés sur la simulation avancée. Adopter une approche hiérarchique face au calcul et au design est pour cela essentiel. La profondeur de la modélisation et la précision des niveaux doit refléter l'étape du design, avec des analyses laissées mobiles, flexibles et réceptives au changement durant les premières phases »*⁵².

Plus que le design, il est également possible de simuler son processus de fabrication. Cette simulation du prototypage, ou « virtual prototyping » rapproche encore un peu plus la conception de la fabrication en assurant une continuité presque totale. En effet, comme l'expliquent Weinstock et Stathopoulos, « *dans l'ingénierie aéronautique, maritime et automobile, le comportement physique, incluant la fatigue d'un véhicule au cours de sa vie, est simulé pendant les phases de conception. Dans beaucoup d'industries, les processus de fabrication sont également simulés [...] Les simulations permettent le développement et l'amélioration des designs avant même la construction de modèles physiques et de prototypes* »⁵³.

53 WEINSTOCK (Michael) & STATHOPOULOS (Nikolaos), "Advanced Simulation in Design", dans Architectural Design – Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, vol. 76 – issue 2 (mars - avril 2006), John Wiley & Sons, p. 58. « *In aerospace, maritime and automotive engineering, physical behaviour, including wear and fatigue throughout the life of the vehicle, is simulated during the design phase. In many industries, manufacturing processes are also simulated digitally in the design studio [...] Simulations allow the development and refinement of designs prior to the construction of physical models and prototypes* ».

Enfin, au delà du rôle de plus en plus important de la simulation dans la maîtrise de la conception d'un projet architectural grâce au développement d'outils de plus en plus puissants, et qui a d'ailleurs tendance dans les processus de conception non-experimentaux, à rendre obsolète les prototypes physiques ; une autre dimension de la simulation est certainement amenée à être développée : le contrôle.

En effet, si en architecture, la simulation est aujourd'hui majoritairement cantonnée au domaine du virtuel dans l'anticipation et l'optimisation de ce qui va être construit, son application à des systèmes structurels réactifs, adaptatifs ou évolutifs permettrait un contrôle extrêmement précis de leurs comportements et mouvements.

A ce sujet, dans le cadre de notre recherche sur les EAP, l'objectif que nous souhaitons atteindre est d'être capable d'imposer à un système complexe un état d'équilibre préalablement simulé, grâce à l'activation différenciée des différents éléments qui le composent.

Plus qu'un outil de développement, la simulation interviendrait ainsi directement sur le prototype physique, en assurant le contrôle de son comportement.

Avec cette perspective, la simulation renforcerait inévitablement le lien entre digital et matérialité.

Maîtriser des comportements matériels et structurels en mettant en œuvre les processus combinés de fabrication digitale et de simulation avancée implique dans la production informatisée elle-même, la mise en place d'une logique spécifique qui diffère des logiques de modélisation classiques conduisant souvent à une géométrie figée.

Comme l'explique Menges dans "Material Computation", disposer de machines plus intelligentes n'est pas suffisant, il faut également être capable de produire des composants plus intelligents. Selon lui, « *les systèmes matériels sont, non pas des dérivés des systèmes et des éléments de construction standardisée, mais doivent être plutôt considérés comme des drivers génératifs dans le processus de conception. [...] La définition géométrique du système doit outrepasser la primauté de la forme et des caractéristiques métriques, descriptives qui lui sont rattachées. Pour cela, le designer doit faciliter l'organisation du modèle computationnel, non pas comme une gestalt spécifique, définie par un nombre de coordonnées et de dimensions, mais comme un cadre pour de possibles créations permettant une différenciation ultérieure qui restera cohérente au comportement observé et extrait des expérimentations physiques*

54 MENGES (Achim), op. cit. , p. 203. « *Material systems are considered, not so much as derivatives of standardised building systems and elements, but rather as generative drivers in the design process. [...] The geometric definition of the system has to overcome the primacy of shape and related metric, descriptive characteristics. Therefore, the designer has to facilitate the setup of a computational model, not as a particular gestalt specified through a number of coordinates and dimensions, but as a framework for possible formations affording further differentiation that remains coherent with the beha-*

et des explorations de ce système pertinent. Ce cadre computationnel, qui constitue en réalité un modèle ouvert (appelé ici « cadre », due à l'ambiguïté de la signification du terme modèle dans le contexte du design architectural), est ensuite progressivement informé par des séries de paramètres, de restrictions et de caractéristiques déduits du matériau, de la fabrication, des logiques et des contraintes d'assemblage »⁵⁴.

L'intégration méthodologique des caractéristiques matérielles, du comportement géométrique, des contraintes de fabrication et des logiques d'assemblage d'un système hétérogène et différencié permettrait donc l'élaboration d'un design tenant compte des performances intrinsèques de ce dernier.

La différenciation de ce système matériel peut être désignée par le terme « polymorphisme », qui réfère en biologie à l'occurrence de différents éléments, formes, niveaux ou types dans des organismes individuels ou des organismes de la même espèce.

Approcher les systèmes matériels comme un moyen de déployer des caractéristiques comportementales d'une manière instrumentale requiert des méthodes analytiques et des outils tenant compte des performances, à la fois à l'échelle globale du système et à l'échelle locale des éléments qui le composent. Il est donc nécessaire d'avoir une approche du design qui intègre

les méthodes analytiques et génératives. En procédant ainsi, le feedback entre le stimulus et la réponse ainsi que la relation entre contrainte et performance deviendront des éléments décisifs d'une organisation spatiale hétérogène.

L'approfondissement du concept de système matériel proposé par Menges appelle par conséquent à une compréhension de la forme, des matériaux et de la structure non plus comme des éléments séparés, mais comme un ensemble d'interrelations complexes au sein d'un même système. Ces interrelations, résultant de la réponse de paramètres variés et d'influences environnementales et provenant des logiques et contraintes de fabrication avancée, peuvent ainsi être déployées comme des contraintes stratégiques dans un processus de conception opérant une synthèse entre forme et matière.

Cette logique de conception en systèmes matériels flexibles et différenciables est donc une condition permettant une plus grande liberté dans le remaniement du projet après la simulation et l'évaluation des comportements matériels et structuraux.

« Ces processus de développement du système, à travers une différenciation continue de ses instances peuvent être envisagés de différentes manières. La possibilité la plus immédiate est l'intervention top-down

viour observed and extracted from physical experiments and explorations of the relevant system. This computational framework, which essentially constitutes an open model (referred to as 'framework' here due to the ambiguous meaning of 'model' in a design context), is then step-by-step informed by a series of additional parameters, restrictions and characteristics inferred from material, fabrication, and assembly logics and constraints ».

directe du designer dans la manipulation paramétrique et le cycle d'évaluation qui lui est relié. La seconde possibilité, plus cohérente avec le concept pris dans son ensemble, correspond aux processus basés sur des principes similaires à la morphogénèse naturelle. Dans cette perspective, deux types de processus de développement sont pertinents : la croissance de l'instance individuelle et l'évolution du système au fil des générations de populations d'instance individuelle »⁵⁵.

A ce sujet, le studio de projet Master “Incubateur Googleplex“, encadré par Christian Girard et Félix Agid nous a montré l'efficacité du logiciel Digital Project en terme de différenciation continue des instances. En effet une partie du projet étant orientée sur l'aspect technique et constructif du bâtiment, une attention particulière a donc été apportée à la conception, au développement et à l'optimisation de systèmes matériels et d'assemblages.

Allant parfois jusqu'à une précision s'approchant de l'échelle 1 : 1, Digital Project a permis, grâce à ses propriétés combinées d'associativité, d'instanciation et de power copy, de modifier n'importe quel détail structurel jusqu'au terme de la phase de conception et ce, sans perturber la cohésion et la cohérence entre les différents éléments du système.

Afin que les système matériels soient com-

patibles avec les processus de conception, de simulation et de fabrication digitale évoqués précédemment, trois caractéristiques apparaissent donc comme indispensables à leur conception et développement : l'associativité interne (entre les différents éléments du système) et externe (entre plusieurs systèmes), le polymorphisme (ou différenciation des différents éléments du systèmes) , et que leur définition suive des logiques génératives et paramétriques.

55 MENGES (Achim), op. cit. , p. 207. « *These processes of driving the development of the system through continual differentiation of its instances can be envisioned in different ways. The most immediate possibility is the direct, top-down intervention of the designer in the parametric manipulation and related assessment cycle. More coherent with the overall concept though are processes based on similar principle as natural morphogenesis. In this respect, two kinds of development processes are of interest here : the growth of the individual instance and the evolution of the system across generations of populations of individual instances ».*

CONCLUSION

Loin de rendre la discipline architecturale immatérielle, l'évolution actuelle des outils digitaux rapproche en fait réellement l'architecte de considérations tectoniques, et physiques.

Ce rapprochement se fait temporellement d'une part, car intégrés à la phase conception du projet, les processus combinés de fabrication digitale et de simulation avancée replacent les approches matérielle et formelle au même niveau. Il se fait aussi conceptuellement car ces outils apportent également bien plus de contrôle et de précision dans ce que l'architecte conçoit.

La fabrication digitale offre ainsi le potentiel de maîtriser la dimension matérielle de ce que nous concevons, aujourd'hui trop souvent dépendante d'une stratégie « off the shelf ». Plutôt que de reléguer ce processus à la phase de construction du projet, la fabrication digitale a un rôle décisif à jouer dans sa conception. Proposer une modification du processus de conception architectural dans lequel le rôle et le moment de production du prototype change pour influencer l'ensemble du développement d'un projet paraît donc envisageable si on se replace dans une logique de recherche appliquée.

Compte tenu du rapide progrès des outils de modélisation et de simulation, on peut faire l'hypothèse que de nouveaux logiciels vont certainement être conçus dans les années à venir, avec lesquels il sera possible d'envisager une logique de conception quasi intégrale et dans lesquels une modélisation paramétrique et associative sera combinée et synchronisée à une simulation avancée et instantanée. Le processus de simulation intégrera des

informations matérielles, structurelles, environnementales et de fabrication. Les données produites, si elles n'affectent pas directement le modèle en l'actualisant, seront communiquées efficacement et leur résolution sera adaptée au niveau de développement du projet afin que leur analyse et évaluation soient optimum. Les systèmes matériels, par leur flexibilité et adaptabilité, feront alors le lien entre les différentes parties du processus de conception, que l'architecte sera d'ailleurs certainement amené à partager de plus en plus avec l'ingénieur.

Modéliser pour concevoir est possible, simuler pour concevoir l'est de plus en plus, à tel point que la représentation est vouée à être remplacée par la simulation et que le processus de conception pourrait être entièrement envisagé de manière virtuelle. Pourtant, s'enfermer dans cette dimension présente selon moi le risque de conduire à des projets qui, par soucis d'efficacité, d'économie et peut-être de facilité aussi, ne seront conçus qu'avec ce qui est simulable. En effet, à l'image de certains projets conçus entièrement avec ce qui est modélisable, et donc contraints indirectement, ou limités par des bibliothèques 2D ou 3D proposées par certains logiciels, cette logique pourrait tout aussi bien s'appliquer à la simulation, à savoir ne concevoir qu'avec ce qui a déjà été simulé et donc testé.

C'est la raison pour laquelle la fabrication digitale doit être maintenue dans le processus de conception. Etre capable d'innover implique en effet une part d'empirisme initiale que seule la fabrication et le test d'un prototype physique permettent ; d'où l'intérêt d'une approche du design

intégrale, dont le processus de conception permet l'échange entre matérialisation physique via la fabrication digitale et génération virtuelle via la simulation avancée.

Bien qu'il ne soit pas viable et possible de tout réinventer à chaque projet, garder à l'esprit qu'à l'ère de la customisation de masse, développer de nouveaux systèmes matériels dans un processus de conception adapté et performant est possible, est selon moi indispensable à la condition de l'architecte.

Dans un contexte d'expérimentation, d'innovation et avec ce retour à la matérialité, que ce soit physiquement ou virtuellement, il s'agit donc bien de fabriquer pour concevoir.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MATÉRIALITÉ

- 1 ANGELIL (Marc), “Interjections I“, dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, 111 p.
- 2 GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, 111 p.
- 3 LEACH (Neil), “Interjections I“, dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, 111 p.
- 4 MENGES (Achim), “Interjections II“, dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, 111 p.
- 5 PICON (Antoine), “Architecture and the Virtual, Towards a New Materiality“, dans *Praxis: Journal of Writing and Building*, n°6: New Technologies://New Architectures (mars 2004), Praxis Inc.
- 6 SEKLER (Eduard), “Structure, Construction et Architectonique“, dans *La Structure dans les Arts et les Sciences*, sous la direction de Gyorgy Kepes, Bruxelles, Les Editions de la Connaissance, 1967, 189 p.

GÉNÉRATION FORMELLE

- 1 LYNN (Greg), “Blobs : Why Tectonics is Square and Topology is Groovy“, dans *Any Magazine*, n°14 (mai 1996), pp. 58-61 ; repris sous le titre “Blob tectonics, or why tectonics is square and topology is groovy“, dans LYNN (Greg), *Folds, Bodies and Blobs, Collected Essays*, sous la direction de Michèle Lachowsky et Joël Benzakin, Bruxelles, La lettre volée, 2004 (1998), pp. 169-182.
- 2 ROCKER (Ingeborg), “Calculus-based form: an interview with Greg Lynn“, dans *Architectural Design - Programming Cultures: Architecture, Art and Science in the Age of Software Development*, vol. 76 – issue 4 (juillet – août 2006), John Wiley & Sons, pp. 88-97.
- 3 TRUMMER (Peter), “Associative Design, From Type to Population“, dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction de Achim Menges et Sean Ahlquist, Londres, John Wiley & Sons, 2011.

FABRICATION DIGITALE

- 1 CACHE (Bernard), *Terre meuble*, Ed. Hyx, Orléans, 1997 (première édition : *Earth Moves: The Furnishing of Territories*, Ed. M. Speaks, London : MIT Press, 1995, 154 p.
- 2 EDGAR (Brenda Lynn), "A Short Biography of KR150 L110", dans GRAMAZIO (Fabio) & KOHLER (Matthias), *Digital Materiality in Architecture*, Baden, Lars Müller Publishers, 2008, 111 p.
- 3 IWAMOTO (Lisa), *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*, Princeton Architectural Press, New York, 2009, 144 p.
- 4 PALZ (Norbert), *Emerging Architectural Possibilities of a Tuneable Materiality through Additive Fabrication Technologies* [en ligne], Thèse de doctorat, Copenhague, 2012. Extrait le 14 juin 2013 du site <<http://cita.karch.dk/Menu/PhD+Projects/Norbert+Palz>>.

PROTOTYPE & EXPÉRIMENTATION

- 1 ARGAN (Giulio Carlo), "Pier Luigi Nervi", dans *Projet et Destin. Art, architecture et urbanisme*, Paris, Les Editions de la Passion, 1993 (1955), 280 p.
- 2 CHAN (Mei) & SERTZU (Adiam) pour p.art, "Workshop", dans *From Control to Design : Parametric/Algorithmic Architecture*, sous la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, 239 p.
- 3 NIIRANEN (Jarkko), "Wood transformed into pavilion" [en ligne], 2012. Extrait le 20 juin 2013 du site <<http://eng.aalto.fi/en/current/news/view/2012-12-12-002/>>.
- 4 SHEIL (Bob), "Protoarchitecture Between the Analogue and the Digital", dans *Architectural Design – Protoarchitecture : Analogue and Digital Hybrids*, vol. 78 - issue 4 (juillet - août 2008), sous la direction de Bob Sheil, John Wiley & Sons.
- 5 SPYROPOULOS (Theo), Conférence lors du Colloque ArchiLab 2013« Architecture et sciences : Une nouvelle naturalité », Orléans, Octobre 2013.
- 6 WEINSTOCK (Michael), "Self-Organisation and Material Constructions", dans *Architectural Design – Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, vol. 76 – issue 2 (mars - avril 2006), John Wiley & Sons.
- 7 WEST (Mark), "With Matter", dans *Architectural Design – Protoarchitecture : Analogue and Digital Hybrids*, vol. 78 - issue 4 (juillet - août 2008), sous la direction de Bob Sheil, John Wiley & Sons.

PROCESSUS DE CONCEPTION & STRATÉGIES

- 1 AITCHISON (Joanne), *Craft Thinking & Digital Making, The Role of the Architect in the Digital Era* [en ligne], Thèse de doctorat, 2009, 56 p. Extrait le 2 août 2013 du site <<http://www.frrarchitects.co.uk>>.
- 2 BRUCKERMANN (Olivier) pour p.art, “Digital Efficiency vs. Physical Necessity“, dans *From Control to Design :Parametric/Algorithmic Architecture*, sous la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, 239 p.
- 3 DELANDA (Manuel), “Philosophies of Design – The Case of Modelling Software“, dans *Verb Processing : Architecture Boogazine*, sous la direction de Jaime Salazar, Barcelone, Actar-D, 2001, 280 p.
- 4 HOGREFE (Alex), *Evaluating the Digital Design Process : Bottom-up vs. Top-down* [en ligne], Thèse de doctorat, Faculty of Miami University, Oxford, Ohio, 2010, 50 p. Extrait le 2 juillet 2013 du site <<http://sc.lib.muohio.edu/handle/2374.MIA/4440>>.
- 5 KOLAREVIC (Branko), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York, Taylor & Francis, 2003, 320 p.
- 6 MENGES (Achim), “Material Behaviour – Embedding Physical Properties in Computational Design Processes“, dans *Architectural Design – Material Computation*, profile n°216 (mars – avril 2012), John Wiley & Sons.
- 7 REAS (C.E.B), “Process/Drawing“, dans *Architectural Design - Programming Cultures: Architecture, Art and Science in the Age of Software Development*, vol. 76 – issue 4 (juillet – août 2006).
- 8 SCHINDLER (Christoph), SCHEURER (Fabian) & WALZ (Arnold) pour designtoproduction, “The Whole and its Parts“, dans *From Control to Design :Parametric/Algorithmic Architecture*, la direction Tomoko Sakamoto & Albert Ferré, Barcelone, Actar-D, 2008, 239 p.
- 9 SPEAKS (Michael), Conférence “Design: Intelligence vs. Ideology“ [en ligne], Hong-Kong, février 2012. Extrait le 10 août 2013 du site <<http://fac.arch.hku.hk/event/michael-speaks-design-intelligence-vs-ideology/>>.

SIMULATION & FEEDBACK

1 FISCHER (Al), “Engineering Integration – Real-time Approaches to Performative Computational Design“, dans *Architectural Design – Material Computation*, profile n°216 (mars – avril 2012), John Wiley & Sons.

2 STANTON (Christian J), *Material Feedback in Digital Design Tools*, Thèse de doctorat, Department of Architecture and Engineering Systems Division, Massachusetts Institute of Technology, septembre 2009, 71 p. Extrait le 18 novembre 2013 du site < <http://dspace.mit.edu/>>.

3 WEINSTOCK (Michael) & STATHOPOULOS (Nikolaos), “Advanced Simulation in Design“, dans *Architectural Design – Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, vol. 76 – issue 2 (mars - avril 2006), John Wiley & Sons, pp. 54-59.

4 VARENNE (Franck), *Epistémologie des modèles et des simulations : tour d’horizon et tendances* [en ligne], Colloque “Les modèles : possibilités et limites“ organisé par la Société française de Physique (Bibliothèque Nationale de France, Paris, 10 décembre 2008), Paris, 2008. Extrait le 26 juillet 2013 du site < <http://hal.archives-ouvertes.fr>>.

5 VON BERTALANFFY (Ludwig), “The Meaning of general System Theory“, dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction de Achim Menges et Sean Ahlquist, John Wiley & Sons, 2011.

SYSTÈMES

1 ALEXANDER (Christopher), *Notes on the Synthesis of Form*, Cambridge, Harvard University Press, 1964, 224 p.

2 ALHLQUIST (Sean) & MENGES (Achim), “Preface“, dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction de Achim Menges et Sean Ahlquist, John Wiley & Sons, 2011.

3 MENGES (Achim), “Integral Formation and Materialisation – Computational Form and Material Gestalt“, dans *Architectural Design Reader – Computational Design Thinking*, sous la direction de Achim Menges et Sean Ahlquist, Londres, John Wiley & Sons, 2011.

4 MENGES (Achim), “Material Computation – Higher Integration in Morphogenetic Design“, dans *Architectural Design – Material Computation*, profile n°216 (mars – avril 2012), John Wiley & Sons.

ANNEXE - QUESTIONS TRAITÉES DANS LA RECHERCHE

QUESTION 1

Comment développer et optimiser le rapport à la matérialité via le processus de design architectural computationnel ?

HYPOTHÈSE 1

La fabrication digitale, en permettant à l'architecte une implication directe dans le processus de fabrication via le contrôle des machines, combine l'automation avec une culture architecturale, où design et construction sont intrinsèquement liés. Désormais, design conceptuel et réalisation pratique ne sont plus des phases consécutives mais entremêlées, l'ensemble des données participant à la définition d'une forme étant identique à son code de fabrication : c'est ce qu'on appelle le F2F (File to Factory). La connaissance inhérente à l'architecte pour assembler des éléments et matériaux distincts dans le but de répondre à une intention de design spécifique est transformée en commandes explicites pour les robots et autres outils numériques de fabrication.

QUESTION 2

Quels potentiels offre la rencontre du digital et du matériel ?

HYPOTHÈSE 2

Les méthodes de construction traditionnelles peuvent être converties en des processus digitaux. En les rendant explicites, en les combinant à la puissance computationnelle et en les appliquant à des robots capables de réaliser un nombre arbitraire de mouvements de haute précision et de manipulations matérielles, ces processus peuvent être transformés et ré-imaginés. Les opérations manuelles ne seraient donc pas seulement imitées et automatisées mais modifiées, voire augmentées par la logique et les caractéristiques spécifiques de la machine. En contrôlant explicitement le processus de construction, les aspects fonctionnels peuvent être intégrés synthétiquement dans un élément de construction, alors qu'au même moment, les frontières entre ordre structurel et expression ornementale s'effacent.

QUESTION 3

Peut-on envisager de nouveaux processus de conception afin que le design digital redonne toute sa place à la dimension matérielle de l'architecture au sein du projet ? Si le rapprochement entre programmation et construction implique le développement de nouveaux processus et donc l'acquisition de nouvelles compétences, se dirige-t-on vers un « artisanat digital » d'un nouveau type ?

HYPOTHÈSE 3

Les processus de conception actuels restent majoritairement linéaires et peu flexibles. Les processus associés au design génératif le sont en revanche beaucoup plus et semblent adaptés à une logique expérimentale et au domaine de la fabrication digitale. Envisager de combiner les deux serait donc un moyen d'intégrer l'expérimentation portée sur la matérialité et la structure d'un projet au sein même du processus de conception architecturale.

QUESTION 4

Qu'implique l'engagement de la fabrication digitale dans le processus de conception architecturale ? Comment rendre possible la digitalisation de la matière afin d'intégrer cette information matérielle comme un driver génératif du design computationnel ?

HYPOTHÈSE 4

L'intégration de la fabrication digitale suppose d'une part l'utilisation de la simulation qui, à la différence de la modélisation, permet l'exploitation des feedbacks matériels obtenus par tests physiques des prototypes fabriqués. Cet engagement requiert également une nouvelle manière d'envisager la matière. Assurer le rôle génératif des matériaux dans la conception architecturale nécessite en effet de les appréhender non plus comme un état figé du design mais comme un système évolutif.