



HAL
open science

L'architecture paramétrique au delà de la morphogénèse visuelle

Nicola Barbisan

► **To cite this version:**

Nicola Barbisan. L'architecture paramétrique au delà de la morphogénèse visuelle. Architecture, aménagement de l'espace. 2013. dumas-01838039

HAL Id: dumas-01838039

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01838039>

Submitted on 13 Jul 2018

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

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

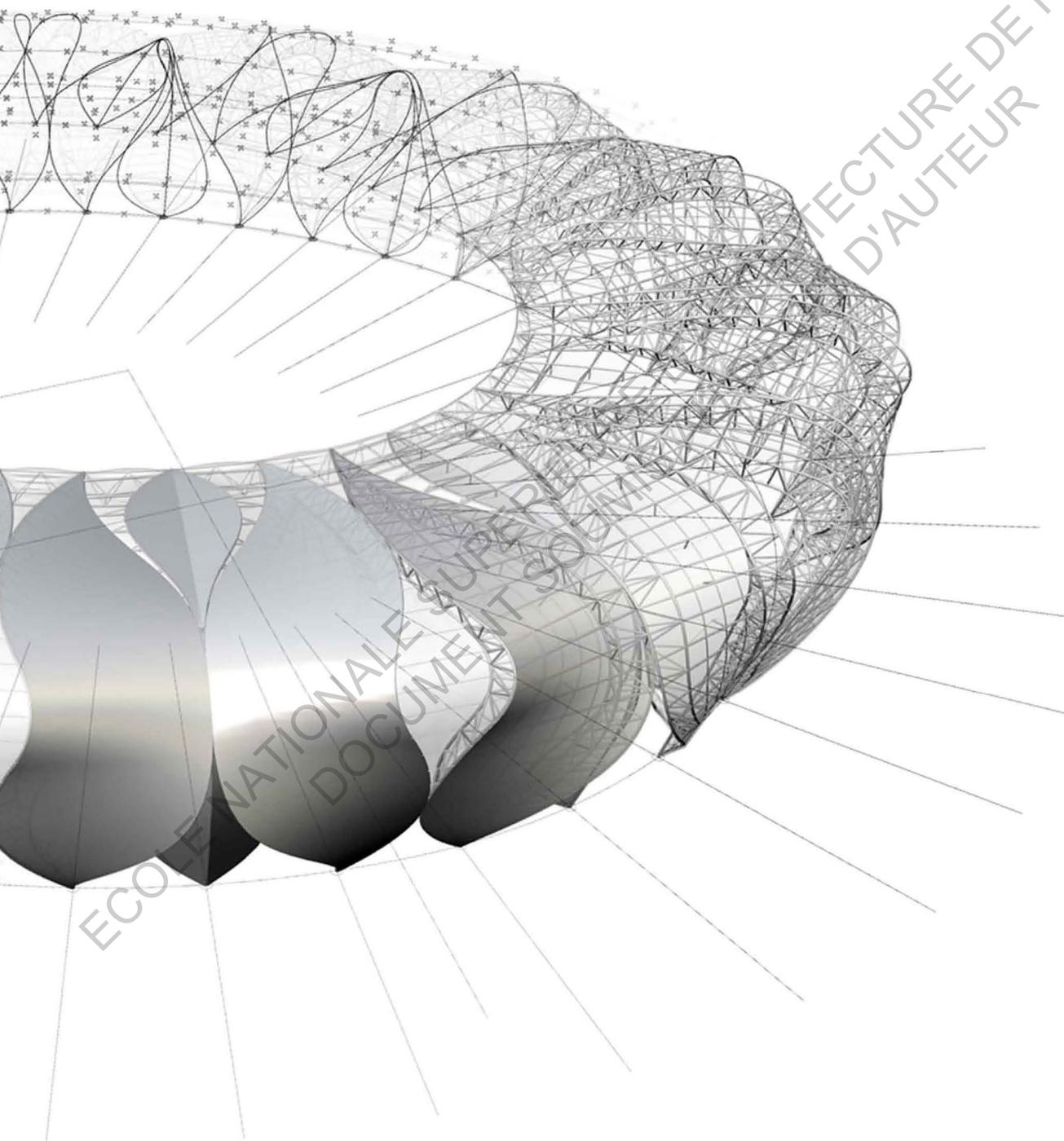


Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'architecture Paramétrique

au delà de la morphogénèse visuelle

Barbisan Nicola



Sommaire

Introduction :..... 5

I Création de forme..... 8

I - Naissance d'une architecture. 8

II- Les mathématiques de l'espace : 12

a Les logiciels paramétriques 14

b Différentes manières d'aborder l'architecture 21

III la paramétrisation à plusieurs échelles : 26

a- la recherche d'une élégance 26

b- la genèse de la forme 31

c - le problem solving 34

d - Vision d'une nouvelle architecture libérée 43

II De la forme à la matière..... 48

I - Epouser constructivement une forme : 48

a Sculpter la matière 50

b Imprimer la matière 53

c L'assemblage 56

d Le tissage 59

e Le tissage 67

II - Les éléments finis à la base de la génération du modèle constructif 70

a Les éléments finis 72

b La science de l'ingénieur 73

III Nouvelles visions du paramétrisme..... 78

I La pensée selon l'axe paramétrique. 78

II Concevoir l'architecture en mouvement : 81

a l'art source de paramétrisation visuelle 81

b Le mouvement à travers l'architecture cinétique 84

III Le passage d'un modèle 3d à la matière physique sans l'utilisation d'un support papier. 91

IV L'architecture paramétrique libre de droit ? 92

Conclusion..... 96

Bibliographie :..... 98

Introduction :

" On ne peut plus penser l'architecture stéréotypée, rigide comme le cube, le cylindre ou la pyramide. Notre vision de l'architecture et de l'urbanisme, se compose d'éléments qui doivent devenir variables, malléables grâce à des paramètres. Elle ne doit pas être générée par une combinaison d'éléments formés grâce à des axes, des symétries et des proportions, mais par quelque chose de beaucoup plus organique, plus ouvert, des réseaux apparents plus riches, différenciés et complexes, comme une ambiance naturelle riche qui ne se répète jamais, en trouvant la voie grâce à des transformations. Ce modèle s'inspire pleinement de la biologie et des systèmes naturels».

« Patrick Schumaker » architecte chez ZAHA Hadid, interrogé lors de la biennale de Venise 2012.

Comme l'explique Patrick Schumaker, l'architecture paramétrique est liée à une volonté de repenser totalement l'architecture dans sa vision spatiale, mais aussi et surtout dans sa vision constructive. L'étude portée dans ce mémoire se concentrera sur deux points : d'abord sur la naissance de ses formes numériques qui se construisent généralement sur des modèles vivants, puis dans un deuxième temps sur la retranscription de ses formes en une réalité constructive. Nous essayerons de comprendre comment une idée qui se génère numériquement peut aboutir à un principe physique véridique. Pour cela l'étude dans ce mémoire se basera sur des réalisations de maquettes numériques et de bâtiments en cours de réalisation ou déjà achevés. La difficulté du propos, comporte deux ambiguïtés. Premièrement, le modèle de l'architecture paramétrique instruit par certains théoriciens est une idée loin d'être partagée par l'ensemble des architectes. On se devra donc de critiquer la vision qu'offre cette architecture, positivement ou négativement. Deu-

xièmement, cette vision est encore à ses prémices et propose peu d'exemples réellement aboutis en termes structurels. La documentation en détail est donc naissante et sans cesse en évolution.

L'architecture paramétrique n'est pas uniquement une l'architecture non standard, c'est une architecture basée numériquement sur le principe de fonctionnalisation de paramètres. Les dimensions, les domaines d'espaces, la construction se base sur la définition de paramètres qui sont manipulables en temps réels. On ne prend donc pas en considération la création de formes - basée sur le façonnage de l'objet numérique pas à pas, comme pourrait le faire un sculpteur - mais bien une création globale régie par une multitude de paramètres combinés entre eux.

Utilisée tout d'abord dans l'architecture aéronavale, l'architecture paramétrique et avec elle, la formulation de nouvelles méthodologies algorithmiques, ont représenté la possibilité de reconcevoir profondément la discipline architecturale. En synthétisant, nous pourrions dire que deux approches ont caractérisé l'usage paramétrique en architecture :

- une approche problem-solving visant à solutionner les problèmes complexes du bâtiment.
- un usage génératif d'instruments algorithmiques-paramétriques visant à l'exploration de nouveaux langages architecturaux.

Les projets d'architecture paramétrique ont souvent des airs et des audaces qui ont l'air gratuit, au mieux esthétique. Si nous considérons d'un côté qu'une architecture paramétrique se libère de la standardisation, de l'autre il ne faut pas tomber dans le rêve d'une architecture libre de toute contrainte.

On cherchera donc dans une première partie à comprendre quelles sont les contraintes possibles pour

générer une forme paramétrique, et ensuite quelles sont réellement les paramètres d'entrées pour créer une forme. Ces contraintes ont-elles réellement un sens architectural ? Bien sûr nous ne voulons pas nous arrêter à l'apparence de la structure ; nous ne voulons pas uniquement de formes organiques, mais de construction générative. Nous parlons de l'architecture qui ramène la nature au rôle déjà connu d'inspiration, tout en introduisant un enjeu clair et net sur la valeur du résultat que ce processus produit. Et ce même dualisme donne lieu à la création de forme architecturale : c'est ainsi que l'on part, de l'observation et de l'analyse du contexte, pour concevoir des formes qui ne naissent pas d'un simple formalisme esthétique, mais qui proviennent d'un rassemblement des données et d'informations nécessaires pour contrôler, modeler, déterminer l'organisme architectural.

Nous ne voulons pas voir le résultat final, produit numériquement, nous voulons explorer la réalité, donc atteindre la substance de l'objet afin de pouvoir la connaître et la juger seulement à la fin. L'architecture paramétrique pourrait-elle avoir la force d'un théorème, en tant que résultat d'un processus de transformation, ou entraîner le doute de la conjecture ? Nous vivons à une époque où les fruits de la révolution informatique mûrissent, où l'influence des technologies numériques a déjà profondément modifié le processus conceptuel dans différents domaines du savoir, imposant de plus en plus la création de nouveaux paradigmes. De quelle façon cela se produit-il en architecture ? Rarement, le confort ou l'usage sont pris en compte. Pourquoi ne pas faire rentrer des critères économiques dans sa chaîne de script permettant de générer une tour aux formes classiques dans ce paradigme génératif ?

Le savoir numérique n'est qu'une partie émergente de l'architecture paramétrique. En effet sa retranscription matérielle constructive est bien plus puissante. La non standardisation des éléments constructifs de base engendre des opérations qui sont aujourd'hui en puissant développement. Les machines à commande numérique convenant parfaitement à l'approche matérielle de l'architecture paramétrique, nous tenterons de comprendre leur fonctionnement ainsi que leurs limites actuelles.

Le deuxième point du mémoire traitera donc de la transcription, en forme concrète et tangible. Le premier questionnement de cette partie pose ainsi la question suivante : comment retranscrire ces formes complexes en une réalité constructive ? De plus, une autre ambiguïté sous-jacente à cette réflexion sur la connexion virtuel-réalité se pose. Cette transposition se basait jadis entièrement sur un support papier. A-t-on encore réellement un sens à retranscrire ces formes sur papier ? Ces formes qui sont généralement perceptibles par une vision uniquement spatiale. Le plan et la coupe n'apportent qu'un complément, mais n'ont finalement aucune justification physique. Sommes-nous arrivés à l'omniprésence numérique avec lequel tout système cartésien serait insignifiant, et donc contraindrait la future représentation par projection plane ? Autrement dit, sommes nous arrivés au stade où le papier ne serait plus nécessaire à la construction d'un projet, depuis sa création jusqu'au chantier même ? Quelles sont les limites actuelles du passage entre un modèle informatique et la réalité ?

L'architecture est forme, et la forme est matière. Cela est une évidence lorsque l'on résonne avec des objets basiques, un poteau, une poutre, une dalle... Ce modèle est basé sur la résistance de matériaux ou

tout objet est bien classé en élément « standard » (barres, poutres, poteau). La science constructive se base, depuis les années 1800, sur ce mécanisme physique servant à dimensionner tout bâtiment standard, mais aussi complexe, en le décomposant en sous éléments élémentaires. L'architecture paramétrique vise entièrement à repenser ce modèle et la façon de raisonner. Le savoir numérique constructif a vu ces dernières années l'apparition d'éléments finis, génératifs d'une nouvelle méthode de maîtrise matérielle, dans tous les modèles de calcul des programmes d'ingénieurs. Les logiciels plus élémentaires de vérification mécanique sont largement employés dans tous les domaines de la construction. Ces logiciels plus élaborés ou plus spécifiques, développés dans les domaines de l'automobile ou de l'aéronautique (comme ceux qui permettent de simuler les flux du vent) sont aujourd'hui souvent utilisés dans l'architecture. Cependant, la puissance incroyable de calcul des méthodes skyline et multifrontal des éléments finis (un travail de 100 ingénieurs travaillant pendant 100 ans se résume en 10 minutes de calcul avec un ordinateur) est en avance sur la réglementation en vigueur. Les Eurocodes ont déjà du retard sur les innombrables possibilités de ce modèle de calcul. Le décalage temporel est dû dans la plupart des cas à l'expérimentation servant ou non à valider une réglementation. Pour l'ingénieur, l'architecture paramétrique ouvre une porte immense et encore floue de modèle structurel, qui pour l'instant ne présente pas assez de recul sur les ouvrages déjà réalisés. Nous essayerons de comprendre, comment se réalise un dimensionnement de structure avec les éléments finis et où se situent aujourd'hui les limites réglementaires. Les projets actuels sont pour l'instant voués au stade du prototype ou de la maquette mais n'apparaissent pas comme une réelle science constructive.

La paramétrisation de la forme ne prend sens uniquement dans un monde virtuel (celui) de l'informatique. Le passage du monde virtuel à la réalité est envisageable, (positionnement de la partie 2), uniquement lorsque les paramètres se figent. Ils sont alors définis une fois pour toute, on ne peut ainsi plus les faire varier. La réalité offre donc souvent une architecture figée, gelée n'exprimant pas sa philosophie constructive faite d'optimisation ou de variation spatiale sensée. Peut-on imaginer que cette architecture reste attachée à ses paramètres dans le monde réel ? Pourquoi ne pas créer une architecture en mouvement ? Ce mouvement même qui serait régi par la variation intrinsèque des paramètres ? Autrement dit la création de formes à travers des modèles paramétrés, peut-elle aboutir à une architecture « animée » ?

Certains projets artistiques offrent des éléments de réponse concernant l'art en mouvement basé sur des paramètres vidéo. Cependant, l'architecture en mouvement existe à l'intérieur d'une maison, à l'échelle du mobilier, mais rarement sur les éléments structurant de l'édifice. Cette troisième partie sera donc une recherche sur les liens possibles entre paramètres virtuels et mouvements réels.

I Création de forme

I - Naissance d'une architecture

Pour mieux cerner le sujet du mémoire et s'intéresser uniquement à l'architecture paramétrique, qui n'implique pas seulement toute forme produite via les logiciels informatiques, il convient d'en faire une première définition, à partir de la manière dont elle est produite et non sur ce qu'elle produit.

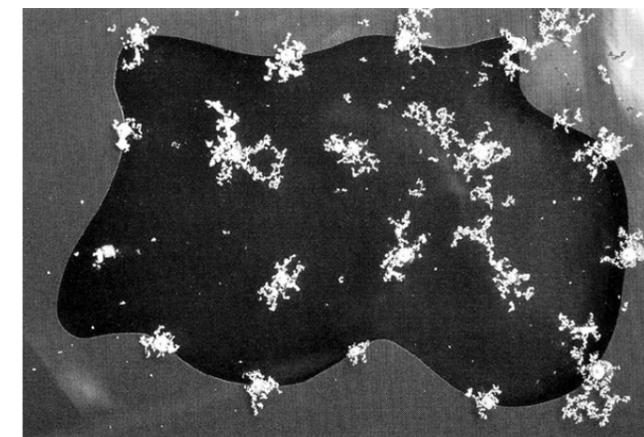
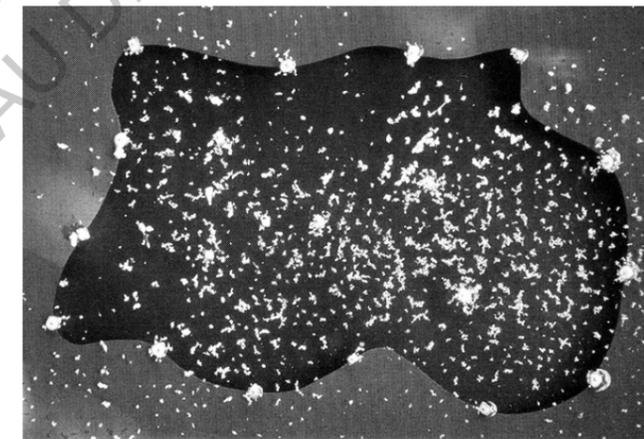
La paramétrisation est la capacité de gérer des modèles complexes et géométriquement très rigoureux. La spécificité d'un modèle paramétrique est de construire un modèle systématique d'un objet qui met en relation des variables indépendantes et des variables dépendantes, de diverses natures (valeurs numériques, entités géométriques, entrée vidéo, image, son...) que l'on appelle les paramètres du modèle. Le modèle paramétrique permet de produire différentes morphologies pour un même objet en faisant varier ses paramètres. Ce que produit réellement, un modèle paramétrique, est appelé une « instance ».

Au delà de cette simple définition sur la conception paramétrique, ce que produit l'architecture paramétrique intrinsèquement est bien plus difficile à définir, et ne pourrait se résumer en quelques lignes. La recherche de la forme idéale à longtemps préoccupé nombres d'architectes au cours de l'histoire. Cette maîtrise rigoureuse du dessin sous entendait implicitement une architecture jouant sur les mesures afin d'obtenir les meilleurs proportions. Nous ne nous attarderons pas d'avantage sur la naissance même du raisonnement conduisant à la maîtrise des proportions. Nous développerons plutôt la recherche sur l'architecture paramétrique numérique. Le paramétrisme sous entend réellement une vaste approche sur l'architecture contemporaine. Certains

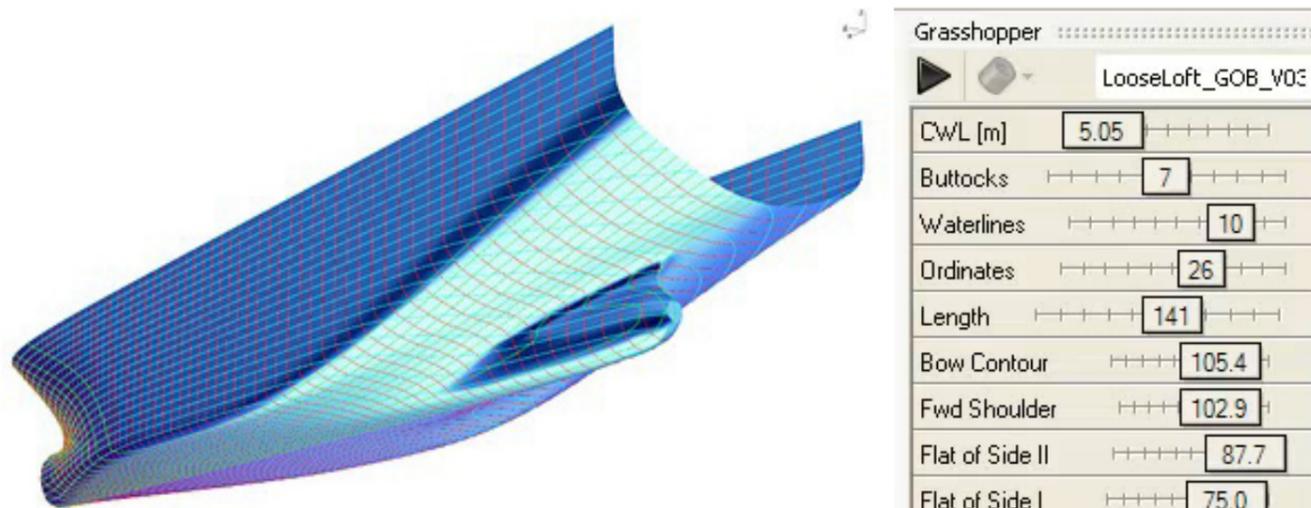
théoriciens y voient un changement radical dans la manière de pensée l'architecture. Cette architecture qui serait plus malléable, moins élémentaire dans ses formes, devient alors un nouveau courant de pensée, en pleine rupture avec le modernisme initié dans les années 1950 avec Le Corbusier. Robert Schumacher, Architecte du studio de Zaha Hadid, nous expose dans son livre intitulé « The Autopoiesis of Architecture » son entière vision de cette nouvelle source de conception basée sur le paramétrisme. A travers plusieurs petites thèses concises, 60 au total, réparties en deux volumes de 1000 pages au total, l'auteur, parvient à dresser clairement sa théorie sur ce qu'il a appelé « l'autopoiesis de l'architecture », fruit d'un travail de trente ans avec Zaha Hadid. Pour lui « le paramétrique offre finalement une réponse soutenable « sustainable », et crédible pour couvrir la crise du modernisme sur la recherche de style qui résulte depuis 30 ans ». Le point de départ de sa pensée est de démontrer que pour lui, le paramétrisme n'est pas simplement le fait de manipuler des scripts et des algorithmes, c'est avant tout un raisonnement construit. De ce fait le paramétrisme est pour lui « le grand style après le Modernisme. Le Post Modernisme et le Déconstructiviste étaient des périodes de transition, comme l'Art Nouveau ou l'Expressionniste. » (p 644 VII). Pour lui « Frei Otto est le seul précurseur du paramétrisme » p619. Il utilisait des processus physiques et des simulations dites « design engine » pour trouver des formes plutôt que de dessiner des formes inventées ou conventionnelles. Cette rigueur et cette élégance étaient cependant inaccessibles numériquement à cette époque pour Frei Otto. Son expérimentation consistait à placer dans de l'eau des aimants et des boules de polystyrène. Sous l'effet de l'attraction magnétique entre les billes de polystyrène et les aimants, et de la répulsion des aimants entre eux, le système est sans

cesse en recherche d'équilibre. Les aimants se repoussent à une certaine distance les uns des autres pendant que les billes proposent des trajectoires elliptiques ou paraboliques à la manière des planètes du système solaire. Frei Otto distingua alors trois modèles types, des trajectoires, des territoires et des longues distances. Il distingua également trois types de configuration fondamentale, des trajectoires directes, minimales ou minimisées. La morphologie résultant du paramétrisme apparaît donc comme un phénomène naturel organique ou inorganique qui est le résultat du processus d'auto organisation et d'évolution. Cette expérience physique simple est la base de la pensée du paramétrisme. Ainsi, si l'on voulait reproduire cette expérience numériquement on définirait deux systèmes : l'un générant les interactions inter-aimants et l'autre générant l'interaction aimant / billes de polystyrène. mène naturel organique ou inorganique qui est le résultat du processus d'auto organisation et d'évolution. Cette expérience physique simple est la base de la pensée du paramétrisme. Ainsi, si l'on voulait reproduire cette expérience numériquement on

définirait deux systèmes : l'un générant les interactions inter-aimants et l'autre générant l'interaction aimant / billes de polystyrène. C'est grâce à ces expériences de recherche de forme que Frei Otto définit la notion surface minimale entre deux géométries, qu'il appliqua par ailleurs sur le toit de stade Olympique de Munich en 1972. En alliant la modélisation classique aux outils digitaux, il dessina, bien plus tard avec l'agence NOX la piscine olympique The Water Cube de JO de Pékin en 2008. Avant cette remarquable maîtrise des logiciels pour parvenir à un dessin tridimensionnel, l'architecture paramétrique a réellement pris naissance numériquement dans la conception aéronavale. Les notions élémentaires de l'architecture navale reposent sur les contraintes dynamiques lors de l'avancée du navire et sur la poussée verticale générée par l'eau mise en évidence par Archimède. La surface de coque est donc le résultat d'un ensemble de contraintes physiques. Ainsi pour une esquisse la génération de la surface 3d de la coque peut se résumer à une vingtaine de paramètres uniquement. Parmi eux, la longueur, la hauteur et la largeur bien sûr mais aussi, la forme de l'avant et de l'arrière du bateau définis simplement par une courbe. Dans le plugin nommé t-splines installé sur rhino, on peut se rattacher aux paramètres déjà prédéfinis, pour générer une coque. Le bulbe avant et arrière étant la clé de la poussée, il est défini de façon précise avec plus de paramètres que pour le reste du bateau. Le modèle créé à parti du fichier Grasshopper permet au projeteur de faire varier ces paramètres et de visualiser sous Rhino ce que l'on appelle une instance de la forme. C'est donc une génération de formes purement contrôlées par un ensemble de paramètres initiaux qui sont ensuite mises en relation pour aboutir à une seule et unique forme. Ce pré modèle conduit plus tard à une conception plus poussée mise sous simulation numérique, qui possède encore intrinsèquement des paramètres définis pour chaque type de mer. En effet, les grands porte-conteneurs sont particulièrement sensibles au phénomène physique de roulis en raison de la conception de leur coque : un vaste arrière plat et un dévers de l'étrave prononcé.



Frei Otto, distanciations et attractions simultanées. Travail avec des aimants et des billes de polystyrène. Institute for Lightweight Structures (ILEK), Stuttgart, Germany, 1992



Les premiers modèles paramétriques : Coque de navire faites à partir du plug in T Splines. A droite les paramètres variables du modèle à gauche une instance de la surface paramétrique générée.

La forme de la coque peut conduire à des pertes ou des dommages lors de la cargaison des conteneurs et peut entraîner également des dégâts possibles au navire. S'appuyant sur la théorie de la physique fondamentale pour simuler l'accumulation de l'énergie qui a lieu au cours d'un mouvement de roulement, les chercheurs d'ABS ont mené une étude sur les conteneurs dits « ultra-larges ». Le dimensionnement de la hauteur du navire se fait en combinant toutes les actions possibles du roulis « vagues avec oscillation sinusoïdale » dans la direction perpendiculaire à l'axe longitudinal du bateau. Ces navires « ultra larges » sont en effet plus susceptibles au roulis. Le roulis paramétrique est la combinaison d'un ensemble bien équilibré de circonstances modélisées numériquement et prend forme grâce à des simulations de séquences pour illustrer les effets de la force de gravité sur les navires comme le roulis, le tangage et le pilonnement sur houle.

C'est donc en partie grâce à la modélisation paramétrique des coques de bateau, surtout grâce aux outils utilisés, que l'idée sous-jacente de pouvoir concevoir et dessiner des formes plus habitées paramétriquement est née. Néanmoins, il ne fallait

pas baser ce modèle génératif sans y imputer des contraintes initiales, qui était le moteur du dessin des coques de bateau. L'idée par laquelle la forme naît de contraintes externes, elles même décrites par un nombre limité de paramètres, se devait de trouver sens en architecture. Ceci soulève implicitement une question, quelles sont les contraintes, donc les entrées pour générer de la forme ? En d'autres termes, en d'architecture, quelles hypothèses génératrices pourraient découler directement de la physique. Certains éléments de réponse se rattachent au milieu extérieur, à la manière de l'eau sur le bateau. On pense alors immédiatement aux écoulements de masse d'air dus au vent, à la génération et la propagation d'onde générée par le son, au nivellement du terrain. Cependant l'abstraction dans laquelle plongerait l'architecture à travers la génération de forme via ce modèle, donnerait-elle réellement sens au projet final ? L'architecture est bien

plus riche qu'un simple résultat abouti de manière purement logique et résultant d'une optimisation via des facteurs extérieurs. Ne créerions-nous pas là une architecture pauvre, inhibée de toute la sensibilité sociale, comportementale des hommes ? Le dessinateur aurait-il encore le rôle du dessin au trait, ou se justifierait-il dans la modélisation des paramètres ?

Il est évident que le fait d'imputer des paramètres initiaux qui seraient explicitement physiques, anéantirait toutes les autres sensibilités du projecteur, si elles ne sont pas quantifiables. La différence entre la conception d'un navire et celle d'un bâtiment réside donc dans l'opposition entre la pure logique qui résulte des forces hydrodynamiques d'un système pour les grands porte conteneurs, et celle de la génération de formes architecturales qui se doit d'être plus sensible et peut être moins logique. La vision de Patrick Schumacher englobe beaucoup d'aspects, pas uniquement celle liée à la notion de forme. Il renvoie notamment dans toutes la première partie du premier volume, à l'implication sociale de l'architecture depuis le début de son l'histoire. En première approche, on en conclura que Robert Schumacher se veut donc l'auteur d'une nouvelle pensée de l'architecture initiatrice, dans la lignée des récits de Leon Battista Alberti, constructeur, ingénieur, théoricien et écrivain de la Renaissance avec « De re aedificatoria », ou de Jean-Nicolas-Louis Durant avec « Précis des leçons d'architecture » ou bien encore de Le Corbusier avec « Vers une Architecture ».

Dans ce mémoire, nous nous attarderons à comprendre la nécessité de repenser l'architecture dans la création de formes. Ce qui est stimulant, c'est de comprendre le processus de la création et les outils - qui comme on l'a précédemment décrit servaient à dessiner la coque de navire dans l'aéronautique utiles - pour arriver au paramétrisme dans l'architecture. La seule thèse de Robert Schumacher, bien qu'elle propose une vision entière de l'architecture Post Moderniste, ne permet pas entièrement de comprendre par des exemples concrets ce qui est sous-jacent à la création de forme dans le détails même des scripts ou des modèles Maya ou Rhino avec Grasshopper. Nous tenterons donc à travers des exemples de maîtriser des outils plus scientifiques pour ensuite discuter sur la thèse de Robert Schumacher.

Afin de mieux comprendre l'entière thèse de Robert Schumacher, il en convient de maîtriser le langage

de conception que génère l'architecture paramétrique, et surtout de faire un premier parallèle entre mathématiques, forme et architecture.

II- Les mathématiques de l'espace.

Comment mathématiquement une forme complexe est-elle définie ? Avec quels outils travailler ?

Les Mathématiques purement logiques, invisibles spatialement et impalpables sont profondément une discipline abstraite, incomprise. Les logiciels de design les rendent presque entièrement transparentes. On ne se pose désormais plus la question mais dès lors que l'on clique sur une commande ou sur une icône, un script sous-jacent renvoie soit une information (exemple coordonnée du point) soit nous demande des informations afin de réaliser une fonction (centre et rayon) pour dessiner un cercle etc. En prenant des opérations simples, on comprend facilement les commandes menées par l'ordinateur. Cependant, si l'on s'intéresse aux mathématiques et au script derrière chaque fonction de Grasshopper, alors cela se révèle totalement abstrait pour un dessinateur. Les ordinateurs voilent la présence des mathématiques implicites et cachées et les mathématiques sont alors noyées dans le langage informatique et sont désormais uniquement accessibles pour les personnes possédant ce langage informatique. Le dessin paramétrique et génératif a donc un prix. Celui du décalage entre mathématique de l'espace et langage de code (C++, rhino script...). Nous ne croyons plus en la figure idéale du cercle, comme le visualisait Palladio 1508-1580, nous choisissons des coordonnées cartésiennes ou polaires non plus avec un compas ou une règle mais avec un pointeur contrôlé par une souris. La création de formes ne se résume donc plus à de simples opérations cognitives telles que la symétrie, l'homothétie ou la rotation. On se référera désormais à des gradients des suites de nombres complexes ou des fonctions polynomiales, pour générer des données. La génération de formes, via des opérations, se construit maintenant avec la gravité, la collision, la relaxation, le draper, en minimisant une surface, en faisant croître une surface et en la contraignant par des obstacles... Autant de fonction certainement envisageable manuellement mais qui étaient des opérations cognitives jusqu'à présent inconnu nu-

numériquement. Cette illustration montre la relation entre géométrie et architecture qui a sans cesse été continue dans l'histoire. Aujourd'hui, certes les ordinateurs, ont réconcilié l'architecture avec les calculs. Pour la première fois, les architectes peuvent réellement jouer avec le temps comme avec l'espace. Ils peuvent générer des flux de manière à transformer les formes architecturales en gelant ces flux à un instant. Mais ce rapprochement grâce aux programmes développés par « l'industrie » ne renvoie absolument aucune notion très complexe de mathématique. La conséquence directe de ce modèle opérationnel ou les principes mathématiques sont souvent cachés derrière les effets sur l'écran, n'a pas abouti plus loin vers un nouvel imaginaire mathématique. Plusieurs raisons expliquent cette vision. D'abord, les designers traitent les objets mais également les relations entre eux. C'est ce de quoi la paramétrisation est faite : considérer les relations bien plus abstraites que ce que le dessin des objets implique habituellement. Cette tendance est renforcée par l'utilisation des scripts et des algorithmes. La notion de conception via la paramétrisation est donc une nouvelle façon d'aborder les interactions entre objets, via des opérations plus poussées et moins géométriques qu'auparavant. Cependant elle n'a pas encore créé un nouvel imaginaire ou de nouvelles bases de projection future, mathématiquement parlant. Un Mathématicien est simplement un inventeur, à l'opposée d'un chercheur scientifique s'approchant de la découverte. Le mathématicien établit des connexions et des descriptions de formes, mais ne décrit pas les faits. En 1931 Kurt Gödel montre qu'un système cohérent axiomatique (défini par des axes), soit un système sans contradictions, caractérise des solutions, qui ne peuvent pas être prouvées vraies ni fausses. Les mathématiques à la base du dessin architectural ne sont donc ni prouvées vraies ni prouvées fausses pour quelconques opérations. Elles obéissent entièrement à la volonté du projeteur. C'est ce qui explique l'incapacité à ouvrir d'autres voies mathématique, car la conception

architecturale n'est ni vraie ni fausses. Les mathématiques à la base du dessin architectural ne sont donc ni prouvées vraies ni prouvées fausses pour quelconques opérations. Elles obéissent entièrement à la volonté du projeteur. C'est ce qui explique l'incapacité à ouvrir d'autres voies mathématique, car la conception architecturale n'est ni vraie ni fausse, mais repose sur d'autres fondements moins logiques.

Les objets mathématiques sont donc des produits de l'imagination humaine. Néanmoins, ce qui caractérise une fiction ce n'est pas seulement son statut logique (s'il est faux ou vrai) mais sa fonction cognitive. Une représentation dont le but est autant de fournir une description juste de la réalité que de nous aider à imaginer des situations irréelles. Les fictions assistent notre imagination et c'est sur ce point que la pertinence des scientifiques est mise à mal, les sciences sont plus qu'une simple collection de faits. Cette modélisation opérative voit le retour d'une vieille question qui interroge le manque d'intuitivité du contenu de certaines opérations.

A l'heure actuelle les agences d'architecture comme Zaha Hadid, Foster, OMA, Gehry, travaillent avec des dessinateurs et des projeteurs qui utilisent de façon intense les logiciels comme Grasshopper, Maya, ou des outils paramétriques comme Générative component ou Digital Project. Cependant une grosse partie de leur recherche s'effectue également dans le Scripting et les algorithmes génératifs. Lors de la résolution de problème ou de génération de systèmes, ils travaillent avec les mathématiques conceptuelles et avec ses équations, plutôt qu'avec le modèle standard de logiciel diffusé par les industries. Cela implique un recours direct aux symboles et signes génératifs. Ecrire les formes et procéder de cette façon se révèle bien plus autodidacte. Leur façon de procéder avec les équations est donc un travail au premier niveau de la pyramide, où très peu de chose sont définies. Travailler comme le font les utilisateurs, dont je fais partie, sur des logiciels où l'interaction est intuitive mais où les décisions ont



Mathematics of space- Writing Form. Harvard Graduated School Of design.

La maîtrise de l'espace passe obligatoirement par une description géométrique. Dessiner à partir d'équations, telle est la philosophie de l'école de design d'harvard.

déjà été faites, c'est travailler au sommet de cette pyramide. Il y a donc un réel engouement à l'heure actuelle pour parvenir à redéfinir la place de l'architecte dans cette pyramide. Doit-il connaître les langages informatiques ou les bases intuitives des logiciels lui permettant de maîtriser et de concevoir son imagination, en s'entourant de personnes compétentes dans le langage informatique ?

a Les logiciels paramétriques

De manière à percevoir quelles sont les opérations cognitives dans la conception de forme spatiale, il convient d'étudier les possibilités des logiciels qui ont poussé l'imaginaire paramétrique. Aujourd'hui trois logiciels de conception 3d se détachent et proposent une nouvelle approche pour dessiner des projets : Grasshopper plug in de Rhino, Digital Project développé par Ghery Technologie et Générative Component (Bentley System).

Grasshopper (le Scripting visuel)

Le noyau ou cœur de rhinocéros est programmé en langage C++. A partir de là, Rhino propose plusieurs échelles pour élaborer des formes. La base du logiciel fonctionnant en C++ Rhinoceros offre un kit de développement en C++ nommé SDK : System Development Kit qui donne accès à l'ensemble des objets qui le composent : les objets géométriques, les outils de visualisation, d'interaction, etc. Avec ce SDK on peut atteindre le cœur du logiciel et développer des applications très sophistiquées. Cependant, C++ est un langage de relativement bas niveau et demande des connaissances avancées en programmation et une gestion fine de la mémoire. Son usage est donc plutôt réservé aux informaticiens.

Un langage est dit de bas niveau lorsqu'il est proche de ce langage « machine ». Un langage de haut niveau est, quant à lui, plus proche du langage naturel (humain).

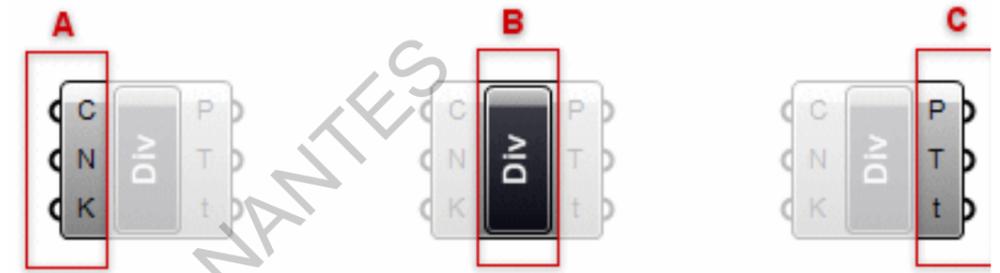
Pour les utilisateurs non-informaticiens, McNeel (éditeur de Rhinoceros) met à disposition des langages de plus haut niveau permettant d'écrire de petits programmes (des scripts), et de générer des icônes activant la fonction du programme. Ainsi RhinoScript est un langage de programmation proche de VBScript, un langage de plus haut niveau que C++ et plus simple à utiliser. Il donne accès à

certains objets de Rhinoceros à travers une bibliothèque de fonctions. Ces fonctions sont par contre en nombre limité ce qui a pour effet de restreindre les possibilités de programmation. Par exemple aucune fonction n'est prévue pour décomposer un solide et accéder directement aux sommets, aux arêtes ou aux faces d'une surface ou d'un solide. L'ajout de nouvelles bibliothèques de fonctions accessibles par Rhinoscript est possible en revenant au langage C++.

Sans utiliser C++, Mc Neel offre un autre kit de développement « enveloppant » le kit C++ : Rhinoceros SDK.NET. Ce dernier permet l'utilisation de langages de plus haut niveau que C++ comme VB.NET ou C#.NET. Ces langages sont à peine plus compliqués que RhinoScript et donc à la portée d'utilisateurs, agueris certes, mais non nécessairement informaticiens de métier.

Cependant ces kits de développements, quel que soit leur langage, nécessitent une compétence en algorithmique et des techniques de base de la programmation informatique. McNeel propose donc également aux utilisateurs de Rhinoceros un outil de programmation visuelle ne nécessitant l'usage d'aucun langage de programmation : le Plugin Grasshopper.

Grasshopper se situe donc au plus haut niveau, c'est-à-dire dans le langage le plus accessible au non-spécialiste de la programmation. Grasshopper permet alors de créer des modèles paramétriques sur Rhinoceros grâce à de la programmation visuelle. Son utilisation par des architectes est donc généralement préférée par rapport au VB script, VB.NET ou C#.NET. La programmation visuelle (ou programmation graphique) est un langage de programmation procédant d'éléments à assembler. Ses éléments sont représentés par des symboles graphiques rectangulaires, sorte de boîte de commande qui « encapsulent » du code, c'est-à-dire des fonctions ou des sous-programmes (codés en VB script). En programmation l'encapsulation est une méthode permettant de protéger un fragment

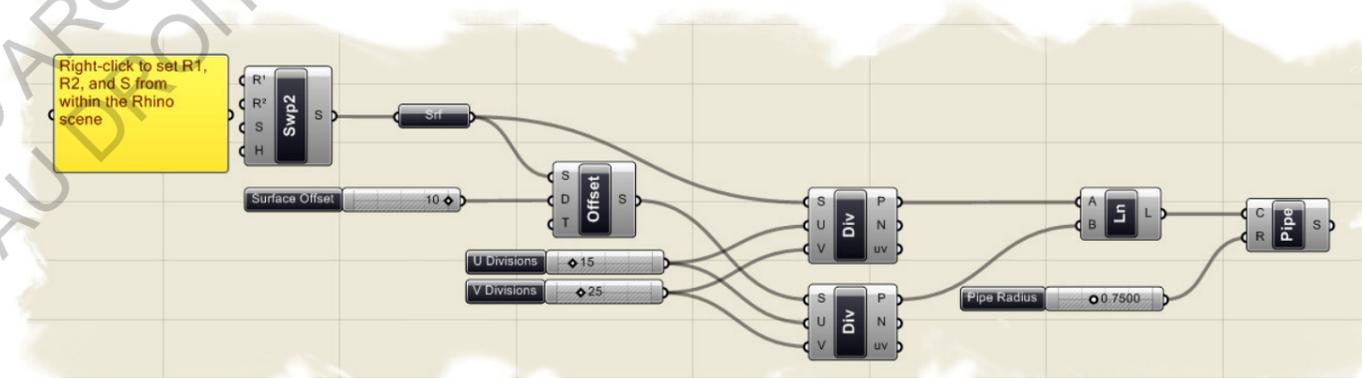
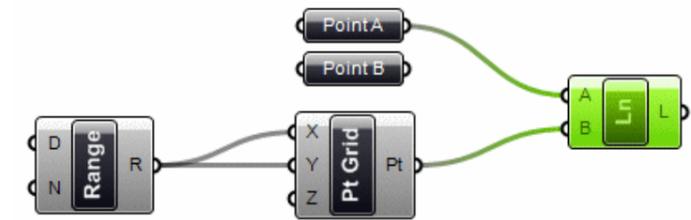


Au dessus : visualisation d'un composant et à droite d'une chaîne générant une simple ligne AB.

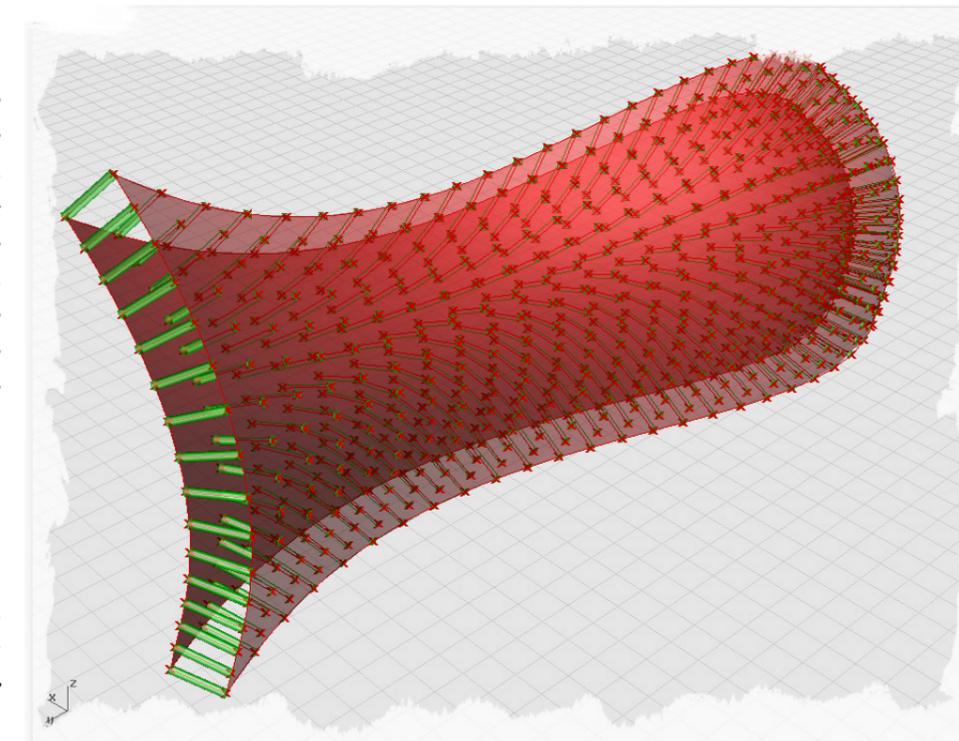
A : les paramètres d'entrées du composant. (input)

B : la fonction du composant

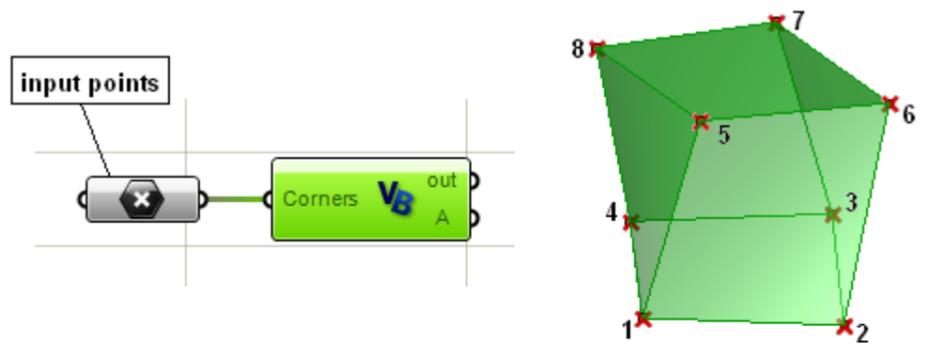
C : les trois paramètres de sorties (output)



Au dessus : visualisation d'un fichier générant à partir d'une surface courbe, une autre surface décalée et rattachée par des cylindres. La distance entre les deux surfaces ainsi que le nombre de tubes peut être gérés par les curseurs réciproquement par surface Offset et U/V divisions. La taille du diamètre se paramètre via le curseurs Radius.



A droite : visualisation de l'instance créée sur Rhino qui peut à tout moment se geler et devenir une géométrie morte.



```
Sub RunScript(ByVal Corners As List(Of On3dPoint))
    ' Build the brep from corners
    Dim Brep As OnBrep = OnUtil.ON_BrepBox(Corners.ToArray())

    A = Brep
End Sub
```

boite de dialogue utilisant le langage VB script sur Grasshopper.

de code. Un code encapsulé fonctionne tel-qu'il vne peut être modifié. Pour l'utilisateur, ces éléments sont des « boîtes noires » effectuant un traitement dont on ne connaît que le type des données demandées en entrées nommé « input » et produites en sorties « output ». La construction du projet de la géométrie s'effectue en reliant les entrées et les sorties et génère ainsi un code invisible pour l'utilisateur. Celui-ci ne voit effectivement que le résultat. On obtient alors un graphe dont les nœuds expriment les traitements à effectuer par le programme, les arcs (ou liens) et le flot des données. Le programme est exécuté en temps réel en parcourant le graphe. Une modification de donnée d'entrée du graphe entraîne une nouvelle exécution du programme.

Ce mode de programmation est relativement simple. Le code étant encapsulé dans les nœuds du graphe, il n'y a pas de risque d'erreur de syntaxe. Aucune connaissance sur les structures de contrôles et plus généralement en algorithmique n'est requise. Le même principe avait été développé en 1988 sur un logiciel de création musicale et multimédia nommée Pure Data.

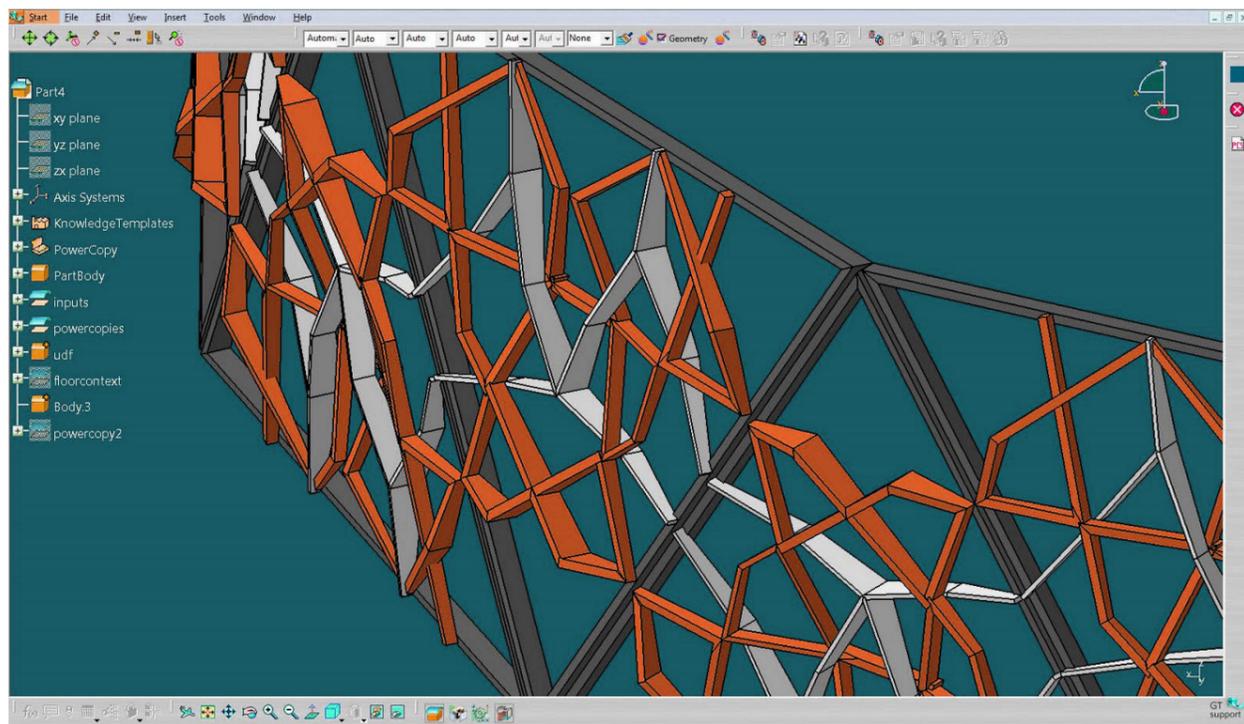
Grasshopper n'est pas un logiciel en soit. Le modèle de script visuel réalisé sur Grasshopper est en permanence relié avec Rhino pour visualiser la géométrie. Ainsi Rhino n'est ni plus ni moins qu'un écran, ou vient apparaître en temps réel une instance du modèle de Grasshopper, nommé "objet instanciés".

Pour obtenir un objet définitif à partir d'un modèle paramétrique sur la scène Rhinoceros, le modèle doit être « baker » (fonction bake). Beaucoup de « boîtes », qui derrière possèdent un script, peuvent être créées en vue de générer de nouvelles opérations. Les entrées peuvent provenir de processing par exemple. Ce genre de traitement de flux requiert cependant des connaissances de traitement inter-logiciel assez pointu. Nous en reparlerons dans deuxième partie. Grasshopper a créé également une communauté sur internet ou les blogueurs peuvent échanger et faire continuellement évoluer la base de données. Par rapport à Rhinoscript, Grasshopper ne permet pas d'inclure de récursivité dans un modèle. En effet, dans un modèle Grasshopper, les entrées sont traitées jusqu'à obtenir un certains nombre de sorties. Ce « traitement » est linéaire et dirigé : le graph est dit acyclique (il ne fait pas de cycle). Cependant toutes ces limites sont peu à peu repoussées par des développements par la communauté de codes ou plugins pour Grasshopper. Ceux-ci prennent la forme de codes encapsulés ou de composants à ajouter, faciles à utiliser, et étendant les fonctionnalités de GH. Par exemple HoopSnake permet aujourd'hui de faire des boucles et Firefly permet l'interopérabilité de GH avec Arduino et divers protocoles d'échanges (OSC, UDP) de façon simple.

Digital Project :

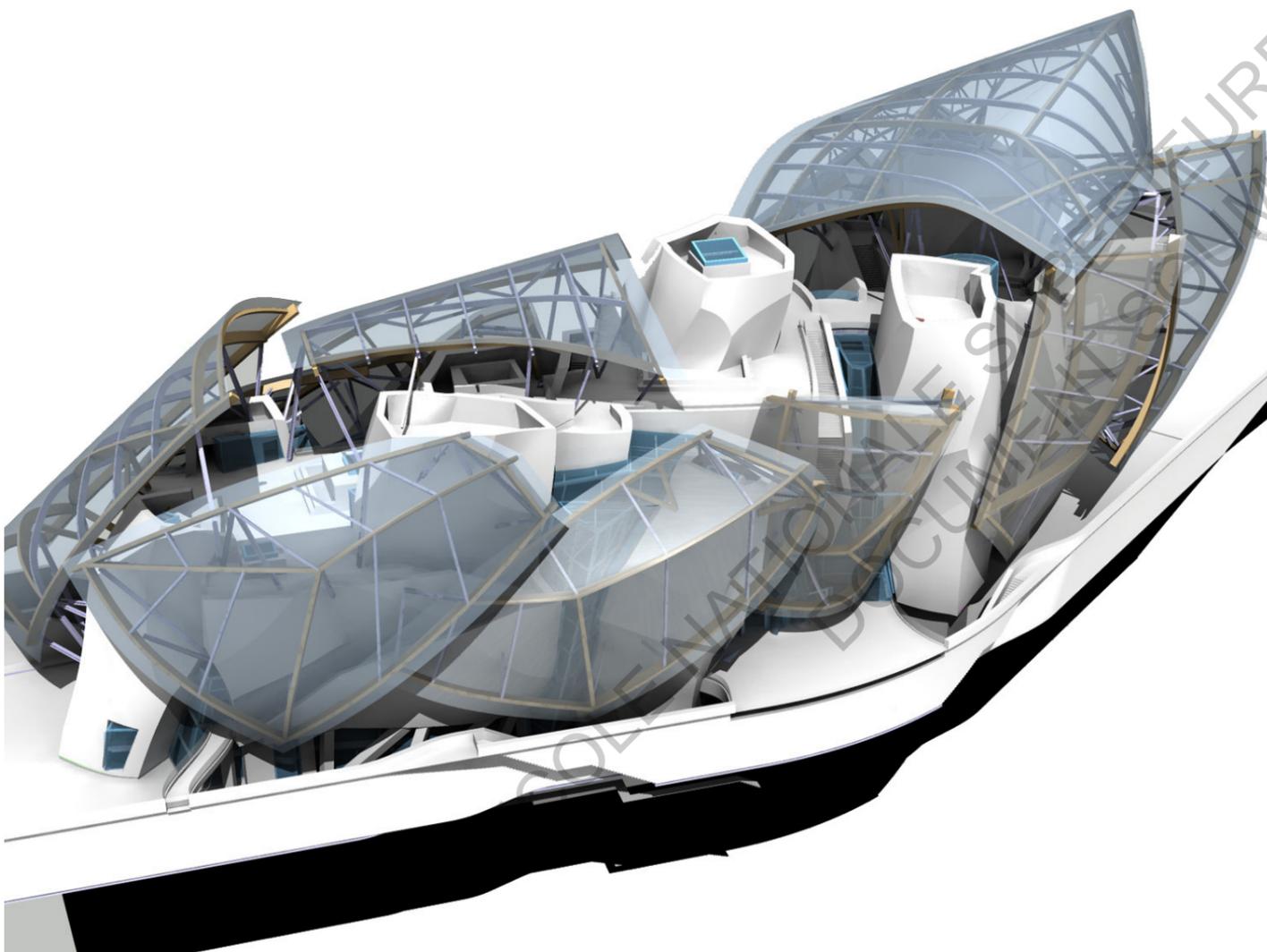
Digital Project est un logiciel CAD, Computer Aided Design, basé sur Catia V5 et développé par Gehry Technologie. En se basant sur Catia, une nouvelle interface a été instaurée pour le travail de projet d'architecture grâce aux développeurs de Gehry Technologie. L'interface de DP se présente comme tout autre logiciel 3D, des icônes permettant la création de formes et d'autres effectuant des opérations. Sa spécificité réside dans la construction du modèle. En effet tous les objets sont hiérarchisés et donc instanciés. Cette hiérarchie est visible en haut à gauche de l'écran ou bien en activant le « modeling tree » l'arbre de modélisation. Cette approche est sensiblement identique à Cinema 4d ou 3ds max à ceci près que lors de la création du bâtiment les objets appartiennent obligatoirement à un étage (ainsi la hauteur d'étage est paramétrable et le modèle s'adapte à ce paramètre en temps réel). Ce niveau de paramétrage se rapproche plus de Revit ou Archicad. On peut également créer des poutres, poteaux, etc en ajustant en permanence leur section. DP serait donc un logiciel mixte alliant la paramétrisation sur Revit, un logiciel de conception de bâtiment, à celle de Cinema 3ds max, dédié plus au dessin cinématographique. Sa puissance s'exprime donc par sa capacité à créer des formes à base de nurbs, de spline en les interprétant ensuite en éléments de construction de type poutre, poteau, voiles... Cependant la puissance de DP, réside dans l'emploi de fonctions très puissantes écrites en script par l'utilisateur. Le script n'est pas forcément visible en entier. Lorsque l'utilisateur lance le script, une fenêtre s'ouvre et demande à l'utilisateur de rentrer les « inputs ». L'utilisateur sélectionne alors les objets appropriés pour réaliser l'opération. Une fois la fenêtre fermée, la commande visant l'opération possède encore quelque paramètre réglable. Tout ceci s'instanciant bien sûr dans la hiérarchie. L'autre point clé de ce logiciel est qu'il permet la collaboration BIM. Gehry technologie a créé deux autres logiciels complémentaires, Digital Manager et Digital Extension. Le point final de cet outil de collaboration permet notamment de dessiner les réseaux d'électricité, d'eau sanitaire, de ventilations,

de désenfumage et de transférer ces informations directement aux fabricants. Un puissant outil de collaborations. Le sujet du mémoire se concentre uniquement sur la création de formes contrôlées paramétriquement, et non sur les possibilités du BIM. Le musée de Guggenheim à Bilbao fut le premier bâtiment d'importance réalisé avec Catia. Par la suite tous les édifices imaginés par Franck Gehry, ont été réalisés d'une manière ou d'une autre via Digital Project « évolution architectural de Catia ». Il en a été ainsi pour la Sagrada familia, Walt Disney Concert Hall, le stade des jeux olympiques de Pékin et plus récemment le pavillon de la création Louis Vuitton à Paris, et la Tour Burj Kalifa. La contribution des utilisateurs au développement du logiciel par la société Gehry Technologie, peut se faire via un site Digital Project Hub où un ensemble de partage et plate forme de renseignement est disponible. L'échange de script est donc rendu possible via ce serveur.



Ci dessus : Modèle paramétrique sur Digital Project, générant un tissage de deux mailles voronoï, l'une blanche l'autre orange.

Ci dessous : Le pavillon Louis Vuitton réalisé par Franck Gehry, développé avec Digital Project.



Génération component :

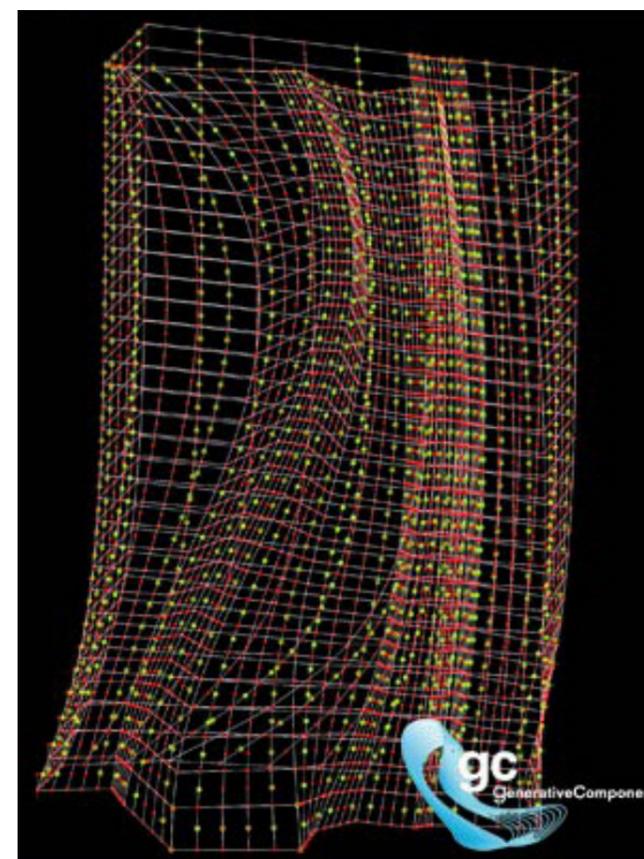
Gc est un logiciel CAD développé par Bentley Systems, et fut introduit en 2003. De plus en plus utilisé surtout par la communauté des architectes de Londres vers 2005, le logiciel fut commercialisé en 2007. La volonté de la société était de développer un logiciel non pas de modélisation mécanique 3d, mais de préserver plus de fluidité et d'aisance dans le design et en architecture. Les utilisateurs peuvent interagir avec le logiciel soit par la modélisation dynamique et la manipulation directe de la géométrie, soit en appliquant des règles, en capturant les relations entre les éléments du modèle, ou bien encore en définissant des formes et des systèmes complexes grâce à des algorithmes. Le logiciel prend en charge plusieurs entrées de fichier standard de l'industrie, y compris DGN par Bentley Systems, DWG d'Autodesk, STL (stéréo lithographie), Rhino. Le logiciel peut également s'intégrer aux systèmes de modélisation des données du bâtiment BIM.

Le logiciel se décompose en trois parties. Une fenêtre de visualisation « view » (à droite), une fenêtre de fonction de génération « task » (en haut à gauche) et une fenêtre de gestion de variables « Graph variables » (en bas à droite). Pour n'importe quelles opérations ou transformation simple, exemple déplacement « translate » ou pour une rotation « rotate », le vecteur de translation ou l'angle de rotation peut directement être entré comme paramètre mais un bouton permet également d'accéder au Script editor. Cette fenêtre de commande permet de renvoyer des informations à l'opération en question. Par exemple au lieu de renvoyer un seul vecteur on peut générer une suite de vecteurs selon une règle mathématique... Dans cette fenêtre de commande on retrouve une icône fx où un ensemble de fonction est déjà programmée. Appeler une fonction revient juste à rentrer dans le script une opération déjà programmée. La base du script est en C++.

Le groupe Smart Geometry Group a été fondé par des experts industriels, Robert Aish (Bentley Systems), Hugh Whitehead (Foster and Partners), Lars Hesselgren (KPF) and Jay Parish (Arup Sport) afin de

promouvoir les nouvelles technologies. Avec plusieurs séminaires à travers le monde ce groupe vise à partager l'expérience et le savoir des professionnels aux étudiants des universités. Ce groupe est sponsorisé par Bentley Systems qui met bien l'accent sur Génération Component.

Ci dessous : visualisation de la géométrie interactive sous GC génération Component.



Maya :

Maya, qui veut dire Illusion en sanskrit, est un logiciel commercial réputé pour les images de synthèse, développé par la société Alias Systems Corporation. Utilisé fortement par l'industrie du cinéma, principalement sous Linux, le logiciel utilise intensivement le langage MEL, permettant à ses utilisateurs de personnaliser et d'ajouter des fonctionnalités sans avoir besoin de connaître le langage C ou C++. Il est toutefois possible de créer des extensions plus complexes grâce à une API utilisant le C++. En octobre 2005, Alias fut vendu à la société Autodesk, qui compléta l'acquisition le 10 janvier 2006. Alias Maya est dorénavant connu sous le nom d'Autodesk Maya. Les versions deviennent de moins en moins stables, voire ne sont plus rétro-compatibles. La version 8 a été boycottée par un certain nombre de sociétés développant des plugs professionnels. Les fonctions inhérentes à l'architecture sont principalement, hair simulation, les fluides dynamiques, et les membranes. La propriété des fluides est utilisée dans l'architecture paramétrique pour absorber et faire le médiateur des conditions des arrêtes et des gradients de transition entre différentes zones.

D'autres logiciels proposent plus au moins une conception paramétrique comme Salome, PythonOCC, OpenCascade (coeur C++ des deux précédents) et Processing permet de créer via des petits scripts du dessin génératif interprétable en formes malléables.

Diverses approches sont ainsi possibles à travers ces logiciels présentés. Il en résulte que la base de tous s'appuie sur du code, qui définit ensuite une géométrie. Cette géométrie se compose de points à la base de tout. La différence des modèles outre leur interactivité et leur maniabilité peut se faire également dans leur précision interne. En effet, la précision des modèles digitaux n'est pas infinie. Ce qui parfois conduit à certaines erreurs lorsque l'on manipule des puissances avec des nombres réels. Dans la plupart des autres cas la manipulation des réels ne pose pas de souci majeur. C'est ce que l'on appelle le floating point. Ces imprécisions peuvent

être négligées dans la plupart des cas, cependant elles peuvent également s'ajouter et devenir « relevant » dans des opérations complexes géométriques. Ce qui explique parfois que l'opération de départ du point (0, 0,0) peut advenir par l'opération inverse au point (10¹⁵, 10¹⁵, 10¹⁵). De plus, plusieurs opérations fondamentales comme l'intersection de deux nurbs, utilisent des approximations numériques, ce qui détruit la notion de la précision infinie des modèles CAO. C'est pourquoi les logiciels ont une tolérance réglable. Augmenter la tolérance, peut améliorer le travail à partir de la géométrie importée, mais réduira la qualité finale. La diminuer peut alors réduire les chances de faire fonctionner certaines opérations géométriques mais cependant booste les temps de calcul. Bien sûr les erreurs d'opérations géométriques sont impossibles à éviter dans certains cas, mais les connaître permet d'améliorer la construction au lieu de sans cesse réajuster la tolérance du modèle. Il faut donc connaître assez méticuleusement son outil de travail, peut importe le logiciel utilisé. La comparaison des logiciels peut donner une piste lorsque l'on aborde un projet. Le caractère acyclique des codes de Grasshopper, s'il facilite le travail de programmation, réduit les potentialités de représentation des codes. Il semble qu'en ce sens, Grasshopper soit plus un moteur de modélisation paramétrique que de modélisation algorithmique. Etant un logiciel open source, sa force réside implacablement dans la communauté sous jacente naissante sur internet. Communauté qui n'est pas encore si développée avec Digital Component. Le logiciel payant et développé par Gehry Technologie se révèle donc plus pour les professionnels, voué à une utilisation de métier. C'est-à-dire de la création jusqu'à la réalisation. Chose qui est plus difficilement accessible via Grasshopper. Generative Component semble le logiciel le moins commercialisé et le moins utilisé des trois. La conception à travers le logiciel est beaucoup plus géométrique et l'interface ressemble encore au logiciel des années 2000, ce qui limite certainement l'envie d'élaboration de formes.

b Différentes manières d'aborder l'architecture

Les logiciels proposent donc actuellement plusieurs niveaux de paramétrisation. Le script à la base même de tous les logiciels et de toutes les opérations assistées par ordinateur en langage binaire 1 ou 0 n'a pour moi rien de paramétrique. Cependant l'écriture d'un script demande elle une justesse et une paramétrisation implicite de la part du créateur. Le langage du code quel qu'il soit n'est rien d'autre qu'une succession d'opérations écrite ligne par ligne avec un langage de plus haut niveau que celui du code binaire. Il est évident qu'« écrire des formes », en c++ ou VB script se révèle être la base de toute approche cognitive pour construire une forme. Néanmoins cette approche est intrinsèquement différente de celle employée dans le scripting visuel. En effet, lors de l'écriture d'un script, la création de formes engendrées par celui-ci est effective une fois seulement après avoir lancé le script (« run » en anglais) dans le fichier principal nommée « main ». Durant l'écriture rien n'est en instance, rien n'est créé, toutes les opérations sont effectives une fois seule-

ment après avoir lancé le « main ». Je pense donc que ce façonnement peut engendrer une paramétrisation viable pour l'architecture et applicable à la génération de formes structurales, mais que pour les architectes elle n'est pas assez fluide. Evidemment, toutes les données pour effectuer les opérations sont infiniment paramétrables, qu'elles soient dans le « main » ou dans les fonctions annexes. Mais il faut sans cesse enregistrer et relancer le main pour voir l'affectation des nouveaux paramètres et pouvoir observer ce qu'ils produisent. J'appellerai donc ce niveau de paramétrisation la paramétrisation « segmentaire ». Sa puissance et ses possibilités infinies sont limitées pour les architectes d'abord par leur langage et pour un informaticien par leur non fluidité. Elle est pour moi réservée à des pratiquants capables d'interagir avec les architectes pour façon-

Les expositions, matières à évolutions.

Zaha hadid. Serpentine Gallery.



ner leur idée. Les grandes agences sous-traitent déjà ces opérations à des modeleurs informaticiens spécialisés. Zaha Hadid depuis 1995 avait travaillé sur la génération de formes fluides invitant à la déambulation à la promenade sensorielle dans ces pavillons expérimentaux. Dessiné dans leur studio par des architectes aujourd'hui l'export de connaissances s'est retourné vers des spécialistes qui manipulent le langage script, plus aisément. Au delà du paramétrisme l'usage du script est inévitable pour des résolutions de problème itératif. L'itération est le processus par lequel le cheminement d'opération conduit à une variable qui est elle-même réinjectée au début du cheminement, de manière à créer une boucle. Après plusieurs itérations la solution converge vers une variable finie, solution du problème posé. C'est ce que l'on appelle le problem solving. Cette opération n'a absolument rien de paramétrique, mais résulte d'une pure logique mathématique. En revanche elle permet d'obtenir des valeurs qui ne proviennent pas du hasard dans une modélisation paramétrique. Le problem solving est donc un outil visant à optimiser un processus selon un critère particulier.

En dissimulant le langage assez complexe les industriels ont donc développé Grasshopper ou digital Project plus adapté aux architectes et ingénieurs. Mais leur utilisation n'a pas recours spontanément à la paramétrisation ou à l'inverse à un usage abusif afin de contrôler entièrement une forme par des paramètres. Certaines opérations ne sont que génératives et effectives une fois seulement, d'autres peuvent être réglables et manipulables par un ensemble de paramètres. On en conclura donc qu'avec n'importe quel logiciel 3d, il existe différents niveaux de paramétrisation et qu'il n'est pas nécessairement valable de qualifier un logiciel de paramétrique. Ainsi dans la génération d'un projet ou d'une forme cette étape est paramétrée d'autres non. C'est sur ce point que diverge la vision des architectes. Les architectes cherchent dans la nature une forme aboutie, qui soit achevée pour ne pas créer de forme aléatoire, venue juste d'une réalité informatique. Cependant dans le mot architecture il y a le mot art. L'art

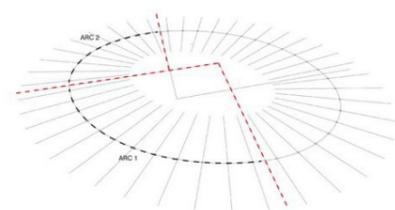
est inspiration et représente une certaine vision des choses. Les architectes comme Zaha Hadid se réfèrent aux forêts, aux canyons, aux deltas, aux dunes, aux glaciers, aux chutes, aux moraines, aux strates géologiques - mais sont incapables de les dessiner numériquement pour la plupart d'entre eux. Là où l'architecture paramétrique excelle et modèle la vision de l'architecte c'est qu'elle est « manipulable » c'est une architecture numérique en mouvement. On pourra la façonner comme une sculpture. Cependant pour la construire il faut la figer. C'est donc dans cet instant où l'instance générée oubliera toute l'histoire de création du modèle et jaillira en quelque sorte d'une « photo 3d » du modèle paramétrique. Certains la figent en l'optimisant par des procédés physiques (on se référera au porte conteneur mentionné au début du mémoire), mais également par d'autres contraintes physiques tel que le son, la répartition de la lumière... D'autres dénie tout cette approche problem solving et font de l'architecture paramétrique une base uniquement visuelle. Dans ce choix, Robert Schumacher emploie alors l'expression « an elegant pattern is chosen » V1 4.2.2. En d'autres termes, si on modélisait la maison Schröder, avec les dimensions des murs en béton manipulables sur Grasshopper, et que l'on demandait à Rietvelt d'obtenir une forme de maison lui satisfaisait, loin de parier que le résultat sera éloigné de la réalité ! Ce qui me touche particulièrement dans cette manière de générer la forme, c'est qu'à l'inverse du trait de crayon ou de la polyligne, le fait de paramétrer des objets, des « surfaces de formes » raffine et augmente la maîtrise de notre pensée. En approchant la forme de cette façon, il reste pour moi une sensibilité finale à l'objet ainsi créé, comme une signature précise qui serait propre à l'architecte. Cependant pour moi la question qui donne corps à l'architecture repose sur la génération au préalable de la forme. Bien sûr toute idée se base sur un bout de papier, trois traits, quelque photos, tout simplement une inspiration, mais de là à en tirer une forme aboutie ! Le chemin à parcourir pour y parvenir n'est ni spontané ni évident.

C'est ce à quoi l'architecture paramétrique ne vise pas à repenser. Au contraire, elle continue l'idée et le chemin créatif, mais elle emmène la vision spatiale de l'architecture plus loin que ne le faisait le papier. Il n'y a pour moi pas d'opposition formelle dans la manière de concevoir l'architecture. En revanche, le point de conjecture est effectivement celui de la vision de l'espace et le façonnement de cette nouvelle architecture. On reproche à celle-ci d'être de l'image. Mais l'architecture est vision, image, forme, matière, texture... Là où je partage ce sentiment d'image illusionniste c'est lorsqu'elle n'est qu'irréelle et non construite. Celle-ci en effet apporte certes une imagination future, un non-achèvement, et est uniquement significatif de rêve et ne peut se révéler qu'artistique. Mais en revanche, je crois en l'architecture bâtie source de forme, et qui propose du mouvement, des espaces et des domaines plus fusionnels avec ce qui nous entoure.

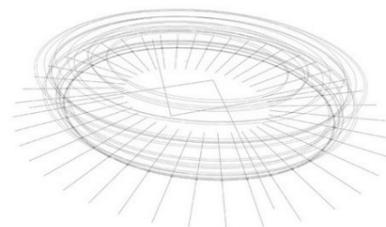
L'architecture est toujours révélatrice de moyens techniques de l'époque où elle a été créée. Les arches et les voûtes brisées, caractéristiques de l'époque romaine et romane, témoignent de l'incapacité technique de l'époque à franchir de longues distances. La distance entre travée ou rangée n'a sans cesse augmenté jusqu'à l'apparition de la fonte puis de l'acier et enfin du béton armé. Aujourd'hui, la technologie avance bien plus vite qu'auparavant. Le fait même de baser une réflexion de conception assistée par ordinateur, ce qui au fond est source de l'architecture paramétrique, rend l'architecture de plus en plus soumise à l'évolution technologique. La recherche visant la conception est donc sans cesse en évolution. Ceci produit d'une part une exploration fleurissante et une maturation dans l'approche sensible paramétrique au fil du temps, qui s'opérerait plus vite que tout les précédents mouvements artistiques de ces dernières années, certes. Mais il ne faut pas se perdre sur l'objet de la recherche car au rythme exponentiel où se développent actuellement les flux, la réflexion aboutissant à cette architecture est remise en question bien plus fréquemment.

On pourra citer par exemple le projet du stade de Hangzhou, ville en pleine mutation, où les designers ont inventé les scripts au fur et à mesure de l'avancement du projet. La dernière transformation étant bien plus complexe que les premières, les projecteurs ont dû revenir en arrière afin de mieux maîtriser certaines opérations qu'ils ne contrôlaient pas exactement auparavant, au début de la conception. Ainsi à l'échelle même d'un projet, soit une durée de 1 an d'étude, il y a déjà des modifications qui peuvent réinterroger les bases initiales sur lesquelles se fonde le projet. C'est dans cette optique que l'évolution doit garantir un mûrissement évolutif du projet sans pour autant remettre en cause l'objectif initial.

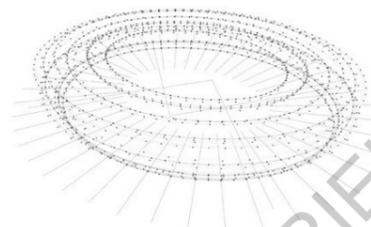
Il en résulte donc que chaque architecte confère à son projet ses intentions plus ou moins manipulables selon le degré de paramétrisation. A l'école de Paris Malaquais et à l'Université de Vienne, un semestre à été dédié à la modélisation paramétrique. Des étudiants de master ont généré un projet afin de mieux comprendre dans quelle mesure la modélisation paramétrique assiste-t-elle la conception architecturale ? Quelles sont les interactions avec le logiciel et quels seraient leurs modèles adoptés. Plusieurs d'entre eux ont entièrement fait évoluer leur projet sur Digital project, d'autres ont eu des difficultés car leur conception était difficilement paramétrable et sont revenus aux modes classiques du dessin spatial sur Rhino. Une étude faite par Aurélie de Boissieu, Caroline Lecourtois et François Guéna doctorants en recherche paramétrique, présente les différents projets et donnent des éléments de réponse sur la Science de construction. Pour eux, « L'activité de modélisation paramétrique semble relever d'opérations de modélisation spécifique que l'on pourrait caractériser grâce à la notion de Reliance (Lecourtois, 2010). La reliance est un concept utilisé par la « pensée complexe » d'E. Morin et J.L. Le Moigne. Elle désigne « l'acte de relier et de se relier ainsi que son résultat » (Le Moigne, 2008). A travers ce concept de Reliance, les auteurs interrogent les relations entre différents niveaux de conception du modèle (entre volumétrie globale,



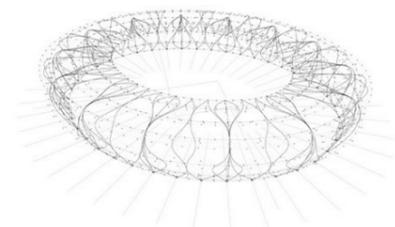
1. Circular arcs are established as the driving geometry for the bowl and the exterior steel petals.



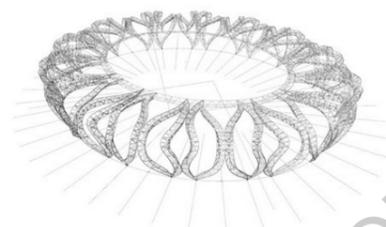
2. Arc geometry is transposed in 3D space to define the interior and exterior limits of the stadium shell.



3. Arcs are divided into lists of control points.



4. The list of points is organized to define B-Spline curves and surfaces.



5. The B-spline geometry is subdivided to create primary truss geometry.



6. Secondary structural elements for lateral bracing and roof systems are linked to the primary truss system.



HANGZHOU STADIUM

nbbj

NBBJ a dessiné en collaboration avec CCDI, le stade de la ville de Hangzhou. Le projet répondant au concours a été entièrement dessiné sur Grasshopper.

La structure et la définition de sa peau ont fait l'objet d'étude à travers des maquettes à échelles réduites.

module, etc.) Ils y distinguent plusieurs niveaux de paramétrisation et d'instanciation. Certaines opérations, comme la discrétisation de la globalité du modèle, en vue d'instancier la power copy, ne s'avèrent, disent-ils, pas pertinente.

Pour le pavillon Louis Vuitton, deux modèles paramétriques ont été générés, un à Los Angeles celui des architectes et l'autre à Paris pour les ingénieurs. Le modèle paramétrique 2 celui de Paris, est entièrement construit et revu chaque semaine par le modèle 1 de Los Angeles en tant qu'instance. Il n'y a donc pas de continuité entre les modèles pour un même projet. Tous les projets ne sont donc pas entièrement bâtis sur un seul logiciel, quand bien même ils le seraient certaines étapes pour aboutir au résultat final sont segmentées, ce qui conduit à une segmentation de la paramétrisation.

A travers cet exemple décrit rapidement, on voit l'émergence de l'architecture paramétrique à plusieurs niveaux et à plusieurs échelles. Pour mieux comprendre la science de conception sous jacente à cette méthode, nous distinguerons quatre niveaux de paramétrisation suivants :

- 1 la recherche d'une élégance non plus avec un crayon mais avec un curseur.
- 2 l'émergence des sources d'entrées générant des paramètres.
- 3 la nécessité d'optimisation.
- 4 vision d'une nouvelle architecture libérée.

L'architecture paramétrique est donc le en fruit à une réflexion naissante et sans cesse évolution. Sa franche rupture avec le mode de conception de l'architecture moderniste conduit pour Robert Schumacher, à la création d'un nouveau style post moderne. Marco Vanucci, architecte cher AKT mais ayant travaillé avec Zaha Hadid, répond de façon moins directe à cette nouvelle approche. « L'avant-garde existe toujours et elle n'a cessé d'exister comme le contemporain ». Les technologies informatiques sont humaines. Elles franchissent le seuil de l'humanité en vitesse, avec un langage simple et un accès facile. Pour lui « Les significations ne changent pas, ce sont les processus qui changent. » C'est

pour moi dans cette voie qu'il faut aborder l'architecture paramétrique. Une nouvelle approche munie d'outils puissants de part leur vitesse (nombre d'opérations par secondes inqualifiable pour l'homme), par leur précision qui contrôle le risque de l'erreur et renseigne sur le coût de production. L'innovation crée le progrès. C'est l'innovation qu'il faut créer, c'est-à-dire l'évolution des disciplines humaines dans leurs interactions continues. Il conclut en disant « Les technologies ne peuvent pas créer de style, enfin je l'espère ». Cette démarche est certainement en cours de réflexion et chacun voit en ce paramétrisme une source d'inspiration. Les projets suivant illustrent cette différence de points de vue et délimitent ainsi l'architecture en quatre niveaux de paramétrisation.

III la paramétrisation à plusieurs échelles

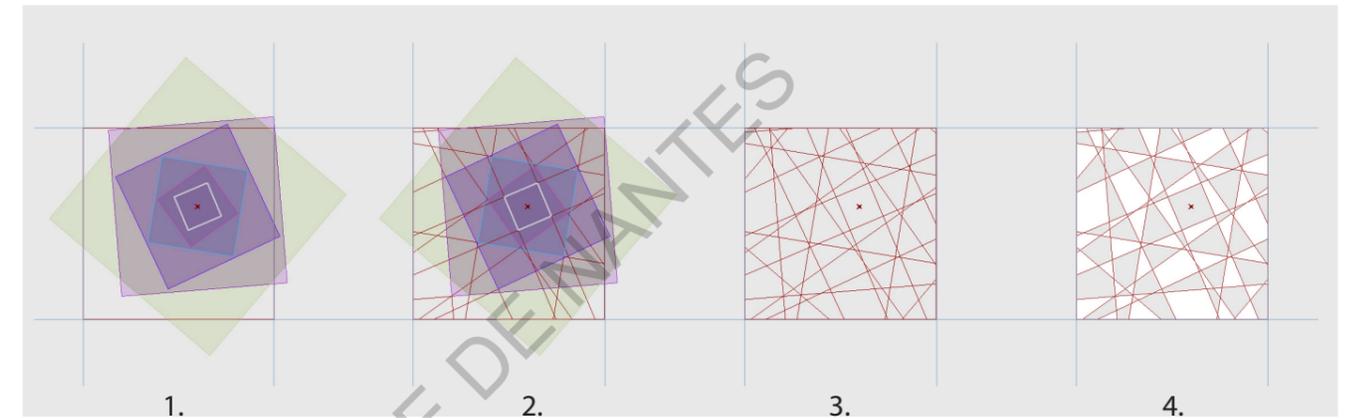
a- la recherche d'une élégance

Hypothèse : La manipulation des curseurs rend malaisable l'architecture. Cette maniabilité est directement source de décision.

Pour illustrer cette hypothèse et cette méthode travail, j'ai modélisé le Serpentine pavillon de Toyo Ito, sur Grasshopper. En première approche, la forme cubique du pavillon formée par cet entrelacement, résulte des lignes arbitraires et sa lecture donne l'impression d'une non organisation profonde. En plan, on se rend compte que la création de ses lignes est parfaitement géométrique. Le pavillon a été créé en 2002 avec la collaboration de l'agence ARUP, qui a défini le modèle structurel du pavillon. L'idée de départ est assez simple et se résume en deux opérations. Premièrement un point est choisi arbitrairement sur la surface supérieure du « cube ». Un carré est dessiné en se centrant sur ce point. Les deux opérations suivantes visent à générer des carrés à partir du carré principal : d'abord en faisant une échelle du carré puis en effectuant une rotation. Les deux opérations uniques sont donc le facteur d'échelle et l'angle de rotation.

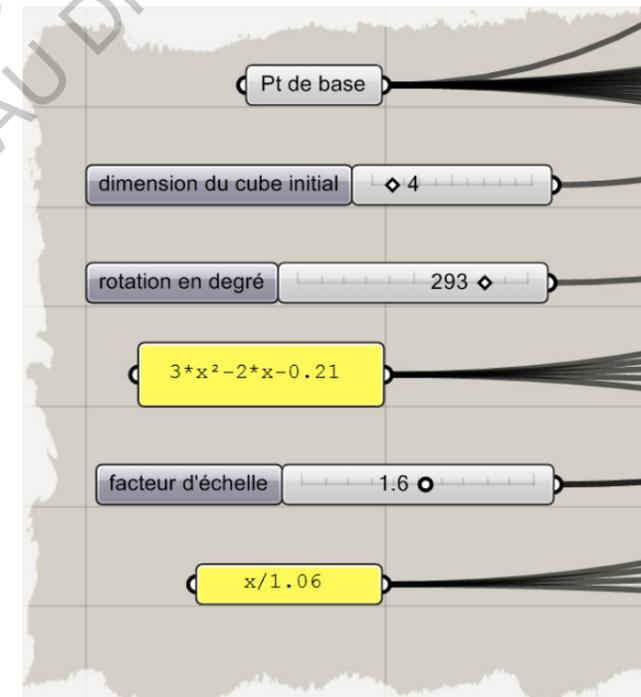
Le modèle Grasshopper est défini de cette façon. On dessine uniquement dans rhino un carré de 30 m de côté (dimension du pavillon) et un point à l'intérieur du carré. Ce sont donc les deux entrées physiques qui sont uniquement transférées à Grasshopper. On réalise alors les deux opérations homothétie et rotation successivement, à partir d'un premier carré puis on répète l'opération avec le deuxième carré pour créer le troisième et ainsi de suite... Les « curseurs » faisant office de paramètres sont donc : la dimension du premier cube, l'angle de rotation du premier carré (les autres angles découlant du premier angle avec la fonction $3x^2-2x-0,21$), et le facteur d'échelle entre le premier carré et le second (les facteurs sui-

vant la fonction $f(x)=x/1.06$). Les deux fonctions polynomiales ont été choisies afin de respecter le dessin final du pavillon. En effet, on remarque en plan que l'agrandissement des carrés diminue. En d'autres termes, le facteur de l'homothétie pour le changement d'échelle diminue, d'où la valeur 1,06, qui engendre cette diminution. La fonction $3x^2-2x-0,21$, permet de rendre les rotations successives moins géométriques, d'où le choix d'une fonction polynomiale d'ordre 2 qui possède deux racines réelles. Les coefficients 3, et 2 sont purement arbitraires et la valeur 0,21 permet d'ajuster la rotation car Grasshopper gère les angles en gradient.



Génération du modèle sur Grasshopper en plan :

1. Création des 6 carrés (du rose au vert) à partir du carré initial blanc par rotation et homothétie.
2. Prolongement des arêtes des carrés sur les bords du volume.
3. Représentation filaire.
4. Création du damier.



Paramètres du modèle sous Grasshopper.

A gauche : Serpentine Pavillon dessiné par Toyo Ito, et Cecil Balmond dans le parc Londonien de Kensington en 2002.

Afin d'obtenir la « toile » finale, il suffit simplement de prolonger les arêtes de tous les carrés jusqu'aux limites du pavillon (le carré de 30 m de côté). La dimension du pavillon, implicitement décrite précédemment, n'est en effet pas paramétrable. L'explication vient du fait qu'un modèle paramétrique n'a pas d'échelle. En effet, si l'on souhaite modifier la longueur du pavillon à 30 par exemple, il suffit d'appliquer la transformation uniquement au modèle final. D'où le choix de rendre le carré de 30 m fixe. Cette notion d'échelle est importante dans tout modèle paramétrique pour ne pas accumuler des opérations inutiles. Le réajustement pour le ramener à une échelle humaine se fait en général toujours à la fin. Les lignes du carré de 30 m se prolongent en plan pour former les élévations du pavillon.

J'ai fait volontairement le choix de ne pas connaître exactement la procédure et les choix de conception qui ont façonné le modèle du pavillon de Toyo Ito en 2002. J'ai plutôt voulu retranscrire cette conception avec un outil paramétrique me permettant de modéliser à ma façon la forme du pavillon. En effet, il est difficile à croire que ce projet ait pu être dessiné à la main. Le seul fait de changer de quelques degrés certaines opérations, demande un temps considérable pour redessiner le modèle à la main. Grâce à seulement trois curseurs (dimension du cube initial, rotation en degré et le facteur d'échelle) et un élément géométrique (le choix du positionnement du point initial) les solutions possibles semblent presque infinies. L'architecte, parmi ces solutions choisit celle qui serait la plus envisageable, celle qui semble être la plus élégante, en fonction de critères structurels ou d'autres plus subjectifs. Le damier final obtenu ne permet par exemple pas l'intersection de trois lignes. On évitera donc les solutions où trois lignes se croisent en un point.

C'est à cet instant précis que le processus du paramétrisme s'arrête et laisse place à la réflexion humaine, afin de choisir une instance unique du modèle avec des paramètres fixés. A travers cet exemple, j'ai voulu montrer ce que permettrait la paramétrisation d'un projet dont les opérations géométriques sont relativement simples, mais où le dessin à la main reste impossible, si l'on veut explorer plusieurs paramètres. Ce niveau de paramétrisme se révèle donc être un processus puissant à travers lequel l'architecte sélectionne parmi une multitude de possibilités, ce que j'appelle la solution la plus élégante. Ce niveau de paramétrisation comme on le verra par la suite, a donné lieu au problem solving. En effet, les aspects structurels peuvent converger vers une solution unique, d'où une nécessité de calculs importants faits par l'ordinateur.

Le paramétrisme à ce niveau, fonctionne comme outils d'élaboration de formes innombrables, permettant d'imaginer un panel de solutions sélectionnables par le dessinateur. Il n'est pas spécifique aux formes courbes ou à double courbure comme le montre l'exemple du pavillon de Toyo Ito.

Cette démarche fut sujet à réflexion dans la recherche de formes pour les tours cher Zaha Hadid. Le studio exploite en effet des stratagèmes tels que le plissement des surfaces, les modulations, les inter-articulations organiques et les transitions imperceptibles entre des éléments disparates. Leur point de départ met en lumière le fait que la typologie des tours est bloquée depuis plusieurs années et que l'émergence des outils numériques peuvent réinventer les tours. « L'architecte réinvente l'équilibre entre objet et espace. Il y a 360° alors pourquoi se limiter à un seul, » s'interroge Zaha Hadid.

Les premières tours aux Etats Unis sont des œuvres à part, des exploits techniques remarquables. Leur conception entièrement effectuée à la main, ont nécessité une collaboration parfaite de tous les corps de métiers. Cependant la construction des centaines d'étages, n'est finalement qu'une répétition d'un étage courant. Il était extrêmement difficile de faire varier le plan et le schéma structurel d'étage en étage par le travail à la main. D'abord pour des ques-

tions de temps et surtout dans un souci de précision. Toutes ces barrières sont aujourd'hui presque effacées. Les travaux actuels ont évolués entre la logique et le fonctionnalisme morphogénétique. Le paramétrisme se veut la réponse de l'architecture au dynamisme et à la complexité de la société post fordiste. Selon Robert Schumacher, John Portman se révèle être l'unique innovateur remarquable concernant l'organisation des tours dans la deuxième moitié du XXème siècle. Le studio de Zaha Hadid a monté une équipe d'infographistes en collaboration avec AA design research lab (CODE COmputational DEsign) et lancé une recherche sur les proto tours paramétriques, nommé Proto Towers. L'intérêt était porté sur la forme et la structure des tours mais aussi sur tous les sous-systèmes bien plus minutieux. Ces proto concepts peuvent



être comparés à un panel « d'organisme primaire » qui sous tendent la variété des formes biologiques et résultent de l'évolution de la nature. Une proto tour comporte quatre sous systèmes fondamentaux : la Structure, la Façade, les Surfaces occupées (niveaux) et la Navigation (ascenseur). Le point clé de ces tours réside dans leurs squelettes externes, rattachés à un noyau interne qui contrevente le bâtiment. Ce noyau, où se logent généralement les ascenseurs est et a toujours été parfaitement vertical ce qui limite les possibilités d'agencement et de forme. Cette recherche sur la Proto Tower vise à développer plusieurs prototypes annihilant l'effet de ce noyau rigide. Le squelette est ainsi conçu comme un réseau d'éléments linéaires sans recours à un noyau solide pour sa stabilité. Ainsi les niveaux et les circulations sont libérés, du fait qu'elles ne participent plus à la stabilité globale de la tour. Les recherches ont abouti à plusieurs modèles paramétriques, que l'on peut ainsi décliner, en faisant varier la hauteur bien-sûr, mais aussi le rayon de courbure, recherche sur les proto tower en termes de paramètres. Christoph Hermann s'est concentré sur la conception de modèles génératifs adaptatifs lors de son projet de thèse. Il présente plusieurs modélisations jouant sur l'inter-articulation du squelette formant la façade.

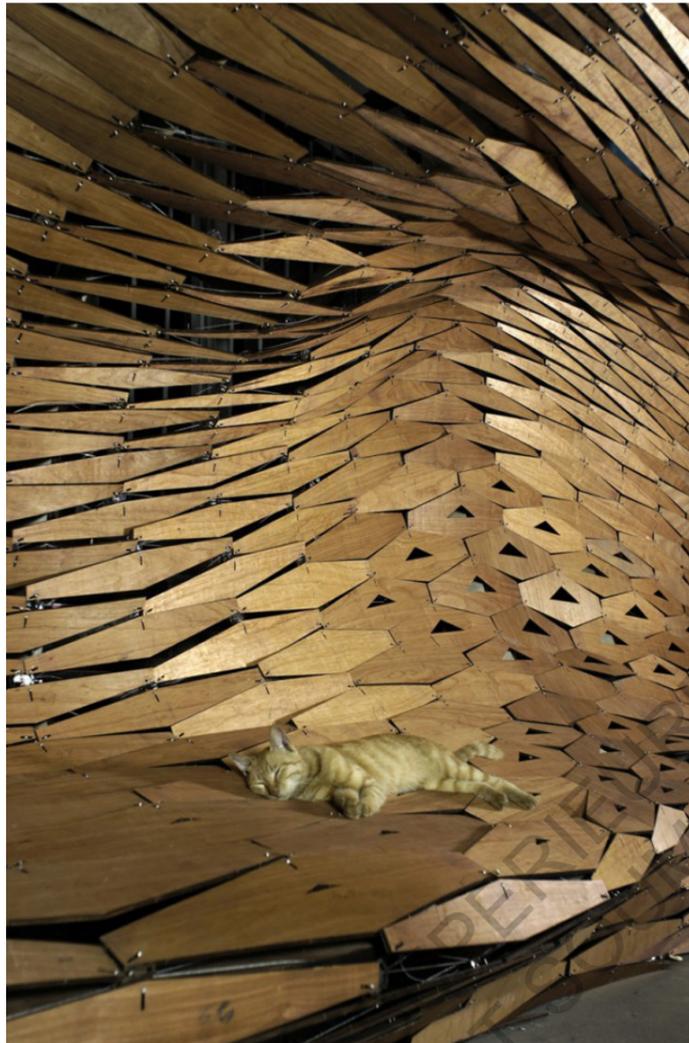
Cette méthode de conception, où les machines assistent la réflexion et construisent la réflexion initiale de l'architecte, a été beaucoup employée au début des années 2000. Cette méthode de conception, où les idées de bases de l'architecte ne sortent pas de la machine mais sont bien le fruit de l'imagination humaine. Certains types de projet amènent et poussent cette réflexion bien plus facilement, du fait de leur typologie. C'est notamment le cas pour les stades, les ponts et ouvrages de franchissement en général, et les tours comme vu précédemment. Cette typologie est assez dépendante de ce que j'appellerai le volume élémentaire. Un stade couvre un terrain de football ou une piste d'athlétisme, un franchissement relie deux points à une certaine distance celle de la largeur de l'obstacle, et les tours sont de fabuleuses

réalisations résistant à la gravité. De ces contraintes intrinsèques propres à chaque projet, il en résulte un volume élémentaire ou enveloppe, qui découle de ces contraintes. Le volume élémentaire du stade serait une sorte de tore ovale ou rond, celui du franchissement un tube horizontal et celui des tours un tube vertical. L'architecture paramétrique vise à repenser ou remodeler ce volume élémentaire, car elle permet de traiter des formes avec plus de maniabilité et pousse la création de formes vers une richesse jamais rencontrée dans l'histoire de l'architecture. Le façonnement du projet du stade de Hangzhou, remodèle ce volume élémentaire du stade grâce à l'utilisation des sous formes multipliées afin d'obtenir l'enveloppe du tore. Il y a dans ce projet quelque chose de magique, de fascinant à travers les esquisses primaires du projet. L'architecture semble en partie emportée par la forme des pétales s'enroulant autour de l'enveloppe. L'immense possibilité d'expression à travers la liberté de formes engendrées par les paramètres, ouvre une innombrable source d'exploration formelle. Les variations imposées par les paramètres peuvent amener un objet, physiquement imaginé, en un modelage complètement remanié grâce à cette notion de maniabilité informatique. Ce n'est certes pas de la sculpture mais une manière raffinée de concevoir une art-chitecture. L'image du pétale s'inspire de l'icône de la fleur « serene » provenant du lac à l'ouest de Hangzhou, afin de créer une puissante image sur les bords du fleuve Qian Tang. Le sens réel final du projet émerge de la retranscription initiale d'un pétale dessiné avec des splines tridimensionnelles et d'une enveloppe ronde délimitant le stade. La définition finale s'est enrichie suite à plusieurs esquisses numériques en faisant varier les points de contrôle des courbes initiales, le nombre de pétales sur la circonférence de l'enveloppe, l'espacement entre celles-ci, leurs chevauchements entre elles ... Petit à petit le projet se précise et les quelques incohérences structurelles, sont palliées, grâce à la caractérisation intrinsèque des paramètres du modèle Grasshopper... recherche de fonctions. Il y a donc là une genèse identique dans un sens formel à tout

autre projet ou idée initiale, mais la force de cette méthode provient de sa capacité à s'auto déformer à n'importe quel instant. L'histoire génétique prégnante du modèle Grasshopper, raconte l'évolution qui a fait grandir la forme du projet : quelles ont été les grandes étapes et les décisions prises pour arriver à la création finale. Cette genèse serait identique à celle d'une plante qui évoluerait au fil du temps en fonction des contraintes extérieures.

Le projet du stade d'Al-Khor-Stadium pour la coupe du monde 2022 au Qatar vise à repenser l'enveloppe du tore typique du stade. L'entrelacement de deux feuilles symétriquement disposées génère un espace intérieur. Leur forme prennent naissance au sol, puis elles se lèvent et viennent se recourber pour générer le toit du stade.

Le paramétrisme a également fait évoluer l'interprétation des surfaces, surtout les surfaces à double courbures. D'innombrable travaux sur la composition des surfaces gauches, tant sur leur structure que sur la texture, ont vu le jour. Les surfaces non développables peuvent être construites uniquement en divisant et en segmentant la surface par des éléments élémentaires de petite taille. La paramétrisation d'une surface est désormais possible car elle permet la répétitivité d'un élément. Dans Grasshopper une fonction très puissante permet de « pluger » un module sur une surface subdivisée en courbes iso-paramétriques. Cette fonction s'appelle « morph ». L'idée est de dessiner proprement d'un côté et en détails un module élémentaire, compris dans une « box », et de l'autre de diviser la surface en n lignes verticales et horizontales. Le quadrillage, formé par ses deux rangées d'iso paramétrique, génère des quadrilatères. La fonction morph est simplement une orientation de trois points de la box initiale vers les quadrilatères de la surface. Imaginons un élément élémentaire composé d'un vitrage et de menuiserie. En appliquant la fonction à une surface quelconque, celle-ci se transformera en paroi vitrée. La connexion à l'interface des quadrilatères est parfaitement continue, créant ainsi une matérialité et une texture rarement possible avec la modélisation numérique classique.



b- la genèse de la forme

Hypothèse : si les modèles de conception architecturale possèdent des paramètres, alors ceux-ci peuvent être physiques. Leur utilisation devient une force.

Quelle justification vis-à-vis de la forme ces paramètres peuvent-ils provoquer ?

On reproche trop souvent à l'architecture paramétrique de ne produire que de l'image et de ne proposer comme base de réflexion initiale, qu'une recherche sur l'élégance, comme décrit dans le précédent chapitre. Cependant, si la paramétrisation de l'architecture se révèle être un puissant outil d'élaboration de formes, le contrôle des paramètres peut aller encore plus loin. Les choix des paramètres étaient jusque là arbitraire, lié au désir du modelleur et sans cesse remis en cause par la pensée de l'architecte. La paramétrisation entraîne l'architecture dans une voie jamais explorée informatiquement. Le son, la lumière, la pression sont autant de facteurs extérieurs qui peuvent devenir sources d'information non négligeables pour modeler une forme. Ces outils étaient inaccessibles pour les architectes et les designers il y a quelque temps. Aujourd'hui le transfert d'informations est implicitement effectué via des logiciels ou plug in, passerelles entre le monde informatique et la réalité.

Le plug-in Firefly est un ensemble d'outils dédié à combler le fossé entre Arduino et Grasshopper. Ce plug in a été développé par Jason K Jonson et Andy Payne. Il a été inventé pour les architectes, les designers, les ingénieurs, les artistes et les inventeurs, et permet de connecter le monde des CAE/ CAM et des modèles paramétriques aux domaines émergents des technologies interactives et de la robotique. Sur Grasshopper ce «plug in» propose plusieurs fonctions dites « boîtes », avec plusieurs entrées, se raccordant directement à Arduino. Arduino est un circuit imprimé en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques

Page de gauche de haut en bas:

Interprétation formelle et matérielle rendu possible par le travail de surfaces paramétrables.

- Canopy Design, Digital Architectural Lab. (Hunan University, professors Biao Hu, Yu Du, Suryansh Chandra, Shuoji Zhong Zhang)

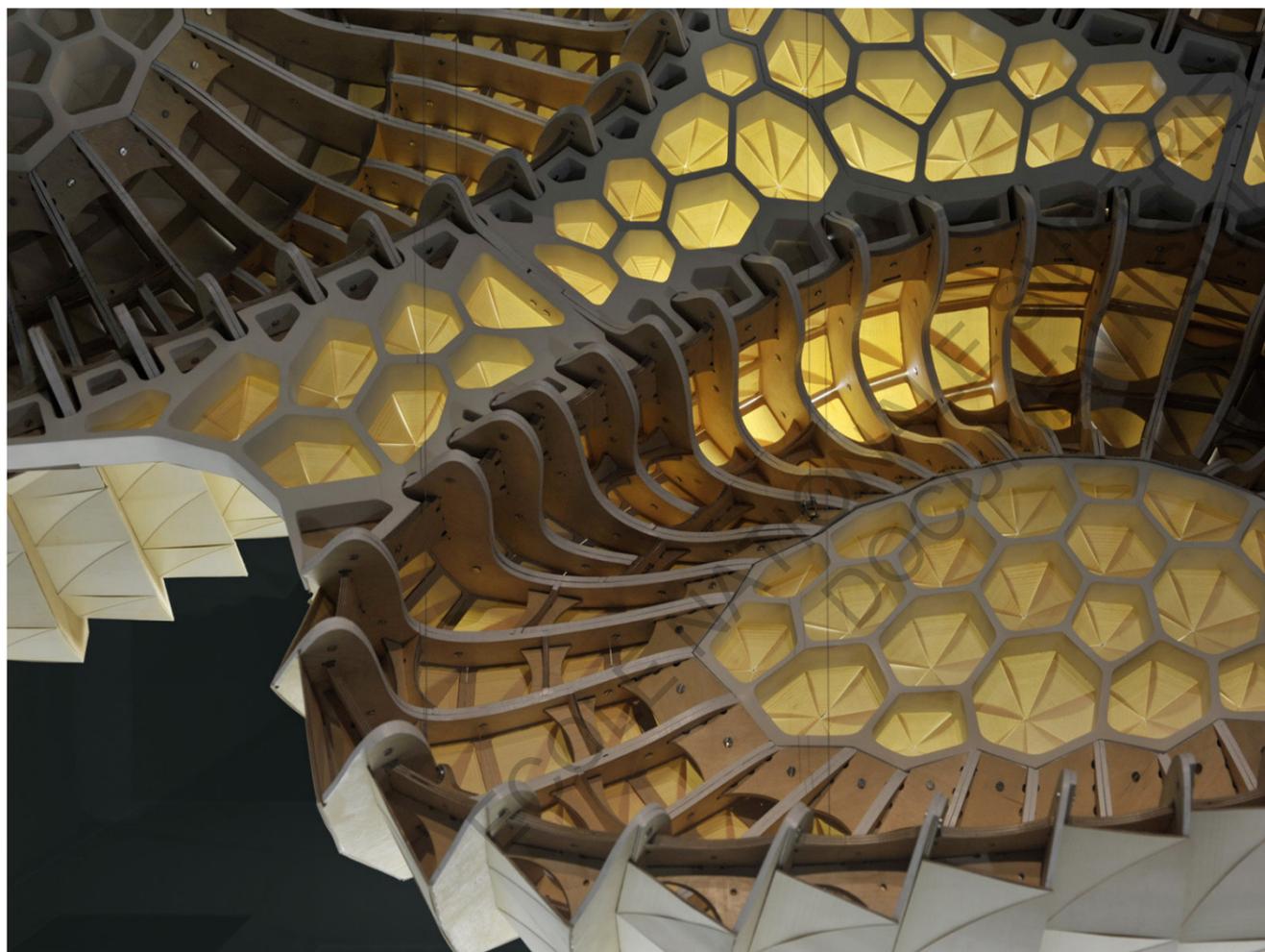
- B digi Door

- Recursive tessellation sur vRhino

- projet réalisé avec de la fibres de coton.

(éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple. Il était destiné à l'origine, principalement mais pas exclusivement, à la programmation multimédia interactive, en vue de spectacles ou d'animations artistiques. Celui-ci peut être programmé pour analyser d'abord et ensuite transmettre des signaux électriques provenant de capteurs sensoriels par exemple. Les messages transmis par Arduino s'effectuent par signal avec une fréquence d'envoi réglable sur Grasshopper. De cette façon plein de petits capteurs ou robots peuvent être reliés avec Grasshopper en envoyant une série de nombres sur Grasshopper. Avec Firefly les messages sont ainsi retranscrits en nombre listés dans un tableau ou en suite de nombres. A partir de ces nombres qui sont continuellement transmis en direct sur Grasshopper on peut inventer et imaginer une multitude de possibilités pour l'architecture pa-

ramétrique. De nombreux montages illustrent la puissance de cet outil générateur de formes. Prenons d'abord la création de formes via l'apport de données d'une photorésistance. Cette petite cellule réagit au degré de la lumière (exactement comme un luxmètre) de l'espace physique. L'information transmise est donc un scalaire gradué de 0 pour le noir complet à l'infini pour une énergie lumineuse proche du soleil. Grâce à cette information, on peut faire varier l'ouverture ou la fermeture d'une surface : l'obstruer si la lumière frappe la surface et l'ouvrir si la lumière diminue. Selon le même principe que le pavillon du Monde Arabe à Paris. Ceci conduit à une architecture en mouvement qui se modèlerait en fonction de l'apport de lumière de l'espace physique situé près du modèleur. Une sorte de membrane réacto-environnementale, des façades peaux poreuses. Le projet hydroscope, réalisé par Achim Menges en est la parfaite illustration. La forme générée avec Grasshopper est constituée avec des ce-



lles Voronoï ou se fixe de très fines feuilles de bois. La maquette est suspendue dans une vitrine à humidité contrôlée. Le modèle s'ouvre et se ferme en réaction à la condition d'humidité dans la vitrine, sans matériel technique ou énergétique. Le mouvement sinueux de ses cellules et simplement du au fluctuation de l'humidité. La structure est elle-même machine.

En d'autres termes cette méthode d'approche via une cellule photosensible permettrait de visualiser et surtout de modéliser un système technique visible sur Grasshopper. Ceci n'est qu'une méthode qui permettrait de faire interagir des données physiques réelles vers le monde numérique. Une autre approche sera de générer la forme directement avec la lumière. On pourrait imaginer de travailler avec une petite maquette simple et rectangulaire, puis ensuite faire parcourir la cellule photosensible à travers la maquette et ainsi remodeler un volume élémentaire en fonction de l'apport même de lumière. On pourra également redessiner un projet en contrôlant les intentions principales lors de la lecture de l'apport de lumière. Cette méthode s'effectuerait dans le même objectif que de monter une maquette numérique et de la soumettre aux apports solaires. Sauf qu'avec cette dernière méthode l'interaction n'est absolument pas possible. Une autre composante vient enrichir cette interaction entre réalité et modèle numérique. Imaginons-nous en présence d'un objet qui sera indéfiniment modifiable et qui permettrait de transcrire une forme vers l'ordinateur directement en façonnant l'objet. De la sculpture numérique interactive. Des étudiants ont réussi à relier directement une plaque munie de capteurs à une surface sur Grasshopper. Le lien entre l'objet réel et la surface, peut être à n'importe quel moment interrompu ou « figé » de manière à constituer petit à petit une forme sur Grasshopper. Avec un seul et même objet (plaque) l'utilisateur se voit ainsi directement modéliser et façonner son projet manuellement. Pour l'instant la notion de courbure de la plaque n'est réalisable uniquement qu'en 2d. L'utilisation d'un autre matériau pourrait à l'ave-

nir enrichir cette approche sculpturale.

« Cette matérialisation en flux tendu d'un modèle numérique peut encore aller plus loin. Carolina Pino et Cristóbal Valenzuela ont développé un mini projet nommé Sonic touch. En s'inspirant de Drawdio, un micro équipé sur un crayon, le projet vise à capter le son du trait de crayon en connectant une personne portant un gant, enfilé dans la main droite, à un modèle numérique sur Grasshopper. Sous l'impulsion et l'articulation de l'index, l'information véhicule un message. La rapidité et l'inclinaison de l'index, contrôlent ainsi, un paramètre initial de Grasshopper.

Ce matériel, non onéreux, se révèle donc un moyen pour un architecte d'obtenir une forme via une réalité physique directement connectée avec un modèle numérique. Son utilisation n'est donc pas uniquement réservée aux artistes, au modèleur de l'aéronautique ou au dessinateur de l'automobile.

Firefly est donc un excellent outil pour des projets de prototypage qui impliquent des capteurs et actionneurs.

Plusieurs autres sources peuvent être à la base de la génération de formes directement reliées via des capteurs à l'ordinateur. Processing est un logiciel adapté à la création plastique et graphique interactive, inventée par deux artistes américains Benjamin Fry et Casey Reas. Processing exprime également le langage de programmation sur le logiciel. Le logiciel est en fait un prolongement « multimédia » de Design by numbers, l'environnement de programmation graphique développé au Media Lab du Massachusetts Institute of Technology par John Maeda. Le principe majeur de Processing est la simplicité, dans la mise en œuvre des programmes comme dans la syntaxe du langage. Processing réclame moins d'efforts que Java pour effectuer des tâches simples et permet des créations animées. Ses fonctionnalités sont réservées aux créateurs d'images 2D et 3D générées par programmation mais peuvent être étendues, par le biais de modules externes, à la capture d'un flux vidéo, à la génération et à la manipulation de son, à l'interface des ports d'entrées-sorties.

HygroScope Achim Menges. Les feuilles de bois refermant réagissent à l'humidité en s'ouvrant ou se refermant.

L'avenir dans la création de formes peut advenir du son. Le son n'est autre que la dépression et la surpression de l'air dû à une propagation de l'air. Les ondes sont définies par leur fréquence et leur amplitude. Ces deux paramètres peuvent ainsi donner corps à une forme. Le contrôle des entrées sonores se fait grâce à gHowl et permet l'interaction directe entre forme et son.

Le contrôle via le monde physique extérieur rend-il l'architecture plus riche ?

Je crois fermement que le crayon est et restera l'outil par excellence du lien entre réalité et imagination intellectuelle. Ce lien élémentaire, fondamental et primitif permet d'exprimer ce que les mots ne peuvent décrire, ce que les gestes ne peuvent façonner. Cependant certains gestes demeurent compréhensibles et peuvent être source d'une genèse immense et puissante. Nous avons depuis longtemps accordé au dessin manuel sur papier une supériorité intellectuelle sorte de représentation du pouvoir. Celui qui savait dessiner était intellectuellement supérieur. Aujourd'hui ce « pouvoir » diverge dans plusieurs domaines. La technique d'interaction via du son, ou des gestes, est donc un autre domaine plausible pour la génération de formes et ne remet absolument pas en cause la technique d'élaboration et de recherche formelle sur papier. L'imagination advient par une connexion du cerveau vers la main. Celle-ci est donc parfaitement plausible à travers les exemples d'élaboration de modèles numériques proposés ci-dessus. Quelle architecture cela générerait cette façon d'imaginer ?

c – le problem solving

Hypothèse : les paramètres à la base des modèles peuvent être optimisés pour conduire à une solution selon des critères objectifs tels que le coût, la structure, l'apport de lumière mais aussi plus subjectifs comme les notions de temps de parcours ... Patrick Schumacher considère Frei Otto comme étant l'unique précurseur du paramétrisme. Je considère ses travaux en effet, comme des œuvres visionnaires, mais pour moi le pionnier de l'architecture paramétrique construite, reste l'ingénieur Sergio Musmeci. Sergio Musmeci, né en 1926, est un ingénieur diplômé en ingénierie civile à Rome, de l'université de La Sapienza en 1948. Sa vision prévoyait le renversement des outils de calculs dans la science de la construction classique. Les méthodes de calculs servaient jusque-là à vérifier une structure, et non à la créer. L'utilisation de la matière n'était donc absolument pas liée à la création de la forme. « Pour soulever cette méthode, il fut nécessaire de développer une réelle théorie propre sur les formes, qui serait basée sur l'énorme possibilité de traitement de l'informatique fait par les calculateurs électroniques » disait-il en 1972. Il prononça cette phrase deux ans après avoir achevé les travaux du pont de Basento en Italie. Ce pont est pour moi une œuvre visuelle impressionnante et envoûtante certes, mais fait surtout preuve d'un avant-gardisme incroyable. Rappelons qu'à cette époque le travail du dessin et des calculs s'effectuaient intégralement à la main. Le projet du pont de Basento fut l'occasion pour Musmeci de mettre en pratique sa théorie et amener des éléments de réponse suite à sa réalisation. Pour dessiner le pont, constitué de quatre arches continues en béton armé qui soutiennent un tablier à caisson, Musmeci a voulu optimiser la matière. Il s'est rendu compte avec les équations de la statique des forces internes qu'elles pouvaient conduire à une forme où la matière travaillerait en compression isotrope (même valeur dans n'importe quelle direction). Son idée découle donc directement de la recherche d'une solution de formes où la matière serait à n'importe quel endroit soumise aux

mêmes efforts internes. Une forme où la contrainte serait identique en tout point, réalisant ainsi une économie de matière. Son approche vise donc la résolution d'un problème, à partir de données initiales, ce que l'on appelle maintenant le problem-solving. Le dessin exact de la forme a nécessité la construction de plusieurs maquettes à diverses échelles. Il a façonné sa première vision, en créant une forme avec une solution d'eau et de glycérine formant des films tendus dans un contour rigide en fil de fer. La forme découlant de cette expérience s'avérait être une surface minimale. Sa deuxième expérience proche du monde numérique actuelle paramétrique, a été réalisée avec un modèle en « gomme para » en néoprène. Le dispositif d'essai était réalisé de manière à pouvoir modifier la forme de la feuille en variant sur la tension transversale (environ 1/10ème de celle longitudinale). Le relèvement de la membrane s'effectuait avec un équipement mobile qui comprenait un « une jauge graduée » (asta graduata) et une aiguille (ago) pouvant s'abaisser jusqu'à la surface. Cette manière fulgurante d'aborder l'architecture et la conception formelle se transforma en paramétrisme lorsque l'ère des ordinateurs outillèrent la pensée humaine. La maniabilité de cette maquette était juste incroyable. Il avait devant lui un instrument unique qui lui permettait de faire varier la forme et la modeler à sa vision. Presque rien n'a changé depuis cette expérience. La position de l'aiguille et de la jauge graduée a été aujourd'hui remplacée par un curseur sur un logiciel informatique. Mais la physionomie reste la même. Le travail aboutissant à la réalisation finale du pont ne s'est pas arrêté là bien sûr, mais son positionnement sur la structure a fait preuve d'une grande maturité et d'un esprit visionnaire.

L'architecture n'est certes pas la réponse à un problème, elle est assurément bien plus riche, mais l'interdisciplinarité entre architecture et ingénierie, entre art et science trouve légitimement sa place dans la résolution de problèmes aboutissant à une conception formelle. Musmeci a donc questionné à travers ses travaux, l'importance de ne pas omettre la résolution d'un problème structurel. Le pont de



Il ponte Sul Basento di Musmeci, 1976 (Italie).

Basento est donc le premier signe de l'optimisation de la matière liée à l'architecture abordé de façon paramétrique. Quelle autre optimisation structurelle est envisageable pour l'architecture sur les éléments qui constituent la structure primaire ?

Pour répondre à cette question, reprenons le projet de Toyo Ito élaboré précédemment en partie I1. Jusqu'à présent nous savons comment s'opère le contrôle des deux opérations générant le projet : la rotation et l'homothétie. Cependant pour définir et proposer un projet qui ne sorte pas d'une manipulation des paramètres, il conviendrait de les optimiser. Le projet se compose structurellement d'éléments fonctionnant comme des poutres avec une âme très épaisse de 60 cm. Le schéma structurel du pavillon est réalisé en partie en prenant en compte la contrainte suivante : la longueur maximale des vitres ne devait pas excéder une certaine valeur. Le problème posé était donc celui-ci : Quelle rotation et position du point initial attribuées à chaque carré, conduiraient à minimiser la longueur maximale des vitres ? En effet une combinaison des rotations de chaque carré engendre une multitude de solutions. Il existe sûrement une solution qui répondra à la première contrainte et qui diminuerait ainsi le coût du projet. Cette optimisation conduirait à une solution déterminant la position du point initial dans

le carré de 30m et définirait la rotation des carrés successifs. Néanmoins cette optimisation est nécessaire mais pas suffisante pour parvenir à réaliser le pavillon. La deuxième contrainte prenait en compte l'intersection des lignes. En effet, les lignes ne doivent pas former des triangles ou quadrilatères trop petits. Il y a donc un opérateur booléen à chaque proposition, qui vérifie si l'aire du plus petit morceau de matière est supérieure à une certaine valeur. Cette contrainte est donc une opération booléenne ; vrai ou faux. Le problème d'ensemble se résout alors de cette manière. On effectue un certain nombre d'itérations pour la première contrainte qui donne à chaque fois une solution géométrique. Puis on vérifie la proposition par la deuxième contrainte qui nous renvoie vrai ou faux. La solution finale est donc la solution vraie effectuée à la plus grande itération. Cette solution est unique pour ce modèle.

Le problem solving est donc la recherche d'une solution, basée sur certains critères, aboutissant à une optimisation des paramètres visés.

Un nombre croissant de projets achevés démontre la popularité croissante des outils paramétriques dans la conception architecturale, mais les moyens pour arriver à l'étape de réalisation finale ne sont pas souvent expliqués. On privilégie toujours les images et les détails techniques, aux dépens de la réflexion de la génération du projet. De nombreuses disciplines destinées à la recherche de solutions d'origines mécaniques de conception, ont centré leur recherche sur la conception paramétrique. Les objectifs et les moyens dans ces disciplines sont bien définis dès le départ. Ce qui conduit à poser puis à résoudre un problème sans ambiguïté. En revanche en architecture, les objectifs sont souvent inconnus. Ces derniers entraînent donc la non définition du problème et posent directement la question de la légitimité d'utiliser cette méthode dans le domaine propre à l'architecture. Afin de répondre à cette question il convient de mieux maîtriser l'approche du problem solving à travers quelques exemples théoriques : la recherche d'une distance minimum, et à travers deux projets, le stade de Lansdowne Road et le projet de thèse de Nate Holland.

La conception paramétrique a intéressé nombres de mathématiciens, ayant tous discuté, sur le sujet, et proposé différentes méthodes d'analyses. Chandraskaran définit en 1990 la conception comme étant à « knowledge based problem solving activity » (une activité de résolution de problèmes fondée sur la connaissance). Pour lui la conception est donc le résultat d'un problème résolu grâce à la connaissance. Sa vision est impunément pragmatique et se rapporte sensiblement à la conception mécanique ou technique. Sa vision ne laisse pas cours à l'imagination et à la liberté gestuelle de l'architecture. Il pose alors la question suivante : conçoit-on toujours en référence à notre connaissance ou est-on capable de voir plus loin que ce que l'on sait ?

La manière dont les connaissances peuvent être améliorées efficacement dans la conception a été identifiée par Motta et Zdrahal en 1996. Ces mathématiciens expliquaient premièrement que la connaissance peut être utilisée pour réduire la complexité des problèmes en écartant les solutions initialement envisageables. Deuxièmement la connaissance d'une tâche peut entraîner l'identification des paramètres clés (ceux ayant la plus grande incidence sur la conception) à partir des multiples paramètres qui peuvent exister. Enfin les paramètres clés ont des gammes de valeurs, ceux-ci peuvent aussi être spécifiés par la connaissance du type d'opérations. Il est inévitable lors de la résolution d'un problème de commencer par un état initial proposant des paramètres dits initiaux proches de la solution finale. Comme l'on décrit Motta et Zdrahal, c'est en partie grâce au savoir mis à profit lors de projets que cette solution initiale peut conduire à un gain énorme de temps de calcul. Le savoir humain doit ainsi assister l'ordinateur dès le début de la démarche, car l'ordinateur ne possède pas d'intuition. Cette même intuition peut aussi jouer un rôle concernant l'importance des paramètres. En effet, il est rare pour des problèmes complexes, que tous les paramètres aient le même degré d'influence. Ce qui conduit dans certains cas à privilégier le problème solving sur les paramètres les plus influents du modèle et ensuite ajouter dans la résolution les para-

mètres ayant moins de prépondérance. Enfin, le dernier point décrit par Motta et Zdrahal repose sur la plage de valeurs que peuvent prendre les paramètres. Ce domaine de variation peut soit découler de l'intuition ou de la connaissance propre à l'utilisateur, soit des contraintes générées par le site ou les matériaux (exemple du rayon de courbure pour les aciers). Afin de maîtriser ces trois points, il est utile de décomposer les problèmes de conception en trois étapes, l'analyse, la synthèse et l'évaluation.

L'analyse :

Pour ce genre de problème, Enrico Motta et Zdenek Zdrahal ont décrit toute une théorie sur la conception paramétrique et le positionnement du problème. Pour eux, celle-ci peut être caractérisée comme une application d'un espace à six dimensions $\langle p, Vr, C, R, Pr, cf \rangle$ à un ensemble de modèles de solution, $\{D SOL1, \dots, D SOLN\}$, où

- P : les paramètres $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$; le curseur sur Grasshopper
- Vr : les plages de valeurs $V = \{v_1, \dots, v_n\}$, où $V_i = \{v_{i1}, \dots, v_{i2}\}$; ici la plage de valeur de la rotation est de 360° et celle des coordonnées des points est de 6 à 24 m. (0+6 et 30-6 pour avoir toujours le carré initial de 4 m dans le grand carré)
- C = Contraintes = $\{c_1, \dots, c_m\}$; distance maximale des vitres inférieure à 3m dans une direction
- R = $\{r = \text{besoins } 1, \dots, r_k\}$; pas de besoin dans le problème.
- PR = Préférences $pr = \{1, \dots, pr_j\}$; pas de préférence dans le problème.
- cf = fonction de coût global. Minimiser

La synthèse.

Ce modèle de conception est examiné en détail par Lawson [2006] où l'interdépendance entre les trois phases est soulignée.

La définition d'un problème ne doit pas posséder d'ambiguïté. Sans connaître préalablement la solution, le positionnement du problème doit conduire à une solution unique ou à une divergence qui indiquerait que le problème ne peut être résolu numériquement. Pour des cas simples cela paraît évident.

En effet, imaginons que l'on veut minimiser une distance en jouant sur un seul paramètre, il suffit de faire varier ce paramètre dans ses plages de valeurs et regarder celle qui conduit à la distance minimale. Cependant lorsque plus de deux paramètres entrent en jeu, il faut sans cesse faire varier un par un les paramètres. Prenons l'exemple suivant. Deux points A et B appartiennent à deux surfaces différentes de coordonnées respectives définies par (x, y) et (x', y') . Pour trouver la distance minimale entre les deux points, il faut faire varier les valeurs de x, y, x' et y' . On procède de la manière suivante. On fait varier x puis on prend la valeur pour laquelle la distance AB est minimale. On fait de même avec y , puis x' et enfin y' . Ceci constitue une boucle. Puis on répète la boucle. On recherche à nouveau une valeur de x pour laquelle AB est minimale. Celle-ci est peut être différente de celle obtenue à la boucle 1 car les autres valeurs de y, x' et y' ont changé. On itère le procédé boucle par boucle. La solution finale est obtenue, lorsque chaque variation de paramètres augmente la distance AB. Ceci implique qu'avec quatre paramètres seulement le nombre de variations est déjà important. C'est un peu le même procédé que la recherche d'un code de cadenas à 4 chiffres dont

Définition de la récursivité via Galapagos sur Grasshopper. La ligne rouge représente l'avancée de la résolution.



ont ne connaît pas le code. En revanche ici, la solution n'est pas forcément unique. Ce qui peut dans certains cas, entraîner une instabilité dans les itérations dans les boucles, qui peut conduire à une divergence et donc une incapacité à trouver la solution de la part de l'ordinateur, alors qu'il en existe au moins une. Ce petit test fait avec Grasshopper, a convergé vers une solution en 1 min 45 s. Ce qui nous renseigne sur l'incroyable capacité de calcul de l'ordinateur, mais montre de façon exemplaire le manque d'intuition de l'ordinateur. En effet, les points les plus proches se trouvent obligatoirement sur le bord de la surface à laquelle ils appartiennent. Cette donnée nullement connue par l'ordinateur, diminuerait sensiblement le nombre de combinaisons et réduirait donc le temps de calcul. De plus, avec une simple règle, l'effort mis pour trouver la solution, qui prévoit la plus courte distance entre les deux points, aurait été dix fois plus rapide à la main. La logique du problem solving est donc complexe : se servir de l'ordinateur pour faciliter la convergence des données tout en évitant les instabilités. Ceci renvoie directement aux mathématiques pures. Se référer à une distance en faisant varier quatre paramètres, se révèle être assez compliqué pour l'ordinateur. Il faudra donc prévoir des algorithmes de résolutions très stables, pour les problèmes compliqués à résoudre avec Galapagos.

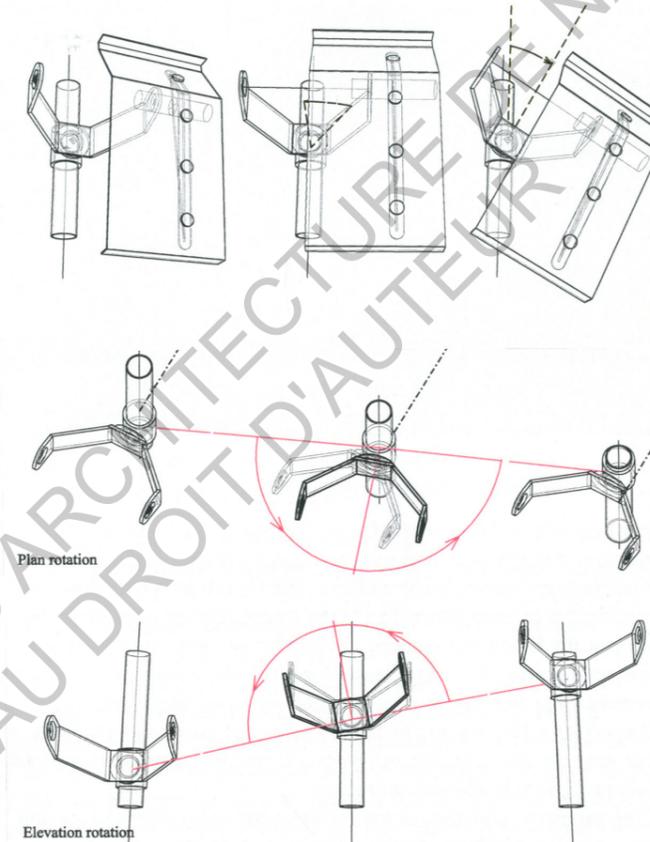
Le problem solving est disponible sur Grasshopper via Galapagos. Cette fonction d'optimisation sur Grasshopper est facilement utilisable pour des personnes peu douées dans le langage du code pur. Galapagos est une boîte qui possède un solveur et permet d'obtenir des optimisations sur plusieurs curseurs, dont le but est de minimiser ou de maximiser un nombre scalaire. Cette boîte intègre plusieurs entrées nommées « Genome », où sont reliés les curseurs et une sortie nommée « fitness », qui représentent le scalaire à maximiser ou à minimiser. Les itérations successives font converger la solution et figent donc les paramètres en gelant les curseurs.

Lansdowne Road :

Le stade rénové sur l'ancien site de Lansdowne Road s'appelle désormais Aviva stadium, conçu par HOK Sport avec Buro Happold comme Bureaux d'étude.



Situé à Dublin, Lansdowne Road est le stade de l'équipe de rugby de l'Irlande. Le stade, construit en 1872, ne contenait que deux tribunes couvertes et possédait encore des sièges en bois. Il possédait également la particularité d'avoir une ligne de chemin de fer passant sous la tribune présidentielle, la gare de Lansdowne Road se trouvant en face dans la rue du même nom. Le projet du nouveau stade prévoyait la création de 50 000 places et une couverture unique de toutes les tribunes. La parcelle est fortement entravée par les conditions routières, ce qui a restreint les choix de conception en limitant la dilatation horizontale du stade. La méthode de travail engagée par les architectes Scott Tallon Walker et Buro Happold du cabinet HOK Sport + Venue + Event (HOK SVN) consistait à former un lien interdisciplinaire dynamique entre la conception architecturale et la conception structurelle jusqu'à la phase la plus détaillée du projet. L'idée initiale était de monter un seul modèle paramétrique utilisable par les architectes et les ingénieurs. Après réflexion, il s'est avéré que l'utilité d'avoir un seul modèle compliquerait la donne, du fait de l'incapacité à travailler sur le modèle en même temps. Deux modèles ont été dessinés. L'un par les architectes pour la conception de l'enveloppe du stade et l'autre par les ingénieurs pour les éléments de façades en polycarbonate. Le modèle des ingénieurs s'adapte automatiquement aux formes dessinées par les architectes mais dans un second modèle.



Détails des fixations des panneaux plexiglas de la façade, ajustables grâce à un système bi-axé.

la forme avec les plaques de polycarbonate. La deuxième concernait l'évacuation de l'eau sur le toit : la surface devait être assez pentue dans au moins une direction et ne pas posséder de creux. Le système de revêtement se compose de multiples panneaux de polycarbonate de même largeur mais de longueur variable. Les panneaux sont fixés sur un système de support normalisé avec deux axes de liberté en rotation. Ces axes de liberté permettent aux panneaux de suivre la géométrie du stade. (Fiches techniques des trois angles de rotation et la longueur du panneau ont été produites pour la construction du stade. Pour de plus amples descriptions détaillées de ce projet, voir [Shepard et Hudson 2007].)

Le modèle de l'enveloppe du stade a été créé avec deux logiciels, Générative Component et Excel. L'enveloppe du stade se décompose en une série de neuf sous-tâches, impliquant la géométrie de référence, avec des paramètres mémorisés dans des tableurs et fusionnés, en utilisant des scripts dans Generative Component, pour produire la géométrie du stade. La modélisation est donc le résultat d'une combinaison de données numériques à partir d'Excel contrôler, graphiquement en deux dimensions d'abord sur Excel, puis en trois dimensions sous Generative Component.

La base initiale des critères, pour définir l'enveloppe, était grossièrement déterminée par un modèle non-paramétrique créé par les architectes, dans le cadre de la phase de conception initiale, à la recherche d'une élégance en première approche. Les éléments en détails, sont ensuite apparus à travers le développement et l'utilisation du modèle. Les relations ont notamment été reformulées pour permettre le contrôle de la courbure, moins raide, des sections en coupe. Ainsi, la géométrie de l'enveloppe a été modifiée, pour réduire les concentrations de courbure et assurer la direction de l'écoulement de l'eau de pluie.

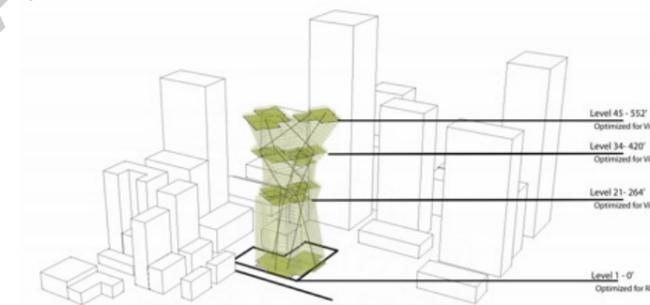
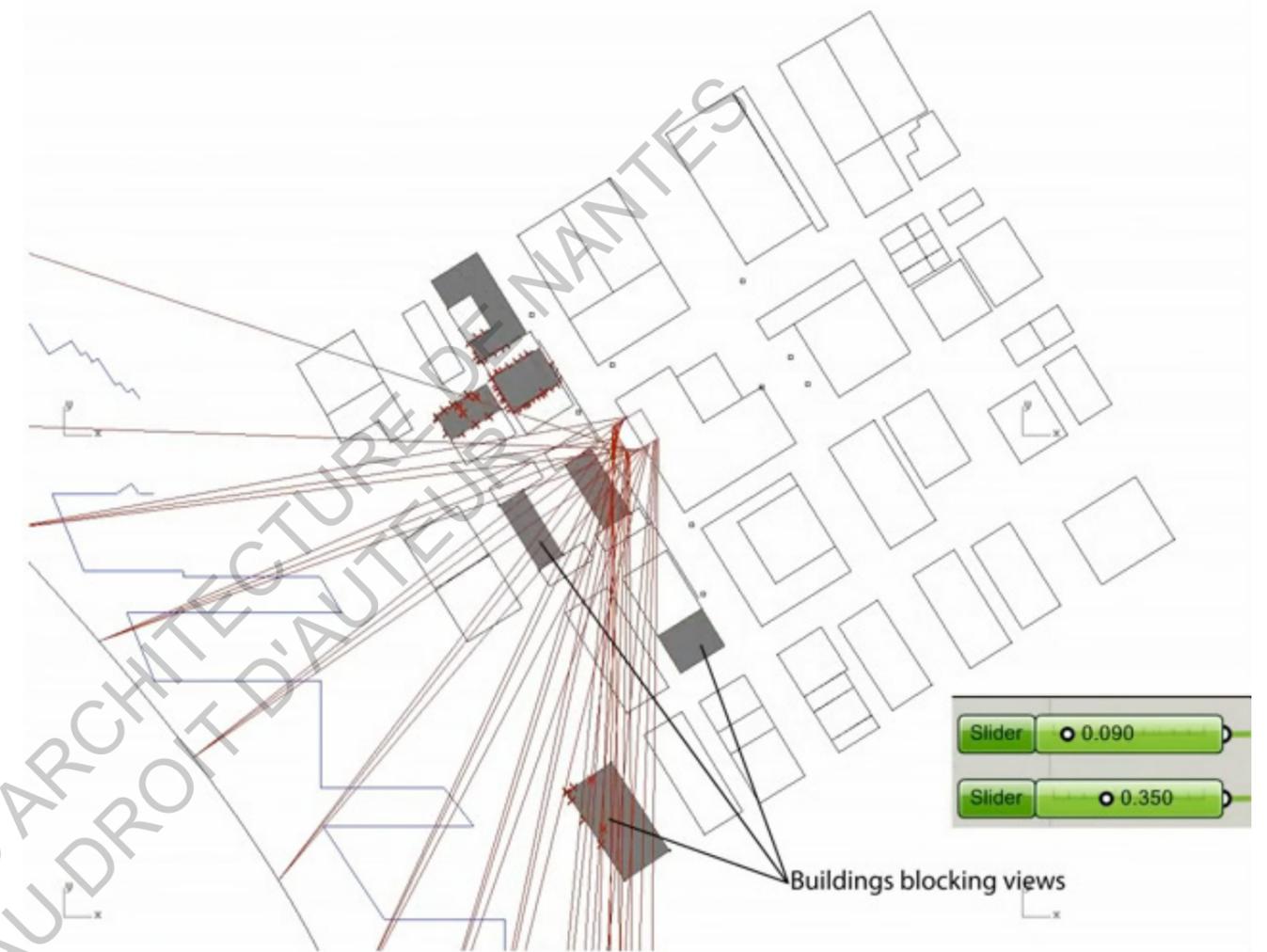
La conception de l'enveloppe s'est effectuée sur Générative Component à partir d'un fichier de script, qui décrit toutes les règles géométriques et les relations pour construire la géométrie du stade. L'interface utilisée était le langage de programmation de Microsoft Visual C#. Un fichier de données d'exportation a été écrit en C# sur GC, et peut être exporté au moment voulu vers le logiciel d'analyse d'ingénierie structurelle. Le problem solving a été utilisé par les ingénieurs, qui transmettaient leurs résultats aux architectes, dans le but de définir au mieux l'enveloppe extérieure. En effet, l'idée initiale de couverture reposerait sur des panneaux de polycarbonate. En prenant cette option, plusieurs données devaient être respectées, en raison du choix de la matière: la première consistait à ne pas réaliser des surfaces avec un rayon de giration fort (donc avec une forte courbure), de manière à épouser sans discontinuité

Cette optimisation s'est effectuée avec des algorithmes de résolution, afin d'une part, de ne pas augmenter trop la hauteur du bâtiment et respecter un rayon de courbure minimale. Il en résulte au final de ce projet, qu'il n'y avait pas besoin d'un modèle unique, d'une part, et que si le projet était à refaire, les ingénieurs et architectes auraient amélioré beaucoup de points.

Cela démontre que, partant d'une description incomplète du problème, il est possible pour ce type de tâches, de concevoir un projet avec une paramétrisation de la forme, puis des éléments de couverture. Certaines des premières conclusions démontrent le potentiel d'apprentissage par la réflexion théorique sur une activité pratique dans l'architecture. La connaissance permet donc de mieux aborder cette approche d'optimisation et de travail, en réduisant notamment les options géométriques. Toutefois, la simplification peut conduire à des malentendus et exige donc un détail plus abouti en phase post-étude.

La toiture entière du stade de Lansdowne Road a donc été générée avec deux modèles paramétriques, à cause des choix des architectes et des ingénieurs, mais aussi en réponse aux contraintes exigües du projet. Bien d'autres projets ont développés par une approche de résolution d'un système, sans même avoir comme source de conception une architecture paramétrique. Le solving problème vise tant la forme du projet que les éléments de construction, comme l'a démontré le stade de Lansdowne Road. Cette optimisation nécessaire d'abord, dans un souci d'économie de projets, peut avoir sa place dans d'autres domaines que la structure. A l'échelle d'un projet l'optimisation peut conduire à une génération de formes, comme nous l'avons dit avec le Pavillon de Toyo Ito, en réalisant une optimisation structurelle. Le projet de thèse Nate Holland à l'Université de Lincoln Nebraska en mars 2011, se concentre sur l'apport de lumière et sur l'incidence des ombres portées des édifices dans une ville.

Son projet vise à réaliser une tour dans un environnement urbain assez dense. Son point de départ n'est ni la forme, ni le dessin manuel, mais les contraintes initiales du site : la forme de la parcelle et les volumes des immeubles environnants. Sur Rhino, la forme de la parcelle est modélisée ainsi que les édifices voisins. Cette géométrie fixe n'est pas modulable sur Grasshopper. Pour générer la forme de la tour, il a procédé de cette manière : Il a défini 7 carrés et a procédé à une résolution du problème suivant. Quelle serait la position des carrés dans la parcelle, de manière à capter un maximum de lumière ? Il a effectué cette résolution de problème au rez-de-chaussée avec les 7 carrés prédéfinis. La solution conduit à une forme où les carrés s'emboîtent les uns dans les autres. Le nombre d'étages de la tour étant supérieur à l'ensemble des édifices environnants, Nate a choisi d'effectuer une résolution de problèmes, en maximisant les vues au dernier étage. La solution est donc celle qui fait varier les 7 carrés initiaux en offrant le plus grand périmètre (circonférence de la tour), tout en restant dans la parcelle. Ces deux problem-solving ont donné naissance à une première forme, en extrudant les 7 carrés de haut en bas, chacun d'entre eux reliant son carré réciproque. Les plateaux sont venus naturellement découper la forme pour créer des niveaux. La forme finale ainsi obtenue, est générée en résolvant deux problèmes géométriques spatiaux, l'un au rez-de-chaussée selon les apports solaires, l'autre au dernier étage en maximisant les vues.



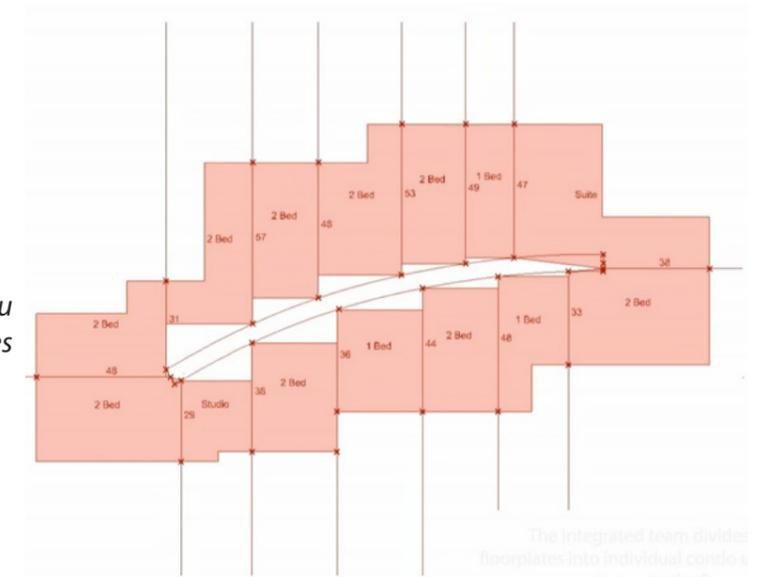
Projet de thèse de Nate Holland.

Ci dessus : spécification de l'emplacement du bâtiment dans le site et définition des vues possibles sur la parcelle.

Ci contre : optimisation des vue pour quatre plateaux définis paramétriquement.

Ci contre : Processus itératif afin de générer du zonage, pour une répartition et distribution des diverses chambres.

A droite : rendu de la tour paramétrique.



Le découpage en plan des niveaux proposait des espaces assez ambigus, du fait des 7 carrés initiaux. Afin d'optimiser est de proposer un premier découpage des chambres d'hôtels, Nate a choisi de résoudre un problème en 2d, pour la disposition des chambres. Pour cela, il a choisi un étage et a simplement dessiné deux courbes représentant le couloir (largeur de 3 m), qui distribuerait au mieux l'étage étudié. Ensuite, il a fait varier des points sur cette courbe de manière à proposer une chambre double ou simple. L'optimisation s'est effectuée en deux étapes. D'abord la création de pièces, puis ensuite l'optimisation d'entre elles sur des critères uniquement surfacique. Cette résolution reste assez complexe à réaliser sous Grasshopper, car elle prévoit la création puis l'optimisation. Cette optimisation en plan, liée à des optimisations de l'espace en surface définie préalablement, est une des grandes voies développées par Association design. Leur recherche conçoit la création de la ville entièrement faite par optimisation. Celle-ci s'effectue d'abord à l'échelle de l'îlot, où la proportion d'un bâtiment par rapport aux espaces privés et aux terrasses, conduit à une optimisation géométrique des pièces intérieures. Ensuite, dans un même îlot, afin de proposer un certain nombre d'heures d'ensoleillement au solstice d'hiver, la distance entre les bâtiments se règle automatique ainsi que la hauteur et le nombre des étages. Puis, à l'échelle urbaine, les axes routiers sont créés et les places de parking sont positionnées afin de minimiser les déplacements piétons des places aux entrées de chaque immeuble. Toutes ces optimisations étant effectives dès lors qu'un seul paramètre change. Une énorme capacité d'adaptation est donc manifeste à travers cet exemple vidéo. Cependant, il ne faut pas se perdre dans cette immensité de calcul et de résolution. Le problème n'est viable que s'il a un sens. Dans cette dernière recherche sur la genèse de plan masse où, l'intérieur via une solving méthode, n'enrichit pour moi absolument pas l'architecture, elle l'appauvrit. Pour moi, l'optimisation structurel a un sens car elle est garante du comportement des éléments entre eux, afin notamment de diminuer les coûts.

Mais la paramétrisation planaire des surfaces ne peut absolument pas tout prendre en compte. On dessine en imaginant, en se projetant dans un espace - la taille et la proportion sont les éléments visibles et tangibles du dessin certes - mais l'architecture pensée est bien plus profonde que le simple fait de générer des surfaces, dont l'aire doit être égale à une valeur fixe. Le travail de la lumière en profondeur, la non planéité des cloisons ou des murs, la dilatation ou la restriction des espaces, sont autant de frontières transgressés et oubliés par ce genre d'approche. Certes, cette méthode offre une solution pour des problèmes complexes ou l'imagination ne suffit pas à générer la solution optimale, dans certains cas.

Le problem solving peut également introduire la notion de diagnostic ou de constat. En effet, imaginons en présence d'un site urbain, avec une parcelle étroite et biscornu. Le problem solving pourrait conduire à une optimisation de surface qui maximiserait l'espace bâti, et renseignerait alors la possibilité maximale de surfaces constructibles. Cette pré analyse, sorte de diagnostic, serait donc là pour évaluer la capacité d'un terrain, en fonction de certains critères et renseignerait sur sa potentialité. Ce cadre de réflexion peut se faire en toute indépendance de conception, et se révèle être une plu value valable dans un projet. Mais le problem solving ne pourra conduire à un enrichissement de l'imagination humaine dans le dessin spatial. C'est donc pour moi, avec beaucoup de possibilités, notamment sur l'aspect structurel et sur une étude de faisabilité que le problem solving se révèle être un outil d'avenir, et non pas sur la genèse directe de conception.

d – Des formes complexes à concevoir

Les trois sous catégories de l'architecture développées précédemment, sont en parfaite adéquation avec la génération de formes, directement liées à sa conception, mais n'ont pas encore pris le dessus sur l'imagination et l'intuition humaine. Nous avons décrit qu'elles servaient jusque là, premièrement d'outils, à la décision (recherche d'une « élégance »), deuxièmement qu'elles permettaient d'interagir avec le monde physique (l'émergence des sources d'entrées), puis que l'on pouvait optimiser les paramètres clés d'un modèle (nécessité d'optimisation). Cependant, les capacités numériques de certains logiciels ne s'arrêtent pas au simple fait « d'obéir » à une pré visualisation spatiale de l'architecte. En effet, au lieu de bâtir une réflexion sur la génération de formes, certains architectes construisent leur réflexion sur le modèle numérique en lui-même, en ne sachant absolument pas où le modèle va les emmener. Prenons l'exemple du master plan de Zaha Hadid d'Istanbul, rendu pour un concours de réaménagement urbain d'une ancienne zone industrielle abandonnée au bord du Bosphore (Kartal Pendik). La composition urbaine proposée par le studio s'est construite via des notions de calligraphie et de topologie qui découlaient des flux de la ville. La zone étant le carrefour entre l'Asie et l'Europe, au croisement de deux routes côtières et de l'autoroute reliant les deux continents. Le dessin du plan a commencé par le tracé des lignes routières Ouest Est émergeant de Kartal. De ces connexions latérales avec un axe Nord Sud longitudinal, naît une grille souple qui forme la structure sous jacente pour le projet. Les axes cartésiens ont disparu au profit de lignes directrices fluctuantes selon l'optimisation des inters connexions dans la ville. Ce travail visant la formation de la grille initiale a été en partie élaboré avec Maya et des algorithmes génératifs. Le résultat produit spatialement par ces interconnexions est une réponse directe aux contraintes du site. L'architecte n'a donc pas « le pouvoir d'intervention » sur l'agencement spatial final, mais il entrevoit et



Ci dessus : Master Plan Kartal Pendik, Zaha Hadid. Projet de réhabilitation du site industriel d'Istanbul, nommé Kartal. La forme du plan masse fut générée par collision et interaction de particules sous Maya.

Page suivante : Emergence de formes sur le nouveau site qui génère des points clés de la ville.



prend des décisions sur les contraintes physiques numérisées. Son jugement sur la forme se base alors directement sur la méthode pour parvenir au résultat, et non sur le résultat en lui-même. Je ne pense donc pas qu'à ce stade, le résultat produit numériquement de cette grille initiale, n'ai pas été dessiné préalablement. Elle jaillit pour moi entièrement des données informatiques. Ce qui renvoie la question du rôle de l'architecte. Sur la base de la grille ou tissu urbain (« net » en anglais), Zaha Hadid a imaginé que certaines régions pouvaient s'élever, formant un réseau de tours, tandis que d'autres domaines du tissu plus dense formaient des parcs ou des étendues d'eau. Le tissu est articulé par un script urbain qui génère différentes typologies de bâtiments, répondant aux différents besoins de chaque district. Ce script calligraphique génératif, crée des conditions permettant d'éloigner les bâtiments ou de les rapprocher, de faire varier leur hauteur, et produit finalement un système hybride. Une sorte de milieu poreux extrêmement fluide et continu. Le master plan proposé est donc un système entièrement dy-

namique qui génère un réseau adaptable à toute forme urbaine. Nul ne pourra remettre en cause le fait de s'appuyer sur les contraintes initiales d'un site, et de là, en tirer le maximum numériquement.

Cette génération dynamique renvoie cependant la question de prendre en compte l'existant. Pour ce projet Zaha Hadid a en effet, fait table rase et pris une feuille blanche. La justification de la connexion avec l'existant est aussi un axe de travail qui devrait faire valoir plus de richesses dans les algorithmes génératifs futurs. C'est ce qui différencierait tous les projets les uns des autres, car le fait de ne pas s'appuyer sur le passé, n'est pas une réponse soutenable. La démarche effectuée en effet, pour le projet d'Istanbul, pourrait être identiquement développée pour une autre ville, en changeant juste les contraintes initiales. La forme découlant serait donc juste une adaptation à de nouvelles contraintes. Cette possibilité de continuité du modèle n'est pour l'instant pas unanime, car elle décale en partie le rôle de l'architecte.

L'algorithme et les scripts permettent donc aux ingénieurs et aux architectes de dessiner en non linéaire. Cette non linéarité, s'inspire des formes que l'on trouve dans la nature. Les chercheurs scientifiques ont depuis toujours essayé de comprendre quels principes régissent la poussée et l'évolution des systèmes naturels. L'évolution des plantes ont donc poussé les scientifiques à caractériser des procès non linéaires. Aujourd'hui, cette science n'est plus seulement vouée à des fins scientifiques mais elle s'est emparée à l'architecture. Ce que la nature nous enseigne est le résultat d'un multiple processus physique dans le temps et l'espace, une sorte de diagramme de contrainte. Quel sens donné à la corrélation de l'architecture avec la nature ? Mimétisme inspiration ou imitation?

Daniel Bosia a développé avec ARUP, une méthode qui utilise des algorithmes génétiques abstraits afin de créer une organisation rationnelle et systématique de l'espace. Ove Arup fondateur de l'agence Arup, est un ingénieur danois considéré comme parmi les tout premiers « architectural structural engineers » de son époque. Pour lui, les modèles se trouvent partout dans le monde, depuis notre structure moléculaire jusqu'aux formes en spirale et en branche de la nature. En effet, les modèles sont profondément ancrés dans notre conscience. Ils gouvernent les rythmes de la vie, de notre battement de cœur jusqu'aux événements cosmiques, comme l'alternance du jour et de la nuit, et les successions des saisons. Depuis le début de notre civilisation, nous avons appris à reconnaître les modèles dans la nature, leur rythme et leur hiérarchie. Nous avons appris à compter à mesurer et à rendre abstraits les archétypes des formes que nous avons rencontrées. Cela nous a permis de nous ordonner dans ce monde chaotique et complexe qui nous entoure. Nous avons appris que l'évolution du modèle à un autre, la transition du modèle stable à un autre, était la base de tout système dans le temps et dans l'espace. Nous avons appris à apprécier la non linéarité des systèmes naturels, basés sur la récursivité, sur des procès cumulatifs de croissance, sur l'évolution. Nous avons appris qu'ils sont constitués de plusieurs

couches multidimensionnelles, car ils contiennent l'histoire de leur genèse et de leurs transformations dans le temps.

Dans cette nouvelle ère d'humanisme, les dessinateurs contemporains sont face à l'opportunité d'explorer de nouveaux systèmes d'organisation. Bien au delà des formes statiques et classiques. L'attention est portée sur les procès qui gouvernent la création et les transformations des systèmes et leurs structures internes. La conception organise l'espace, en établissant des réseaux de circulations et en structurant des formes. C'est un procès non linéaire comme ceux qui régissent la nature, mais cela ne doit pas imiter la nature, ils doivent s'en inspirer, en promouvant l'émergence d'une nouvelle organisation. Le point de départ est souvent arbitraire et irrationnel, mais les résultats sont structurer et organiser, créant ainsi des réponses surprenantes. Ce qui en émerge ne sont pas des formes statiques, mais des systèmes dynamiques, expressions de simples et rigoureux processus récursifs. Ils sont complexes et non compliqués, riches dans leurs ramifications et dans leurs modèles internes. La non linéarité produit de multiples résultats, et non une réponse unique, nécessitant une évaluation plus critique et sélective que dans l'approche traditionnelle. L'évolution est à la base de la recherche forensique, où les réponses ne sont pas figées dans une mentalité stylistique, mais sélectionnées par leur aptitude de base.

Pour cette nouvelle approche générative, il est important de distinguer le formel et le fonctionnel, et ensuite les mettre en corrélation. Ces deux chemins (the functional heuristic of paramétrisme and the formal heuristic) ont été développés parallèlement ces 15 dernières années. OMA, Rem Koolhaas winy maas (mvr) inspira Dutch pour le fonctionnel et Eisenman Lynn and Kipnis inspira l'avant-garde américaine pour le formel. Ces deux visions se rencontreraient à l'AA in London Association of School of Architecture en 1990. Maas interprétait déjà les urbans landscapes avec leur morphologie urbaine, en prenant leur caractéristique comme par exemple, la distribution de densité. Cette distribution était

comme une expression de force de pression qui pouvait être enregistré à travers des bases de données sous forme par exemple, de paramètres de population, de préférence du consommateur, ou d'indicateurs économiques. En quelque sorte des régulateurs de contraintes qui seraient des paramètres identiques à ceux environnementaux ou technologiques. Ce concept initial analytique fut renversé en moteur de dessin par lequel ces paramètres devinrent les entrées, pour des fonctions de formes simples et non pas comme des histogrammes 3d. Sans réflexion ou discussion dans la construction de la forme, Michael Schumacher dit que « Ce manque de réflexions entraîna l'inévitable prémisse du radicalisme fonctionnel ». L'évaluation ne peut pas seulement se faire à partir de l'apparence extérieure de la forme. Si nous ne voulons pas nous perdre dans le dessin spatial, nous sommes voués à évaluer et comprendre la qualité de l'algorithme des machines, et non la conception qu'elles produisent. Comment discute-t-on des structures architecturales complexes dans un sens significatif, pas entre les machines numériques, mais entre la sensibilité humaine, rassemblés en équipe de projet. « Dessiner c'est prendre des décisions et des responsabilités, et non déléguer les opérations à l'ordinateur ». Ove Arup.

Conclusion.

Le raisonnement actuel fait dans l'approche de Zaha Hadid pour construire ses plans masses se veut une nouvelle réponse à la création de la forme. Les règles de symétrie de perspective sont aujourd'hui dépassées au profit de l'approche numérique valorisant les flux, les données, la cartographie des usages, qui étaient auparavant seulement une aide à la compréhension d'un territoire. Aujourd'hui elles sont directement genèse de formes. Michael Schumacher explicite clairement que les formes cultivées par cette approche, doivent être discutées et remises en question, et que les principes de base des méthodes, constituent une nouvelle vision de l'architecture. Il a pour lui définitivement tourné la page de l'imagination classique pour l'architecture.

A travers cette classification apparente des quatre échelles de la paramétrisation en architecture, il en ressort que pour certains le paramétrisme n'est que l'amélioration du savoir de conception, et donc un outil. Pour d'autres, il est voué à faire évoluer l'approche directe du processus qui gouverne la génération de formes. Néanmoins dans toutes approches, il s'avère que la paramétrisation n'est pas un processus linéaire tout au long des projets. Certaines étapes à l'intérieur d'un logiciel ne peuvent pas conduire le paramétrisme de manière continue. Il y a donc à l'échelle du projet dans la construction elle-même, d'une forme ou d'un projet entier, certaines étapes qui sont paramétrables et d'autres qui ne le sont pas. La rupture entre deux étapes s'effectue souvent entre conception et réalisation. En effet, la conception d'un projet repose sur des hommes. On retrouve d'abord les architectes et les ingénieurs qui sont les premiers à se pencher sur la genèse de formes. La sectorisation actuelle des deux métiers ne permet pas encore une réelle symbiose au sein d'un même logiciel. Le studio qui tend à associer architecture et ingénierie est le studio de Frank Gehry. Un des projets en cours d'élaboration est le pavillon de la fondation à Paris pour la marque Louis Vuitton. La conception en équipe s'est opérée avec deux modèles paramétriques, un pour les architectes et l'autre pour les ingénieurs. Cette première partie a fait un état de l'art sur l'architecture paramétrique, en dissociant quatre approches, en vue de la génération de formes. La puissance de cette architecture entrevoit également des portes au delà de la conception, dans le passage de la conception à la réalisation, qui est donc plus un domaine réservé à l'ingénierie.



II De la forme à la matière

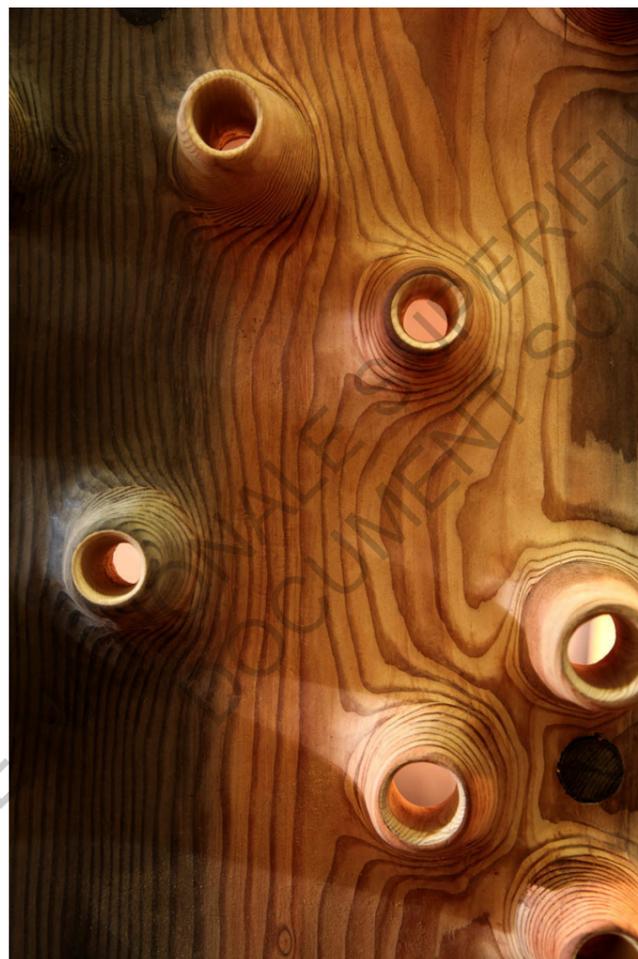
Wawona de John Grade. Sculpture exposée au Musée de l'histoire naturelle de Seattle.

Ci dessous : détails des planches de la goélette démantellée.

I - Epouser constructivement une forme

Quelles sont les méthodes pour obtenir une parfaite adéquation entre modèle informatique et réalité ? Quel sont les procédés du plus artisanaux au plus industriels pour construire une forme ? Comment procéder pour paramétrer la production, en vue de créer une continuité informatique, mais également diminuer le coût de réalisation ?

Le travail de l'artiste John Grade est pour moi révélateur de ce que l'architecture paramétrique, à l'échelle du bâtiment, doit impérativement éviter. Cette œuvre remarquable nommée Wawona a été façonnée avec la récupération de planches de bois d'une goélette démantelée de 1897. L'œuvre présente au total 200 planches de bois. La particularité de ces planches vient du fait qu'elles présentent de nombreux nœuds, tous de taille similaire. L'artiste les a alors enlevés et a fait jaillir à la place des volutes en bois. La technique d'élaboration pour obtenir ces formes volutes a nécessité une précision incroyable. Le mode opératoire révèle l'engouement et la passion à travers laquelle John Grade vit ses œuvres. En effet, le façonnement de ces volutes s'est opéré à l'aide d'une fraiseuse et d'une ponceuse manuellement. Le temps nécessaire pour travailler les 200 planches a demandé un travail colossal. Cette œuvre magistrale est révélatrice sur la manière de



travail des artistes. Dans le domaine de la construction cette méthode d'élaboration est tout simplement impossible à l'échelle d'un projet entier. Certes, quelques éléments ponctuels peuvent relever de la création manuelle, mais le modèle actuel économique ne le permet absolument pas sur un projet entier, pour une question d'argent et de temps. Il faudra donc trouver une méthode de construction qui ne révèle pas d'un savoir manuel, mais qui se base sur les façonnements des dessins numériques à travers des machines.

travail des artistes. Dans le domaine de la construction cette méthode d'élaboration est tout simplement impossible à l'échelle d'un projet entier. Certes, quelques éléments ponctuels peuvent relever de la création manuelle, mais le modèle actuel économique ne le permet absolument pas sur un projet entier, pour une question d'argent et de temps. Il faudra donc trouver une méthode de construction qui ne révèle pas d'un savoir manuel, mais qui se base sur les façonnements des dessins numériques à travers des machines.

- la découpe dans la masse
- découpe par projection graphique (vidéo projecteur)
- huyperbody : machine dotée de deux bras
- machine à commande numérique CN (avec jet d'eau)
- le prototypage
- la Stereolithographie ou le « casting »
- moulage par rotation, voir zaha hadid flow
- tissu de Achim Menges.
- mise en forme avec le Digital Form-Finding of Timber Post-formed Gridshell
- les machines à 5 axes.

Il convient en première approche de comprendre comment s'effectue le transfert d'informations entre le monde numérique et la matière. Ces méthodes de transferts peuvent s'opérer de trois façons : d'abord et avant tout par le papier. Les côtes même pour des formes courbes peuvent posséder un sens, car toute forme est définie à la base par des points qui possèdent des coordonnées géométriques dans

les logiciels. Ceux-ci sont donc des données viables pour n'importe quelle forme ou projet. Il reste le moyen également le plus simple de vérification, car l'outillage de l'homme n'a pas encore fait preuve d'évolution. On peut mesurer des distances, des angles planaires, mais par exemple la mesure d'un rayon de courbure, d'une surface gauche, n'a pas encore été inventée. Deuxièmement, les données peuvent se transmettre directement à une machine via des fichiers spécifiques (par exemple des extensions .flv). Les données sont donc invisibles pour l'homme, car la commande des machines aujourd'hui assez évoluée permet de définir quelques critères pour la découpe, la machine en génère automatiquement son tracé. Enfin la troisième possibilité est la projection vidéo. Dans cette approche, le support de projection constitue la matière même à découper. Les points, courbes ou surfaces projetés sont directement visibles sur la matière et peuvent être tracés sur la matière avec un simple crayon. La découpe peut alors s'effectuer manuellement ou avec des outils de découpe classique. L'intérêt de cette approche permet de projeter sur des matières selon de multiples directions. On positionne par exemple un morceau cubique de polystyrène et on vient projeter un plan de découpe sur sa face avant et en même temps sur sa face arrière. Le découpage découlant ensuite du tracé au crayon permet de découper la matière de manière biaisée. Les matières de projections peuvent être le bois, le plexiglas, la mousse... tout produit où la découpe est assez facile avec un outillage manuel.

a Sculpter la matière

Bien que la paramétrisation n'implique pas directement la notion de surfaces courbes ou à double courbure elle en permet la génération. La première approche vise à produire des formes directement en découpant la matière dans la masse : méthode proche de la sculpture. Il est assez facile de découper des formes dans du polystyrène bien sûr, mais le bois peut aussi s'adapter à cette technique.

The Norwegian Wild Reindeer Centre Pavillon par les architectes Snøhetta, est un projet où la forme numérique a été obtenue avec des opérations non paramétriques, mais manuellement avec le logiciel Catia. Ce petit pavillon, situé à 1250 mètres au-dessus du niveau de la mer, à portée de vue de la montagne de Snøhetta dans le centre de la Norvège, est utilisé comme un centre pour visiteurs du Centre de renne sauvage norvégien, mettant en valeur la riche histoire et la faune de la région. Le bâtiment est conçu comme un lieu de contemplation - pour des



vues et de perspicacité. Une grande fenêtre donne sur la montagne de Snøhetta. Un robuste boîtier en acier de 10 mm recouvre un noyau en bois de forme organique, qui intègre des sièges et forme la façade sud du pavillon. Le bois est produit par fraisage à commande numérique par une entreprise de construction de bateaux dans le Hardanger, et a été frété pour le site en deux morceaux. On retrouve ici l'implication de l'architecture paramétrique dans la construction de bateaux. La salle impressionnante mesure près de 12m de long. Un pont roulant est installé dans la longueur du hangar et permet de déplacer la fraiseuse dans tous les endroits de la pièce. La hauteur maximale d'une pièce pouvant être réalisée dans ce hangar est de 2,2 m. La forme incurvée

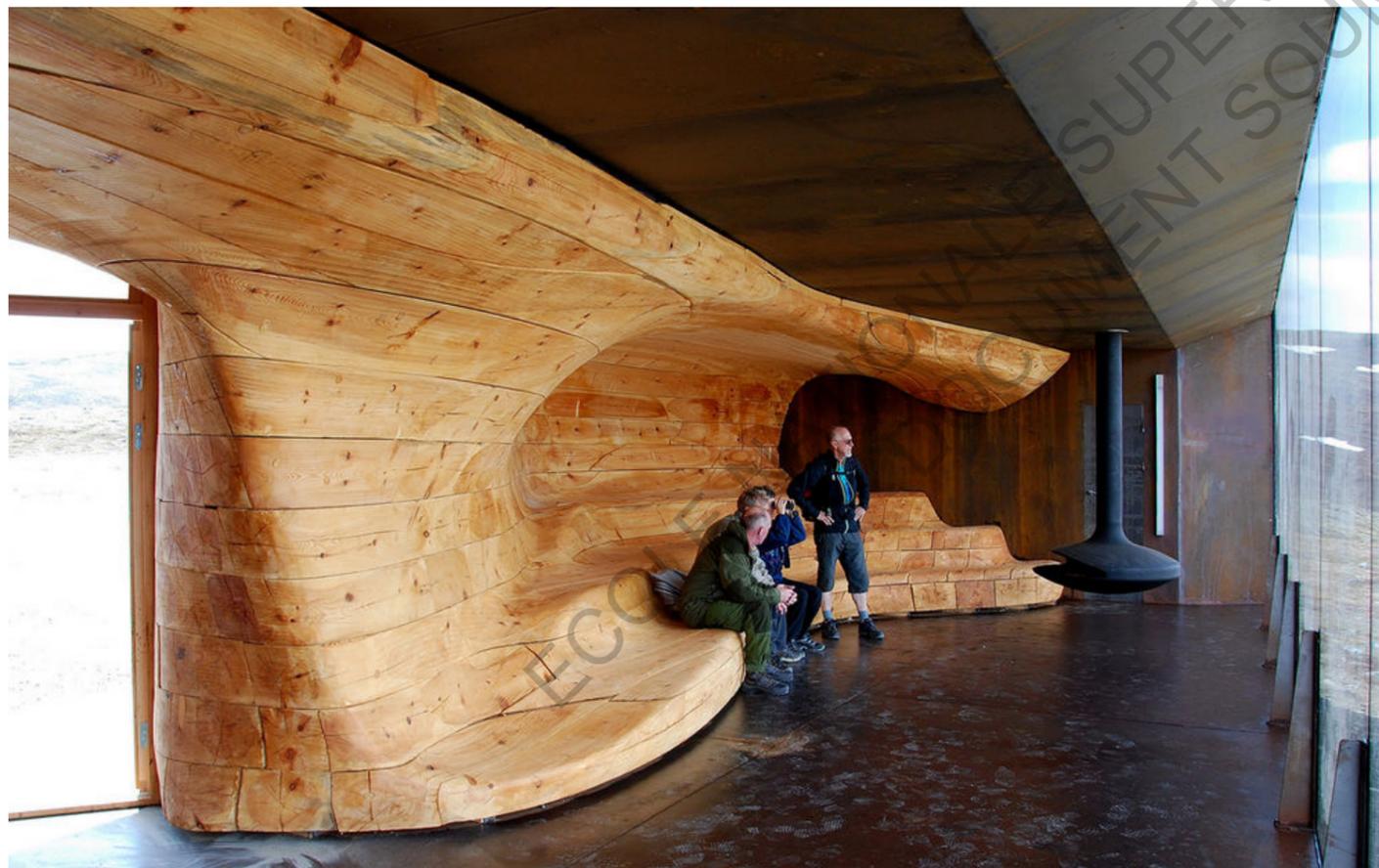
A gauche : Norwegian Wild Reindeer Centre Pavillon par les architectes Snøhetta. Salle de découpe dédiée à la découpe de bateaux dans le Hardanger.

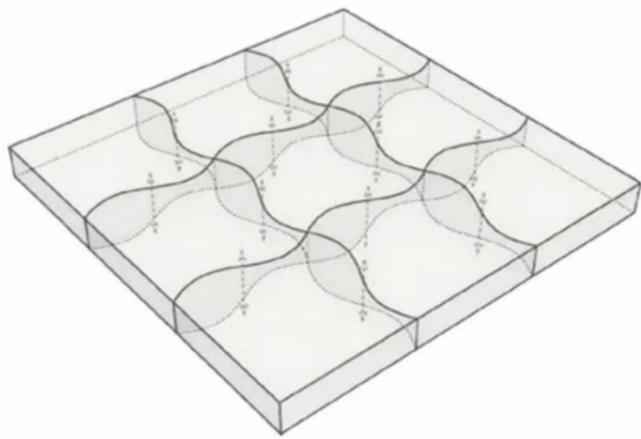
a du être découpée en deux fois. Une forme supérieure et une forme inférieure, car la machine à commande numérique peut seulement se déplacer en plan. Elle possède deux axes de déplacement (x et y) et un axe autour duquel la fraise tourne. L'usinage s'effectue verticalement du haut vers le bas. Ceci implique directement que la structure ne doit pas posséder de « creux » (ou de grotte si on assimile la forme à un paysage), car la fraise travaille inévitablement verticalement. La forme a donc été découpée en deux morceaux. La ligne de jonction horizontale entre les deux formes représente donc l'intersection avec la forme et un plan tangent horizontal. Pour découper le bois dans la masse, les poutres de bois ont d'abord été profilées en carré, puis taillées dans leur longueur. La découpe s'est opérée de la façon suivante : une installation avec des tasseaux ont permis de positionner les diverses poutres en bois qui ont été assemblées entre elles avec des bouchons de liège. Une rangée horizontale de morceaux de bois est disposée de manière à couvrir la forme souhaitée. Ensuite, la fraise vient découper le bois en suivant la forme numérique en faisant plusieurs passes. La hauteur maximale de bois découpé à chaque passe est de 2,4 cm. Pour chaque niveau un nombre important de passages est donc effectué. Une deuxième rangée de bois massif est ensuite installée, et la machine vient redécouper le bois massif et ainsi de suite... Au total, la forme inférieure est le résultat de l'empilement de 7 rangées de billes de bois, et la forme supérieure est de seulement trois rangées. La structure est assemblée avec des piquets en bois selon les méthodes ancestrales, sans colle ou ni de liaisons métalliques. L'opération consiste réellement à débiter la matière puis à la sculpter précisément. Le nombre d'heures passées sur l'ensemble de la forme est du fait de ce débitage minutieux, extrêmement long. Une fois l'assemblage terminé entre les deux formes, le bois est traité à l'intérieur puis à l'extérieur. Le toit lui, est réalisé avec des profilés métalliques creux, s'étendant sur la longueur du bâtiment.

La limite de ce genre de projet est souvent financière, car l'énergie requise pour obtenir une forme directement sculptant la matière à travers ce procédé, se révèle souvent extrêmement coûteuse. D'autres instruments et matériaux permettent de tailler directement dans la masse.

Hyperbody est un groupe de recherches à la Faculté d'Architecture de l'Université de technologie de Delft dirigé par le prof. ir. Oosterhuis Kas. Le groupe explore les techniques et les méthodes pour la conception et la construction d'architecture non standard, virtuelle et interactive. Ces méthodes et ces techniques de pointe sont enseignées et appliquées par les chercheurs et les étudiants. Un projet, nommé MSc2 Hyperbody Prototype 01, intéressant dans la mise en place du mode opératoire de découpe a été façonné par ce groupe de recherches. La forme initiale du projet a été déterminée sur RhinoVault. RhinoVAULT est un plug-in pour Rhino, en cours de développement au Groupe de recherches BLOC (Matthias Rippmann, LORENZ LACHAUER et Philippe Block) qui permet la conception intuitive de formes uniquement soumises à de la compression, offrant un maximum de contrôle de la géométrie. Ce logiciel est écrit en particulier pour l'élaboration des voûtes en maçonnerie non armée, mais peut aussi être utilisé pour la conception des coquilles freeform. En utilisant la discrétisation de la forme, le plug in redistribue les forces au sein du réseau en utilisant des diagrammes de force.

Forme créée sur Rhino Vault par un groupe de recherche de l'université de Delf.





Mode de découpe non perpendiculaire à la surface. La Machine 5 axes découpant les mousses en utilisant un fil chauffé. Le bras est monté sur une machine 5 axes.

Cette redistribution est basée sur l'approche du réseau de poussée (TNA Thrust Network Approach). Une fois la forme définie, un travail de recherche a été entrepris par les étudiants sur la décomposition de la forme en élément. Cette recherche a abouti selon le principe d'assemblage curviligne. En effet, l'assemblage dit « droit » (comme les briques ou les parpaings) demande une adhérence significative entre chaque pièce superposée. L'idée ici est de créer une jonction qui soit capable de s'auto-emboîter. La géométrie curviligne permet ainsi sans colle de faire converger les efforts dans la structure, sans que celle-ci ne se déforme. Les pièces sont réellement emboîtées. Les lignes de coupes ne sont donc pas perpendiculaires à la surface de découpe, ce qui a demandé une réflexion sur la méthode pour obtenir ces pièces. La solution est venue en découpant de la mousse assez compacte, avec un fil chaud manié de part et d'autre du morceau à découper. Cette découpe aurait pu s'effectuer à la main, à l'aide d'un tracé précis sur les deux faces du bloc de mousse. Les chercheurs ont donc développé une machine capable d'effectuer cette opération. Sur une machine robot standard pour l'industrie automobile (machine servant à peindre les voitures), le groupe a monté une fourche à deux bras. Entre ces deux fourches un fil tendu chauffé, a permis de découper l'ensemble des éléments. La difficulté rencontrée dans la connexion entre Rhino et la machine, provient du fait que le mouvement du bras de la machine n'est pas le mouvement réel des courbes définies sur la surface des blocs. Il y a un décalage. Ce décalage représente la différence entre la distance entre les deux bras (la longueur du

fil tendu) et l'épaisseur du bloc de mousse. En deux semaines les étudiants, à l'aide au total de deux machines, ont réalisé le projet installé dans le hangar de fabrication.

Le but de ce projet était de repenser les formes géométriques complexes libres en termes de contraintes de fabrication. L'avenir de ces évolutions se décidera certainement sur le marché par le marché, mais on peut déjà voir comment une conception basée numériquement avec ses techniques de fabrication pourraient être utilisés pour construire l'architecture non standard. Qualitativement, cette approche ici faite sur de la mousse EPS pourraient se généraliser à d'autres matériaux. Imaginons un fil de diamant (autrement dit plus résistant) utilisé pour découper de la pierre ou bien encore des blocs de béton. Dans une autre vision des choses, plutôt que de découper la masse, il serait également envisageable de découper la forme inversée, et s'en servir comme coffrage pour couler du béton, ou de la terre mélangé à de la chaux et du ciment.

Quantitativement, il serait possible d'exploiter la découpe, de manière entièrement automatisée, pour répondre à de nombreuses conceptions et des besoins différents. Il s'avère que la machine requiert l'aide humaine pour maintenir les blocs lors de la découpe, ce qui ne rend pas encore la machine autonome. Ainsi avec ce procédé de découpe utilisant une machine robotique de cinq axes, la découpe à fil chaud possède de multiples avantages, et permet la génération de formes aussi bien convexes que concaves. D'autres projets ont mis en lumière la capacité de l'utilisation des machines robotiques à cinq axes. L'adaptation au design et à l'architecture, se fait généralement en montant un instrument de découpe sur le bras de la machine. Une performance live a été effectuée en découpant à partir d'une bille de bois, un tabouret en entier avec une tronçonneuse installé sur le robot 5 axes. Cette expérimentation a été faite par l'allemand designer Tom Pawlofsky.

A travers deux exemples, nous avons vu comme la technique de sculpture pouvait, avec des machines particulières, être adaptée à la construction de formes paramétriques. Une autre approche vise à créer la matière en trois dimensions.

b Imprimer la matière

Les imprimantes trois D déjà connues et utilisées dans le monde de l'industrie pour générer des surfaces impossibles à assembler, sont aujourd'hui en pleine évolution. Les premières imprimantes pouvaient générer des modèles de dimension assez modeste de l'ordre d'une vingtaine de centimètres. De plus le coût de réalisation d'un modèle était onéreux du fait du prix du matériau utilisé, généralement de la poudre de polyamide. En effet, les imprimantes 3D élaboraient leurs formes en déposant de fines couches de matière plastique superposées les unes entres elles. Cette technique porte le nom de stéréolithographie. L'utilisation de ces machines est aujourd'hui entièrement à la portée d'agence de maquettiste et quelques agences d'architecture

Son utilisation en architecture s'opère essentiellement pour la construction de maquettes à échelle réduite. Le cabinet d'architecte Autrichien SPAN, s'en sert non seulement pour expliciter son architecture à ses clients en réalisant des maquettes, mais également en développant des prototypes de recherche de formes impossibles à réaliser à la main. Pour moi, la question de l'objet imprimable intéresse certainement le design, mais pas la génération de formes pour l'architecture. En effet, l'impression de maquettes impossibles à faire à la main, ne fait pas évoluer le projet réel qui lui, doit être construit. Nous ne sommes pas encore, et peut-être ni arriverons-nous jamais, à imprimer entièrement un bâtiment grandeur nature en trois D. Il faut donc dès la phase de recherche, développer des modules d'assemblages, car l'architecture n'est pas mono matière. L'évolution incessante des imprimantes numériques n'ont pas encore poussé au stade de réflexion de ces assemblages, par exemple entre la forme d'un châssis de fenêtre, ou un entraxe de porte... Il en résulte que pour l'instant l'architecture imprimée est bloquée par le fait qu'elle est faite d'un seul matériau.

L'approfondissement de ces dernières années a permis la découverte certes de nouveaux matériaux moins chers, et a tout simplement mis en valeur les matériaux à la base de la construction : la terre, l'argile, les cendres, le pisé ...

Une piste mener par un Enrico Dini, ingénieur italien, semble plonger enfin l'impression 3d dans le monde de l'architecture. "Printing houses it's a provocation, but this is the true", déclare, Enrico Dini. Ayant initialement travaillé dans une usine de manufacturing de machines robotisées, il décida de créer sa propre entreprise et développa la machine nommée « D_Shape Concept ». Cette imprimante grandeur nature, fonctionne sur le même principe que la stéréolithographie en déposant successivement de la colle. La machine est composée d'un bras qui se déplace selon une seule direction lors de chaque couche, puis se lève au fur et à mesure de l'impression. Elle procède en effet non pas en ajoutant de la matière là où il en faut, mais dépose un

Radiolaria, obtenue dans l'atelier de Enrico Dini. La sculpture mesure 2 m de haut et a été imprimée en une seule fois.



filet de colle suivant la forme voulant être réalisée. Ensuite elle dépose du sable uniformément sur le support de base puis, racle le sable pour ne laisser qu'une fine pellicule de 5 à 10 mm. La dépose de la colle s'effectue par des pics verseurs espacés de 5 mm sur le bras de la machine. La solidification est à priori de 24h. La machine ne possède pas de limite fixe de distance car elle est montée sur des supports pouvant s'adapter en longueur et en hauteur. Sa largeur par contre (où se situe l'ensemble des becs verseurs) est pour l'instant fixe. Le bras qui se déplace doit cependant ne pas trop subir les efforts de vibration de la machine, ce qui implique que pour de grandes longueurs, il doit être assez renforcé. Aujourd'hui la structure de la machine permet de générer des formes de 6 m x 6 m, et la hauteur peut atteindre 18m avec des rallonges. Le degré de précision de la machine est de 0,1 mm, et sa rapidité peut varier de 0 à 500 mm/seconde. La hauteur entre chaque couche ne peut excéder 20 mm, sinon l'adhérence entre deux couches ne serait pas suffisante.

"Printing houses it's a provocation, but this is the true", Enrico Dini.

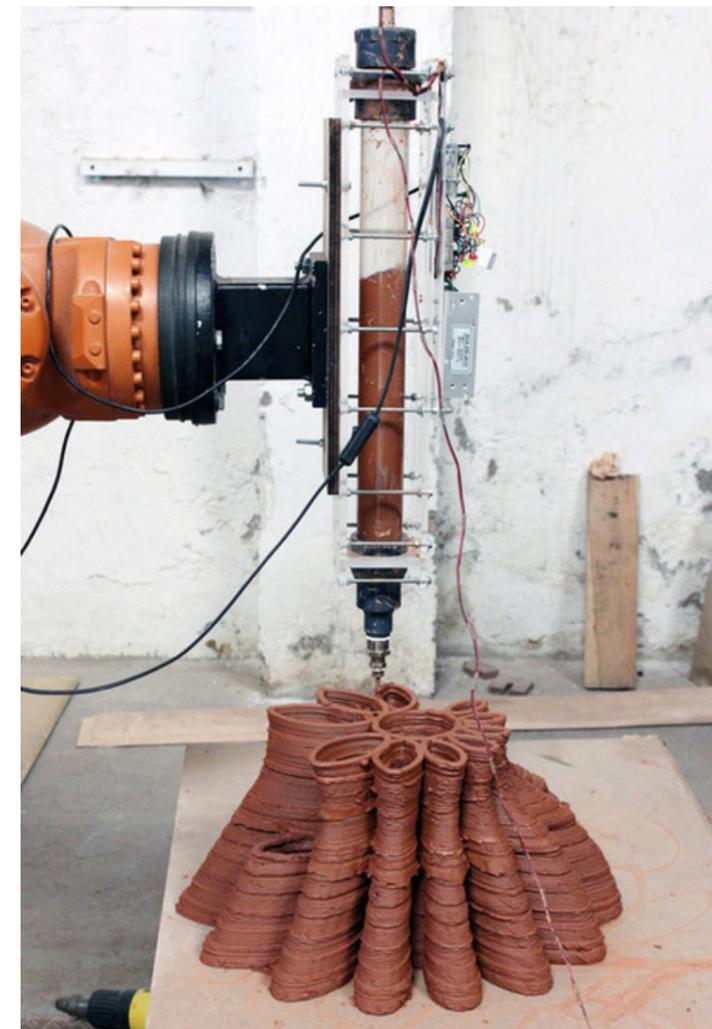
Enrico Dini a réalisé de sublimes œuvres d'art avec cette machine, notamment une sculpture ou projet à grande échelle nommé « Radiolaria ». Cette œuvre a été dessinée par Andrea Morgante, en s'inspirant d'un micro organisme « Radiolaria », et fut réalisée à l'échelle 1/4. Il s'agit d'une structure de grès monolithique haute de deux mètres, imprimée à l'aide 200 couches (soit 10mm d'épaisseur) de grès, collées par un nouveau liant minéral. La matière finale du prototype coûterait seulement 200 euros (de sable et de liant). Une fois l'ensemble des couches terminé, la matière en trop (celle qui n'a pas été collée) est déblayée à la main ou avec de l'air comprimé. Au total, la D_Shape a façonné la forme en deux semaines, puis il a fallu une semaine pour déblayer la matière et effectuer les finitions. La définition finale obtenue est de 4 à 6 dpi. Ceci s'explique par le traitement par couches qui résulte en fait d'un traitement d'images superposées. La définition théorique étant de 25 dpi.

Imprimer des maisons serait donc pour Enrico Dini l'aboutissement de son travail, et constate aujourd'hui que cette méthode n'est pas encore compétitive par rapport à la construction classique. Néanmoins, il a sous les yeux un procédé extraordinaire de constructions de formes, auparavant impossibles à réaliser. La puissance de cette technique - l'idée du collage par couches successives, fait vaciller le monde de l'impression en utilisant l'encre comme un liant structurel. Enrico Dini croit en deux concepts qu'il espère améliorer : le premier vient du fait que le liant servant de colle peut provenir des rejets de l'industrie cimentaire ou provenir de matériaux inorganiques et écologiques. Le deuxième tient dans la possibilité d'exporter la machine en dehors de son hangar. Pour cela tous les composants doivent être montés et démontés rapidement, la matière première doit être réutilisée et la machine doit consommer peu d'électricité.

Grâce à son travail, fruit de 4 ans d'études avec des ingénieurs et des chimistes, Enrico Dini a ouvert une porte immense sur l'architecture. Il n'y a pas plus vrai que le travail de la matière pour l'architecte. La naissance des procédés numériques a fait naître une exubérance de formes qui sont pour la plupart uniquement visuelles, car inconcevables. L'heure



est venue de repenser complètement cette vision à travers cette nouvelle approche. Reprendre une par une les formes auparavant imaginées virtuellement, et se repencher dessus, afin d'en entrevoir une possible conception.



En haut : Machine D_Shape_Concept montée dans l'atelier d'Enrico Dini, Italie. La machine imprime la matière en déposant une fine couche de matière minérale.

A droite : machine déposant des couches d'argiles de 1 cm d'épaisseur.

c L'assemblage

Une autre possibilité pour épouser une forme complexe à double courbes ou gauche peut être la discrétisation de la forme en facette de petite taille. Les arrêtes de ces facettes peuvent alors devenir des éléments linéaires structurels. La difficulté de cette composition spatiale porte sur deux propos : le premier vient du fait que les assemblages de ces éléments linéaires (généralement des profilés acier) doivent s'assembler en un point exact. Ceci afin de ne pas transmettre de moment dans les barres. La discrétisation de la forme par ce système de barres, peut être faite à partir de n'importe quelle forme, en revanche la multiplicité des assemblages augmente considérablement le prix de la structure. Les profils acier du commerce sont indéfiniment modulables dans leur longueur, du fait de leur procédé de fabrication par extrusion. Les assemblages des barres eux, sont moulés à chaud, et ne sont pas standard. Ce que peut apporter le paramétrisme, c'est premièrement une optimisation, en minimisant sensiblement le nombre d'assemblages différents, pour une même forme. Deuxièmement, la force des logiciels paramétriques réside aussi sur le degré de précision des assemblages. En effet, d'un point de vue spatial, les assemblages sont toujours repérés et cotés avec des axes cartésiens. Le fait de travailler sur un modèle paramétrique permet de réorienter facilement tous les assemblages et permet une nomenclature des éléments et une définition en plan et en coupe pour les fabricants.

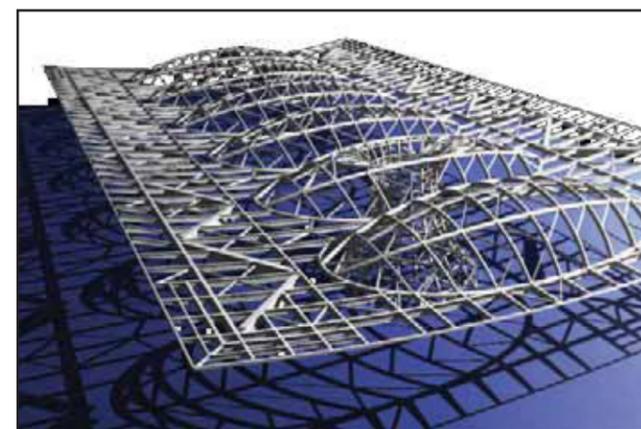
Dans le projet de Lansdowne Road ou Aviva Stadium déjà vu dans la partie problem solving, une solution a permis de construire la forme extérieure, avec des morceaux de polycarbonate, en utilisant un seul type d'assemblage. Le support standard installé permet d'articuler les trois axes des panneaux en polycarbonate. Ce système unique sur toute l'enveloppe du stade a permis d'épouser au mieux la forme définie numériquement. Même si la solution est simple techniquement, elle sous-entend qu'à chaque panneau a été attribuées 6 données intrinsèques. Les trois angles de rotation pour l'accroche

gauche et les trois angles de rotation pour la partie droite. Ce listing n'a été possible qu'avec l'utilisation du modèle paramétrique, fait sous Generative Component et avec l'aide d'Excel pour la sortie des données sur papier. Les ouvriers ont donc travaillé avec ce listing lors de l'installation des panneaux en polycarbonate, réglant une par une toutes les rotules au degré près.

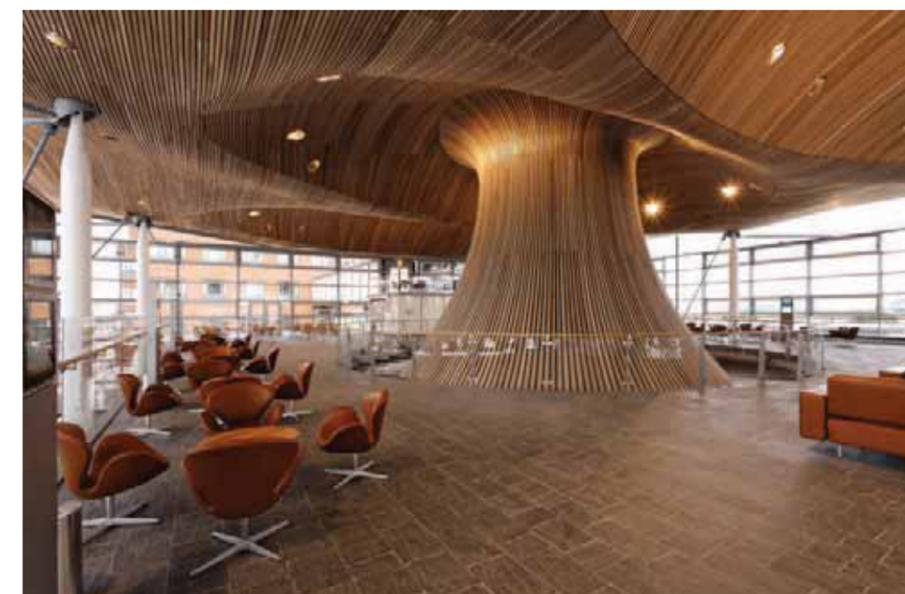
L'assemblage unique est parfois inenvisageable dans certains projets, du fait de la forme de l'enveloppe. Deux projets conçus par Arup pour la structure, ont vu naître l'approche d'outils paramétriques pour les ingénieurs. Le premier projet est celui de l'assemblée Nationale du Pays de Galles, l'œuvre de Richard Rogers & Partners. Le toit du projet, en forme de coupes ou dômes aplatis a été réalisé sur Rhino. Le modèle générant la forme n'est pas paramétrique, mais modélisé avec les outils classiques sur Rhino. Un modèle d'analyse de « spaceframe » (structure spatiale) est dérivé directement du modèle Rhino et a permis de constituer une géométrie uniquement filaire, faite de nœuds et de lignes. Ce modèle effectué via un logiciel GSA, développé en interne, a permis d'effectuer une première analyse structurelle de rdm et comprendre le fonctionnement d'ensemble. Ensuite, une analyse non-linéaire avec GSRelax, qui représente les effets de second ordre de la structure, a été entreprise, pour déterminer la prévalence de flambage. Les ingénieurs d'Arup ont développé un outil paramétrique afin de réaliser les assemblages des profilés. Ces derniers sont des barres standards universelles, des profilés creux ou circulaires, mis à part les profilés en porte à faux et les éléments de « pliage » (où les dômes coupent le cylindre). Arup a développé chaque assemblage géométriquement complexe en fonction des transferts de charge, des techniques du fabricant, et selon les principes de montages envisagés. En utilisant des techniques, de fabrications standard et conventionnelles, appliquées sur les assemblages hautement complexes, les ingénieurs ont donné aux fabricants de charpentes métalliques une série d'assemblages à réaliser. Un modèle X-Steel (un ancien module de Tekla) a également été produit à

à partir de la géométrie de base sur Rhino, pour la forme générale de la structure et pour toutes les connexions de charpente métallique. En outre élaboré une fois que l'entrepreneur en charpente métallique ait été sélectionné, le modèle comprenait chaque écrou, boulon, éclisse, plaque et raidisseur, et a servi au final, à fabriquer tous les composants structurels. Un essai, monté en atelier à grande échelle de l'ensemble du module, a facilité le montage sur site, ce qui a permis de valider l'exactitude de la fabrication et de l'adéquation des tolérances. La construction du toit s'est avérée par la suite d'une grande vitesse et a été effectuée sans entrave.

Le second projet où les outils paramétriques ont permis de répondre à l'attente de l'architecte, est le projet à Singapour de la « fleur de lotus », à Marina Bay Sands. Pour construire la structure, un modèle paramétrique a été monté avec Générative component uniquement pour un pétale. Celui-ci s'adaptait à n'importe quel autre pétale par la suite. Le modèle de ligne fut ensuite comme dans le précédent projet analysé avec GSA et a permis de définir toutes les sections. Ce modèle fut ensuite exporter sur micro station Triforma de Bentley, pour modéliser en trois dimensions la structure, puis sur Tekla de manière à pouvoir collaborer avec le fabricant. En effet, le modèle GSA est un moteur de calcul mais ne fait pas de visualisation, ce qui explique l'export vers Bentley Triforma. Ce dernier a également servi à effectuer un export de dessin 2d. Un projeteur du fabricant



d'acier insista sur le fait que le travail 3d d'Arup lui avait permis de gagner trois mois. Le choix du matériau pour couvrir la forme de lotus a fait l'objet d'une étude poussée. En effet, l'architecte ne voulait pas de jonction visible entre les éléments de couverture. La découpe de la forme en double courbure était obligatoire et devait donc être réalisée à partir de la structure métallique. Le matériau choisi est un polymère en fibre renforcé, utilisé pour les yachts de courses aux Etats Unis. Son utilisation à l'échelle du bâtiment est une première pour un projet de cette taille, et a nécessité une certification pour sa résistance au feu. La forme des plaques a été obtenue par moulage, qui a fait l'objet d'une paramétrisation de la surface des pétales du lotus. Le pavillon Porsche a été façonné de la même manière. L'idée de cette architecture qui étonne, était de créer une



Ci dessus : maquette du toit réalisée jusqu'au détail des boulons générée à partir du modèle numérique fait sur X Steel (Tekla)

Ci dessus : National Assembly for Wales - The Senedd. Architecte Richard Rogers, Bureaux d'étude structure Arup.

surface ininterrompue reprenant le mouvement d'une vague. A première vue, l'œuvre, sorte de vague à l'aspect du béton. La peau est en fait constituée de plaque courbe, en acier inoxydable. La structure monocoque rependue dans la construction navale et la formule Un est constitué de neuf mille nervures en acier, comparable au plancher sur un navire. Une fois de plus la référence structurelle, fait intervenir l'architecture navale. Un total de 620 feuilles en acier inoxydable, ont été soudées ensemble avec nervures de renfort, préfabriquées dans un chantier naval à Stralsund et assemblées sur place.

Le point culminant de la fleur de lotus s'élève à 28 mètres au-dessus du niveau de l'eau. C'est l'architecture qui étonne.

The Art Science Museum de Singapour, 2011. Architecte Moshe Safdie. Arup structure.



Ces éléments se répètent tous les quatre profilés primaires. La complexité du modèle réside dans l'entrecroisement des barres, car elle nécessite au minimum trois plans de croisement. En effet, deux éléments se superposent sans problème, mais lorsqu'un troisième se superpose au deuxième, il se crée un espacement lorsqu'il croise le premier élément. Au total, les Supertrees possèdent quatre nappes qui permettent de générer le croisement des « branches ». Le croisement des deux systèmes s'opère environ tous les 60 cm sur les profilés primaires.

La structure visible sur les photos montre à quel point, une telle forme ne peut s'opérer sans l'aide d'un modèle 3d paramétrique. Celui-ci permettrait de générer par exemple le déversement de « l'arbre », le nombre de profilés primaires, la distance des entrelacements et surtout la simulation de croissance à travers la structure secondaire. Il paraît peu probable en effet, pour ce genre de formes, de trouver une solution sans modèle paramétrique sur ses données initiales, car la connaissance et le comportement global de l'arbre structurellement reste inexplicable à première vue. Motta et Zdrahal remarquaient la complexité d'un problème, avant tout en fonction de la connaissance préalable de ceux qui le crée. Pour eux la difficulté d'un problème à résoudre, est proportionnellement liée à son degré de connaissance. Il est évident qu'un problème connu est beaucoup plus simple à comprendre et à résoudre qu'un problème inconnu, complexe ou non. La connaissance acquise au fil du temps, engendre donc une culture dite constructive. Cette culture constructive est en permanente évolution, du fait de la suractivité émergente des projets paramétriques. Les architectes créent des formes qu'ils ne savent pas explicitement caractériser structurellement, car la culture structurelle évolue plus vite qu'auparavant. Les ingénieurs sont donc en constante réflexion en quête de nouveaux procédés paramétriques, qui n'étaient absolument pas envisagés il y a quelques années.

On pourra donc approcher une forme courbe ou gauche par divers éléments linéiques. Ces derniers n'ont pas soulevé de problèmes inconnus pour les ingénieurs, en revanche la paramétrisation de l'architecture a fait évoluer l'analyse des assemblages. C'est donc l'interconnexion des éléments linéaires qui a poussé les ingénieurs vers des modèles de conception 3d entièrement paramétriques. Ceux-ci semblent encore assez liés au langage du code, ce qui explique la séparation des modèles paramétriques de l'ingénieur de ceux de l'architecte.

d Le tressage

L'autre solution possible pour approcher une forme est de la définir via des lignes dites « iso-paramétriques » quadrillant la forme. Ce quadrillage n'est pas obligatoirement composé de ligne orthogonale, il peut être la résultante de la projection d'un pavage plan sur la forme. Deux systèmes de trame semblent se détacher dans les projets réalisés. Le premier vise à quadriller la forme selon deux directions principales. Ces lignes définissant la forme sont physiquement représentées par des pièces fabriquées en bois lamellées collées. Les assemblages entre les pièces aux intersections des lignes peuvent se traiter de la même manière que les assemblages classiques en bois. L'assemblage le plus adapté à cette méthode reste cependant, l'assemblage mi bois, car il bloque les trois rotations et les trois déplacements entre les deux pièces. L'emboîtement, l'enfourchement ou la queue d'aronde ne sont cependant pas à négliger, même s'ils libèrent quelques degrés de liberté. Dans ce cas, le collage permet de bloquer les déplacements ou les rotations libres. Plusieurs assemblages se prêtent donc aux doubles réseaux. Pour éviter des complications de découpe, les réseaux de lignes orthogonales sont presque toujours obligatoires. L'emboîtement et l'assemblage mi bois sont alors entièrement justifiés. La rigidité obtenue lors d'un assemblage mi-bois, n'est pas entièrement satisfaisante vis-à-vis de la stabilité globale de l'ouvrage. En effet, un carré peut se déformer en losange à la différence d'un triangle.

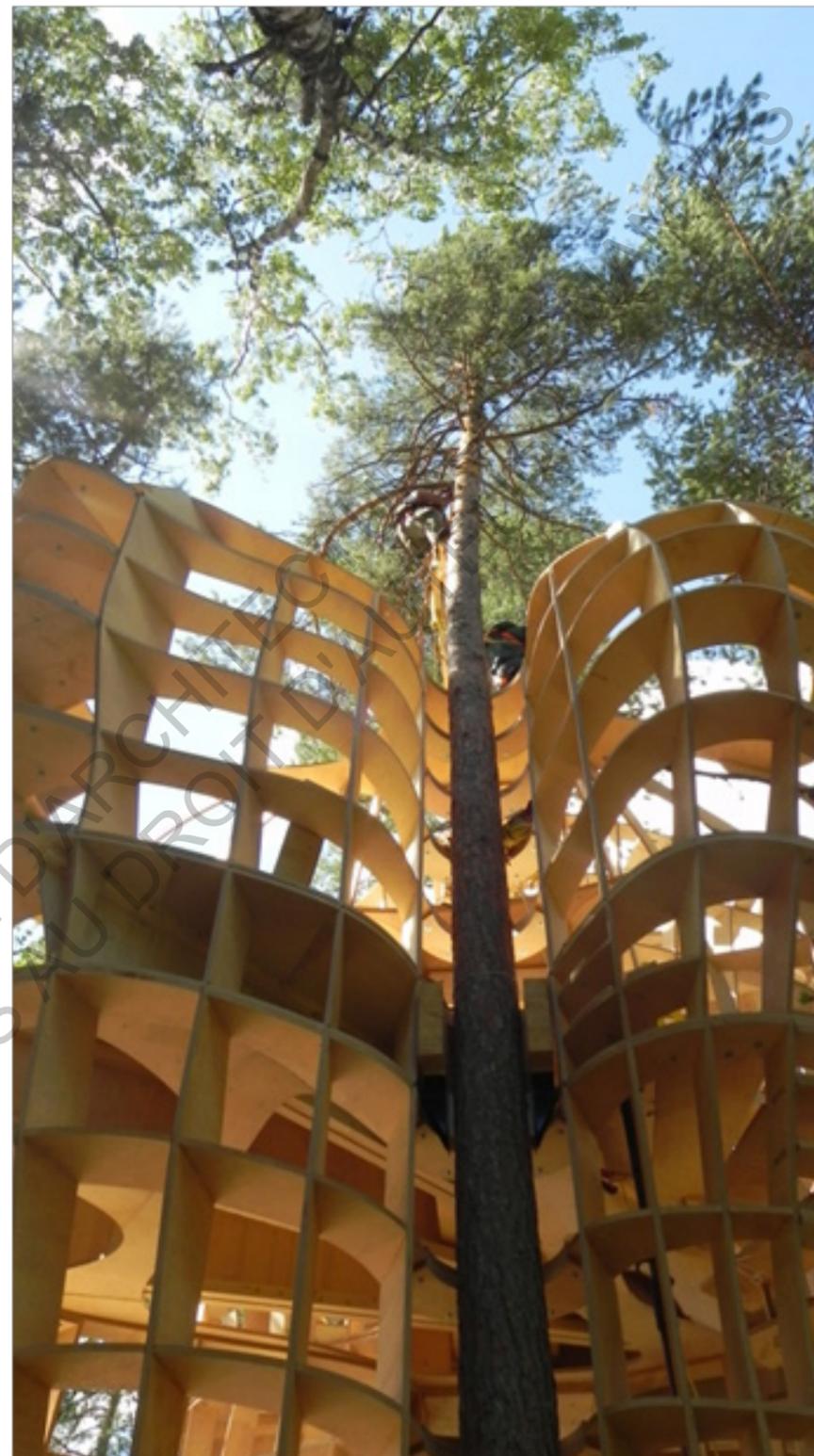


Supertrees : Garden by the bay Singapour. Grant Associates et Atelier 10 en tant qu'ingénieur structure.

Ma première approche de cette structure en bois lamellé collé, s'est effectuée avec le projet Öarna développé à l'école d'architecture de Nantes, sous la direction de Michel Bertroux, et Francis Miguet. Le projet prévoyait la réalisation d'un prototype de chambres d'hôtel dans les arbres, sur une île en Suède, non loin de « Ange ». La forme façonnée sur Rhino n'a pas fait l'objet d'un travail paramétrique, mais est le résultat d'une « sculpture numérique ». La définition également de toutes les pièces de bois s'est effectuée par une modélisation classique. La forme a été divisée en coques représentant les étages, puis en six éléments par coque. Le contour des pièces est représenté par une poly ligne fermée, définie par des points de contrôle. Une courbe correspondait ainsi à une pièce. La définition de toutes les poly lignes, 1000 au total, a nécessité une précision pointilleuse car les opérations étaient manuelles. L'étude paramétrique a été générée plus tard, dans le processus de conception, et a débuté lors de l'étude des assemblages mi-bois. Les poly lignes prédéfinies précédemment, n'intégraient pas le fait même de l'assemblage. Un modèle Grasshopper a ainsi permis d'effectuer les opérations nécessaires pour assurer l'assemblage entre les pièces. Le but étant de redéfinir le contour des poly lignes en intégrant les redents aux endroits où s'emboîtent

les pièces. Un modèle unique servait à définir les contours des assemblages pour un sixième de coque. Celui-ci était ensuite divisé pour définir le contour, premièrement des pièces horizontales, puis deuxièmement des verticales. Ce modèle à quelques opérations près, était paramétré pour toutes les sixièmes de coques. La seule difficulté venait du fait que la forme n'avait au préalable pas été définie via Grasshopper. En effet, pour générer les deux opérations principales sur Grasshopper, à savoir une réorientation de trois points d'un rectangle et une homothétie d'un autre rectangle, il était nécessaire de sélectionner les points d'intersections des poly lignes. Cette opération de sélection devait être faite dans un ordre bien précis. C'est l'ordre des points qui a posé des difficultés et qui a conduit finalement à une sélection manuelle de chaque point. C'est de ce fait, la seule entrave au paramétrisme, rencontrée directement sur Grasshopper, du fait d'une non paramétrisation préalable. Un total d'environ 520 opérations a donc été traité et de ce fait, a nécessité la sélection des 520 points d'intersections dans un ordre précis. Ce premier modèle Grasshopper renvoyait une géométrie « baker » dans rhino, avec deux calques distincts. L'un pour les poly lignes, et l'autre pour les pochages, ce qui permettait d'uniformiser l'épaisseur de toutes les pièces à 23.8 cm aux endroits d'assemblage et permettait aussi un meilleur emboîtement des pièces. Le deuxième modèle paramétrique - dont les éléments étaient plus faciles à sélectionner, car ils venaient du modèle paramétrique précédant - définissait les trous pour assembler les coques (boulons de 8 mm de diamètre), puis permettait la mise en plan des pièces, enfin il générait la numérotation de toutes les pièces selon un code, qui décrivait l'emplacement des pièces. Le code se composait de cette manière : V / 1B 5-1. Ce code par exemple, signifie que la pièce était verticale qu'elle appartenait à la forme 1, tronçon B, 5ème sixième de coques position 1. La troisième opération paramétrique envisagée, prévoyait la répartition de pièces sur les plaques de CP bouleau, le matériau qui servait à la découpe. Les plaques mesuraient 3m par 1.5 m. Après avoir essayé Rhino Nest avec 40 éléments, le résultat ne fut pas assez convainquant.

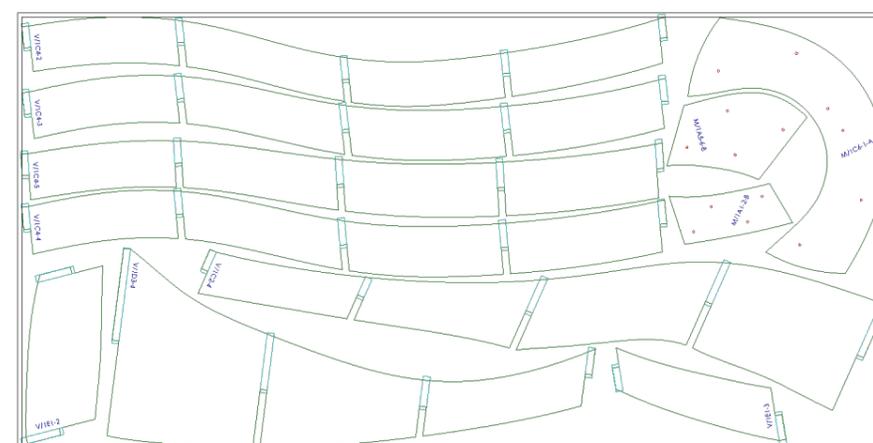
La matière entre les pièces pouvait être optimisée. Cette conclusion s'est faite après avoir fait le travail manuellement, et en le comparant avec Rhino Nest. Le travail dit de Nesting, qui consiste à répartir l'ensemble des pièces sur des plaques de découpe, s'est donc effectué manuellement pour les milles pièces au total. L'opération était effectuée sur des tronçons de forme ce qui limitait la réflexion, la tâche restait cependant assez intellectuelle. Elle visait à répartir dans l'ordre décroissant de grandeur les pièces, en partant toujours de la plus grande. Après avoir placé la plus grande pièce sur la première plaque, la deuxième pièce était testée sur la première plaque ; si elle ne rentrait pas, elle était placée dans la deuxième plaque, sinon l'opération se répétait avec la troisième et ainsi de suite. L'opération simplement présentée ici, sûrement celle qui était à la base de Rhino Nest, n'intégrait pas le fait que certaines pièces s'assemblaient plus facilement sur les plaques que d'autres. En clair, l'ordinateur n'a pas d'intuition pour ce genre d'opération. Ce fut la deuxième entrave au problème à résoudre à l'avenir. Le travail manuel a permis d'économiser 20% de matière au total. Les contraintes du Nesting était d'ordre mécanique et dépendait de la machine qui a permis la découpe des pièces. Cette machine était une machine dite à commande numérique. La génération de fichiers dwg avec quatre calques, était exportée vers un logiciel qui commandait la machine. En réalité ce logiciel, « Art Cam », envoyait un fichier à la machine décrivant le chemin que la fraise devait parcourir ainsi que le changement d'outil pour la découpe. Au total 33 heures de découpe ont été nécessaires, puis un ponçage manuel a permis d'obtenir les 1000 pièces découpées au dixième de millimètre près. Cette expérience effectuée en 2011, a été certainement une réalisation audacieuse développant la pratique de l'architecture paramétrique pour des étudiants. Une fois l'installation de deux semaines, la forme finale exprime l'inexorable souplesse de la nature en venant épouser les deux pins sylvestres avec une élégante silhouette. Les enseignements tirés des méthodes de conception, du point de vue paramétrique, ont d'abord été, comme déjà dit, une difficulté de sélection puis une optimisation de la



Oarna Project : Ensan Workshop 2010 2011. Sous la direction de Michel Bertroux et Francis Miguet. Prototype d'une chambre d'hôte dans les arbres en Suède sur une île.

En haut : Forme travaillée sous Rhino. Photo : Installation de la forme sur l'île. La structure ne tient que sur quatre appuis, par percement dans le tronc de deux arbres.

Ci dessous : Développé des plaques pour la découpe via une machine à commande numérique.



matière qu'il aurait été préférable de paramétrer. L'élaboration des modèles paramétriques ont également mis en lumière, le fait qu'il était difficile de travailler en équipe sur un même modèle. Au final, seul trois élèves ont généré les deux modèles paramétriques, et un élève dessinait les détails spécifiques sur Rhino, plancher et escalier. Je suis beaucoup intervenu pour ma part dans le premier modèle, générant les assemblages et n'ai pas du tout suivi par exemple la numérotation. Cette question des acteurs d'un projet paramétrique remet en cause beaucoup d'automatisme dans la genèse de projet. Après finalisation du projet, il ressort que cette expérience fut enrichissante tant au point de vue technique, par la manipulation de machine à commande numérique, qu'au point de vue humain. Les procédés de conception du projet jusqu'à la réalisation finale, n'avaient pas du tout été réalisés précédemment par une équipe d'étudiants. Si le projet était à refaire et à réinventer, la reformulation de certaines étapes serait envisageable d'un point de vue critique. D'abord le comportement de pièces et de la structure n'a pas été vérifié en entier, du fait de la complexité de la structure. Le dimensionnement des deux poutres principales reliant les deux troncs, a bien évidemment été calculé à l'état ultime et à l'état de service, par un modèle simple de poutre et en approchant le poids propre de la structure. Ce poids propre aurait pu être facilement trouvé, en additionnant les aires de toutes les pièces. Le modèle ne prévoyait pas le fait que les poutres étaient fixées de chaque côté sur des appuis très élastiques, les deux troncs des arbres. Une autre approximation concernait la prise au vent de la structure. Sans couverture l'effort qu'exerce le vent est assez inqualifiable, du fait de la multiplicité des pièces et de la forme courbe et arrondie du projet. Toutes ces données n'ont pas abouti réellement à une explication du comportement de la structure vis-à-vis des éléments extérieurs, du fait de son accroche aux arbres, et son comportement au vent.

Une seconde reformulation des modèles paramétriques aurait permis également de réduire le temps passé à la sélection des points d'intersection puis au

puis au Nesting. Notre structure ne possède pas d'éléments supérieurs à 3m et 1.5 m pour qu'ils puissent tous être découpés sur une plaque de CP (Contre Plaqué) en bouleau e. Le découpage de la surface primaire s'est donc opéré manuellement. Le modèle paramétrique n'a commencé qu'avec des poly lignes. Il en résulte que pour une forme différente s'adaptant sur trois arbres par exemple, une grande part de modélisation n'est pas paramétrisée. La paramétrisation semble être indispensable pour faire évoluer les procédés de conception et réduire leur impact de travail.

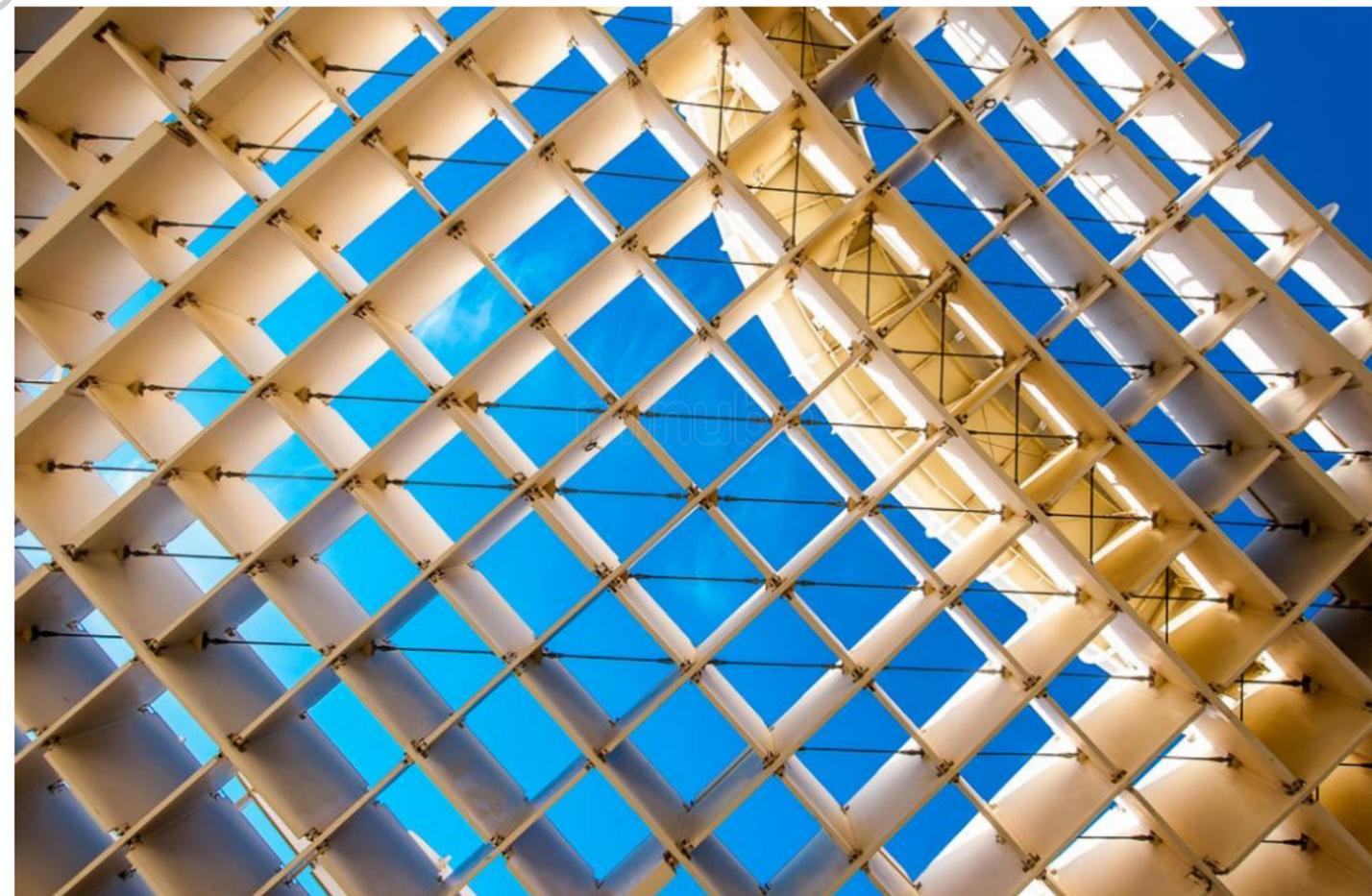
Enfin, la recherche la plus importante à développer reste celle de la peau et de l'enveloppe de cette structure. La solution envisagée pour couvrir la forme, comprenait des écailles en plexiglas en forme de losange, qui venaient s'accrocher aux intersections des pièces horizontales et verticales. Cette solution n'a pas été assez étudiée pour être expérimentée. En effet, elle ne garantissait pas une étanchéité à l'eau parfaite et isolait très peu l'intérieur. Beaucoup de projets avec des formes gauches reprennent cette typologie structurelle, à savoir un assemblage mi-bois de deux réseaux orthogonaux. Ceux-ci sont généralement des projets à l'intérieur et non structurels, et n'ont donc pas la problématique de l'étanchéité. C'est exactement le même discours pour le projet Centre Urbain Metropol Parasol à Séville de Jurgen Mayer. La forme produite ne dégage ni intérieur ni extérieur. L'assemblage cette fois-ci se fait par encastrement puis jonction, avec des tiges de métal qui viennent connecter deux morceaux de bois dans leur épaisseur. Les 3400 pièces sont percées manuellement par une mèche de 70 mm dans leur épaisseur, pour permettre l'insertion de tiges de métal. La liaison entre le métal et le bois s'est faite grâce à une colle époxy qui « gonfle » et permet ainsi d'assurer une bonne adhérence en traction. Cette solution a été trouvée par les ingénieurs d'Arup pour tenir compte des conditions thermiques extrêmes dans le sud de l'Espagne. L'assemblage complet a été chauffé, assurant ainsi une plus grande résistance des liaisons et ce, même à des températures très élevées. Au delà du geste architectural et social,

le projet du Metropol relève surtout d'un incroyable savoir faire technique inventé durant le projet. Le bois utilisé est du Kerto-Q. Le Kerto fabriqué dans les usines de Finn forest en Finlande, a été utilisé avec succès dans le domaine de la construction en bois depuis des décennies. Sa variante en plis croisés appelée Kerto-Q, fut la seule et unique réponse possible en bois. Le Kerto-Q satisfait à deux exigences essentielles du Metropol Parasol que sont la stabilité dimensionnelle des éléments et la forte résistance aux contraintes structurelles du projet. Il est formé de placages de 3 mm obtenus par déroulage de billons d'épicéa (épaisseur finale de 21 à 75 mm). La fabrication se fait dans deux usines situées en Finlande. Le Kerto-Q préalablement traité en autoclave, a été revêtu d'un vernis polyuréthane bi-composants de 2-3 mm d'épaisseur, imperméable à l'eau, mais perméable à la diffusion de vapeur d'eau, nécessaire à la conservation de l'ouvrage. Le projet a donc permis d'étanchéifier le bois en lui-même, mais n'a pas créé de surfaces étanches. Il y a donc un réel engouement à rechercher une méthode



constructive épousant la forme, et se basant sur un réseau boisé. De plus, ce croisement perpendiculaire des réseaux, ne permet pas du tout de contreventer la structure. Dans le projet Öarna, la stabilité horizontale était assurée par la forme ronde. En effet, les pièces verticales n'étaient pas dans le même plan, ce qui créait un léger contreventement local. Ici toutes les pièces sont orientées dans seulement une direction. Des câbles reprennent les effets de torsion d'ensemble. Des caissons, bi diagonalisés et des lignes de grandes diagonales évitent toute torsion de la structure.

Metropol Parasol de Jurgen Mayer H Seville Spain.



Pour éviter, un système de contreventement l'autre solution, élaborée notamment pour le centre Georges Pompidou de Metz pour générer une forme avec des courbes, est la construction de trois réseaux de courbes. Ce tressage en trois dimensions, constitue en soit une structure auto stable.

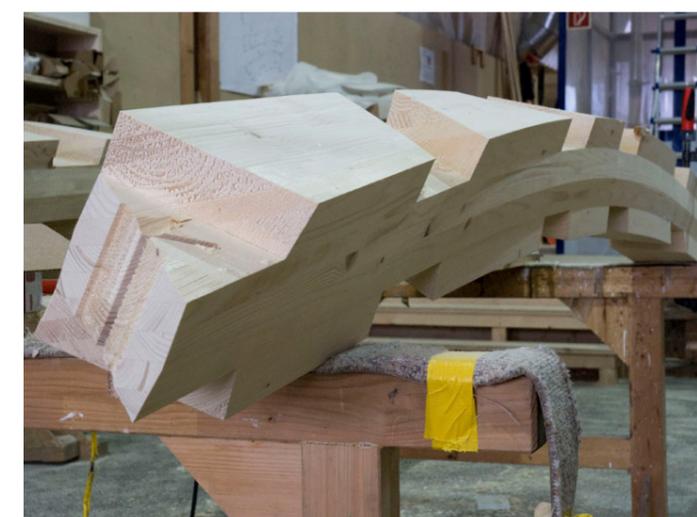
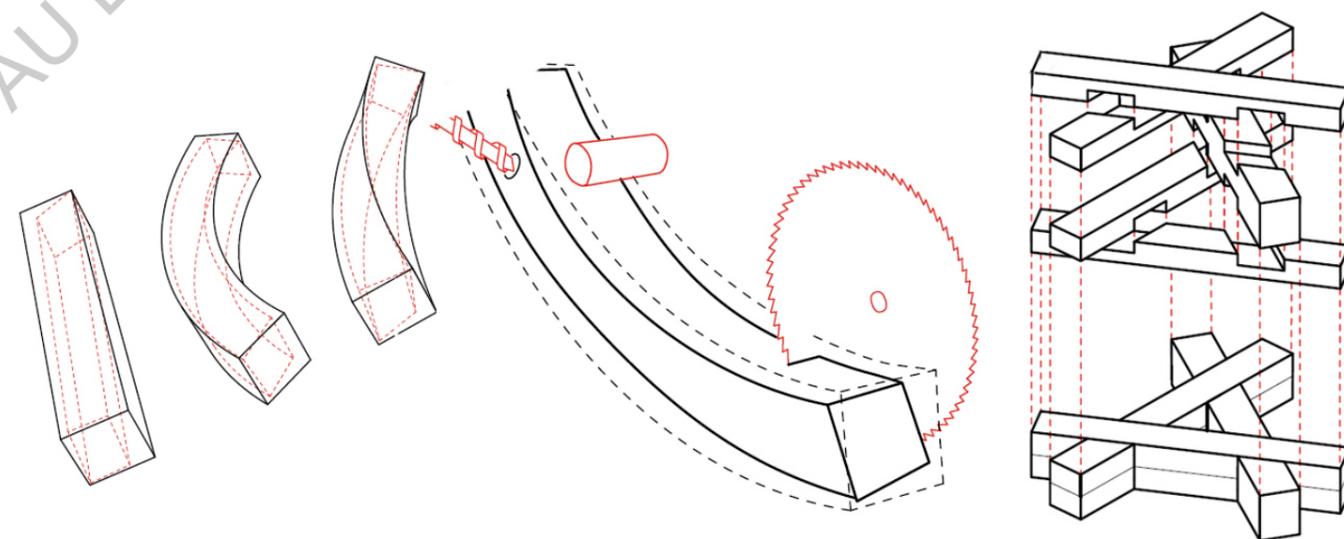
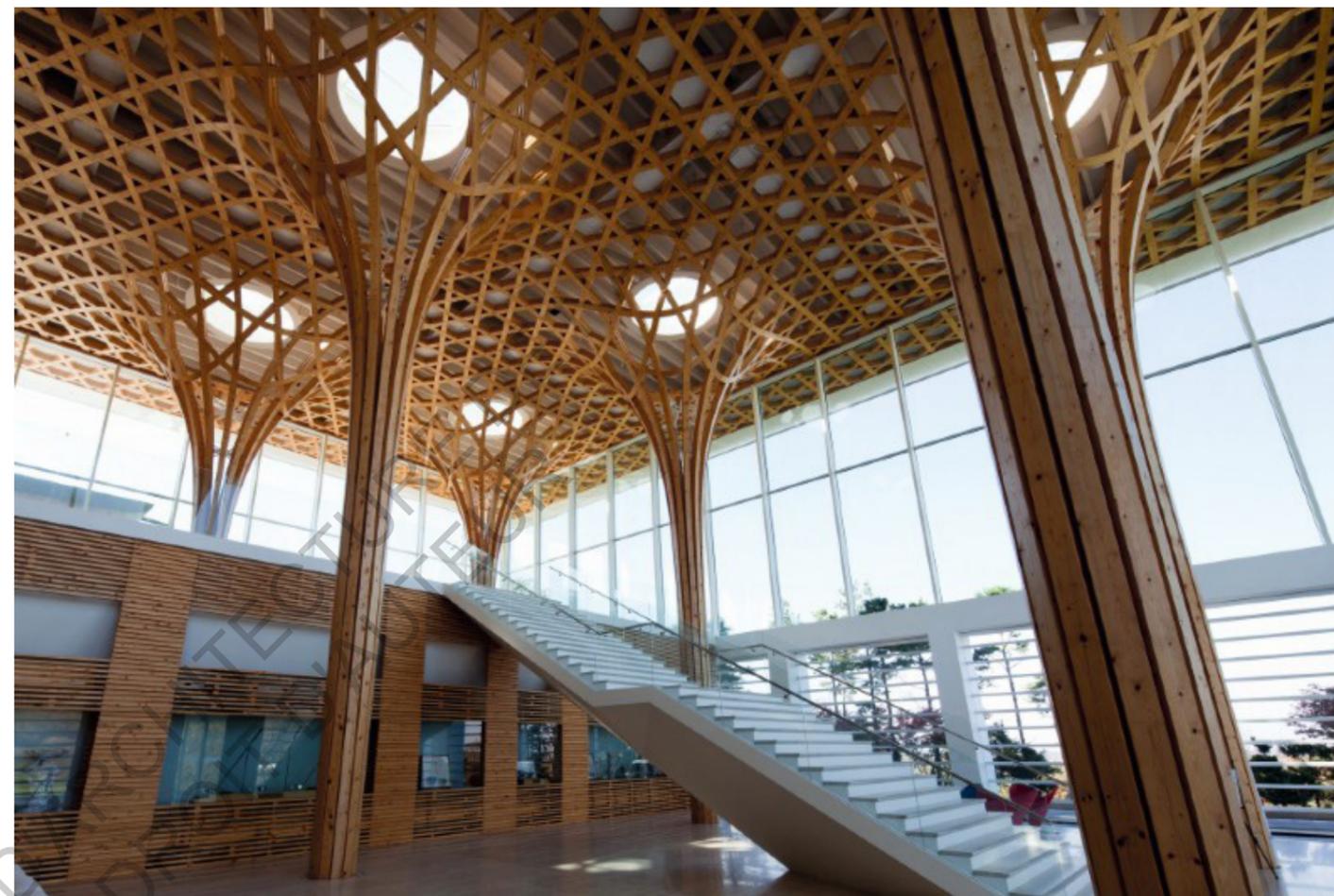
Le club de golf de Yeosu en Corée du sud, a été construit en 2008 par Shigeru Ban. Les architectes Ban et Yoon ont ainsi développé un ouvrage avec une toiture évoquant le prestigieux parcours 18 trous. Composée de trente-deux éléments carrés de 9 m de côté, soutenus par 21 poteaux en forme d'arbre, cette structure en résille galbée, est une véritable prouesse technologique. Sa morphologie avec trois fuseaux qui ne sont pas concourants en un même point, fabrique une nappe qui se déforme selon des points d'attraction, pour s'ancrer sur des piliers en bois. La forme de la charpente constituée d'une répétition de modules paraboliques, est plus régulière qu'à Metz. Les architectes ont mandaté une entreprise de charpente suisse (Blumer Lehman) pour la construction des divers éléments en bois. Les ingénieurs de SJB Kempteur Fitze engineering ont eux étudié le comportement de la structure. Le modèle paramétrique de l'enveloppe a été constitué par les architectes avec l'aide de « design to production », les calculs de structure ont été établis grâce à ce modèle, enfin la production a été pilotée à l'aide du modèle numérique. Il y a eu une réelle coordination entre les trois corps de métier. Pour réaliser ce tissage, les ingénieurs spécialisés en détails d'assemblages, ont imaginé un tressage sur trois nappes. L'assemblage s'effectue par emboîtement, à la manière des Kaplas, mais non pas avec deux réseaux orthogonaux, mais trois réseaux formant des triangles. Le modèle paramétrique d'assemblages des pièces était créé de manière à pouvoir dessiner les 15 000 recouvrements entre les pièces. Il s'adaptait à la courbure de la forme et ainsi qu'à l'orientation de toutes les pièces. La géométrie des pièces a également été définie en fonction des contraintes d'usinage, de même que la forme de la surface de base. En effet, le rayon de courbure du bois devait être respecté. Il y a donc eu une interac-

tion forte entre conception / construction et étude structurelle au cours du projet. Après avoir défini le modèle géométrique, la découpe a pu s'effectuer. Pour découper toutes les pièces deux machines ont été nécessaires. D'abord, une machine permettait de fléchir les poutres de bois selon deux axes, puis une machine 5 axes venait ensuite fraiser et créer les redents dans les poutres. Cette double opération a nécessité une technologie de pointe. La conversion du modèle géométrique en fraisage, opérations de forage, de coupe et de rabotage pour une machine CNC, ne se résume pas à un clic de souris. Pour des projets non-standard, il n'existe pas de processus de planification off-the-shelf (hors commerce). Afin de maîtriser la quantité de composants, des solutions spécifiques au projet ont été développées. L'opération avec la machine 5 axes, semble assez intuitive si les poutres n'étaient pas fléchies, et aurait pu être entreprise par une simple machine 2 axes, puis seulement ensuite les poutres auraient pu être courbées.

Cette inversion des processus n'a pas été entreprise, premièrement pour une question de précision, puis parce qu'il fallait découper les poutres selon leur tranche. C'est donc cette double opération qui a permis d'obtenir ce tressage tridimensionnel. Cette étape de découpage ne prévoit pas la réalisation de 21 poteaux qui sont eux plus standard à fabriquer. L'assemblage final a conduit à une précision qui a entraîné des décalages d'environ 2 cm entre les diverses formes. La précision numérique était de 1:1000ème de millimètre et celle des machines de 1:10ème de millimètre. Les 2 cm d'écart sont encore acceptables d'un point de vue structurel.

En haut : Yeosu, haesley nine bridges golf club, Shigeru Ban. Bureau d'étude suisses SJB.

Schémas : Principe de réalisation. Cintrage des poutres de bois, puis découpe avec une machine cinq axes, pour générer les redents afin de d'emboîter les éléments. Puis montages des sous formes.

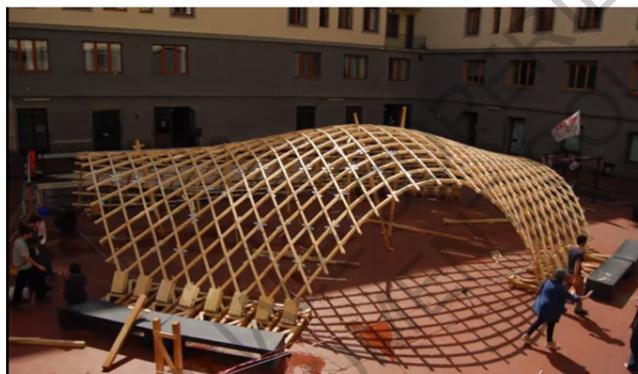


Le tissage est à priori une réponse qui demande une technologie de pointe pour passer du stade numérique à la construction. Cette opération entre modèle numérique et découpe physique peut être entreprise par l'usage combiné de deux processus ; l'un visant à courber le bois (double courbure) l'autre à découper le bois pour créer des assemblages. Le projet de recherche Digital Gridshell vise à simplifier ce processus complexe de découpe.

Le projet Digital Form-Finding of Timber Post-formed Gridshell a été développé par des étudiants de l'université de Naples, dans leur cadre de thèse de maîtrise. L'approche de la forme s'est faite via Rhino et Grasshopper en définissant une grille élémentaire parfaitement cartésienne. Cette grille de 169 m² était constituée de deux réseaux de courbes orthogonales. La construction de la forme finale s'est opérée, via des conditions aux limites. Trois courbes ont été définies de façon arbitraire. Celle-ci sont dans le même plan et constitueront la base de la structure. La génération de la forme s'est opérée de cette façon. La grille cartésienne est venue se draper et s'adapter parfaitement sur les trois courbes au sol. La surface de couverture au sol est alors de 96 m². Cette technique n'est pas novatrice, en revanche la manière de construire la forme, résultat de nombreuses recherches, s'est opérée de la même manière que le processus numérique. Les étudiants ont fabriqué au sol une grille élémentaire tissée perpendiculairement, avec des morceaux de bois assemblés sans serrage. Cette grille n'est absolument pas contreventée. Ensuite, la structure est poussée sur trois côtés (les trois courbes définies initialement) et se lève pour donner la forme. La poussée s'arrête lorsque les poids, qui, contre la poussée au vide de la structure, viennent se placer sur les trois lignes tracées au sol. Une fois la structure stabilisée, un tissage joignant les diagonales permet de rigidifier la structure et surtout de la contreventer. Cette méthode de construction est assez novatrice car elle met directement en relation le façonnement de la forme numérique et celle du prototype physique construit. Cette corrélation recherchée entre modèle numérique et modèle physique dans la construction, semble réellement une véritable

prouesse. La manière dont est générée la forme est tout simplement remarquable et nécessite peu de machines et moyens technologiques de découpe. En revanche, elle demande de la main d'œuvre pour assembler la grille initiale et pour la pousser ensuite. Cette technique de réalisation est dite post formée. La forme créée est générée après avoir fabriqué les morceaux la définissant, sur le même principe que la post contrainte pour le béton.

Photos du Workshop de l'université de Naples, étudiant la création de forme digitale post formée.



e Le tissage.

En Novembre 2012, l'Institut pour la conception computationnelle (CIM) et l'Institut des structures de bâtiments et la conception structurelle (ITKE) à l'Université de Stuttgart, ont terminé un pavillon de recherches qui est entièrement robotisé fabriqué à partir de composites en fibre de carbone et de verre. Ce projet interdisciplinaire, mené par des chercheurs, des architectes et des ingénieurs, des étudiants de l'université de Stuttgart en collaboration avec des biologistes de l'Université de Tübingen, étudie la relation possible entre les stratégies de conception biomimétiques et les nouveaux procédés de production robotisée. La recherche a porté sur les principes matériels et morphologiques des exosquelettes, des arthropodes, comme sources d'exploration d'un nouveau paradigme de la construction composite en architecture

L'atelier de recherche nommé Research Pavillon 2012, conduit entre autre par Achim Menges vise à étudier le développement d'un procédé de fabrication robotisée, innovant pour l'industrie du bâtiment, basé sur l'enroulement filamentaire de fibres de carbone et de verre, en étudiant les modèles biologiques des invertébrés. Après une approche "bottom-up", une large gamme de différents sous-types d'invertébrés a été initialement étudiée, en ce qui concerne l'anisotropie du matériau et la morphologie fonctionnelle des arthropodes. Les principes biologiques observés ont été analysés et extraits pour être ensuite transférés dans les principes de conception viables pour des applications architecturales. L'exosquelette du homard (*Homarus americanus*) a été analysé plus en détail pour sa différenciation matérielle locale, qui a finalement servi de modèle de rôle biologique de ce projet. L'étude de l'exosquelette a permis de mettre en évidence le comportement d'une structure à fibre isotrope, générant une distribution uniforme de la charge dans toutes les directions. L'arrangement des fibres, l'épaisseur de la couche associée et les gradients de rigidité dans l'exosquelette du homard, ont été soigneusement étudiés. Les principes résultant de l'étude ont été appliqués à la conception d'une



Research Pavillon : Achim Menges. Travail sur une structure en fibre de verre et de carbone.

structure de coque, fabriquée par une machine 6 axes. Cette machine est munie d'un appareillage spécifique en bout de bras (donc machine 7 axes), qui permettait de dérouler un fil dans l'espace et ainsi tisser une forme. Les matériaux servant de fils sont un système composite de fibres. Des fibres de verre et des fibres de carbone sont donc utilisés comme filaments. Dans les techniques de placement de fibres existantes, par exemple de l'industrie de pointe aérospatiale ou pour la production de voiles, les fibres sont généralement posées sur un moule positif fabriqué séparément. Ici ils constituent la forme même. Le tissage s'opère de cette façon. Un léger châssis temporaire, sorte d'échafaudage, en acier linéaire permet de définir les points d'ancrage pour tendre les fils. Le châssis en acier est monté sur une plate forme tournante. Celle-ci tourne pendant que le robot vient dérouler les fils en passant par les points d'ancrage. La définition paramétrique des trajectoires sinueuses du robot par rapport au modèle numérique de la géométrie, ainsi que la génération de code de commande du robot lui-même, ont été nécessaires pour aboutir à la forme. A partir des segments de droite, résultats du tissage, la forme incurvée, parabolique hyperbolique à double courbure du pavillon, se forme. Des capteurs à fibres optiques intégrés dans la structure, contrôlent en permanence la tension et des varia-

tions de contrainte. Six séquences d'enroulement de filaments différents contrôlent la variation de la mise en couches de fibres et de l'orientation des fibres des couches individuelles, à chaque point de la coquille. Elles sont conçues pour minimiser la consommation de matériaux, tout en maximisant la rigidité de la structure, résultant de l'efficacité de matière importante et une structure très légère. Les fibres de verre sont principalement utilisées comme un élément de partitionnement spatial et servent de coffrage pour les couches suivantes, tandis que les fibres de carbone plus rigides, contribuent principalement au transfert de charge et la rigidité globale du système. La pré structure en acier, est démontée, et la structure uniquement tissée est stable. L'épaisseur maximale est seulement de 4 mm. L'intégration simultanée des principes biomimétiques de la cuticule du homard et de la logique du carbone nou-

vement robotisé et de l'enroulement de fibre ont permis un haut niveau de performance structurelle et de nouvelles possibilités pour l'architecture tectoniques. En dépit de sa taille et de la portée, la peau semi-transparente du pavillon pèse moins de 320 kg et révèle la logique structurelle du système à travers l'agencement spatial du carbone et de fibres de verre. La synthèse de nouveaux modes de conception computationnelle et du matériel, de simulation numérique et la fabrication robotique permet à la fois l'exploration d'un nouveau répertoire de possibilités architecturales et le développement de structures extrêmement légères et matériellement efficace.

Tissage des fibres via une machine 5 axes, par rotation de la structure en acier temporaire.



Ces différents exemples de construction de formes à double courbes, montrent qu'il est indispensable de lier la conception architecturale à la réalisation physique. Plusieurs outils ont été développés, pour allier les modèles numériques aux modèles physiques. Certains d'entre eux sont dédiés à des réalisations artistiques et assez onéreux pour l'instant. Des recherches s'ouvrent donc pour tenter de ramener cette science de construction à l'habitat courant, afin d'être compétitif financièrement. Les machines à commande numérique sont en plein essor, car leur pilotage est de plus en plus précis. Ce degré de précision n'est désormais, plus une faille dans la conception finale des assemblages. De nombreux projets ont déjà exploré les possibilités de rattacher à une machine dite robotique, un bras supplémentaire permettant de générer des tâches encore inexplorées auparavant : un fil réchauffé, une aiguille pour tisser, une mèche pour découper le bois et même une tronçonneuse. D'autres recherches poussent la réflexion sur le mode de construction, qui peut être remis en cause par les innombrables possibilités de calcul des ordinateurs. Le paramétrisme a d'abord et avant tout apporté une réduction considérable dans le travail de tâches répétitives, qui s'opérait auparavant manuellement. Ce gain de temps, tant sur la construction de la forme, que lors de l'étude structurelle, et lors de la découpe, représente aujourd'hui une avancée majeure dans la relation entre monde de l'informatique et le monde réel.

L'approche de l'architecture paramétrique pour la construction d'une forme géométrique précise, se veut initialement adaptée aux architectes, qui on l'a dit dans la première partie, entrevoit par cette méthode de multitudes possibilités. Les ingénieurs pour qui l'approche classique de la structure est acquise, ont dû adapter leur mode de dimensionnement, en partie à cause des géométries complexes et non compliqués que les architectes ont formulées. Il y avait auparavant une franche rupture entre le monde de la logique et celui de la création. Celle-ci demeure encore dans les méthodes d'enseignement. Les principes structurels sont enseignés d'abord et avant tout, par des calculs simples sur des éléments classiques tels qu'une poutre ou un

poteau. C'est seulement ensuite que la vision d'ensemble d'un bâtiment s'acquière, au fur et à mesure des projets développés hors cadre scolaire. Cependant, il y a toujours cette tendance à vouloir se rattacher à la réglementation. Cette réglementation n'est pas discutable dans sa globalité, mais elle ne permet pas de sortir du cadre défini par les points, disons classiques reprenant des exemples standard. Le monde de l'enseignement de l'architecture parcourt le chemin inverse. L'imagination alliant création et réflexion, ne doit pas être bornée, dans une première approche. Elle doit jaillir d'une intention liée à plusieurs contraintes et doit être clairement exprimée. La réglementation ne doit pas en ce sens, interférer avec la création. Cette pseudo contradiction dans l'approche de l'enseignement de l'architecture et de l'ingénierie, s'efface petit à petit au fur des années, car les projets demandent une communication de plus en plus importante. Grâce à l'immense opportunité graphique laissée par les modeleurs numériques, le projet devient impunément une source d'échange et de collaboration entre professionnels, autour de laquelle émerge une idée. Il est désormais peu envisageable que l'ingénieur n'intervienne pas dans le processus de réflexion lors de la conception. Je dirais qu'aujourd'hui cette approche peut aller encore plus loin. Comme nous l'avons vu avec les deux exemples précédents, les ingénieurs d'Arup ont eu aussi le désir de participer à la création formelle d'un projet. Leur modèle numérique peut totalement s'adapter à celui façonné par les architectes. Bien sûr, il y a encore deux modèles. D'abord et avant tout parce que chacun ne renseigne pas sur les mêmes éléments et ensuite parce que les outils utilisés par les architectes et les ingénieurs ne sont pas identiques. Je dirais que ces maquettes doivent être complémentaires. L'échange d'un sens comme dans l'autre doit être possible, sans perte d'informations. C'est ce qui résulte de beaucoup de projets récemment menés sans pour autant intégrer un logiciel BIM. Du fait de leur ouverture vers des modèles paramétriques de construction, quels outils mettent les ingénieurs, en œuvre réellement pour justifier le comportement de telles structures ?

II - Les éléments finis à la base de la génération du modèle constructif.

Hypothèse : les formes complexes à interpréter doivent être traitées par éléments finis car elles n'ont aucune légitimité avec la RDM.

Comment interpréter les résultats basés sur les EF (éléments finis)? Existe-t-il une vérification contrôlée sur un prototype construit (prototype muni de capteurs qui analyseraient les contraintes et qui les compareraient au modèle 3d) ? Quelle réglementation gère cette approche paramétrique ?

Revenons sur le projet du pont de Basento de Musmeci. Le modèle paramétrique physiquement créé avec une maquette en néoprène, lui a permis de connaître précisément les efforts dans la surface. Il a d'abord obtenu le module d'Young du néoprène, et le coefficient de Poisson expérimentalement, puis il a même réussi à calibrer la tension de la membrane en mesurant l'allongement du néoprène. Les tensions transversales et longitudinales se révèlent être assez constantes, variant avec un écart de 10%. Musmeci s'est rendu compte, que l'hypothèse initiale d'une surface à contrainte isotrope, uniquement en compression, n'était pas physiquement réalisable, car la surface est soumise à son poids propre. Il a donc décidé de renoncer à la condition d'isotropie, typique des surfaces minimales. Le pont réellement construit ne fonctionne donc pas en compression uniforme, d'abord parce le point propre rentre en jeu, et parce que les efforts dus aux charges mobiles, ne sont pas constantes, sans parler également des efforts de vent. Avant d'affronter le projet définitif du pont, Musmeci décide de construire une autre maquette en plexiglas, pour évaluer l'entité des perturbations sur la membrane. La maquette a été réalisée en collant le plexiglas chaud à travers la contre forme modelée en bois et avec une feuille d'aluminium. Les bords de la membrane ont été augmentés. Avec des cellules extenso métriques électriques, la maquette révéla les résultats attendus, et fit preuve d'une résistance significative. Après avoir déterminé la forme exacte de la membrane, en s'aidant de calculs effectués avec la géométrie de l'eau savonneuse (publication de Rudolf Trostel en 1962),

Musmeci regarda le comportement général du pont. C'est alors que le studio fut dans l'obligation de travailler avec les méthodes classiques de calculs de rectilignes et de courbes. La membrane fut alors décomposée en neuf barres roulées entre elles, afin de calculer la structure comme un système classique de rdm. Les liaisons des barres étant judicieusement positionnées au niveau du changement de signe de la courbure. Le degré de statisme fut alors réduit à 7, ce qui limita les calculs au vue de la complexité de la membrane. Après la vérification, sous quatre combinaisons de chargement, plus aucune autre vérification d'ensemble n'a été effectuée, avant la construction du pont. Il restait cependant à vérifier la connexion avec le tablier et les zones marginales, où pourraient se concentrer les contraintes. Avant de passer à la construction, le Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, concéda l'exceptionnalité de la structure et l'incertitude sur son comportement, et demanda d'effectuer une maquette en micro ciment, en vue de confirmer ou d'infirmar les résultats avec le modèle monodimensionnelle. La maquette réalisée au 1/10ème, longue de 14 m a donc été installée à Bergame, à l'institut d'Expérimentation de Modèle et de Structure. Elle est reproduite exactement à l'identique avec les armatures, à l'échelle. Les premiers essais ont démontré un comportement imprévu dans les zones de clés voute : la naissance de compression parasite dans le tablier et de traction ... Musmeci trouva la solution en augmentant l'épaisseur des bords. D'après cette dernière modification, les valeurs obtenues avec la maquette sur la tension longitudinale, présentait des différences minimales avec les valeurs de calculs de l'ordre de 5% (et 25% en plus dans les sections à la base et 25% en moins au sommet).

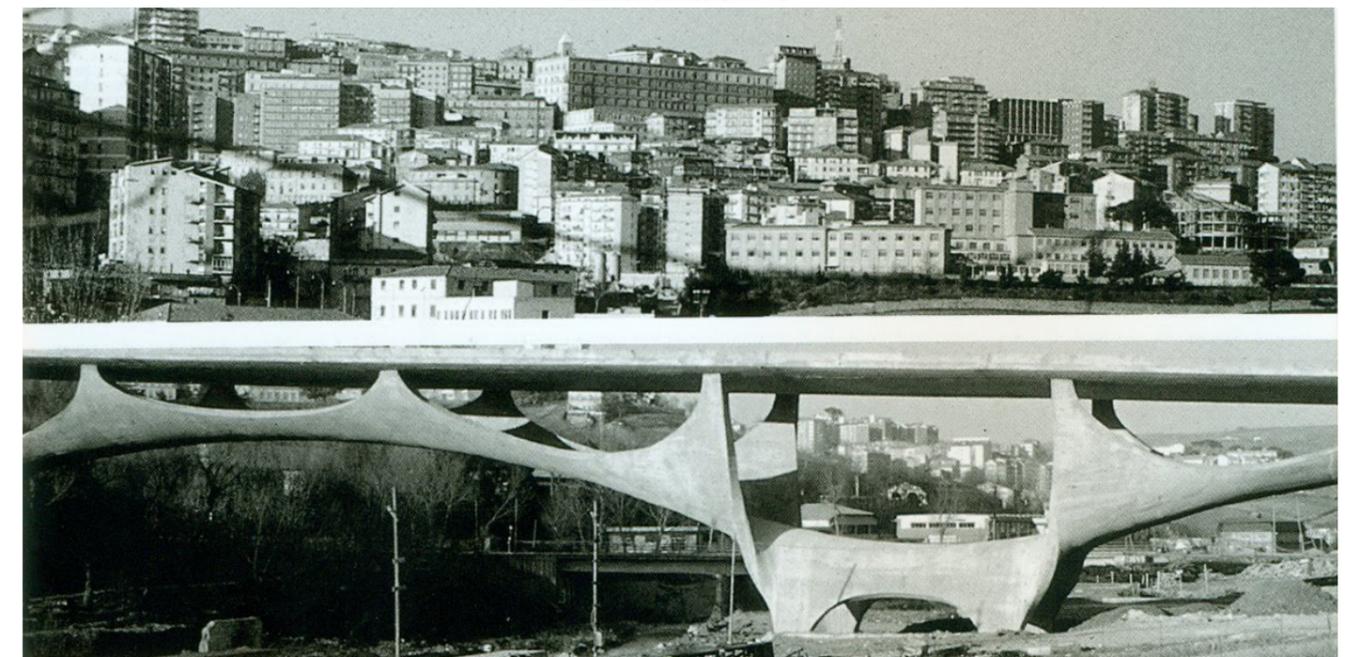
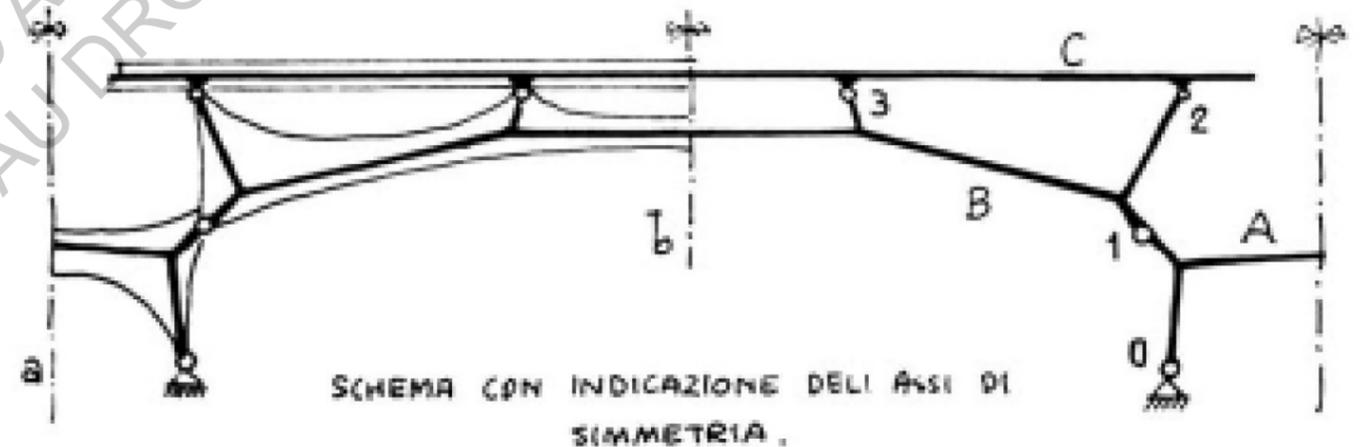
L'étude du pont aura nécessité au finale cinq ans d'étude, pour aboutir à la réalisation finale en 1972 à Basento. La complexité de la forme à nécessité l'emploi d'outil encore jamais expérimenté pour définir la forme. Cependant dans l'approche de l'ingénieur les calculs on été effectué de la même manière que les calculs standards de structure. Musmeci aurait pourtant bien voulu apporter les fruits de sa réflexion jusqu'au bout et développer un modèle de

calcul aux éléments finis. Malheureusement la théorie des éléments finis n'étaient dans les années 1970 supportée par les ordinateurs. Deux ans après la réalisation du pont Musmeci s'est penchés encore sur quelques calculs en vue d'étudier encore plus en détails la forme. Il a notamment procédé à un calcul manuelle aux différences finis en maillant la forme avec 250 nœuds. Il est aujourd'hui infiniment plus simple d'obtenir des éléments significatifs de réponse à la diffusion de contraintes dans des surfaces gauches.

Musmeci a ouvert une nouvelle porte encore inexplorée à son époque, qui prévoyait le renversement des méthodes classiques de calculs de structure, vers une étude des structures avec les méthodes des

éléments finis. Il avait vu là, une l'extraordinaire possibilité d'un outil pour la construction d'une vraie et réelle théorie de la structure, capable de contribuer à la découverte et à l'invention de nouvelles formes structurelles.

Ponte sul Basento de Musmeci. Le schéma est la représentation du modèle barre, très simplifié par rapport à la surface réelle.



a Les éléments finis

Les diverses structures étudiées dans la partie II ont été calculées pour la plupart d'entre elles, avec la méthode classique de rdm, consistant à créer un modèle barre ou tout objet serait linéique.

Dans le metropol parasol ou dans le projet Oarna, cette hypothèse par laquelle chaque élément est assimilé à une barre, n'est absolument pas envisageable pour connaître les effets locaux entre les pièces. Afin de connaître exactement le comportement de plaques ou de pièces, qui ne peuvent pas être assimilées à des barres, ils convient de recourir à la méthode des éléments finis. La méthode des éléments finis est un outil de calcul, qui repose sur la résolution d'équations aux dérivés partiels. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation « variationnelle » ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec des conditions aux bords. L'idée est de discrétiser le modèle, c'est-à-dire de mailler par de petits éléments les éléments géométriques, en général par des carrés ou des triangles, et résoudre une équation aux dérivés partiels pour chaque petit élément.

Ce découpage peut s'opérer tant sur des éléments de volume que des éléments planaires et même sur des éléments linéiques. Une poutre ou un poteau va être assimilé à une ou plusieurs barres, qui débutent et se terminent par un point. Chaque point sera modélisé par un assemblage. Ce découpage de la forme initiale s'appelle le maillage. La manière de mailler la forme est déterminante dans la méthode de résolutions. La technique actuelle étudiée renvoie ce découpage à une réelle science du maillage. La discrétisation passe donc par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère alors le problème posé sur la géométrie approchée, par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. La résolution du problème impose les questions de qualité de la discrétisation :

- existence de solutions,
- unicité de la solution,
- stabilité,
- convergence,

Et bien sûr : mesure d'erreur entre une solution discrète et une solution unique du problème initial.

La science du maillage permet de mieux interpréter les modèles. On essaiera dans un premier temps, d'augmenter le nombre de nœuds dans les zones de fortes contraintes et de créer un maillage cohérent. C'est-à-dire, qu'il ne devra pas mélanger les formes de maillages (pas de quadrilatère ou quadrangle avec des triangles). Plusieurs méthodes de maillage existent. La plus répandue dans les logiciels de calcul, est la méthode Delaunay. On l'utilise notamment pour calculer la descente de charges statiques et pour faire des analyses dynamiques, lors de l'action d'un séisme. Le « mailleur » définit alors, des carrés de 0.5 m de côté et adapte le maillage sur les bords des éléments. Les résultats après résolution de l'équation aux dérivés partiels, en abaissant le degré des équations par une intégration par partie, sont obtenus pour chaque élément du maillage. Les résultats les plus étudiés sont les contraintes, dans les deux directions principales, les forces (traction, compression) les déplacements et les microdéformations (qui sont révélatrices de la plastification). On sait de plus que les résultats obtenus sont tous faux, mais s'approchent grandement de la réalité. Il y a donc pour chaque modèle, plusieurs résultats possibles selon l'affinement du maillage. Plus celui-ci est dense, plus les résultats s'approchent de la réalité. En revanche, on sait que la somme des erreurs de tous les éléments dans un modèle est nulle. L'erreur est donc globalement nulle.

Dans le cas d'un calcul aux éléments finis sur une poutre, le calcul va être effectué sur chaque barre. Il repose sur une équation qui établit un lien entre potentiel (en force et moment), résistance (matrice de rigidité) et flux (déplacement).

Dans ce cas : $\{F\} = \{K\} \cdot \{U\}$

$$\begin{pmatrix} \text{Compression traction} & UTorsion \alpha \\ \text{Effort tranchant } V & \text{Flexion } \beta \\ \text{Effort tranchant } W & \text{Flexion } \gamma \end{pmatrix}$$

F : force et moment appliqués au six degrés de liberté

K : matrice de rigidité appliquée au six degrés de liberté, elle correspond à la cinématique de l'assemblage et peut intégrer un jeu ou une raideur

U : Déplacement sur les 6 degrés de liberté

Si le calcul est possible alors la structure est stable, et inversement si le calcul est impossible, la structure est instable et on peut difficilement localiser le problème. Il faut alors repenser la conception générale de la structure, ou changer d'assemblage pour choisir des liaisons plus contraignantes.

Les ordinateurs ont permis de résoudre l'ensemble des équations, qui comprend entre autre une inversion de la matrice de rigidité K dans un temps viable pour le calcul de structure. Des ingénieurs de l'école Centrale de Nantes s'étaient attardés à comparer la rapidité de calcul de l'ordinateur, à celle d'un ingénieur avec un crayon et une caleulette. Le résultat montre la puissance implacable de rapidité de l'ordinateur. En effet, la résolution d'un problème 2d avec 10 000 nœuds avait été résolue en 12 minutes par l'ordinateur, pendant que plusieurs ingénieurs prenaient une feuille de papier et commençaient leur résolution. Il aurait fallu 100 ingénieurs calculant jour et nuit pendant 100 ans avant de résoudre le problème sur papier !

La méthode des éléments finis, calculée avec l'aide de machines numériques, dans les années 1960 à aujourd'hui, a entièrement pris sa place dans les calculs dans l'aéronautique, dans certains ouvrages d'art, mais sont encore timides dans l'architecture, à l'échelle d'un bâtiment entier. La limite des calculs classiques avait, comme on l'a dit, poussé l'ingénieur dans la simplicité car il comprenait le comportement de chaque élément. Celui-ci résultant de la RDM était purement géométrique. Cette méthode ne permettait pas l'entière expression architecturale,

et était un frein à la création architecturale structurelle. Le pont de Bassento reste donc, un des exemples révélateur du pas de géant, dans l'analyse et la conception de l'ingénieur. Les outils changent mais les critères de dimensionnement restent les mêmes. Autrement dit, la compréhension d'un modèle n'a pas apporté d'autres éléments permettant de repenser la philosophie de la RDM. Les éléments finis ont donc permis de calculer en détails, les efforts et les déformations qui étaient déjà les critères dimensionnant de la RDM, s'exerçant sur une plaque ou un volume.

b La science de l'ingénieur :

L'étude d'une structure se conduit de la façon suivante. On explicite en premier lieu, quelles sont les actions qui sollicitent la structure. Celles-ci peuvent s'opérer par des forces, des déplacements ou des vibrations. La notion de force est intuitive, en revanche celle de l'action des déplacements est moins perceptible. Les déplacements sont essentiellement générés par des différences de température. Les forces elles, sont classées en deux catégories :

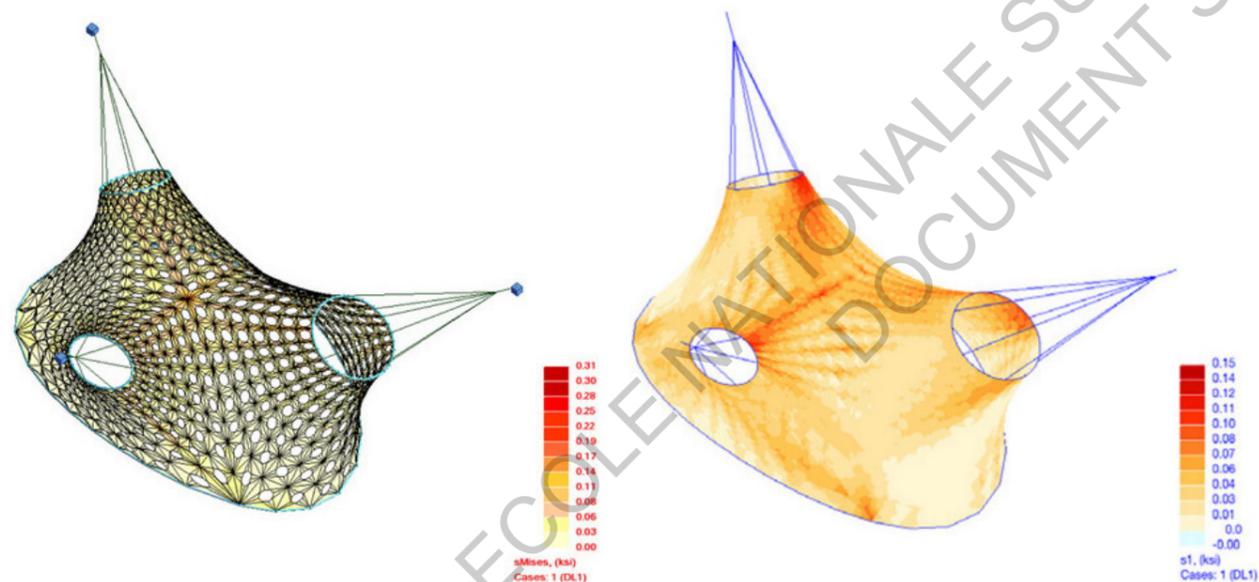
- les forces internes au bâtiment : le poids propre, les charges permanentes et les charges d'exploitations.
- les forces externes : le vent, la neige, et les actions sismiques.

A partir de la définition de toutes ses forces, une structure se calcule, en combinant ses actions, en attribuant à ces forces des coefficients de pondération. C'est ce que l'on appelle des combinaisons. Certaines actions sont inéluctables, comme le poids propre, d'autres courantes, comme les charges d'exploitation et d'autres accidentelles, comme la neige extrême. Ce qui explique la différence des coefficients, afin de prendre en considération cette différence de facteurs. Une première analyse, à partir de toutes ces combinaisons s'effectue statiquement. Cette étude vise à générer la descente de charges, afin notamment, dans un premier temps, de pré dimensionner les fondations, et renseigne sur les contraintes et les déplacements de la structure.

Ensuite, une analyse dynamique vient compléter l'étude statique. Aujourd'hui, cette analyse n'est plus complémentaire, elle est souvent « dimensionnante », du fait de l'augmentation de l'estimation des effets du séisme. L'analyse dynamique permet de maîtriser les phénomènes de résonances, vis-à-vis des actions sismiques, mais aussi vis-à-vis des effets de foule, ou de passage de piétons. En complément d'une analyse modale, qui renseigne sur les modes de vibration de la structure, les analyses dynamique diverses permettent de comprendre les phénomènes d'excitation du bâtiment. Ceci afin d'éviter tout phénomène de résonance. Afin de dimensionner tous les éléments d'une structure, deux états de calcul ont été définis. Le premier est l'état limite ultime, dit ELU. Cet état ne doit pas entraîner la ruine du bâtiment, les pièces ne doivent pas subir des déformations irréversibles. On vérifiera alors, que les contraintes dans les matériaux ne dépassent pas une valeur limite, définie par des normes. Le deuxième calcul, est l'état limite de service, dit ELS. Il consiste à vérifier le bon usage du bâtiment, pour qu'il soit compatible avec son fonctionnement. On vérifiera alors les déformations des éléments de structure, de manière à ne pas empêcher le bon fonctionnement de l'édifice.

Par exemple, si une poutre - sous une porte de 2.03 m de hauteur, a une flèche trop importante de 4 cm, une machine d'une hauteur de 2.00 m de haut, ne pourra être acheminée, entre les deux pièces séparées par cette porte. Les critères de flèches sont également précisés dans les règlements. Ces deux états et ces critères associés doivent être pris en compte, pour toutes les analyses, statiques et dynamiques. La démarche de dimensionnement des pièces structurales s'opère donc de cette façon. Cette démarche décrite ici, s'effectue pour tout type de bâtiments. Elle peut être conduite à la main, mais est aujourd'hui accompli systématiquement avec l'aide d'outils numériques. Ces outils numériques reposent sur des résolutions d'équations de la RDM et permettent de connaître les réactions, les efforts, les moments, les contraintes, les déplacements dans toutes pièces d'un modèle. L'utilisation des éléments finis, qui est une méthode complètement différente de résolutions de calcul, n'a pas changé

Modèle de toile tendu modélisé et analysé par éléments finis 2d sur une surface. Les zones rouges représentent les concentrations de contraintes.



n'a pas changé les méthodes de dimensionnement, mais a amplifié considérablement les processus de résolutions. Dans le calcul de structure, elle n'a pas remis en cause l'approche de l'ingénieur. Ainsi, on pourra conclure que les outils évoluent mais que les critères « dimensionnants » restent les mêmes. Les projets présentés précédemment ne sont pour la plupart pas calculé entièrement avec l'aide des éléments finis, à l'exception du Metropol Parasol de Séville. Pour dimensionner la structure, les ingénieurs d'Arup ont élaboré un modèle numérique fait avec des éléments coques. En clair, chaque pièce de bois était modélisée par sa longueur et sa hauteur mais pas par son épaisseur. Les pièces assimilées à des éléments 2 d étaient ensuite maillées. Ce modèle a été élaboré sur un logiciel interne d'Arup. Le calcul entier de la structure, s'est opéré en utilisant les éléments finis en 2 dimensions. Ce modèle global, a permis de caractériser le fonctionnement de la structure. Les éléments de contreventement étaient modélisés, et le vent qui n'était pas dimensionnant a été largement simplifié. Ensuite, un deuxième modèle sur les « troncs » uniquement, a été réalisé mais cette fois-ci, avec une maille 3d. L'épaisseur des matériaux était donc prise en compte. Le travail d'Arup a donc consisté, à une pré étude globale et un modèle de détails sur les troncs. A partir de ce travail, les données étaient transférées à la société Merck, qui était missionné pour l'exécution des pièces. Ces données consistaient en d'énormes matrices, qui répertoriaient les efforts pour tous les nœuds dans toutes les directions. Ce fichier pouvait être visible via Excel et en 3d sous Visual basic. Ensuite, sur Rstab les ingénieurs de Merck, ex société de FinnForest, ont créé des modèles d'assemblages, afin de dimensionner tous les éléments de détails entre les tiges et les pièces. Bien que ces modèles renseignent sur le comportement général des pièces, le génie mécanique est bien plus complexe pour ce nouveau type de structure. Les grandeurs mécaniques, tels que la raideur et le jeu, sont notamment prises en compte, et nécessitent une expertise très poussée. Les données, concernant la raideur, proviennent de test et de calculs difficiles à transcrire. Ces calculs s'opèrent sur des modèles de détails. Ils

se combinent. L'accumulation de ces légers mouvements peut vite devenir importante. Dans le calcul des structures en bois, il est fréquent de tenir compte des glissements d'assemblage, pour obtenir une analyse plus fine de l'ossature, surtout lorsque la déformation globale ne doit pas dépasser une valeur précise. La résine époxy a également été un point d'étude très important, du fait de la chaleur importante à Séville. Des études thermiques, utilisant les éléments fins, ont permis de démontrer que la température interne dans le bois pouvait atteindre les 70° C. Les fabricants certifiaient son usage jusqu'à 60°. Pour parer à cette configuration extrême, la solution de principe est de chauffer la résine époxy lors de l'assemblage, afin de rendre la molécule plus résistante aux variations de température. Un procédé novateur de précontrainte dans le bois, par élévation de température, fut ainsi développé et testé par Finnforest, avec l'aide de WEVO Chemicals et l'expert Borimir Radovic. Il s'agit de préchauffer les éléments de charpente, y compris les tiges d'assemblage, à environ 55°C, afin que la température de transition vitreuse de la colle, dépasse en toute sécurité le seuil des 80°C.

De par ces modèles paramétriques, les architectes ont poussé les ingénieurs, à bâtir d'abord, des modèles tridimensionnelles parfois paramétriques, et ensuite à se concentrer sur l'étude des détails d'assemblages. Le premier enrichissement a notamment été rendu possible, par l'utilisation des éléments finis au cœur même du processus de calcul. Le deuxième point, sur lequel l'architecture paramétrique a été génératrice d'inventions, est sur l'étude des détails entre pièces opérées de façon paramétrique. La simulation numérique permet de calculer et vérifier le comportement structural des structures très complexes. Mais le génie est plus qu'un simple calcul, surtout quand un matériau anisotrope est utilisé. La conception structurelle « Clever » doit aller de pair avec l'intelligence de modélisation, surtout dans l'étude des articulations. Au delà de la puissance des éléments finis, les modèles actuels numériques, ont permis de mieux connaître le comportement des bâtiments, surtout

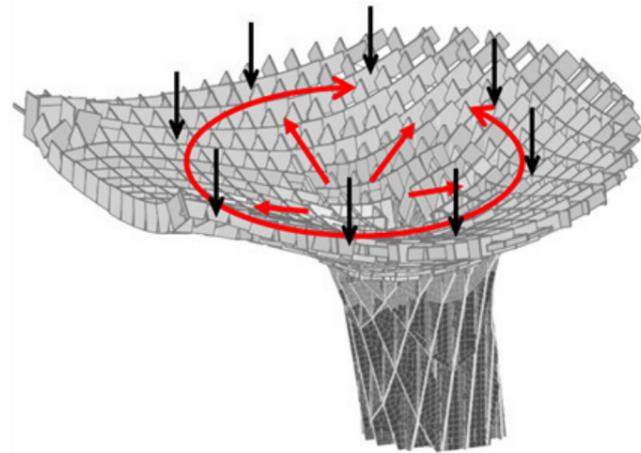
quand un matériau anisotrope est utilisé. La conception structurelle « Clever » doit aller de pair avec l'intelligence de modélisation, surtout dans l'étude des articulations.

Au delà de la puissance des éléments finis, les modèles actuels numériques, ont permis de mieux connaître le comportement des bâtiments, surtout dans leur réponse dynamique, et de travailler avec la matière de manière plus directe, par l'utilisation des machines à commande numériques.

Metropole Parasol : Bureau d'étude Arup et FinnForest. Détail de l'assemblage entre les pièces de bois. Les pièces sont continues dans une direction, discontinues dans l'autre.



Principe de la répartition des efforts sur les troncs.



III Nouvelles visions du paramétrisme.

Hypothèse : l'architecture paramétrique est plus qu'une simple utilisation d'outils informatiques. Elle sous-entend une approche transversale à l'architecture moderniste.

Qu'est ce que l'architecture paramétrique, a-t-elle réellement apporté ? Jusqu'où, pousse-t-elle l'imaginaire ?

I La pensée selon l'axe paramétrique.

Lorsqu'on passe en revue la bibliographie autour des systèmes paramétriques, on trouve des termes aussi divers et variés, que la modélisation générative, la modélisation procédurale, la modélisation déclarative, les modèles à base de caractéristiques de formes, les modèles à base de contraintes, les history based model, la modélisation « variationnelle ». Dans leur ensemble, ces modèles désignent toutes les propriétés, que l'on pourrait attendre d'un système paramétrique. A travers les divers exemples illustrés ci-dessus, une clarification de ce qu'est réellement un système paramétrique, s'impose donc. Un modèle paramétrique est une structure à double couche. La première, qui s'appelle couche géométrique ou noyau géométrique, contient la représentation explicite des objets modélisés, en d'autres termes, la géométrie que nous avons évoquée dans la partie I. La seconde, qui s'appelle spécification paramétrique, historique de construction, représentation implicite ou tout simplement spécification, contient un ensemble de paramètres et un processus, permettant de recalculer la représentation explicite, lorsque les paramètres sont modifiés. Par analogie avec la programmation, il est possible de considérer le paramétrique, comme une structure duale, avec d'un côté, le programme et de l'autre les données. La représentation mathématique doit devenir perceptible et palpable. En terme de processus de design, la demande de corrélation, implique que chaque action de dessin doit être suivie par une réaction.

Les modèles paramétriques peuvent être classés en deux grandes catégories, suivant leurs structures mathématiques sous-jacentes, et les divergentes problématiques, auxquelles ils se réfèrent. Aussi, nous pouvons distinguer l'approche fonctionnelle, et l'approche équationnelle (ou « variationnelle »). Il n'ya donc pas d'architecture paramétrique sans cette double adéquation. C'est donc précisément cette association fonctionnelle équationnelle, qui est novatrice, dans la manière de concevoir l'architecture. Pour moi, l'architecture paramétrique est porteuse d'une nouvelle vision qui se développe en trois points :

1 Nouvelle manière de construire et penser une forme.

2 A implicitement engagé les ingénieurs, à générer des opérations de calculs systématiques.

3 A engendré une pluridisciplinarité, à l'échelle du projet.

Le premier point est une réflexion sur cette double association fonctionnelle - équationnelle. Aujourd'hui, l'architecte concevant une architecture dite paramétrique, doit aussi bien penser sa géométrie, que son modèle équationnel. J'irais même plus loin en disant, qu'il n'y a vraisemblablement peu d'importance à accorder aux objets réalisés numériquement, ce qui importe ce sont les multi-data, qui gèrent la coordination du modèle. Cette vision est liée au fait que les objets sont indéfiniment modulables, dans tous leurs paramètres et que la genèse du processus de création intervient dans la gestion des données, qui sont représentées par des « trees » dans Grasshopper. On s'intéresse désormais davantage aux données qu'aux objets. La démarche de processus peut s'expliquer alors de cette façon. Les formes et les intuitions n'adviennent pas de l'ordinateur, qui a d'ailleurs du mal à générer de l'aléatoire, elles viennent de nos propres décisions réfléchies ou non. Cette appréhension de forme, se résume souvent par une esquisse numérique. Ensuite, on s'intéresse à la manière dont peut se construire cette forme ; si elle n'est pas développable, ou si les

ou si les rayons de courbure sont trop élevés. On pose donc une condition au résultat. Le travail paramétrique, vu de cette manière, est une démarche par positionnement du problème, puis résolution de celui-ci.

La volonté dans le dessin géométrique peut alors s'effacer, aux profits du procès même du modèle équationnel. C'est ce qu'entreprend Zaha Hadid dans la génération de ses masters plans. Considérer totalement les relations entre entités, plutôt que penser aux objets. Un exemple concret de cette approche, trouve en partie sa cohérence dans le comportement de beaucoup d'espèces animales. Les oiseaux formant des nuées, sont pour certaines espèces habitées, par un comportement en fonction du comportement de l'oiseau voisin. Lors de déplacement formant des nuées, un oiseau vole en fonction des oiseaux qu'il a autour de lui. Ses réactions sont calquées par l'attitude de ses proches. C'est ce qui explique l'effet de masse ou d'évitement, lorsqu'un rapace attaque par exemple ce groupe d'oiseaux. La nuée se sépare alors en deux, d'une manière élégante et sans discontinuité, puis vient se refermer après le passage du rapace. Le processus est le même dans la génération des Master Plan et de l'architecture de Zaha Hadid. Le façonnement de ses formes résulte, non pas d'une construction géométrique, mais d'un comportement de plusieurs entités. Ce façonnement découle de nombreuses recherches effectuées à l'aide de particules ou d'agents contrôlés par des relations comportementales.

Ainsi, les relations sont prépondérantes sur l'objet final créé.

Un projet mené par l'agence de Hugh Dutton pour la création d'une ligne de haute tension, résume cette nouvelle approche. L'idée directrice était de redessiner les pylônes, généralement dessinés par des ingénieurs, de manière à directement intégrer les contraintes de tension et de distance entre les câbles. L'esquisse a été entreprise, et a conduit au développement d'un modèle Grasshopper qui serait capable de gérer un ensemble de données intrinsèques à chaque pylône. Ces données provenaient de la qualité du sol, (plus le sol est dur, plus le pylône sera évasé à sa base, de la tension des câbles (si les câbles changent de direction alors le pylône s'inclinera pour créer uniquement de la compression, et éviter des efforts tranchants dans son mât), de plus, le nombre de câbles définira la taille des deux ailes des pylônes. Cette prise en compte de données extérieures, a conduit à concevoir un modèle adaptable pour tout type de pylônes. Les relations et les données à entrer dans le modèle, ont donc généré un procès de travail, qui a pris le dessus sur le dessin même de l'objet.

*Pylône of the Future : Hugh Dutton Associate.
Concours pour la réalisation d'une ligne en Toscane en Italie.*



L'architecture d'aujourd'hui, est une architecture mondiale. Tout nouveau projet est soumis aux critiques. Ceci ne renvoie pas à une architecture monotone ou homogénéisée, mais implique une cumulation progressive des projets. Les architectes modernistes emploient les outils paramétriques, en maintenant une esthétique moderniste, afin d'absorber la complexité. Pour Michael Schumacher, la sensibilité paramétrique a un tout autre sens, elle se révèle par l'accentuation de différences visibles, et l'amplification visuelle de différentes logiques. (P646 Volume II Autopoiesis of Architecture).

Le paramétrisme, se caractérise par sa nouvelle valeur, et sa sensibilité, qui a émergé avant même l'aide de méthodes de calcul. La création peut être approchée de diverses manières. Elle se base en particulier, sur des expériences, des essais, des remords. Bien-sûr, le regard que nous portons sur le monde est une clé d'entrée en la matière. Mais au-delà, le procédé du projet répond à des règles, des méthodes, des pratiques, quelquefois hétérogènes, quelquefois rationnelles, souvent hasardeuses, voire polémiques, qui nous conduisent à prendre parti, en somme à se ranger d'un côté de la pensée, en une tentative pour ordonner, articuler, mettre en valeur, bousculer. Ce que l'on appelle « les pratiques du projet ».

En Italie, les architectes, parlent parfois, « di fare il progetto » « faire projet » pour mieux comprendre un site, un espace donné, un ensemble d'éléments, dont la lecture s'opère par le biais de liens opératoires entre eux. Opératoires pour le regardeur, pour le lecteur de paysage, puisqu'il est vrai, que face au même site, chacun opère une construction mentale à partir de sa culture, ses intérêts, ses savoirs, et « projette » ainsi son propre paysage. Pour les architectes, faire le projet, s'accompagne souvent de la mise en œuvre d'un processus codifié, qui possède ses phases définies, par ambition et hiérarchie des enjeux, par échelle et par précision. Pour autant, la mise en œuvre de ce processus, ne suffit évidemment pas à faire projet. Le design consiste lui aussi, à donner formes et sens, au monde matériel qui nous accompagne dans notre quotidien.

Le deuxième point, qui est cette fois-ci moins critiqué, concerne l'adaptation des ingénieurs aux modèles paramétriques, à travers l'utilisation d'outils de calculs puissants. Pour l'ingénieur, le projet passe avant tout par l'analyse, analyse d'un problème défini, qualifié, puis l'élaboration d'un cahier des charges, qui permet d'envisager un modèle ou une solution fonctionnelle et fonctionnant. Cet apport mutuel a généré une collaboration totale entre architectes, ingénieurs et également des artisans. Ce qui peut se traduire par une multidisciplinarité du processus de création. Les méthodes d'élaboration des projets, autorisent et engendrent d'une part, de nouvelles hybridations, que nous supposons repérables, soit au sein des frontières ou des limites des champs disciplinaires, soit dans la rencontre entre compétences complémentaires. Elles interviennent d'autres parts, sur la méthode, en accompagnant le passage d'une méthode par étapes ou planificatrice, au profit d'une méthode par objectifs, ce que François Asher appelle des « démarches heuristiques, itératives, incrémentales et récurrentes ».

L'avenir concernant l'architecture paramétrique, se trouve peut être dans l'amélioration de la genèse de projet, afin de moins laisser une place hasardeuse au désir de conception, notamment par l'enrichissement progressif de projet. Une autre voie semble également persistée dans le monde artistique et tenterait d'ouvrir l'architecture vers une nouvelle voie. Celle de l'architecture en mouvement.

II Concevoir l'architecture en mouvement

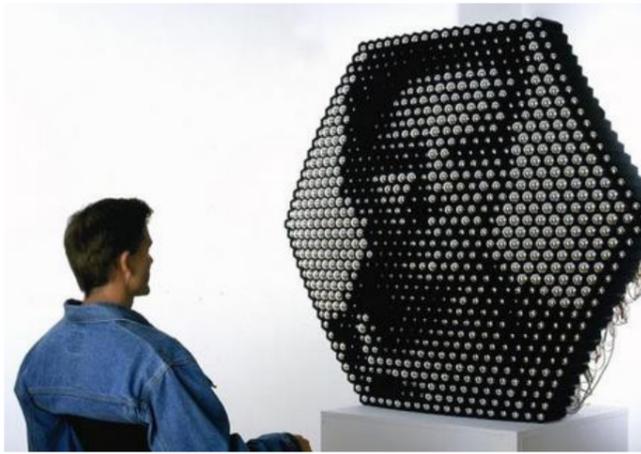
Hypothèse : L'idée du paramétrisme est toujours éclipsée lors du passage à la construction comme si l'architecture se figeait et se suffisait dans une stabilité implacable.

Le procès du dessin paramétrique ne peut-il pas être source de mouvement pour l'architecture?

Les exemples actuels de réalisation d'architecture en mouvement restent peu nombreux. On pourra citer la façade de l'institut du monde arabe de Jean Nouvel, the Art Museum de Santiago Calatrava à Milwaukee. Cependant pour ces deux exemples, les mouvements ne sont pas effectués par des éléments structurels. En effet, ce qui est mobile dans l'architecture, ce sont les portes, les cloisons, les fenêtres, qui intègrent l'adaptation d'un espace figé, en s'ouvrant ou se refermant afin de cloisonner ou décroisonner l'espace. Dans le musée d'art de Milwaukee, ce sont les brises soleil qui viennent se détacher de la paroi en évoquant l'envol d'un oiseau. Ce mouvement d'une somptueuse légèreté, n'a pas de lien direct avec la structure. Il constitue un manteau ou une peau protectrice. Dans l'institut du monde arabe, ce sont les éléments de façade qui, par un mécanisme de haute précision viennent s'ouvrir ou s'obstruer en référence au moucharabieh arabe. Ces deux exemples sont pour moi révélateurs de la volonté d'apporter plus qu'un formalisme physique, et emmène l'architecture vers une adaptation à son milieu environnant. Cette architecture pourrait aller plus loin, si ses mouvements s'opéraient directement sur les éléments constitutifs de la structure. Si la peau est structurelle, alors c'est elle et uniquement elle, qui devrait réagir en adéquation parfaite avec son milieu environnant. Cette idée de l'architecture malléable est entièrement présente dans l'architecture paramétrique. Elle n'est aujourd'hui pas encore tournée vers un paramétrisme physique, tangible, et s'arrête au monde de l'informatique. Toutes ces modularités visibles sur écran, s'effaceraient en réalité et seraient même invisibles une fois la construction terminée.

a L'art source de paramétrisation visuelle

L'état de l'art actuel montre à quel point les artistes manient les codes graphiques avec la réalité physique. Le travail de Daniel Rozin se décompose en une série d'œuvres artistiques, mélangeant l'art du portrait avec celui du travail vidéo. Son style se concentre principalement sur la mise en place de miroirs mécaniques, reflétant l'audience. Le traitement du reflet se fait via des ordinateurs, qui facilitent le processus de génération de l'image. Chaque pixel de l'image envoyée par la vidéo est interprété par un mouvement, contrôlé par des petits moteurs. Les mouvements de ces moteurs peuvent être de nature diverses, en fonction de l'effet que Daniel Rozin veut obtenir. Par exemple, dans le tableau hexagonal qu'il nomma Shiny Balls, les moteurs contrôlent l'avancement des boules brossées en inox. Plus la boule est avancée, plus elle reconstitue le blanc de l'image. Inversement, plus elle se retire, plus elle reconstitue le noir. Le mouvement de moteur peut aussi s'opérer en contrôlant l'inclinaison verticale. Cette deuxième technique joue sur le reflet du matériau. Une lumière est placée au-dessus du cadre et vient éclairer le tableau. Les pixels sont interprétés par des petits morceaux carrés de bois. Si le morceau est orienté vers le haut, alors il sera éclairé par la lumière et reconstituera le blanc. Inversement, si le morceau de bois est incliné vers le sol, alors il sera peu éclairé et renverra une couleur foncée proche du noir. Les tableaux de Daniel Rozin sont donc une sorte de portrait vidéo, des miroirs interactifs. Il les conçoit avec plusieurs matériaux, comme de la porcelaine, du verre, du métal et du bois. L'interprétation d'images successives est en partie une sorte de paramétrage. Cette traduction de l'image en la matière, est une des voies qui permettrait l'interaction de l'architecture avec son environnement. Imaginons-nous une face caméléon qui changerait de couleur en fonction de la luminosité extérieure, de la couleur du ciel. Le bâtiment pourrait alors se confondre, ou être en rupture totale de contraste. Un bâtiment « réacto-environnant ».



Daniel Rozin, *Shiny Balls*. Reflet de la personne se positionnant devant le portrait.

Le travail de Daniel Rozin repose d'abord et avant tout sur l'interprétation d'une seule image. En effet, l'interprétation de la vidéo n'est en fait que l'interprétation de plusieurs images successives. La question qu'il s'est premièrement posée était, comment retranscrire la lumière d'une image avec des matériaux et des contrastes ? Ensuite, seulement vient le travail de mécanisation qui rend cette œuvre totalement interactive, et sublime le jeu du reflet. En clair, il y a deux développements opérés pour chaque œuvre, l'un statique visant l'interprétation d'une image et l'autre dynamique visant à reproduire les mouvements humains. Ce double traitement, pourrait être travaillé en architecture, afin d'amener des éléments structurels à se métamorphoser en éléments dynamiques et non plus figés. Le traitement statique de l'image pose la question de la compréhension de l'image par l'observateur. En effet, cette discrétisation d'une image composée de pixels en éléments physiques, doit être réglée en fonction de l'œil humain. Une petite étude m'a permis de mieux comprendre cette dimension d'interprétation.

La paramétrisation à partir d'une image.

Hypothèse générale : une image peut physiquement être interprétée.

L'image est constituée d'un ensemble de pixels avec une densité que l'œil ne peut percevoir, comment rendre ces « pixels » perceptibles tout en révélant l'image ?

Afin de comprendre comment fonctionnent les tableaux de Daniel Rozin, j'ai effectué deux portraits pixelisés, avec l'aide de la fonction Image Sampler sur Grasshopper. Le but étant de mieux comprendre comment s'opère la traduction entre une image et la réalité constructive. La démarche employée utilisait une image en noir et blanc, introduite dans Grasshopper via la boîte Image sampler permettant de transcrire une image (constituée de pixels) en série de nombres. Avec cette fonction, plusieurs interpolations sont possibles, grâce à de nombreux filtres :

- l'interpolation Color Brightness (Image en noir et blanc) : transcrit un pixel en nombre, compris entre 0 et 1. Les pixels noirs sont transcrits avec un 0 et les pixels blancs avec le nombre 1. Toutes les gammes de gris sont ainsi transcrites en un nombre compris en 0 et 1. Un gris 50 % serait donc retranscrit en 0,5. Le gradient de couleur allant du noir au blanc est donc transcrit en nombre réel.

- l'interpolation Color (image en couleur) : transcrit chaque pixel par trois valeurs entières, des trois composés primaires de la couleur : bleu rouge et vert. Cette retranscription s'effectue par combinaison de 0 à 255, de trois valeurs. La valeur renvoyée pour chaque pixel est donc un vecteur composé de trois.

- Blue : transcrit chaque pixel de 0 à 255 selon sa composante bleue.
- Red : transcrit chaque pixel de 0 à 255 selon sa composante rouge.
- Green : transcrit chaque pixel de 0 à 255 selon sa composante verte.
- Alpha : Canal alpha génère la transparence
- Saturation : degré de saturation

La fonction Image sampler, transcrit donc des pixels d'une image, en couleur ou en noir et blanc, en nombres allant de 0 à 1 dans notre cas. Pour opérer cette fonction, il faut d'abord créer une grille de points. Cette grille vient quadriller l'image et permet ainsi la lecture de chaque pixel. Ainsi pour le premier tableau réalisé, une grille de 60 points par 60

points a permis de retranscrire les pixels de l'image de départ, en séries de nombres allant de 0 à 1. 3600 nombres sont donc à la base de l'interprétation numérique de l'image. La question, après avoir opéré cette transformation numérique, est de traduire ces nombres en objet physique. Deux hypothèses ont conduit à la réalisation des deux portraits différemment réalisés.

La première hypothèse consiste à réduire tout simplement les pixels à des éléments dénombrables, notre cerveau fera la transcription en reconstituant l'image. Pour représenter ces pixels, des tiges de balsa de 0,8 cm de diamètre ont été choisies.

Le cadre choisi mesure 50x50 cm et le diamètre des morceaux de balsa est de 0,8 cm. L'image sera interprétée avec 5 couleurs. Tous ces choix résultent de l'aller retour entre les matériels disponibles et le travail informatique.

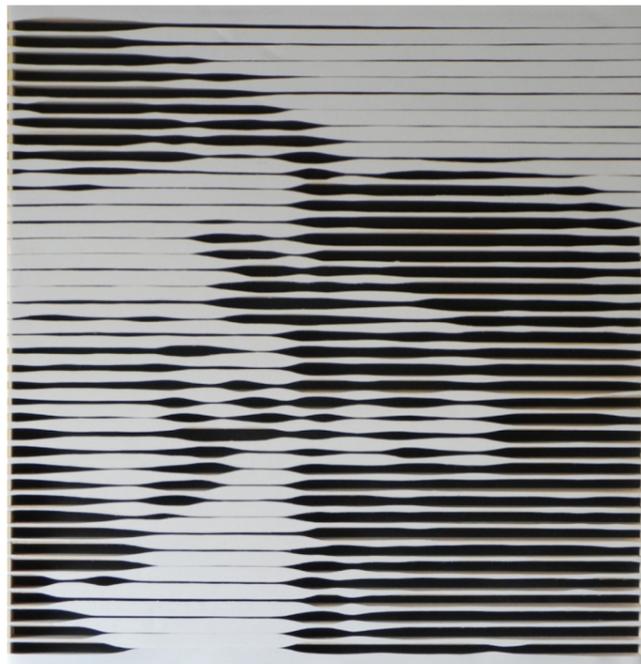
L'image interprétée est un portrait rapproché, travaillé sous Photoshop, en réglant l'exposition, le contraste luminosité. La sortie en jpeg peut se faire en couleur, cependant l'image en noir et blanc est plus révélatrice pour se rendre compte du niveau d'égalisation. Le réglage du contraste de l'image



Explication de la programmation : après avoir créé une grille initiale de 60 x 60 points, Image sampler (Color Brightness) transforme cette grille en nombres de 0 à 1. Ces nombres sont classés en 5 domaines (correspondants aux cinq couleurs) : ainsi les domaines [(0 ; 0,2) (0,2 ; 0,4) (0,4 ; 0,6) (0,6 ; 0,8) (0,8 ; 1)] correspondent aux couleurs : noir, gris foncé, gris, gris clair, blanc.

Sur chaque point de la grille initiale, on construit des cercles de 0,8 cm de diamètre avec la couleur correspondant à son domaine. Puis, on numérote la grille pour la sortie sur support papier. Par exemple, toutes les pièces devant être peintes en noir, ont le numéro 0, et pour les pièces gris foncé le numéro 1. De plus, pour donner du volume au tableau, les 5 couleurs définissent 5 hauteurs : noir 0,5 cm, gris foncé 0,8 cm, gris 1,1 cm, gris clair 1,4 cm et blanc 1,7 cm de hauteur. Le travail manuel s'est fait à partir de l'impression sur papier, où se collaient directement les pièces découpées. Grasshopper permet donc un travail précis d'interprétation d'image. La difficulté rencontrée était d'ordre manuel. En effet, toutes les pièces de balsa, 3600 au total, ont été découpées à la main. La finalité de l'architecture paramétrique, aurait été de développer une machine capable de reprendre les données numériques et de découper toutes les pièces avec des hauteurs toutes différentes. Ces machines existent bien sûr dans l'industrie, pour la découpe de tubes pvc, tasseaux de bois, tuyaux souples, et de manière générale pour toute pièce formée par extrusion. Cependant, il serait nécessaire de numérotter ces pièces une par une, pour pouvoir les différencier.

Portrait de dimension 50 par 50 centimètres fait avec du balsa sur un dégradé de cinq couleur. Le quadrillage de 60 par 60 génère 3600 points.



Portrait traité par bandes blanches sur fond noir en interprétant une image en noir et blanc.

également à l'outil de découpe. Pour l'heure, il serait donc préférable d'imprimer directement sur le matériau, générant le cadre, au lieu de passer par un support papier. L'idée initiale était de s'inspirer d'une œuvre créée avec des bandes en pierre, avec une certaine épaisseur. Entre chaque bande, venait se glisser de la terre, permettant de faire pousser de petites plantes grasses. L'idée serait donc de passer du programme, directement à la matière, en sautant l'étape du support papier. Il existe actuellement des machines CNC capables d'usiner des matériaux minéraux, qu'il aurait été possible d'utiliser pour ce tableau.

Le traitement d'une image, puis d'un ensemble d'images, autrement dit de la vidéo, est directement en lien avec le paramétrisme, et renvoie la question de l'imbrication du modèle numérique à celui de la réalité. Ce raccord s'opère grâce à l'utilisation et au développement de nouveaux procédés de fabrication. Si l'on devait ainsi créer une architecture en mouvement, il faudrait alors se concentrer autant sur l'outillage de découpe, que sur les mouvements. Les axes de recherche se tournent donc pour l'instant vers la première étape, consistant à l'automatisation des procès de fabrication. Tous ces processus comme le tissage, l'impression de matière, ou l'assemblage, ont déjà fait preuve d'une énorme révolution dans le domaine de l'architecture. Il reste maintenant à franchir le deuxième pas, qui serait de promouvoir et d'exploiter les données malléables des logiciels paramétriques.

b Le mouvement à travers l'architecture cinétique

L'architecture cinétique est le concept par lequel les bâtiments peuvent, en partie ou totalement, se mettre en mouvement. L'aptitude d'un bâtiment à se déplacer ou à s'adapter à son environnement exécute des fonctions impossibles pour l'architecture statique. Ce mouvement, peut comme dit précédemment, provenir de la maniabilité des modèles paramétriques. Cette vision dynamique est déjà réalisée dans le domaine de l'art ou de la représentation, notamment par l'art cinétique dit « Kinetic Art ». Le mélange élégant entre la notion d'espace et la robotisation crée un art en mouvement. On citera

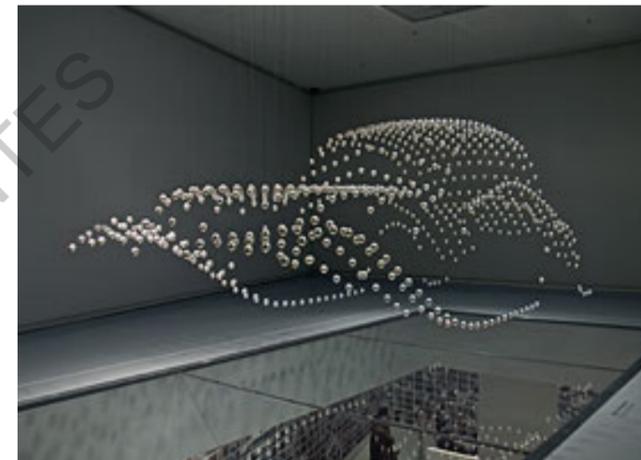
La 2ème hypothèse serait de traiter l'image par balayage.

Projet : le cadre est fait à partir de bandes blanches, à partir de bâches tendues sur un support en bois. Des lamelles de bois horizontales mesurant 80x80 cm, permettent de rigidifier les bandes blanches. Un support en carton peint en noir, collé en fond, sert à contreventer le cadre, et génère le contraste avec les bandes blanches. Celles-ci se retournent pour se fixer sur l'épaisseur du cadre.

Explication de la programmation : Création de deux grilles de 40x40 points. Image Sample associée à ces points, un nombre de 0 à 1 selon leur pixel, comme vue précédemment. Ces points sont ensuite déplacés vers le haut pour la première grille (vers le bas pour la deuxième), en fonction de leur nombre associé. Les points déplacés servent à créer des courbes de degré 3 horizontalement. Puis des polygones sont créés en associant deux courbes et génèrent ainsi des bandes horizontales. Ces polygones dessinent également les bords du cadre, pour fixer les bandes sur le cadre.

Plus délicate, dans le maniement des « arrays » (tableau de nombres), la construction du cadre, se fait assez facilement. La sortie se fait sur un support papier, qui sert à découper les bandes. L'idée serait d'automatiser la découpe via une machine. La difficulté de découper des bâches ou des toiles, réside dans la tension du matériau. Il faudrait donc s'attacher à résoudre ce questionnement en réfléchissant

par exemple, la sculpture cinétique au Musée BMW créée par Art+Com. Des petites boules sont suspendues grâce à des fils d'acier. La hauteur des boules est contrôlée via un moteur qui enroule ou déroule le fil de chaque boule. Les 714 boules couvrent une surface de six mètres carrés, et apparaissent chaotiquement à l'instant initial. Puis grâce à l'utilisation d'un récit dit mécatronique, les boules viennent former de somptueuses formes dans l'espace, laissant place aux allures fluides des lignes de voitures. La magie de cette installation, en faisant jaillir des formes se combinant les unes avec les autres, réside dans le contrôle des 714 boules. La fluidité et l'élégante transition entre les formes, surprennent et permettent un réel récit. La combinaison du mouvement, de la vidéo et du récit serait donc une porte d'entrée, un point d'étude pour l'architecture. La narration prendrait sens par une architecture. Ce qui est également présent dans l'architecture scénique, mais plus sous forme d'interactions du décor. D'autres projets donnent naissance au mouvement en utilisant les propriétés de répulsion et d'attraction des aimants. Winding Kinetic Structure de David C. Roy en fait la démonstration. Ces sculptures vivantes fascinent par leur mouvement quasi perpétuel. Depuis 1975, David Roy travaille sur le mécanisme du mouvement induit par l'aimantation. Il façonne ces œuvres, sortes d'horloges mécaniques, entièrement dans le but d'un mouvement perpétuel. L'élaboration de ces formes découle donc entièrement de la cinétique de répulsions des aimants, et entraîne le spectateur dans une longue réflexion. Les diverses rotations presque hypnotiques, restent incompréhensibles pour le spectateur, qui entrevoit la magie à travers la création de ces formes visuelles. L'art cinétique met aussi l'accent sur l'interaction possible entre une structure et l'homme. L'architecture s'adapte au mouvement de l'homme. De nombreux projets travaillent sur cette attraction, comme Aegis hyposurface où une surface verticale constituée de triangles, se met à bouger et à vibrer en fonction des mouvements des personnes. La fonction principale se nomme « attract ». Cette fonction renvoie numériquement, à la notion de point d'attraction. Plus les personnes s'approchent de la surface, plus



Kinetic Structure au Musée BMW. Scénographie à travers des billes de chrome suspendues contrôlées par des moteurs faisant varier la hauteur de chacune des billes.

les triangles se déforment et sont attirés. Réciproquement, si le spectateur s'éloigne de la surface, alors les triangles reprennent leur position initiale et la surface devient entièrement plane. Cette notion d'attraction est présente dans beaucoup de projets artistiques et techniques. Le projet, de One hundred and Eight de Nils Volker, gère cette interaction, en gonflant plus ou moins des sacs plastiques. Une pompe contrôle le volume d'air pour chaque sac plastique. Plus le spectateur s'approche de la paroi, plus les sacs se gonflent et réciproquement, plus il s'éloigne plus la pompe enlève l'air dans le sac. Les façades interactives et robotisées par divers procédés sont une réponse au mouvement humain. Ce mouvement des hommes est souvent interprété dans l'architecture. Son utilisation en est même génératrice, dans le projet Citizen in Motion, conçu par Milas & Patners. Le projet célèbre la réunification allemande et la révolution pacifique de 1989. Il se compose d'un énorme bras bascule, mesurant 55 mètres de long et pesant 330 tonnes, qui tient en équilibre. « if you want to make it move, you have to get a group together and all go in a particular direction. That's what a peaceful revolution is about » « Si vous voulez le faire bouger, il faut s'unir et aller dans la même direction. Ceci est le maître mot d'une révolution pacifique » explique Johannes Milla philosophiquement. Le reste des bâtiments du monde sont construits pour être regardés. Avec ce concept, c'est le peuple qui génère le bâtiment. Le mouvement initie les utilisateurs à être actifs et non pas passifs. Ce bâtiment fonctionnant entièrement sur l'idée du mouvement, est pour moi un objet

exceptionnel. Le mouvement est dû à la différence du nombre de personnes sur la partie droite et sur la partie gauche. Ainsi, Milla & Partner ont établi qu'avec une différence d'environ 50 personnes d'un côté par rapport à l'autre, le bâtiment pourrait se soulever de 1m d'un côté et s'abaisser d'un mètre, de l'autre. Un mécanisme permet de contrôler la vitesse de basculement pour empêcher une allure excessive, et contrer un mouvement de foules. Ce mécanisme fonctionne avec des vérins hydrauliques avec de l'azote. Le soulèvement maximal de l'œuvre de 320 cm, s'opère en 65 secondes. La conception de l'œuvre repose sur une coque en béton concave posé au sol. En sous face convexe de la coque, une pictographie minutieuse, faite sur un plaque d'acier perforée, représente la foule lors de la libération de Berlin. Sur la face concave, où peuvent circuler les citoyens la phrase « Wir sind das Volk, wir sind ein Volk » est inscrite en relief (Nous sommes le peuple. Nous sommes un peuple).

Dans cette ville, capitale de l'Allemagne, avec une telle histoire, ce monument vise les utilisateurs actuels, à poursuivre l'héritage de la Révolution tranquille. La démocratie et la liberté ne sont pas un état sur lequel une société peut se reposer, mais elles sont le processus qui vit de l'engagement des citoyens et de la liberté d'expression, exprimés à

travers les élections, d'où l'expression « Wir sind das Volk, wir sind ein Volk ». Cette phrase clé est donc à elle seule, génératrice de projets.

C'est également sur une phrase philosophique, que le projet Leaf Chapel, conçu par Klein et Dytham, prit naissance. Leur point de départ pour la construction de cette chapelle, au Japon, est l'instant d'union entre deux personnes. Ce moment fort, se devait d'être marqué par l'architecture. Lors de l'alliance et de la sentence du prêtre, l'arrière de la chapelle s'ouvre, laissant place à un paysage paisible et somptueux. La chapelle est constituée de feuilles. L'une fixe en verre, où les montants sont fixes », les verres reprennent les formes des nervures d'une feuille, et l'autre mobile en acier, semblable à un voile de mariée en dentelle délicate. A la fin de la cérémonie, lorsque l'époux lève le voile de la mariée pour le baiser légendaire, le «voile en acier» s'ouvre comme par magie, révélant un étang et une nature enchantée. La lentille d'acier vient ainsi se glisser au-dessus de la feuille de verre, et ouvre la chapelle sur la nature. Ce « voile » d'acier, percé de 4700 trous, pivote selon un axe horizontal et rend l'union symbolique.

Milla & Partner. Citizen in motion. La structure en forme de coupelle bascule sur deux côtés en fonction du nombre de personnes montées sur la structure.



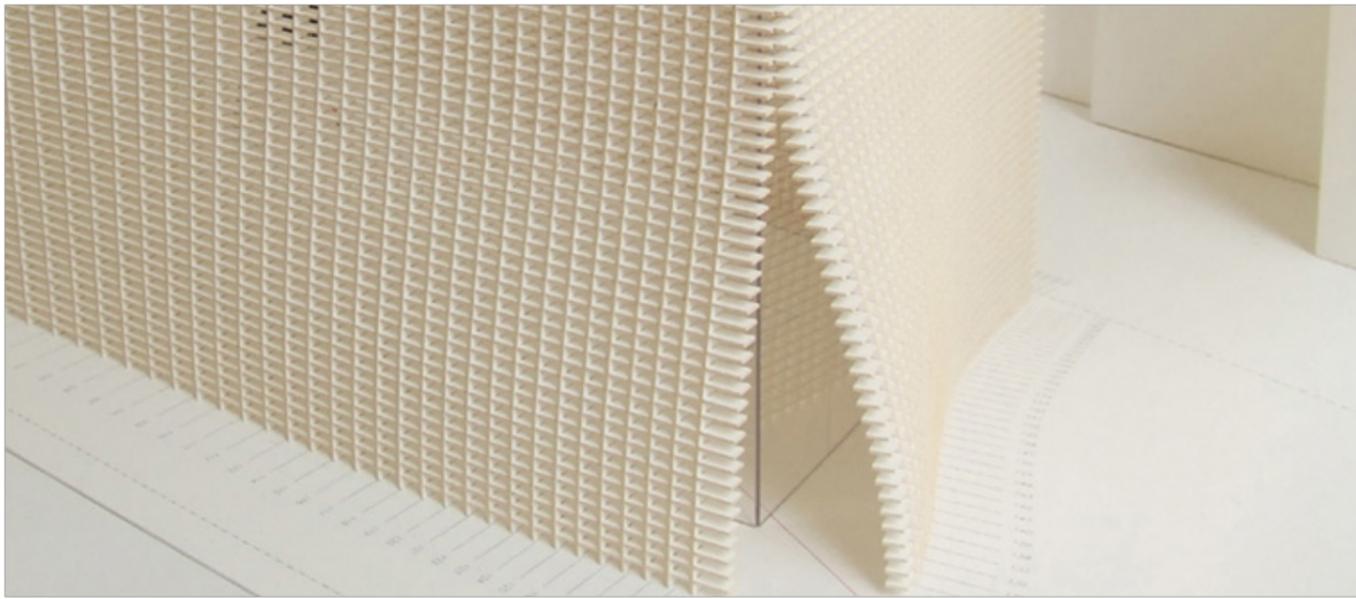
Leaf Chapel By Dytham, Japon. Un voile en acier se lève lors des cérémonies de mariage.

Dans les deux projets présentés ici, le mouvement est lui-même architecture. Il ne renvoie pas à la notion d'adaptation, mais prend source dans une mise en scène sensible, et génère un subtil récit. Cette question du sens du mouvement, est souvent associée en architecture, à l'envie de rendre déplaçable tous les éléments, en vue d'une meilleure occupation de l'espace. Ici, le mouvement est totalement intégré dans son architecture. Bien que ces deux projets n'aient pas de liaison directe avec le paramétrisme, ils enseignent par leur approche, que l'architecture en mouvement peut être plus qu'une simple adaptation à un milieu environnant. Il y a là, une réelle vision qui pourrait se traduire paramétriquement dans la création des modèles. Au lieu de générer une géométrie par son approche classique statique, l'architecture paramétrique se devrait d'intégrer la notion temporelle. Celle que l'on appelle généralement la quatrième dimension. En effet, un mouvement n'a de sens que s'il s'exprime sur une durée. L'idée d'intégrer, dans un modèle paramétrique, la notion du temps, est directement liée au programme de création 3d, utilisé pour l'animation. Dans ces logiciels, comme 3dsMAX ou Cinema 4d, une « time line » permet de travailler les opérations temporellement. Tous les paramètres d'une opération peuvent être réglés à n'importe quel moment dans cette time line. Par exemple, l'angle de rotation peut être contrôlé à tout instant, de même que la valeur de la gravité pour des opérations de drapé. Cette

association des paramètres, au temps, n'est pas du tout présente, dans les logiciels paramétriques, ce qui conduit au final, presque toujours à une géométrie morte, qui ne retrace absolument pas toutes les informations de sa génération formelle. Tout curseur renvoie implicitement à la notion de la maniabilité et du mouvement, car chaque valeur décrit un état de transformation. Les exemples d'architecture Kinetic, montrent qu'il est possible de représenter le mouvement par une interaction avec l'homme. Je pense qu'il est donc possible de retranscrire la notion de la malléabilité des modèles paramétriques, en un mouvement constructif. Bien des exemples montrent que ces mouvements peuvent provenir d'éléments adjacents à la structure. Mais ceux-ci peuvent-ils advenir de la structure même ?

Pour répondre à cette question, je me suis attardé à lister tous les types de projets dans lequel l'implication structurelle dynamique est présente. Cette particularité du mouvement est souvent présente dans les grandes infrastructures, telles que les salles de concert, les stades ou les gymnases. Pour ce type d'installation, les grandes portées misent en jeu par la taille des terrains, ou de la scène, pousse l'architecture vers des méga structures servant uniquement à protéger des conditions extérieures, les acteurs et les spectateurs. Les stades de football américain sont aujourd'hui presque tous couverts de même, que les grandes salles de sport. Il y a néanmoins l'idée dans certains projets, de pouvoir ouvrir et refermer le toit ou dôme, de manière à proposer plusieurs types de configuration. Ce mouvement mécanique est souvent une translation linéaire parallèle à la plus petite portée. Un projet d'étude, IJP Art Fund Pavillon, a mené cette réflexion sur la question de l'architecture dynamique à travers sa conception. Les modèles spatiaux d'IJP, sont basés sur la notion de surface mathématique. En terme analytique, toutes les sur-





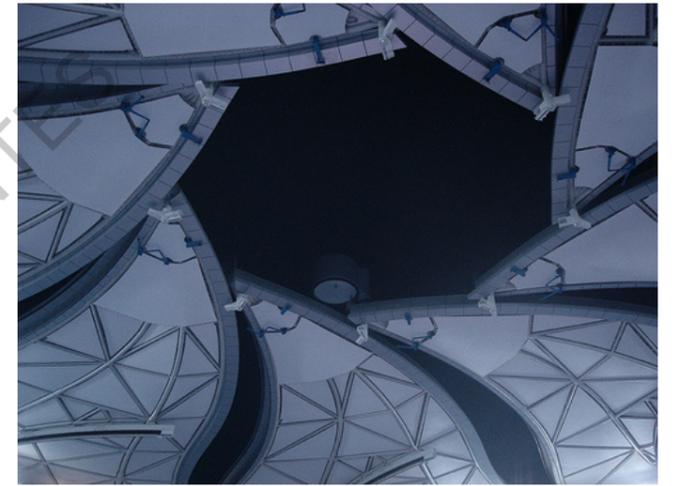
IJP pavillon the art fund pavillon : La façade du pavillon s'ouvre le matin et se referme le soir.

faces paramétrées mathématiquement, se forment et se déforment en réponse directe aux relations numériques, qu'elles possèdent dans leur milieu. Pour l'observateur, la conformation d'une surface paramétrique expose les traces du mouvement interne autant que la figure elle-même. Le pavillon est constitué d'une boîte exposée Nord Sud selon sa plus grande dimension. Il offre à l'intérieur plusieurs espaces d'expositions. L'idée du projet est de constituer une résille autour du volume élémentaire, qui soit directement conçue, en prenant en compte la lumière. L'idée est de redistribuer la lumière dans l'espace intérieur sans changer la forme de la boîte initiale. Tous les murs du pavillon sont dessinés, en alternant une séquence d'une gamme numérique grâce aux développements d'équations. Ainsi, le rythme des montants de la façade sud suivent une distribution périodique, qui regroupe des montants proches les uns des autres, bloquant la lumière directe du soleil. Dans la partie nord, la distribution est précisément inversée. La maille s'élargit pour apporter plus de lumière. Ce dessin des quatre façades fut au cœur de la réflexion du projet. Cependant, un autre axe d'étude m'a interpellé. En effet, les façades ne présentent ni porte ni ouverture. L'entrée se fait aux angles de la boîte. En dissociant les arrêtes, le pavillon s'ouvre à la même manière d'un zip, et donne lieu à l'entrée du pavillon. Le système est réalisé sur les deux angles opposés du pavillon, déterminant ainsi l'entrée et la sortie. La façade du pavillon s'ouvrirait ainsi le matin et se refermerait le soir. Cette installation offre l'opportunité de tra-

vailer à n'importe quelle échelle, puisque la paramétrisation permet de faire varier, d'un moment à l'autre, la hauteur totale du bâtiment. En effet, l'échelle n'a pas d'impact sur la distribution interne de la lumière car sur terre les rayons arrivent tous parallèles. L'ouverture de la peau structurelle est ici un bel exemple de mouvement génératif structurel.

La discussion de l'architecture mobile fasse à son environnement a trouvé sa justesse dans un projet à Shanghai. Un court de tennis peu médiatisé, nommé Qizhong Forest Sports City Tennis Center et conçu par Mitsuru Senda, intègre cette modularité à travers l'ouverture ou la fermeture de son toit. La forme du stade parfaitement circulaire rappelle le colisée. L'édifice romain, presque toujours à ciel ouvert, avait la possibilité d'être recouvert pour certains événements, avec plusieurs toiles qui étaient tendues par des cordes attachées à même le sol. Les Romains intégraient donc déjà cette modularité. De la même manière que le colisée, le toit du stade de Shanghai est complètement mobile. Il se compose de 8 feuilles reprenant la forme de pétales de Magnolia qui glissent sur des rails en acier. L'ouverture se fait en 8 minutes et permet tant au spectateur qu'au sportif de jouer quelles que soient les conditions météorologiques. Cette architecture reflète de façon impressionnante le dynamisme de notre société actuelle. Le mouvement qu'opèrent les pétales a été finement étudié, en reprenant l'ouverture d'une fleur lors de sa floraison. La disposition des rails est calculée de manière à ce que les pétales s'effleurent constamment sans jamais se toucher. Lorsque le toit est totalement fermé, la jonction des huit pétales est parfaite. Puis dans un lent mouvement, les bords

courbes des pétales s'écartent doucement, laissant rentrer un filet de lumière majestueux. A la manière de l'éclosion d'un germe, le mouvement des pétales est totalement synchronisé. Cette coordination est notamment un point fort structurel lors de la fermeture, pour obtenir une étanchéité parfaite. Afin de générer ce mouvement, chaque pétale repose sur deux appuis mobiles, fixés sur deux rails courbes. Les défis techniques surmontés par les ingénieurs sont de taille, puisque l'élément doit être calculé selon une multitude de configuration. Pour se rendre compte de la complexité de l'ensemble des pétales, il suffit de comprendre le mouvement synchronisé de tous les pétales. La position ouverte semble d'un point de vue structurel assez stable. En revanche, lorsque le toit se referme les pétales sont entièrement en porte à faux. Les appuis mobiles entraînent donc d'importants moments, très défavorables pour le mécanisme, lors d'un glissement des pétales. Le choix de feuilles d'aluminium pour la toiture des pétales a permis, d'alléger le poids propre du toit et d'obtenir cette formidable architecture modulaire.



Il est vrai, que tout architecte aimerait animer son dessin. Cette nouvelle manière d'aborder l'architecture, sera sûrement à l'avenir possible, et amènera la réflexion sur de nouveaux processus de construction. La question inhérente est de maîtriser les transferts d'informations paramétriques, pour conduire à une architecture mobile constructible.

Qizhong Forest Sports City Tennis Center conçu par Mitsuru Senda. Le toit du stade s'ouvre en imitant la fleur du Magnolia.



III Le passage d'un modèle 3d à la matière physique sans l'utilisation d'un support papier.

A travers les projets décrits précédemment, nombres d'entre eux ont nécessité la collaboration de diverses professions, et donc le transfert des connaissances. Ce transfert d'informations, on l'a vu, s'est généralement produit par export ou import des données entre plusieurs logiciels. Cette interconnexion entre les logiciels, n'est pas réellement la conception de la maquette numérique dite BIM. Les éditeurs de logiciels n'ont pas la même approche concernant le BIM. Bentley par exemple, voit la maquette numérique comme un rassemblement de tous les modèles 3d, produit par les différents corps d'état sur différents logiciels. La liberté d'import dans Project Wize, permet donc de rassembler toutes données numériques condensées (en créant un lmodel de taille réduite), qui retranscrivent visuellement, tous les objets géométriques du projet architectural, en gardant leurs attributs. Le BIM ouvert et extensif. L'éditeur Autodesk, avec Revit Bim, considère que la maquette numérique doit être produite sur une seule gamme de produits, qui dialogue aisément, car elle est conçue par un seul éditeur. Le BIM fermé et borné. C'est la même approche chez Digital Project, développé par Gehry Technology. La notion d'interopérabilité est donc source d'ouverture pour des logiciels comme Bentley et Tekla, qui ont compris que le rêve du logiciel unique n'existe pas, et qu'il est préférable de dialoguer avec ses concurrents, pour être le plus compétitif possible.

Les projets paramétriques présentés auparavant, ont nécessité une collaboration et un échange extensif des données, en utilisant avant tout, les logiciels dit « ouverts ». Le paramétrisme a donc créé des liaisons fortes de connections. Cependant, le transfert de documents ne permet pas pour la plupart, la conservation de l'interactivité. C'est-à-dire, que les paramètres qui sont malléables dans un modèle conçu en amont, ne le sont pas forcément dans un modèle conçu en aval, à partir du fichier amont. Les informations sont figées, le transfert s'effectue sur de la géométrie morte. L'idée serait donc de conser-

ver cette modularité. La tâche reste très difficile, car si l'on est capable d'attribuer un numéro par objet (GUID number, Global Unique Identifier), de lui attribuer des informations sur sa nature, son matériau, on ne peut pas aujourd'hui attribuer des données à des nombres ou des fonctions. Le transfert de gradients, de suites ou de domaines reste problématique. Ceci implique que pour l'instant, des modèles paramétriques développés sur deux logiciels pour le même projet, communiquent forcément par une géométrie morte.

La gestion du projet pose la question de la communication entre les différents corps d'état. Ce transfert de données d'un projet, se fait le plus souvent par trace écrites, plans, coupes, élévations, ou par formats numériques pdf, pdf 3d, présentation dwg... qui sont directement imprimables. Cette retranscription aux divers stades d'un projet Esquisse, APS, APD, PRO et Exécution, est avant tout un moyen de communication véridique et juridique. Les documents et seulement les documents écrits, peuvent être recevables, comme preuves devant la justice. Paradoxalement, cette preuve marquant chaque étape de la conception à la construction pourrait aujourd'hui être totalement effacée. Dans nombre de projets présentés, la question de la retranscription du projet en plan, réduit souvent l'information d'une dimension, et n'a plus réellement de sens. Pour le projet Oarna, développé à l'école d'architecture de Nantes, n'a nécessité aucune impression papier, du stade de conception jusqu'à la construction du prototype. La recherche d'informations, lors de la réalisation et l'assemblage des pièces, s'effectuaient directement sur le modèle numérique. Il y avait en permanence, un ordinateur sur le chantier, servant uniquement à coter des distances ou à vérifier des assemblages. Il n'y a pour moi pas de sens, à représenter obligatoirement une forme en deux dimensions. Cette démarche était évidemment viable, lorsque l'architecte travaillait à la main avec du papier, et générait son projet en l'imaginant en 3d, et en le représentant en 2d. Aujourd'hui, de nombreux projets, tel que le projet Digital Form-Finding of Timber et le Norwegian Wild Reindeer Centre Pavillon,

présentés dans ce mémoire, n'ont pas nécessité de support papier, à titre de travail. Bien évidemment, les parutions obligent la retranscription et le travail de documents en deux dimensions, mais ils ont été produits uniquement à titre médiatique. La non-utilisation du support papier, est donc possible à travers l'architecture, liée directement aux machines de découpe numérique, et l'échange de données entre logiciels. Aujourd'hui, le monde de l'expertise et de la justice n'ont pas encore autorisé les documents numériques à faire partie des preuves recevables, d'un point de vue juridique. A l'avenir, ce parti pris institutionnel, pourra peut être s'élargir et donner une validité à des modèles numériques. Avant d'en arriver à ce point, un grand pas a été effectué, à travers la publication des pdf 3d. Ce support visuel lisible par tous, éloigne la notion de la représentation plane, et augmente la compréhension spatiale d'un projet. C'est, en quelque sorte, une micro maquette BIM. Sa consultation peut se faire à partir d'une tablette numérique et permet, par exemple, de comprendre la composition spatiale d'un projet, ou le détail d'un assemblage. Il a toute son utilité, au stade de construction sur chantier. Cependant le pdf 3d ne permet pas le repérage, ou de se renseigner sur le modèle. La géométrie est uniquement dessinée, parfois annotée de textes. L'avenir concernant l'approche du chantier, concerne le repérage SIG dans le chantier. Bentley propose aujourd'hui, un logiciel nommé Navigator, qui peut être installé sur une tablette numérique. L'utilisateur peut alors se promener dans la maquette, en même temps que dans le projet réellement construit. C'est ce que l'on appelle la réalité augmentée. Son utilité est avant tout, dédiée aux contrôles et à la révision de tâches pour l'instant. Cependant, on pourrait imaginer un compagnon, plaçant les armatures nécessaires dans un dallage, en regardant directement les informations sur un écran tactile, et non plus à partir de plans papiers. L'extraordinaire possibilité de cette application, est d'abord freinée par son prix, et ensuite, comme on l'a déjà évoqué parla non prise en compte de la validation de cette démarche, par les instances juridiques. Il demeure néanmoins, qu'à travers les projets d'architecture, où la notion d'es-

paces peut difficilement être retranscrite de façon plane, ces outils n'ont pas fini de surprendre par leur capacité de renseignements.

IV L'architecture paramétrique libre de droit ?

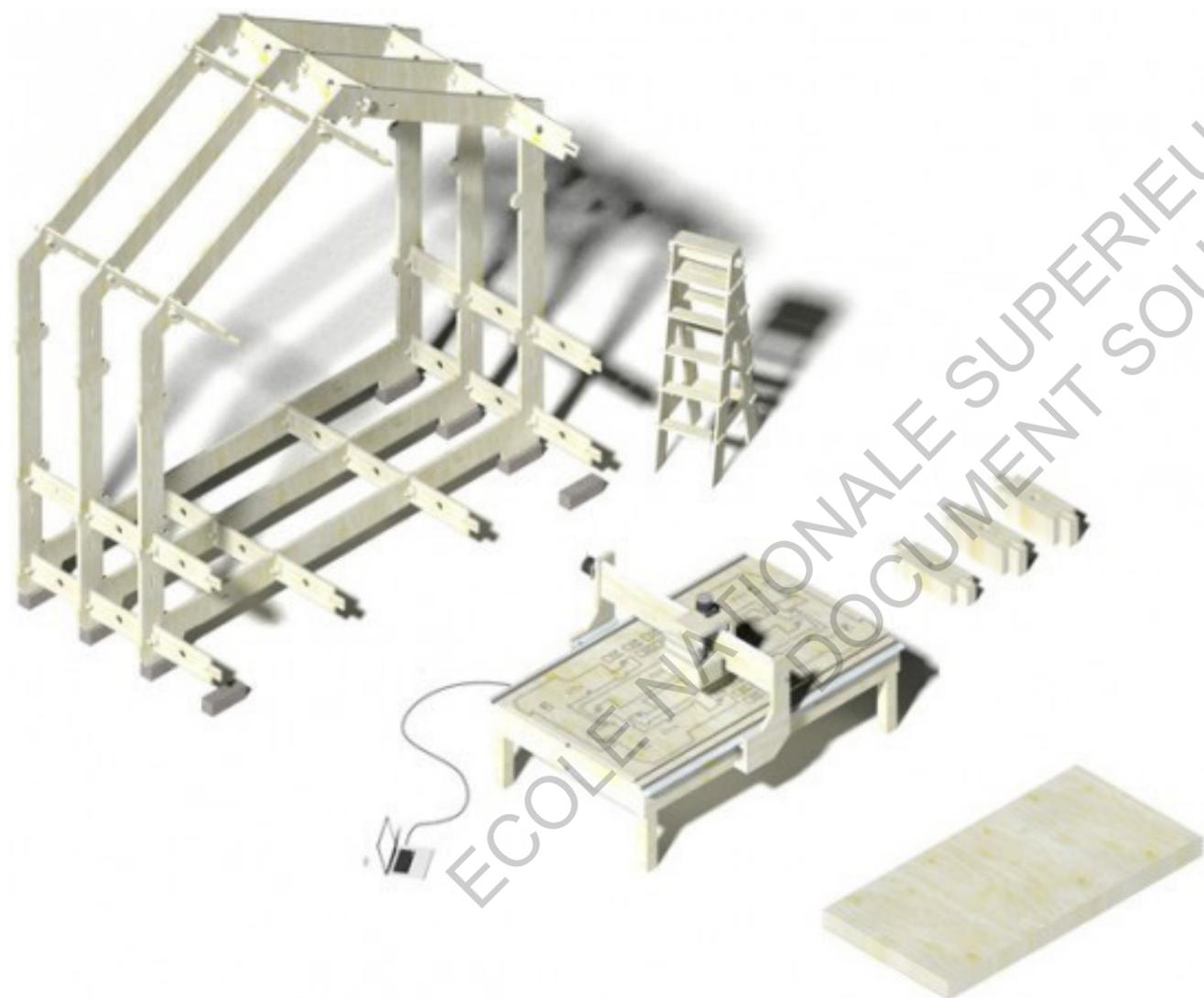
Aujourd'hui, lorsque l'on prononce le mot architecte ou designer, cela renvoie directement au monde professionnel, en sous-entendant implicitement un travail rémunéré. On pense que ce sont eux, qui par leurs idées et leurs visions du monde, résoudrons les changements climatiques et les divers problèmes de société. Ceci est pour Alastair Parvin une idée reçue, une présomption. En réalité, dit-il, l'architecture est le business du design pour les riches. Les architectes travaillent pour seulement 1% de la population. « This is not a clever strategie » ajoute-t-il. Alastair Parvin, architecte diplômé en 2007 à Londres, est le cofondateur de WikiHouse. Il présenta un Ted Event en 2013, où il expliqua sa vision sur l'architecture participative et libre de droit. Ayant mentionné que l'architecture ne s'adressait pas à tout le monde, au 1 % de la population la plus riche, son idée initiale était d'intégrer les 99 autres pour cents. Pour lui, la ville doit être développée par les citoyens. L'idée étonne sûrement pour les professionnels du corps de métier de la conception, mais cette approche fait petit à petit son chemin. Les villes les plus florissantes sont celles auto construites par les habitants. Cette architecture vernaculaire, générée au fil du temps, est au premier abord totalement désorganisée et chaotique. Elle se révèle en fait, pensée en reprenant les techniques de construction classique. Il n'y a certes pas de réelles innovations, dans cette architecture vernaculaire, car la copie est souvent source d'inspiration, mais elle contribue à enrichir les techniques classiques de notre construction connue depuis des décennies. Notre société actuelle demande une adaptation rapide, de plus en plus réfléchie et dessinée. Paradoxalement, le nombre de diplômés en architecture non embauchés, ne cesse d'augmenter. Alastair Parvin voudrait donc, en tant qu'architecte, pouvoir ouvrir la voie à l'architecture citoyenne.

Trois points viennent développer son raisonnement

Premièrement, l'architecture qui conduit à la construction d'un bâtiment, est probablement la solution la plus coûteuse. La conception devrait d'abord penser, à résoudre les problèmes, avant de proposer une solution neuve bien plus onéreuse.

Deuxièmement, il construit sa réflexion sur le fait que, la construction actuelle est gouvernée par les grandes collectivités et organisations. "Masse architecture is about big, big building, big finance, the only people how make cities are largest organization..., procuring all neighborhoods in a single monolithic project". Ce discours assez direct, révèle une approche totalement différente de celle abordée au cours de la dernière décennie. Pour lui, la construc-

tion d'immeubles résidentiels, rend les habitants clients du processus, et ne participent pas du tout à l'approche de conception. Sa volonté est que les habitants redeviennent acteurs, et ne soit plus considérés comme acheteurs. Evidemment, cette vision de l'implication des citoyens dans la démarche de conception, possède une limite. Je pense que cette démarche peut facilement être compréhensible, si l'architecture participative se destine aux édifices résidentiels. L'engouement de ne pas être un simple acheteur, mais de pouvoir dessiner et conceptualiser l'espace, semble être de plus en plus la volonté citoyenne d'aujourd'hui. Des bâtiments résidentiels proposent déjà cette approche : l'édifice, lors de sa réception, n'est pas entièrement terminé, le cloisonnement intérieur ainsi que le revêtement des murs



intérieurs, ne sont pas installés. L'achat se fait donc dans un état brut, sur lequel viennent s'adapter les futurs résidents. Cette démarche montre que les habitants se sentent beaucoup plus concernés, en adaptant l'espace à leur mode de vie. "Different values the place they want to leave ». On pourrait également engendrer cette participation pour les espaces publics, et même pour les ouvrages publics. Alastair Parvin pose donc la question de la limite de cette implication. Jusqu'à quel point l'implication citoyenne pourrait-elle être viable en architecture ? Je pense que cette limite actuelle de l'engagement du citoyen, face à cette envie participative, ne doit pas effacer la connaissance de l'architecte, mais qu'elle doit plutôt la compléter. L'architecte travaillera toujours pour les 1 % dont parle Parvin, il sera toujours concepteur de projets à toutes les échelles, mais son rôle doit peut être changer, afin de pousser la conception, et de l'amener aux personnes directement concernées, par l'architecture produite. « Of course form finance finance ». Bien sûr, comme le dit Parvin, le système actuel fait profiter l'architecture où l'argent est présent. L'idée serait d'ouvrir l'architecture citoyenne, afin de produire beaucoup, avec certes peu de moyens, au lieu de produire peu avec beaucoup de moyens. « The few with a lot, the many with a bit ». Parvin pose donc la question du sens donné au citoyen, sur son droit de construire dans une société. Il ouvre également la réflexion sur la conséquence de ce partage conceptuel "How can we plan cities, how can we finance development ?»

Le troisième point de son raisonnement, interroge le développement d'outils, et les institutions nécessaires pour l'élaboration de l'architecture participative et sociale. Il construit sa réponse avant tout par l'utilisation des logiciels open source, des logiciels (arduino, grasshopper l'imprimante 3d, machine CNC). Sa démarche tant qu'architecte, en réponse à cette question, a commencé en 2011 dans la création de WikiHouse.

Wiki House : image du procédé de l'architecture paramétrique libre de droit. Visualisation d'une maison préconstruite sur un fichier sketchup.

Wiki house est un projet open source à but non lucratif. Le but est de donner la possibilité à chacun de créer, télécharger, et imprimer via des machines à commandes numériques, les composants de sa maison. Wiki House est d'abord et avant tout une plate forme d'échange open source, permettant le partage de la culture. Le support d'échange est le fichier skp, lissible sur sketchup qui est lui-même un logiciel open source récemment racheté par Trimble. Via plusieurs produits d'exemples de maisons classiques en bois, un bouton permet de « nester » sur Sketchup, de générer les planches de découpe. Les cutting files sont donc disponibles en un clic. Même le maillet servant à la construction peut être découpé grâce aux machines à commandes numériques. En un jour, deux hommes peuvent construire la structure en bois d'une petite maison d'environ 25 m². La maison est tout, sauf un objet fini. Elle évolue au cours de l'adaptation de ses usagers. Grâce à cette démarche de conception citoyenne, la maison peut être agrandie à n'importe quel moment. La prise de conscience sur cette liaison entre architecture et méthode de réalisation par commande numérique vient du fait qu'aujourd'hui, nous dit Parvin « We move in the future where factory is every where, the design team is everyone ». L'architecture paramétrique, a donc entièrement sa place dans cette approche. En effet, le fait de pouvoir manipuler la forme par des paramètres, afin de générer une architecture décidée par l'utilisateur, est donc un point fort.

La réflexion sur l'architecture libre de droit, a aussi été soulevée par Ion Cuertas Mons et Francesco Cingolani. Leur volonté, est d'explorer la possibilité de réaliser un logiciel, à mi-chemin entre un jeu-vidéo et un outil de travail, capable de permettre à tout le monde (les habitants et non seulement les architectes), de dessiner leur propre appartement. Leur recherche s'est tout de suite tournée vers des expériences, tels que des outils de paramétrisation comme Grasshopper, inspiré des projets menés au LMN Tech Studio à Seattle, qui cherchent à trouver des méthodes de connexion entre des définitions Grasshopper et les programmes fonctionnels

complexes des bâtiments d'architecture. Cette recherche, appelée Grasshopper Space Planner, reste bien sûr, encore assez basique, et peut être très orientée à l'outil de travail d'architecte, plutôt que de se focaliser sur l'objectif exposé ci-dessus, c'est-à-dire de donner aux non-architectes la capacité de dessiner leurs propres maisons.

Sur la même ligne directrice que Parvin, leur rêve est de mettre l'architecture dans les mains de ses propres usagers, à moins qu'elle ne l'ait déjà été ? On fera référence à Lucien Kroll, architecte belge, qui était connu pour l'implication de conceptions avec ses futurs résidents, et pour qui cette idée « d'architecture » était au cœur de sa pensée. Il semblerait aujourd'hui, que les nouvelles technologies peuvent donner un nouvel élan à ces tendances ; ce qui s'est passé avec le web 2.0 pourrait-il se reproduire avec l'architecture ?

S'éloignant d'un environnement statique, comme peut être le bureau d'architecture moderne, le studio de Parvin est basé dans un endroit enrichi intellectuel et hyper-stimulant, nommé likethe Hub à Westminster, dans le centre de Londres. Sa vision assez moderniste, propose donc de démocratiser la production et décentraliser la conception à l'échelle pour l'instant de l'habitat.

Cette voie possible mérite d'être explorée, car elle recentre l'architecture sur les utilisateurs. Bien sûr, il faut cadrer la recherche et les limites de cette approche, car si d'un côté, nous croyons dans une architecture libérée de la standardisation, de l'autre, il ne faut pas tomber dans le rêve d'une architecture libre de toute contrainte : la figure de l'architecte ne va pas disparaître, elle va juste changer. L'architecte ne sera plus un artiste dessinant dans son coin, mais plutôt un conseiller et un gérant ou créateur d'espaces, et propulseur de dynamiques spatiales. Ce rôle de guide ou de conseiller de l'architecte, a déjà grandement évolué durant le XXème siècle, avec notamment, l'augmentation du nombre de corps de métier, se rattachant à un projet lors de la conception. Aujourd'hui, l'architecte est le médiateur entre les divers intervenants : l'ingénieur structure bien-

sûr, mais aussi avec les ingénieurs HQE étudiant la qualité environnementale, les acousticiens, les thermiciens, les géomètres, les projeteurs CVC et électriciens et les économistes. Ce rassemblement de connaissances s'accroît aujourd'hui d'années en années. Les ingénieurs, travaillant sur la qualité de l'air et le traitement des polluants, interviennent notamment de plus en plus dans la phase de conception. Ce rôle de médiation peut alors aussi être plausible vis-à-vis des citoyens, en mettant des outils disponibles pour l'autocréation de conception. Parvin voit même dans cette méthode, une interaction possible entre citoyens, afin de développer des réseaux sanitaires, de ventilation ou d'électricité concertés.

L'idée paraît être un retour en arrière, au temps où les professions réglementées étaient peu nombreuses, et où le travail manuel pour son propre compte était prépondérant. Je ne pense pas que cette démarche vise à appauvrir l'architecture, mais plutôt à l'enrichir. De nombreux acheteurs de biens immobiliers neufs, reconçoivent entièrement l'espace intérieur, juste après en avoir fait l'acquisition. Quel sens a donc la production de logements neufs, où le plan intérieur respecte des ratios de surfaces et des normes handicapées, qui ne correspondent pas à l'acheteur futur ? Imaginons une résidence construite et livrée avec le gros œuvre terminé, et une partie du second œuvre seulement, (installations des gaines et des réseaux d'eau et d'électricité). L'architecte aurait à charges de créer le squelette du bâtiment, en imaginant juste son organisation intérieure, et en proposant une distribution des réseaux, cohérente et adaptable. Ensuite, une salle spécialement conçue pour l'usinage et la découpe de matériels, tel que le bois, les cloisons, permettrait à chacun d'organiser l'espace de son logement, en fonction de ses besoins. Cette expérience nécessiterait un accompagnement dans le dessin, que pourrait effectuer l'architecte, en se munissant de modèles numériques paramétriques, directement découpés par machine numérique. J'espère un jour, que cette approche puisse être développée, afin de ne pas considérer l'utilisateur comme client, mais le recentrer sur la conception. L'architecture participative, sous-en-

tendu libre de droit, pourrait débiter par ce genre d'exemple. Ensuite peut être, lorsqu'elle aura mûri, alors l'architecte pourra convertir cette approche sur la création d'une maison, pavillonnaire ou en cœur de ville.

Conclusion

Cette étude sur l'architecture paramétrique, a sûrement permis de répondre à mes premières interrogations, concernant cette nouvelle approche disciplinaire de l'architecture. Le paramétrisme était, avant de commencer cette recherche, un simple outil qui viendrait en complément de notre intuition et notre imagination. La création de formes, reposait pour moi, sur un raisonnement qui s'exprimait à travers des outils, qui aujourd'hui étaient devenus numériques. Je n'envisageais pas sa conception, basée sur la construction d'un modèle paramétrique, en instaurant des relations de comportements, des contrôles de trajectoires, et tout autre caractéristique géométrique dynamique. Cette approche, développée par Patrick Schumacher dans son livre « The Autopoiesis of Architecture », m'a poussé plus loin dans la réflexion, sur la construction d'une méthode générative. Il n'en demeure pas moins que, même si cette nouvelle approche ne remettait pas en cause l'architecture moderniste, elle ne reprenait pour moi pas sa force et éloignait par exemple, les questions sociales, qui étaient difficilement lisibles dans la génération de projets. En d'autres termes, les limites de cette construction, résident dans son rapport à l'échelle humaine. La perception des modèles paramétriques est difficilement sensible à l'échelle d'un modèle numérique. Cette appréhension s'est aujourd'hui de plus en plus affinée, grâce aux panels de projets développés paramétriquement. Renzo Piano disait : « Construire un bâtiment, c'est loin des effets de style, tendre au murmure du monde, comprendre les désirs des hommes et savoir leur faire échos. » Ce style, comme l'explique Renzo, ne doit pas prendre le dessus sur l'incroyable potentiel du paramétrisme. Les logiciels paramétriques ne devront pas avoir le dernier mot sur l'architecture. Il faudra surpasser leurs limites, afin de réellement concevoir une architecture. De même, les outils paramétriques ne devront pas devenir un jeu. La facilité de construction sur Grasshopper présente des pièges, car elle contient de nombreuses opérations déconnectées de sens. Cette opérabilité est souvent recherchée par les artistes notamment

afin de produire de l'art cinétique, mais elle peut aussi desservir l'architecture et ne produire que de l'image. Il semble y avoir une distance de plus en plus grande, entre l'identité sociale des créateurs et les objets qu'ils contribuent à produire. En d'autres termes retrouve-t-on finalement, les caractéristiques et le trait du dessin de l'architecte sur des projets numériques ? Je pense que ce trait de dessin peut être reconnaissable numériquement, si le créateur se sert des logiciels comme outils à la réflexion, et ensuite à la conception. On remarque néanmoins que le processus d'objectivation des champs de compétences, tend à s'inverser au lieu de prendre le domaine disciplinaire comme lieu d'identification des objets produits, il se saisit d'abord des objets produits comme facteur d'identification des compétences. Cela voudrait dire concrètement, que la notion de discipline ne serait plus opératoire et devrait être remplacée par celle de méthodologie, ou de méthodes d'approches des problèmes et des questionnements. La méthodologie serait alors prépondérante sur l'identité des acteurs. La continuité de raisonnement entre les acteurs, serait mise en avant par rapport aux intérêts propres de chaque discipline. Ainsi, la réponse aux modèles paramétriques, doit aller dans le sens de l'évolution de modèles de calculs des ingénieurs, pour tenter de dépasser la simple fiction numérique. L'architecture devra également se nourrir d'autres univers, pour ne pas sembler être l'apparente figuration d'un modèle numérique complexe, que l'homme ne serait à première vue décrire. Ce que Frédérique Entrialgo, Ronan Kerdreux nomment, une « trans culture du projet », c'est-à-dire un espace, au sein du projet où les cultures se recouvrent entre elles.

Cette nouvelle approche a engendré une multitude de projets tests et de workshop dans les écoles d'architecture. Sa rapidité d'apprentissage, du fait notamment de l'élégance dans son approche à la géométrie, a fait naître nombres de projets enthousiasmants, comme celui sur les fibres carbone structurelles, mené par Achim Menges, (Research Pavillon en 2012). D'un autre côté, les industriels ont dû s'adapter aux développements sériels, d'élé-

ments non standardisés. Ce développement a engendré d'abord, une connexion entre les modèles numériques et les programmes machines avec une précision aujourd'hui recevable. Il a dans un deuxième temps, permis de réinventer les méthodes de productions d'éléments, qui ne sont désormais plus limitées seulement en deux dimensions, mais s'enrichissent des mouvements en 3 dimensions des machines 5 axes, industrielles. L'impression de matière et le tissage, ont permis de penser entièrement la matière, les assemblages, les formes et donc l'architecture, car la forme est matière, et inversement. Cette perpétuelle et florissante évolution, renvoie implicitement à la question de l'obsolescence des moyens de production. Cette obsolescence est clairement visible à l'échelle des logiciels. Certains développeurs rendent leurs utilisateurs des « bêta testeurs », qui sont obligés chaque année de changer de versions, non compatibles, avec la précédente. Un abonnement ou un forfaitaire. D'autres en revanche, ont ouvert leur base de données, et permis une meilleure inter compatibilité, afin d'engager une interdisciplinarité possible. L'obsolescence des machines, renvoient à la notion de la conservation, et surtout à l'utilisation des données post réalisation. Les agrandissements et les réhabilitations feront de plus en plus partie des volontés urbaines des prochaines décennies, et amplifieront le phénomène de la ville palimpseste. Les données nécessaires à l'élaboration du projet, devront pouvoir être réutilisables, bien-sûr par un support papier, mais également disponibles numériquement, plusieurs années après la réception des travaux. Cette compatibilité temporelle, numérique et physique, par l'utilisation des procédés industriels, devra pouvoir être garantie. Cette notion de compatibilité renvoie implicitement à la notion de produits « open source », développée avec Wiki House par Alastair Parvin. Le partage du savoir technique et artistique doit être mis à disposition de tous. Les renseignements effectués pour ce mémoire, ont pour beaucoup été recueillis sur des documents recherchés sur internet. La plupart des données courantes sont disponibles, et permettent de comprendre notamment, l'élaboration des projets exposés dans la partie II.

Cependant, les données pointues, ne sont pas formulées par les architectes ou les ingénieurs, qui détiennent ces informations, et n'en souhaitent pas leurs divulgations. On les trouve à contrario, chez les fabricants, qui se servent notamment, de ces projets, afin de faire valoir leur savoir-faire dans le domaine de compétence, par exemple l'assemblage bois, et expliquent donc leur méthodes utilisées. Cela a notamment été le cas dans la recherche pour le Metropol Parasol. Les données sur les modèles de calculs d'Arup, m'ont été communiquées facilement par FinnForest, elles étaient relativement confidentielles, de la part des ingénieurs d'Arup. Cette explication est aussi due au phénomène de médiatisation, qui prend une part plus importante dans les entreprises, qui peuvent être sollicitées par les ingénieurs ou les architectes.

Il restera de ces recherches sur l'architecture, cette formidable opportunité aujourd'hui, pour le développement dans le domaine des outils de conceptions informatiques paramétriques. Je crois que l'utilisation du paramétrisme, n'est pas uniquement vouée, à l'expression d'une architecture onéreuse, mais qu'elle garantit et produit aussi, une architecture simple et riche de sens. Je le crois et je l'espère.

Sources :

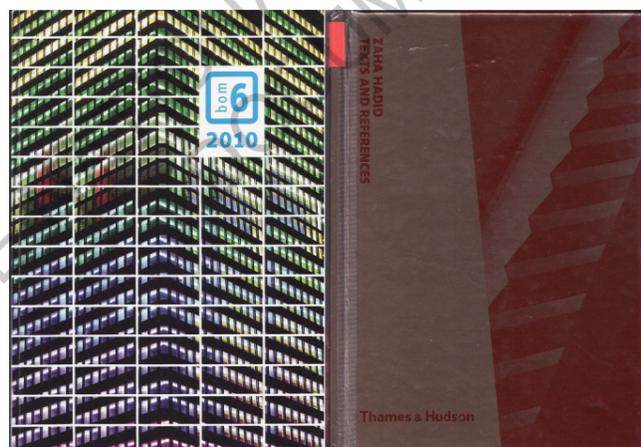
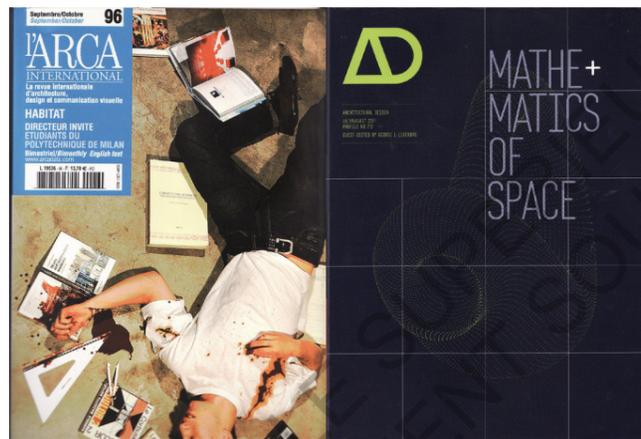
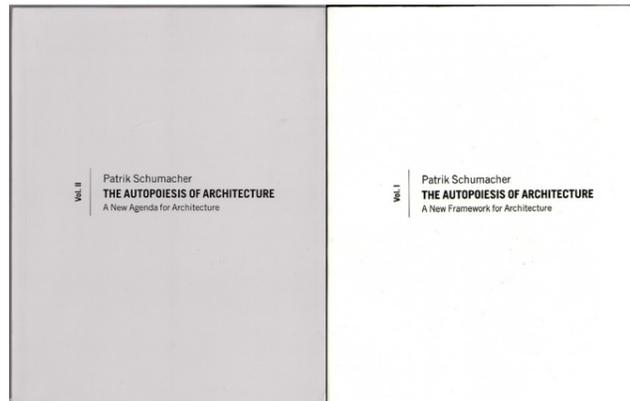
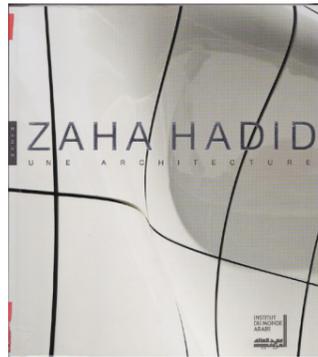
Sources manuscrites :

- Arca Internationale n°96 Peut-il exister une formule pour des formes infinies ?
- AD mathematics of space july/august 2011 edited by George L Legendre.
- ZAHA hadid une architecture.
- Zaha hadid text and reference.
- The autoipoiesis of Architecture Patrik Schumacher (volume I & II)
- Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc. These chiara silvestri (19 juin 2009) Titre : perception et conception en architecture non-standard Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes.
- Enseigner la conception architecturale avec la modélisation paramétrique: Quelle spécificité cognitive ? Aurélie de Boissieu, Caroline Lecourtois, François Guéna
- Rinaldo Capomolla « Il pont sul Basento di Sergio Musmeci », il progetto della forma strutturale prima dell'avvento del calcolo automatico.
- Modélisation paramétrique partagée, digital project Guery.
- Système de nomination hiérarchique pour les systèmes paramétriques, Mehdi Baba-ali, Docteur de l'Université de Poitiers.

Source internet

Création de forme :

- Arduino + Grasshopper & Firefly <http://vimeo.com/11308747>
- Firefly for Grasshopper / Arduino <http://vimeo.com/14637158>
- Grasshopper Processing <http://www.livearchitecture.net/archives/3732>
- Achim Menges <http://www.achimmenges.net/?p=5561>



- Kartal pendik Zaha Hadid <http://www.arcspace.com/features/zaha-hadid-architects/kartal-pendik-masterplan/>
- NBBJ and CCDI Break Ground on Hangzhou Sports Park http://www.archdaily.com/56594/nbbj-and-ccdi-break-ground-on-hangzhou-sports-park/hangzhou_rendering_cd_05/
- Generative algorithmes using Grasshopper Zubin Khabazi
- The Grasshopper Primer, Second edition for version 6 2009
- Grasshopper : Aurélie de Boissieu et François Guéna <http://dnarchi.fr/outils/grasshopper-et-la-programmation-sur-rhinoceros-4-une-introduction/> http://www.grasshopper3d.com/video/summaries-and-analysis-of-presidential-speeches-in-gh?xg_source=activity
- Quel modèle économique pour l'architecture paramétrique? Frédéric Renou
- Numérique et architecture : Quelles hybridations des pratiques ? <http://dnarchi.fr/pratiques/le-numerique-engence-darchitecture-queelles-hybridations-des-pratiques/>
- Comparaison Grasshopper Generative Component <http://designplaygrounds.com/deviants/rhino-grasshopper-vs-generative-components/>
- Overview of the development of ultra large container carriers: where next? Bill Shi, Donald Liu, Peter Tang-Jensen, K.M. Wong, American Bureau of Shipping, USA

De la forme à la matière :

- Le magazine wood. Novembre 2011 Special Metropol Parasol. FinnForest
- Freeform timber free forms require strong bonds. www.freeform-timber.com
- Metropol parasol Redevelopment of Plaza de la Encarnacion in Sevilla Spain.
- FINNFOREST - Metropol Parasol à Séville. Une prouesse mondiale d'ingénierie bois

- D- Shape. The 21st century revolution in building technology has a name.
- The perfect wave, Porsche; Valerie Hôhne.
- Elaboration d'un modèle paramétrique d'assemblages bois pour le calcul des structures non standard, thèse de Nicolas jacob
- The National Assembly for Wales. Joseph Correnza Gabriel Hyde Gavin Kerr Ray Lake Ed Newman-Sanders Matthew Skuse.
- Achim Menges <http://www.achimmenges.net/?cat=236>
- hyperbody demonstrations www.hyperbody.nl <http://www.protospace.bk.tudelft.nl/> <http://designplaygrounds.com/deviants/msc2-studio-at-hyperbody-at-tu-delft/>
- ICD-ITKE Research Pavilion 2012: Prototyping <http://vimeo.com/46611143#>
- ICD/ITKE Research Pavilion 2012: Dry Run Snap Shot <http://vimeo.com/48210691>

Architecture mobile :

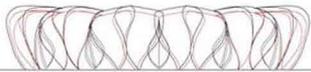
- <http://designtheorykje.wordpress.com/2012/10/18/1983-1985-ernstings-warehouse-2/>
- Wikihouse <http://www.wikihouse.cc/> <http://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/16648b94-bfdc-48c0-8ed9-a8d16d5c336c> <http://complexitys.com/blog/wikihouse/#.UaZO-IECmFBk>
- Citizen in mouvement by Mila & Partner <http://blog.kineticarchitecture.net/2011/04/milla/>
- Stade Magnolia" de Mitsuru Senda <http://blog.kineticarchitecture.net/2008/10/magnolia-stadium-by-mitsuru-senda/>
- Bmw Demonstrations <http://www.youtube.com/watch?v=HVhVCIFMg6Y->
- Limites des projets et univers numérique Frédérique Entrialgo + Ronan Kerdreux <http://www.studiolentigo.net/?p=695>

- Leaf Chapel By Dytham
<http://blog.kineticarchitecture.net/2011/01/leaf-chapel-by-klein-dytham/>
- Responsive Parametric Infrastructure | a proposal for a smarter Turin
<http://complexity.com/english/2960/#.UajymECmFBk>
- Dancing with Nature Hugh Dutton
<http://complexity.com/english/dancing-with-nature/#.Uajyk0CmFBk>
- Frédérique Entrialgo + Ronan Kerdreux : limites des projets et univers numérique
<http://www.studiolentigo.net/?p=695>

Conférence et formation :

- Ted Event : Alastair Parvin. Open source architecture
<http://www.youtube.com/watch?v=Mlt6kaNjoel>
- Patrick Schumacher Parametric order 21st century Architectural Order.
<http://www.youtube.com/watch?v=zG2WMVkd5dw>
- Francesco Cingolani : Formation Grasshopper, 13 juin 2013.
- Bentley système : formation sur la suite Bentley par Loïc Béduneau & Eric Komlavi Agbetiafa, mardi 2 juin 2013.
- Tekla : Contrôle des IFC et transfert vers robot structure analysis, Dominique Flakin, jeudi 30 mai 2013.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



HANGZHOU STADIUM

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT FOURMIS AU PROFIT D'AUTRES

