

ALPHA
GRAFIK

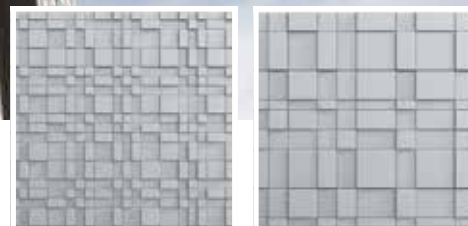
NOUVEAU

**ALPHA GRAFIK EST LE NOUVEAU DESIGN MONOLITHIQUE
QUI CONJUGUE INTEMPOREL ET CONTEMPORAIN**

La nouvelle solution en vêtage, économique, esthétique et durable.
Alpha Grafik, parement Minéral Composite de fabrication française, vous propose
deux aspects GRAF100 et GRAF200 qui apporteront à vos ouvrages une touche
contemporaine intemporelle.

Pour tout savoir : www.carea-facade.fr

FABRICATION
FRANÇAISE



GRAF100

GRAF200

CAREA[®]
MINERAL COMPOSITE

Éléments simples, formes complexes



DOSSIER

Dossier réalisé par Stéphane Berthier

La quête du *continuum* numérique

Ces algorithmes qui viennent

L'invention d'une tectonique numérique

L'université comme milieu d'expérimentation

Armadillo Vault, un artisanat numérique ?

Une nouvelle génération de chercheurs, architectes, ingénieurs, mathématiciens, explore les possibilités de construction des architectures dites « non standard » qui ont émergé à la fin du XX^e siècle avec l'apparition de l'informatique. Après le formalisme virtuel des premières heures, ces universitaires réinterrogent cette production à partir de ses conditions de réalisation. Ils inventent un registre architectural original, tectonique, finalement très différent des « blobs » initiaux. Leurs travaux s'appuient désormais sur la constitution d'un *continuum* numérique, de la conception à la fabrication robotique, qui transforme profondément le caractère séquentiel de l'acte de bâtir, fondé classiquement sur les interventions successives de l'architecte, de l'ingénieur puis de l'entreprise. Ces recherches, menées par des équipes pluridisciplinaires, émergent sous la forme d'objets expérimentaux de laboratoire, de prototypes et d'édifices démonstrateurs de ces nouvelles technologies digitales. Elles remettent en question les savoirs, les méthodes et les rôles de l'architecte tels que nous les connaissons.

De gauche à droite :

Flying Vehicule, ETH de Zurich © Gramazio Kohler research, ETH Zurich.

L'exposition « Timber Project », EPFL, 2005

par Yves Weinand et Hani Buri © EPFL / IBOIS.

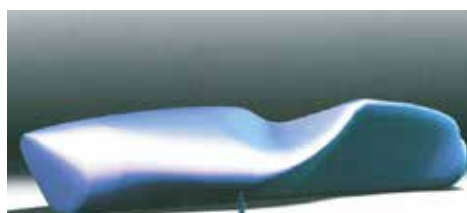
Recherche Pavillon, de l'Institute of Computational Design (ICD)

et de l'Institute for Building Structures and Structural Design (ITKE) © ICD/ITKE Universität Stuttgart.

Armadillo Vault, présenté à la 15^e Biennale de Venise © David Escobedo of the Escobedo group.

La quête du *continuum* numérique

L'architecture non standard s'oppose à la notion moderne de série, de répétition industrielle et à la standardisation architecturale qui en découle. Elle regroupe les formes complexes et quelconques au sens géométrique du terme. Ses premiers auteurs (Greg Lynn, Asymptote, NOX, etc.) revendiquaient aussi s'inspirer des découvertes de l'analyse mathématique non standard dans les années 1960, sans qu'il soit toujours possible de faire le lien entre cette théorie et l'étrangeté des formes architecturales considérées. En revanche, elles témoignaient d'une fascination évidente pour les formes organiques du vivant, dont l'imitation devenait aisée grâce aux nouveaux outils informatiques. Comme un premier jalon, l'exposition « Architecture non standard » organisée par le Centre Pompidou en 2004 dressait un inventaire détaillé de cette production encore largement théorique. Identifiées initialement sous le nom de « blob » en raison leurs formes molles et fluides, ces architectures ont évolué très sensiblement ces dernières années, sous l'influence des développements du numérique. Les travaux menés sur les conditions de leur constructibilité ont transformé significativement



leurs caractéristiques morphologiques et dessinent désormais une architecture non standard 2.0.

LE BUG DES BLOBS

En effet, les premiers blobs furent très vite confrontés à la difficulté de leur construction. Tout d'abord en raison de leur absence d'échelle, puisque ces objets pouvaient être soit des cocons individuels, soit des salles philharmoniques, c'était selon la taille du personnage ajouté à leur représentation. Or nous savons, au moins depuis D'Arcy Thompson¹, que les formes du vivant sont déterminées par leur échelle. Il n'y a pas d'homothétie dans la nature, simplement parce que lorsqu'un être grandit, ses dimensions augmentent linéairement tandis que sa surface croît au carré et son volume, donc sa masse, croît au cube. Ainsi, Gulliver n'est que 12 fois plus grand que les Lilliputiens, mais il est 1728 fois plus lourd. Après la question de l'échelle, l'autre écueil résidait dans l'emploi de systèmes constructifs traditionnels inappropriés à la complexité morphologique de ces architectures non standard. Les premières tentatives de discrétisation, c'est-à-dire de décomposition d'une

Les premières architectures non standard sont inspirées de l'analyse mathématique et guidées par une fascination pour les formes organiques du vivant. Si l'imitation formelle est rendue aisée par l'outil informatique,

le « blob » – avec ses formes molles et fluides – se heurte à la question de la constructibilité, notamment par son absence d'échelle. Toute appréciation de taille n'est donnée que par le personnage ajouté aux représentations.



En haut : NOX architectes, SoftOfficeUK, modélisation 3D.

Au milieu, les images en bleu : Osterhuis.nl architectes, Transport_

MUSCLE, modélisation sans échelle et avec échelle donnée par un personnage.

En bas : DR_D architectes, Maison Dom_inFo, modélisations 3D.



surface complexe en de plus petits éléments pour qu'ils puissent être fabriqués et manipulés, créaient des discontinuités importantes qui altéraient la fluidité des formes imaginées. L'une des deux méthodes les plus communément employées consistait à découper l'objet en tranches, à la manière des maquettes de topographie. Un travail sur l'enveloppe devait ensuite lisser la surface pour en restituer la fluidité. La seconde méthode consistait à décomposer les surfaces courbes en les triangulant pour coller au plus près de la topologie initiale. Dans la plupart des cas de figure, des systèmes constructifs conventionnels aux trames resserrées venaient « faire tenir » ces architectures non standard, sans relation organique ou cohérente entre la structure et la forme, un peu comme un décor de théâtre.

REDÉCOUVERTE DES STRUCTURES SPATIALES

Une première amélioration a été apportée avec la redécouverte des structures spatiales. À la différence d'une structure traditionnelle fondée sur un système de travées répétitives, plus ou moins espacées, les structures spatiales sont caractérisées par des surfaces continues dont la géomé-

LES TRAVAUX SUR LES CONDITIONS DE LA CONSTRUCTIBILITÉ DES BLOBS ONT TRANSFORMÉ SIGNIFICATIVEMENT LEURS CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET DESSINENT DÉSORMAIS UNE ARCHITECTURE NON STANDARD 2.0.

trie définit une portance multidirectionnelle qui répartie les déformations grâce à une meilleure solidarité structurelle. Ainsi des voiles minces en béton de Dischinger, Freyssinet ou Candela, des structures tridimensionnelles de Le Ricolais, des dômes géodésiques de Buckminster Fuller ou encore de la résille de bois de la Halle de Mannheim conçue par Frei Otto en 1976. L'art de l'ingénieur du XX^e siècle est riche d'exemples de ce type, un peu tombés dans l'oubli à partir des années 1980. Le pavillon de la Serpentine Gallery de 2005 conçu par Alvaro Siza, Edouardo Souto de Moura et Cecil Balmond est un exemple intéressant de structure spatiale au service d'une forme non standard. Les logiques structurelle et morphologique s'y confondent dans un objet désormais cohérent. Sa projection en plan dessine une grille rectangulaire déformée comme si elle était élastique. La forme qui en résulte est décrite par un réseau de poutres croisées qui définit une surface à double courbure quelconque, mi-coque, mi-tente, dont la flèche garantit la stabilité. Ces mêmes structures spatiales se retrouvent aussi dans les recherches d'Achim Menges à la TU de Stuttgart ou celles d'Yves Weinand

Un système constructif conventionnel soutient la peau de ces premières architectures non standard, sans relation cohérente entre structure et forme.

Ci-dessus, à droite : Jakob + MacFarlane architectes, FRAC Centre, Orléans, France, 2013.

Ci-dessus, à gauche, puis de haut en bas :

NOX architectes, Son-O-House, Son en Breugel, Pays-Bas, 2004.

Deux photos au centre : XTU architectes, musée de la Préhistoire, Jeongok, Corée du Sud, 2011.

En bas : Future Systems architectes, centre commercial, Birmingham, 2003.



Frei Otto architecte, halle de Mannheim, 1976.



La Serpentine Gallery de Siza, Souto de Moura et Balmond architectes, Londres, 2005. Les structures spatiales,

revisitées par les outils numériques, viennent au service de la mise en œuvre des formes non standard.

Dans les travaux d'Yves Weinand pour le laboratoire IBOIS de l'EPFL, les surfaces complexes sont discrétisées selon un motif ou *pattern*

constitué d'éléments simples, identiques dans leur géométrie, mais dont les dimensions varient. Ci-contre, un prototype de recherche sur les

structures plissées à partir d'un modèle d'origami et un prototype de voûte réalisée avec des voussoirs en contreplaqué.



© EPFL / IBOIS



© ICD/ITKE Universität Stuttgart

à l'EPFL. Ces travaux ont en commun de discrétiser les surfaces complexes selon un motif ou *pattern*, constitué d'éléments simples, identiques dans leur géométrie, mais dont les dimensions varient pour épouser de proche en proche la topologie de la surface complexe. Ces éléments simples, constitutifs du motif, peuvent être plans comme les hexagones et pentagones d'un dôme géodésique déformé, ou bien tridimensionnels, comme les voussoirs de la voûte de bois de l'EPFL ou encore décrire des surfaces plissées à la manière des origamis japonais.

Mais cette recherche de cohérence entre forme et structure n'aurait pas été possible sans le transfert dans le champ de l'architecture d'outils de conception numérique développés auparavant dans les domaines automobile et aéronautique. En effet, les structures spatiales du XX^e siècle que nous évoquons ci-avant étaient principalement fondées sur des formes géométriques régulières, qui pouvaient être dessinées et calculées « à la main ». Elles devaient aussi être construites à partir d'éléments standardisés répétitifs. Le caractère géométriquement quelconque des

formes non standard rend leur modélisation et leur réalisation extrêmement laborieuses sans outils numériques. De surcroît, l'informatique donne aussi la possibilité de maîtriser des figures géométriques telles que les courbes de Bézier ou les *NURBS (Non Uniform Rational B-Spline)*, très souvent utilisées pour générer les surfaces gauches, mais qui ne peuvent pas être décrites par la géométrie descriptive conventionnelle.

De la même manière, les machines à commandes numériques sur lesquelles sont désormais réalisés ces artefacts singuliers sont assez vieilles. Elles ont été développées dans l'industrie des années 1970 et instaurent la notion de plateforme numérique continue, de la conception à la fabrication. Elles apparaissent aujourd'hui dans le champ de la construction parce qu'elles deviennent utilisables grâce à l'évolution de nos outils de conception et pertinentes pour réaliser les usinages sophistiqués requis par les architectures non standard. Ainsi, le pavillon de la Serpentine Gallery de Siza, Souto de Moura et Balmond est un réseau de poutres croisées en lamibois, toutes singulières, qui ont été découpées sur une



© Alain Herzog

IL FAUT PLUTÔT PARLER D'UNE RENCONTRE OPPORTUNE ENTRE DEUX DOMAINES, L'ARCHITECTURE NON STANDARD D'UNE PART ET LES OUTILS DE CONCEPTION NUMÉRIQUE D'AUTRE PART, QUI SE VALORISENT RÉCIPROQUEMENT.

fraiseuse numérique à partir de la nomenclature extraite du modèle digital. Soigneusement numérotées, elles ont ensuite été assemblées entre elles comme un kit.

CONCEPTION PARAMÉTRIQUE ET FABRICATION NUMÉRIQUE

À un premier niveau de complexité, ces outils de conception numérique permettent de paramétrer les modèles 3D de telle sorte que les pièces constitutives de l'objet puissent être exportées sous forme de nomenclature à destination des outils de fabrication numérique, telles que les fraiseuses CNC ou les robots. Les liens paramétrés entre la forme générale et les pièces constitutives offrent la possibilité de modifier la nomenclature des pièces à fabriquer automatiquement, lorsque l'architecte modifie la forme générale du modèle 3D. Ces outils peuvent aussi servir à modifier les sections des pièces en fonction des efforts qu'elles subissent, dans un certain intervalle de validité, lui aussi paramétrable. Le fil conducteur de ces recherches est bien la quête d'une plateforme numérique homogène, depuis les logiciels de conception jusqu'aux instructions données aux ma-

chines numériques, en passant par les outils de dimensionnement des structures. De la sorte, une modification apportée à la forme générale se répercute en temps réel sur toutes les informations techniques nécessaires à la construction, et réciproquement. Un unique fichier source serait alors capable de contenir toutes les informations, de la conception à la fabrication. Plus encore, le processus de construction lui-même, c'est-à-dire l'assemblage de l'édifice, peut désormais être paramétré, programmé, puis exécuté par des robots comme le montrent les travaux récents de Gramazio et Kohler à l'ETH de Zurich.

Il faut souligner que les outils de conception paramétrique ne sont pas seulement des moyens de réalisation des blocs initiaux de l'architecture non standard. Il faut plutôt parler d'une rencontre opportune entre deux domaines, l'architecture non standard d'une part et les outils de conception numérique d'autre part, qui se valorisent réciproquement. Ces outils développent depuis quelque temps un langage morphologique propre qui ne repose plus directement sur l'imitation des formes fluides du vivant. Leur logique de discrétisation

des surfaces gauches conduit à des expressions architecturales singulières faites d'éléments simples assemblés qui décrivent de manière originale les formes complexes, sans chercher à masquer leur caractère très construit, mais au contraire en l'affirmant. Ils intègrent dès le départ l'impossible continuité de la forme à l'échelle architecturale et l'envisagent donc *a priori* comme une suite d'éléments discrétisés.

L'avantage théorique qu'offre ce *continuum* numérique, outre d'être un langage commun entre tous les acteurs, est celui de l'efficacité économique. Il est presque égal pour le robot d'usiner cent pièces différentes ou cent pièces identiques. Il ne nécessite plus les réglages spécifiques ni les gabarits qu'imposaient les outils industriels lourds du XX^e siècle. L'amortissement devient beaucoup plus rapide et la série peut théoriquement commencer à 1. C'est ainsi que Jeremy Rifkin a théorisé *La nouvelle société du coût marginal zéro*, c'est-à-dire la fin de l'industrie de masse et de ses exigences économiques de standardisation. Cette capacité des outils de fabrication numérique rend économiquement acceptable la réalisation de pièces toutes légè-

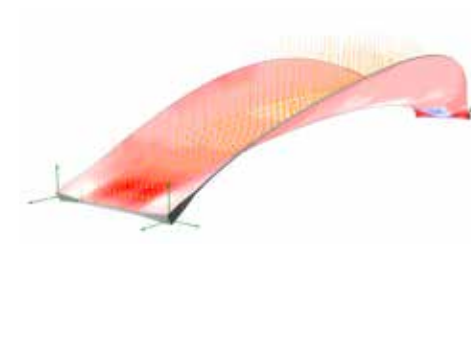
Dans ses pavillons de recherche à Stuttgart, l'architecte Achim Menges expérimente les structures spatiales à partir de l'assemblage de caissons hexagonaux et pentagonaux en contreplaqué. La variation dimensionnelle

des éléments permet, de proche en proche, de générer la topologie de la surface complexe.

En haut et au milieu, le Research Pavilion, 2011. En bas, à droite, le Landesgartenschau Exhibition Hall, 2014.



© ICD/ITKE Universität Stuttgart



© Gramazio Kohler research, ETH Zurich

L'outil de conception Karamba 3D permet de simuler les efforts subis par les pièces et d'adapter leurs sections en conséquence. La construction elle-même peut être paramétrée,

programmée et exécutée grâce au numérique. À l'ETH de Zurich, Gramazio et Kohler font monter le mur de leur projet *Structural Oscillations* par un bras articulé robotisé.

C'EST TOUJOURS UN ÊTRE HUMAIN QUI ÉCRIT L'ALGORITHME, DONC QUI ÉTABLIT LA NATURE DES VARIABLES ET LEURS HIÉRARCHIES, QUI FIXE LES RÈGLES DU JEU.

rement différentes les unes des autres, issues de la discrétisation des surfaces complexes. Ces machines rendent possible, notamment avec l'utilisation du bois, des assemblages comme des clavetages, des tenons-mortaises, des queues d'aronde, etc., et font l'économie des liaisons mécanosoudés, réputées être les pièces chères d'un devis de charpente. La tendreté du bois, sa capacité à se travailler facilement et sa disponibilité le rendent particulièrement adéquat à cette nouvelle technologie de fabrication digitale. De matériau archaïque au XX^e siècle, il devient le matériau phare de ce début de XXI^e siècle.

LES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

À un second niveau de complexité, les outils de conception paramétrique sont capables de générer eux-mêmes la forme architecturale. Ces algorithmes dits « génétiques » sont des codes informatiques qui définissent les critères de la forme et leurs variables, en fonction des règles ou des contraintes que le concepteur se donne. Ces critères sont par exemple d'ordre techniques et relatifs à la statique, la thermique ou l'éclairage, auxquels on assigne des performances à atteindre; ils peuvent aussi être d'ordre géométrique, fonctionnel, morphologique ou esthétique. Ce code informatique est en outre capable de pondérer ces critères, de les hiérarchiser, voire de les laisser au choix du hasard. Le programme est alors en mesure de déterminer la solution optimisée entre toutes celles possibles, comme un point d'équilibre entre les différents critères de conception, chacun d'entre eux restant dans son intervalle d'acceptabilité. À l'intui-

tion cultivée de l'architecte et son « parti architectural » succéderait alors un calcul informatique d'optimisation entre tous les possibles. La réalité n'est bien entendu pas aussi tranchée. Les algorithmes génétiques sont pour l'instant des aides à la conception, des moyens efficaces de trouver rapidement une solution satisfaisante entre plusieurs contraintes, par exemple entre forme désirée et statique optimisée, mais aussi dans les processus de discrétisation des surfaces, en fonction de la taille et de la forme des éléments selon les contraintes de leur fabrication. D'autre part, c'est toujours un être humain qui écrit l'algorithme, donc qui établit la nature des variables et leurs hiérarchies, qui fixe les règles du jeu.

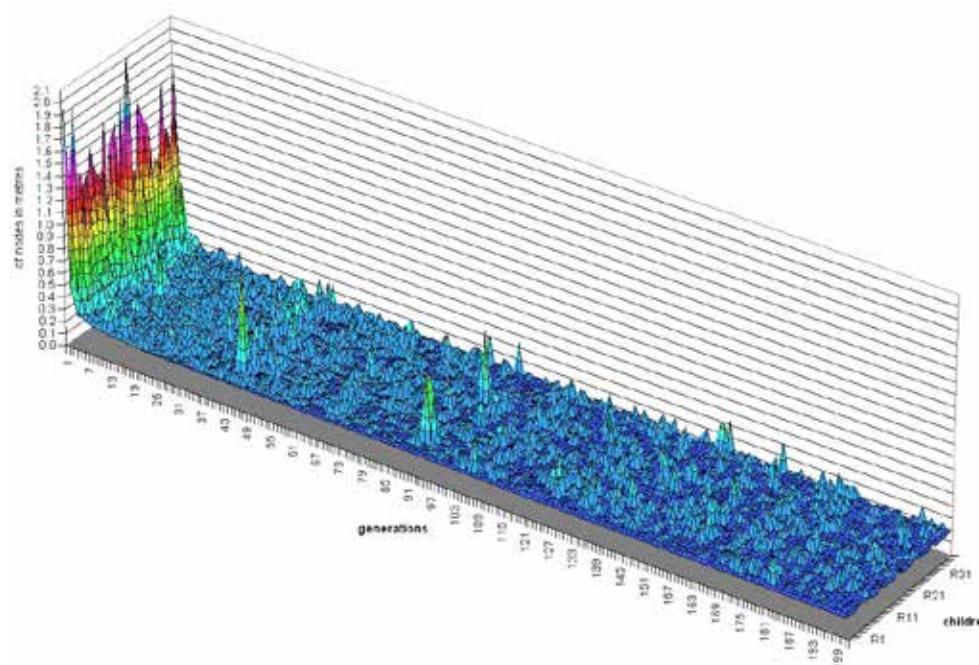
Le projet d'architecture devient alors un modèle numérique dont l'expression morphologique peut se modifier selon les variables codées dont on l'informe. Ce modèle contient théoriquement de multiples états possibles et se présente comme un génotype dont les expressions sont limitées par les intervalles de validité qu'on lui fixe. Par analogie avec la génétique, l'objet ou l'édifice qui est issu de ce génotype peut être considéré comme un phénotype, de la même manière que nous portons en nous un patrimoine génétique complexe contenant de nombreux possibles, dont seuls certains traits s'expriment dans notre phénotype personnel, au gré des hasards du brassage chromosomique. Plus largement, et considérant l'immense tâche de paramétrage que requièrent ces objets numériques, il faudra sans doute les imaginer comme des « modèles souples », non standard au

sens propre du terme, capable d'amortir le coût de leur R&D sur plusieurs réalisations, sensiblement différentes pour de multiples raisons de site, de programme, de climat, de performances requises, etc. mais tous fondés sur un même génotype, comme les membres d'une même lignée. Toutefois, si les critiques initiales relatives à l'absence d'échelle comme à l'inconstructibilité des architectures non standard sont désormais levées, celles, d'ordre éthique, qui interrogeaient le bien-fondé d'une démarche perçue comme strictement technophile et formaliste restent entières et sont peut-être plus vives encore. Ces développements scientifiques et techniques doivent être interrogés par les sciences humaines. Comme le fait remarquer Jean-Claude Bignon, cette continuité numérique de toutes les étapes suppose un langage commun, qui, comme tout langage, repose d'abord sur une culture commune. Or les différences de cultures entre tous les acteurs de l'acte de bâtir sont peut-être un frein à la productivité, mais elles sont aussi un terreau favorable à la créativité et à l'enrichissement réciproque. Les reconfigurations profondes que ce nouveau paradigme digital impose, non seulement à l'architecte mais à tous les métiers de la construction, sont-elles un gage de liberté retrouvée, une nouvelle Union des Arts et de l'Industrie après un siècle de standardisation industrielle appauvrissante, ou au contraire, une nouvelle forme d'aliénation des hommes par de nouvelles machines, toujours plus sophistiquées? ■

1. D'Arcy Thompson, *Formes et croissance*.

Ces algorithmes qui viennent

Entretien avec Klaas de Rycke, ingénieur-architecte diplômé de l'université de Gand et enseignant à l'ENSA de Versailles. Il dirige l'agence parisienne du bureau d'études allemand Bollinger + Grohmann.



D'A : QUELS SONT LES CHANGEMENTS QU'APPORTENT LES OUTILS DE CONCEPTION PARAMÉTRIQUE DANS UN BUREAU D'ÉTUDES TEL QUE LE VÔTRE ?

Klaas de Rycke : À dire vrai, les bureaux d'études travaillent depuis toujours dans une logique paramétrique. Pour dimensionner une poutre, il faut l'informer de sa portée, son matériau, sa surcharge, la nature de ses appuis, etc. Ces données sont autant de paramètres qui entrent en jeu pour la définition de cette poutre. La logique paramétrique est une logique causale que les ingénieurs connaissent bien. Ensuite, depuis longtemps, nos logiciels de calcul des structures sont paramétriques puisqu'on informe un modèle avec des données et le programme se charge d'établir la solution optimisée. Ce qui est nouveau et qui a permis un très fort développement des outils paramétriques, c'est l'ergonomie des interfaces graphiques.

CES OUTILS SONT DEVENUS PLUS FACILES À UTILISER ?

Oui, d'une part le paramétrique est devenu visuel. Avec des logiciels comme Karamba 3D ou RhinoVAULT, on peut voir la structure se modifier en fonction des paramètres dont on l'informe. En devenant graphiques, ces logiciels rapprochent la conception morphologique de la conception des structures. D'autre part, l'augmentation continue de la capacité de mémoire des ordinateurs, que l'on connaît bien sous le nom de loi de Moore, permet de rentrer beaucoup plus d'informations et de calculer des modèles beaucoup plus complexes dans des temps de plus en plus courts. Le nombre de paramètres que l'ordinateur peut traiter est devenu très important. Notre travail consiste désormais à coder les algorithmes qui gèrent cette multitude de paramètres simultanément.

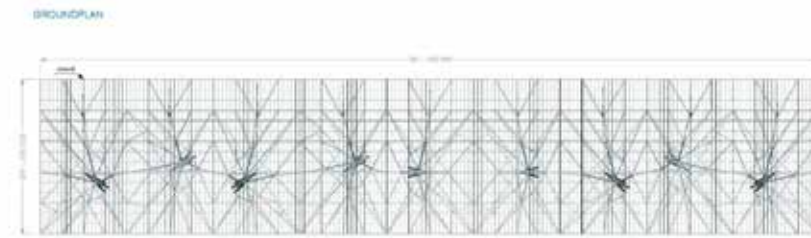
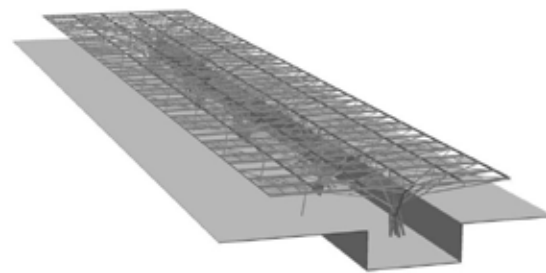
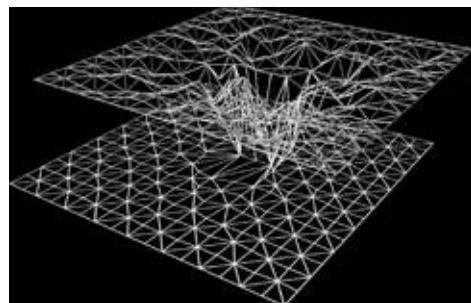
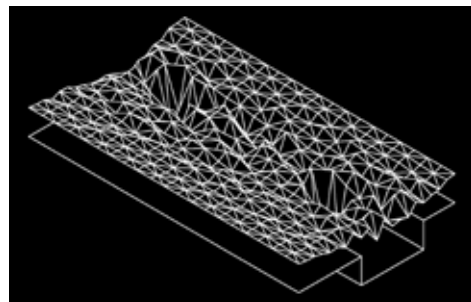
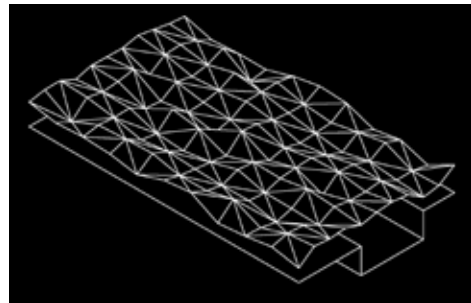
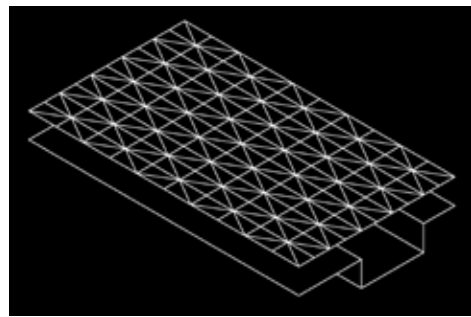
Ci-contre : pour un élément constructif donné, les outils de conception paramétriques permettent d'explorer des combinaisons complexes et de les améliorer sur des lignées de 500 générations, selon l'équilibre des performances recherchées.

CES OUTILS CHANGENT-ILS LE TYPE DE RELATION QUE VOUS ENTRETIENEZ AVEC LES ARCHITECTES ?

Ils améliorent certainement le partage de l'invention. Nous ne travaillons plus forcément de manière séquentielle, selon la vieille idée qui voudrait que l'architecte dessine son projet, puis le passe à l'ingénieur qui se chargera de le rendre constructible. Les itérations de travail sont plus riches, par exemple on peut élaborer des règles en commun et les faire évoluer ensemble. Si je prends l'exemple de la piazza Garibaldi à Naples, Dominique Perrault imaginait des arbres irréguliers et aléatoires avec une frondaison continue. Les appuis devaient avoir une forme arborescente mais aléatoire, puis la ramification devait se traduire par une grille tridimensionnelle et irrégulière. Nous avons donc paramétré un modèle numérique de cette grille, d'abord dessinée comme une grille régulière. Ensuite, nous avons travaillé le caractère aléatoire en élaborant un programme selon lequel chaque nœud pouvait bouger en altimétrie selon une suite non récurrente, un peu comme la suite de Fibonacci. Par ailleurs, pour respecter la logique structurelle, nous avons informé le modèle avec nos contraintes mécaniques, notamment sismiques. Avec des contraintes programmatiques aussi, en indiquant par exemple qu'aucun nœud n'avait le droit de descendre sous un certain plafond pour que l'espace soit utilisable et ainsi de suite.

C'EST CE QUE VOUS APPELEZ DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES.

Oui, l'idée est de concevoir en informant un modèle avec des paramètres qui peuvent



Ci-dessus : étude de la déformation d'une structure pour le projet de la piazza Garibaldi à Naples par Dominique Perrault, par le bureau Bollinger + Grohmann.

De haut en bas : grille régulière; déformations principales; accentuation des déformations; modélisation numérique d'un arbre.

Ci-dessus : axonométries de la structure d'ensemble du projet de la piazza Garibaldi à Naples. Élévation, plan et coupe de la structure définitive. Dominique Perrault a

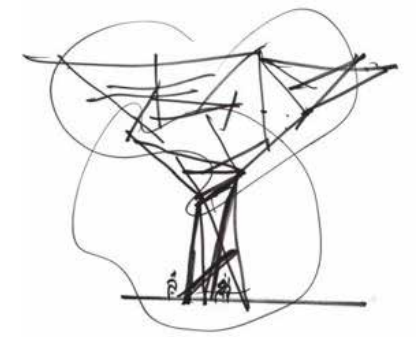
imaginé des arbres irréguliers avec une frondaison continue. Les appuis se multiplient pour créer une forêt métallique comme un auvent couvrant l'espace multimodal de la place.

« QUAND L'ORDINATEUR DÉLIVRE SES HYPOTHÈSES, DONT IL A DÉJÀ VÉRIFIÉ LA CRÉDIBILITÉ TECHNIQUE, IL FAUT ENCORE ÊTRE CAPABLE DE CHOISIR ENTRE ELLES. CELA DEMANDE UNE APTITUDE AU JUGEMENT QUI NE PEUT ÊTRE QU'HUMAINE. »

concerner la géométrie, la statique, etc. On peut imaginer beaucoup plus facilement la conception des formes complexes en générant une multitude de réponses. L'ordinateur n'ayant d'ailleurs pas de standards innés ou culturellement définis, il propose librement une très large variété de solutions, tout en restant dans les contraintes imposées. Cela concerne aussi les données programmatiques de l'architecte. On peut par exemple informer les éléments du programme avec des exigences de dimensions, d'éclairage ou d'interrelations. Ce n'est pas très différent de ce que les architectes faisaient parfois au début d'un concours lorsqu'ils découpaient des volumes en mousse qui représentaient les différents locaux, et qu'ils essayaient ensuite d'assembler entre eux. Sauf qu'à l'époque, la forme des volumes en mousse ne pouvait pas être changée sans recommencer une nouvelle itération laborieuse qui limitait les explorations possibles. Désormais, il suffit de changer un paramètre concernant la proportion des volumes et l'algorithme propose les nouvelles combinaisons possibles. Ainsi, au lieu de créer « à la main » des solutions qui explorent une seule hypothèse à la fois, nous pouvons lancer des explorations beau-



© Bollinger + Grohmann



© Dominique Perrault

coup plus complexes et les améliorer sur des lignées de 500 générations, selon l'équilibre des performances recherchées.

L'ORDINATEUR LAISSE DONC DES CHOIX POSSIBLES ? IL N'IMPOSE PAS SON PROPRE « PARTI ARCHITECTURAL » ? Ce qui est incroyable avec ce procédé, c'est qu'on peut très rapidement obtenir des centaines de choix possibles en faisant varier les paramètres. Cela laisse aussi place à la sérendipité, à des découvertes fortuites auxquelles personne n'avait pensé mais qui s'avèrent très intéressantes. Les solutions sont évaluées, par les architectes, par les ingénieurs, et de proche en proche on parvient à optimiser une réponse en ajustant la

Ci-dessus : pour l'architecte, les appuis devaient avoir une forme arborescente mais aléatoire. Le bureau d'études Bollinger + Grohmann a

exploré cette caractéristique en élaborant un programme par lequel chaque nœud peut bouger en altimétrie, selon une suite non récurrente.

règle du jeu. On peut voir toutes ces étapes d'optimisation comme une lignée génétique à laquelle on donne peu à peu aux descendants les caractéristiques idéales recherchées. Ces outils libèrent les possibles, mais au début il faut toujours établir la règle du jeu, faire des choix en hiérarchisant les paramètres entre eux, en définissant ce qui est important et ce qui est secondaire. Quand l'ordinateur délivre ses hypothèses, dont il a déjà vérifié la crédibilité technique, il faut encore être capable de choisir entre elles. Cela demande une aptitude au jugement qui ne peut être qu'humaine.

LE CONTINUUM NUMÉRIQUE DE LA CONCEPTION À LA FABRICATION EST-IL DÉJÀ UNE RÉALITÉ ?

Il y a encore des écarts de langage, des transcriptions à faire parce que souvent les robots de l'industrie sont faits pour d'autres objectifs, mais cela s'améliore régulièrement. Cette idée de *continuum* numérique élargit le rôle de l'ingénieur qui participe à la définition géométrique et morphologique du projet avec l'architecte, jusqu'à la mise en fabrication et aux modalités d'usinage avec les entreprises. Notre projet de bulbes en bois pour la maison Hermès a

Les contraintes mécaniques et programmatiques sont aussi prises en compte, pour que la hauteur libérée en sous-face soit praticable par les usagers.

été élaboré selon cette logique de continuité numérique. Cela marche plutôt bien dans la filière bois. Ce qui est intéressant aussi, c'est que le modèle numérique peut intégrer les paramètres de fabrication dès la conception, par exemple la taille de panneaux de bois, leurs modalités d'assemblage, la proportion de percements possibles, etc. Cela paraît très lourd à gérer pour nos capacités humaines, mais l'ordinateur le fait très bien. Le vieux processus selon lequel l'architecte dessine, l'ingénieur instruit et l'entreprise fabrique est désormais beaucoup plus récuratif.

JUSTEMENT, LES ENTREPRISES JOUENT-ELLES LE JEU DE CES NOUVEAUX OUTILS ?

Celles qui jouent le jeu sont celles qui disposent des compétences et des outils numériques de fabrication. Par exemple, la plupart des entreprises de charpente de taille moyenne sont équipées de machines à commandes numériques, à l'origine pour améliorer leur productivité et non pour fabriquer des formes complexes. Elles ont cependant tout à gagner à démontrer leur savoir-faire au travers d'ouvrages complexes. Tout cela est très développé en Allemagne, en Suisse ou en Autriche. On travaille pour faire baisser le coût de l'architecture non standard, c'est-à-dire conçue et construite selon des procédés hors de la série industrielle. Les outils de conception numérique nous aident à optimiser la matière, à faire des structures alvéolaires, etc. L'idée est de pouvoir à terme construire à des coûts acceptables des architectures à chaque fois très spécifiques.



Ci-dessus et page de droite : au cœur de Naples, Dominique Perrault procède à la transformation d'un espace public majeur et réalise la station de métro du même

nom. La nouvelle structure métallique arborescente reprend le motif triangulaire de la toiture de la gare centrale voisine et plonge jusque dans les galeries sous-jacentes.

Ce grand élément d'articulation fait face à une place plantée de dimensions équivalentes, donnant deux facettes très différentes à la piazza Garibaldi.

© photos: Peppo Maisto



© Peppo Maisto

LES RÉGLEMENTATIONS EN VIGUEUR SONT-ELLES UN FREIN AU DÉVELOPPEMENT DE CES ARCHITECTURES SPÉCIFIQUES ?

Les normes sont juste un cadre de référence. Elles sont écrites pour empêcher les gens de mal faire, mais parfois elles les empêchent de bien faire. L'effet des DTU est de nous pousser à construire selon des recettes éprouvées depuis vingt ans. C'est un frein à l'innovation. Il y a toujours un effet de retard sur les normes qui tentent de suivre la réalité. Comment permettre un changement rapide des règles et donner place à de l'innovation ? C'est probablement en gardant un cadre réglementaire plus léger et en responsabilisant plus les acteurs de la construction, en revalorisant leurs compétences techniques. Par exemple, comment faire pour que les normes suivent

LE VIEUX PROCESSUS SELON LEQUEL L'ARCHITECTE DÉSSEINE, L'INGÉNIEUR INSTRUIT ET L'ENTREPRISE FABRIQUE EST DÉSORMAIS BEAUCOUP PLUS RÉCURSIF.

les derniers développements des pièces métalliques imprimées sur des imprimantes 3D ? Cette nouvelle technique ouvre considérablement le champ des possibles, inimaginable il y a encore quelques années.

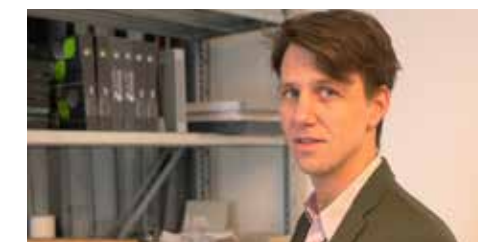
ON OBSERVE QUE CE SONT DÉSORMAIS LES UNIVERSITÉS QUI SONT À LA POINTE DE CES EXPÉRIMENTATIONS ARCHITECTURALES ET TECHNIQUES, (ETH, EPFL, ICD DE STUTTGART, ETC.). COMMENT ANALYSEZ-VOUS LE CONTEXTE FRANÇAIS ?

Les écoles d'architecture françaises sont très isolées de l'université, à la différence des pays que vous citez. Elles ont donc moins de moyens car elles ne peuvent pas mutualiser les compétences, les laboratoires de recherches, etc. Ni travailler en équipes pluridisciplinaires. Il y a ici une tradition École des beaux-arts *versus* École des ponts et chaussées, que l'on retrouve moins dans les autres pays européens. D'un côté, cela a permis historiquement une production théorique peut-être plus riche qu'ailleurs. D'un autre côté, les architectes souffrent peut-être d'un manque de culture constructive et les ingénieurs formés dans les écoles françaises ont moins de culture de *design*, au sens anglo-saxon du terme. Peut-être que

cette plateforme numérique sur laquelle nous travaillons actuellement permettra de mieux relier ces deux professions.

COMMENT RÉAGISSEZ-VOUS AUX CRITIQUES QUI CONSIDÈRENT CES RECHERCHES COMME UN NOUVEL AVATAR DU FÉTICHISME TECHNOLOGIQUE ?

Je pense que ce que font actuellement les GAFA (Google-Amazon-Facebook-Apple) avec nos données ne relève pas du fétichisme technologique. Ce sont des enjeux importants pour l'avenir. La place de l'humain dans cette révolution préoccupe toutes celles et ceux qui travaillent au quotidien sur le développement de la conception paramétrique. Par exemple, le Design Modeling Symposium est une manifestation biennale qui réunit des architectes, des ingénieurs et des développeurs qui travaillent sur ces questions. Il se tiendra cette année, du 16 au 20 septembre, à l'ENSA de Versailles. Le thème de cette session est « Humanizing Digital Reality » et interrogera la part de l'humain dans la modélisation numérique et les moyens de conserver le contrôle de nos actes et de notre environnement. Tous ceux qui s'interrogent sur le sujet y sont les bienvenus. ■



© Christian Breising

Klaas de Rycke est ingénieur-architecte diplômé de l'université de Gand et enseignant à l'ENSA de Versailles. Il dirige l'agence parisienne du bureau d'études allemand Bollinger + Grohmann, spécialisé dans les structures et les enveloppes. Régulièrement sollicités pour travailler sur des projets morphologiquement complexes, du Rolex Learning Center des architectes japonais SANAA à la piazza Garibaldi à Naples de Dominique Perrault, les outils de conception paramétrique occupent une place importante dans leur activité.

L'invention d'une tectonique numérique



© EPFL / IBOIS

Dans un article paru en 2012, intitulé « The Tectonics of Timber Architecture in The Digital Age¹ », Hani Buri et Yves Weinand, directeur du laboratoire IBOIS à l'EPFL, énoncent l'avènement d'un nouvel âge digital de la construction, après l'âge de l'artisanat et celui de l'industrie. Le titre fait

référence à la notion de tectonique, forgée à partir de la racine grecque *tekton*, étymologiquement « le charpentier ». Elle est un héritage de la théorie de l'architecture allemande du XIX^e siècle, développée par Karl Bötticher puis par Gottfried Semper². Leur quête était celle d'une ontologie de l'architecture qui ne

chercherait plus en dehors d'elle-même ses motifs d'expression. L'architecture ne devait plus être un simple support à une ornementation extérieure, mais exprimer ses dispositifs constructifs propres, être avant tout un « art de bâtir ». Ce concept de tectonique a été revisité en 1995 par l'historien et critique d'architecture américain Kenneth Frampton pour offrir une nouvelle lecture de l'architecture moderne, qu'il estimait être trop souvent analysée sous le seul angle de sa spatialité³. Si l'architecture moderne a revendiqué une disparition de l'ornementation surajoutée, ce crime dont parlait Adolf Loos, elle lui a en réalité proposée une nouvelle forme, dans l'expression du « détail constructif ». Selon Kenneth Frampton, la tectonique n'est pas qu'une simple affirmation de la construction, souvent pauvre et muette; c'est un art de la fabrication qui exploite le potentiel d'expression poétique, tactile et sensoriel de la matière, des outils et des métiers de sa mise en œuvre. L'ironie de l'histoire est que l'ouvrage de Kenneth Frampton *Studies in Tectonic Culture* polarisait à l'époque le débat universitaire américain en s'opposant à *City of Bits* de William J. Mitchell, paru la même année, et qui annonçait l'avènement d'une

Ci-dessus : l'exposition « Timber Project », EPFL, 2005 par Yves Weinand et Hani Buri. Sous forme de maquettes à grande échelle, les capacités morphologiques

et mécaniques de structures spatiales tressées, tissées ou plissées sont testées. Ici, *Tress Arc*, un prototype en panneaux de LVL, exploite l'élasticité du matériau.



nouvelle ère de l'architecture, numérique, virtuelle et dématérialisée. Considérant ce caractère virtuel et inconstructible des architectures non standard issues des premiers outils informatiques, Yves Weinand et Hani Buri se donnent l'objectif, non pas d'inventer un *set* de solutions d'ingénierie au service de ces formes étranges, mais de les revisiter entièrement à partir de leurs problématiques constructives. Jugeant intellectuellement insatisfaisantes les méthodes constructives qui procèdent par saucissonnage des formes complexes, ou encore par décomposition en facettes grossières, ils proposent une approche synthétique des questions morphologiques et des questions constructives. Leurs recherches visent à définir des modalités de discrétisation algorithmique de ces surfaces complexes, pour pouvoir les réaliser à partir

Ci-dessus, la *Look-Out Tower*. Les étudiants d'Yves Weinand discrétisent des surfaces complexes par de petits éléments répétitifs dont

l'assemblage formerait des structures spatiales ou « réciproques » : un état d'équilibre entre formes, schémas statiques et modalités constructives.

YVES WEINAND ET HANI BURI SE DONNENT L'OBJECTIF DE REVISITER CES FORMES ÉTRANGES À PARTIR DE LEURS PROBLÉMATIQUES CONSTRUCTIVES.

de petits éléments répétitifs dont l'assemblage formerait des structures spatiales ou « réciproques ». Ces structures présentent selon eux un état d'équilibre ou d'adéquation entre formes, schémas statiques et modalités constructives. L'enjeu est autant d'inventer des modes constructifs adaptés aux formes de l'architecture non standard que d'inventer les formes de celle-ci, à partir de modalités constructives nouvelles, dans une logique de consubstantialité.

« TIMBER PROJECT »

Yves Weinand et Hani Buri énoncent ainsi une tectonique de l'âge numérique (*tectonics of digital age*) comme objectif prioritaire de leurs recherches. L'exposition « Timber Project » rassemblait déjà en 2005 des expérimentations de modes constructifs originaux, imaginés à l'EPFL dans le cadre d'ateliers de projet d'architecture, en cycle de Master. « Timber Project » présente ainsi une synthèse de cinq années de travaux, entre 2000 et 2005, sous forme de maquettes à grande échelle, comme autant d'hypothèses exploratoires de ces nouvelles manières de construire. Ces pistes testent les capacités morphologiques et mécaniques de



© EPFL / IBOIS

structures spatiales tressées, tissées ou plissées. Les deux premières exploitent l'élasticité du matériau tandis que la troisième tire partie des panneaux de bois contrecollé très résistants que l'industrie sait désormais produire dans des dimensions architecturales. Étonnamment, ces modes constructifs procèdent par transferts vers l'architecture des savoirs et savoir-faire textiles (vannerie, tissage, tricot) et de l'origami japonais, tous issus de cultures artisanales, dont les artefacts portent en eux la mémoire du geste qui les a créés, qualité typiquement tectonique. L'IBOIS se propose de les réinterpréter avec les moyens numériques contemporains, à l'échelle de l'architecture. Les structures tressées telles que *Tress Arc* exploitent l'élasticité des grands panneaux de lamibois (LVL ou *Laminated Veneer Lumber* en anglais). Elles expérimentent la résistance des forces de friction ou de frottement, essentielles dans la vannerie, mais qui sont actuellement difficiles à prendre en compte dans les modes de calcul conventionnels. De même, le projet *Continuity Tridimensionality* est une structure spatiale qui évoque l'entrelacement du ruban de Möbius. Elle est faite d'une nappe

Ci-contre : la structure spatiale de *Continuity Tridimensionality* évoque l'entrelacement de plusieurs rubans de Möbius. Des études doctorales s'emploient à caractériser scientifiquement ces expérimentations.



Ci-contre : la chapelle Saint-Loup de Pompaples (2008) interroge les structures plissées. De très minces plaques de bois contrecollé (CLT) sont mises en œuvre à la manière des origamis japonais.

tressée de quatre boucles constituées de trois lames chacune, qui se croisent en un motif carré à son sommet. Ces recherches exploratoires et empiriques menées initialement dans un studio d'architecture sont aujourd'hui développées sous forme de thèses de doctorat dans le but de les caractériser scientifiquement.

LA CHAPELLE SAINT-LOUP

L'autre domaine de recherche porte sur les structures plissées, à la manière des origamis japonais. Elles sont faites de plaques de bois contrecollé (CLT ou *Cross Laminated Timber* en anglais) très minces en proportion de leur portée. La structure tire sa résistance des plis dont elle est formée. Le prototype de la chapelle Saint-Loup à Pompaples, dans le Jura suisse, réalisé en 2008 démontre la faisabilité de ce type d'approche. Il s'agit d'une petite structure plissée irrégulière dont le développé s'inscrit dans un plan rectangulaire. Poursuivant la référence aux origamis, les

deux cours de plis perpendiculaires permettent de décrire une nef intéressante, plutôt basse et large au niveau de l'entrée des fidèles et étroite et haute à l'autre extrémité, où est installé l'autel. Cette particularité est la conséquence directe d'un développé rectangulaire : plus les élévations sont hautes, plus le toit est étroit et vice versa. Les plis irréguliers rythment l'espace architectural et sa lumière naturelle, tout en définissant sa structure et son enveloppe.

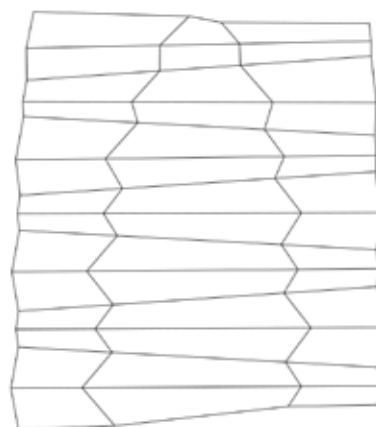
Cette construction est réalisée en panneaux de CLT, de 40 mm d'épaisseur pour les murs et 60 mm pour la toiture qui présente une portée maximale de 9 m. Son modèle informatique unique a servi à la génération de la forme, à son dimensionnement structurel et à la conception des assemblages. Puis il a été traduit en code d'usinage (*G-code*) pour la découpe sur une machine à commandes numériques. Les différents panneaux constituant chacune des faces de cette structure

plissée sont réalisés en panneaux de bois contrecollés, assemblés à coupe d'onglet selon les différents angles déterminés par les pliages. Toutefois, les assemblages y sont encore assurés par de fines platines métalliques continues, sur toute la longueur des plis. En revanche, les derniers travaux du laboratoire permettent désormais de s'affranchir de ces platines métalliques pour relier les panneaux entre eux.

LE PAVILLON DE MENDRISIO

En effet, l'IBOIS a présenté en 2013 un nouvel édifice démonstrateur sous la forme d'un pavillon exposé à l'école d'architecture de Mendrisio. Ce prototype explore les propriétés architecturales et techniques de structures plissées faites d'éléments courbes s'assemblant sur leurs arêtes cintrées, grâce à des découpes à queue d'aronde minutieusement adaptées à la complexité géométrique de la situation. Le pavillon de Mendrisio est un simple portique de 13,5 m de portée par 4 m de largeur pour 3 m de hauteur utile. Les panneaux de bois contrecollé de 77 mm qui le composent présentent tous le même rayon de courbure pour

La structure de la chapelle s'inscrit dans un plan rectangulaire et tire sa résistance des plis dont elle est formée. Les différentes faces sont liées par assemblage à coupe d'onglet, soutenus par de fines platines métalliques continues sur la longueur du pli. Les dernières recherches en laboratoire permettent désormais de s'affranchir de ces éléments.



des questions d'économie de réalisation à partir d'un moule unique. Le toit de ce portique est réalisé en trois parties : les deux panneaux courbes d'extrémités, convexes, s'assemblent avec le panneau central, concave. Les deux pignons présentent une courbure concave qui assure la stabilité de l'édifice dans toutes les directions. La double courbure inversée de la toiture offre une rigidité maximale au regard de sa flèche. Les panneaux de bois contrecollés ont été réalisés par l'entreprise allemande Merk. Cinq lits croisés de planches de 15,4 mm ont été collés successivement puis pressés pour former ces panneaux de 77 mm d'épaisseur. Le croisement des fibres du bois a garanti une excellente stabilité de la courbure après pression, sans élasticité résiduelle. Ces panneaux courbes ont ensuite été découpés et usinés sur un centre de taille à commandes numériques pour réaliser des découpes des liaisons à queue d'aronde. De la sorte, l'assemblage n'est plus un

tiers élément qui unit les deux premiers mais une singularité de la découpe de chaque panneau. Il offre la possibilité architecturale de lignes élégantes évoquant les savoir-faire de la menuiserie. Ces assemblages « intégraux » offrent aussi de bonnes caractéristiques mécaniques en répartissant les efforts sur toute la longueur de l'arête, tandis que les éléments métalliques ont tendance à concentrer les efforts sur des points particuliers très sollicités. D'autre part, les équerres métalliques utilisées lors de la construction de la chapelle Saint-Loup étaient inadaptées à une configuration de lignes d'arêtes courbes.

CECI NE TUERA PAS CELA

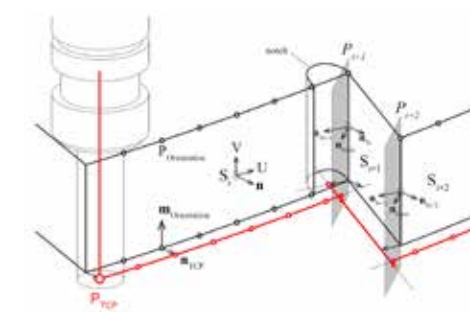
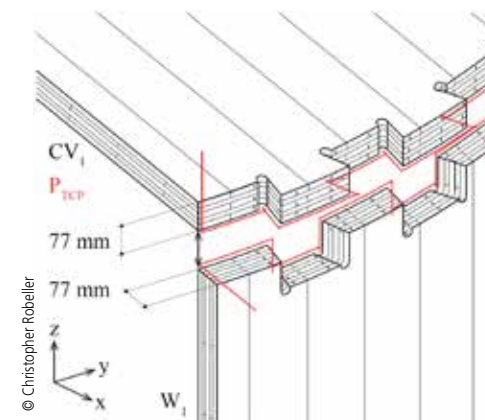
On peut toutefois douter que ces recherches témoignent de l'avènement d'un nouvel âge digital qui remplacerait l'âge industriel comme ce dernier aurait remplacé l'âge artisanal. Ces prototypes sont réalisés comme des pièces uniques sur des machines numériques, mais ils ex-

En 2013, le pavillon exposé à l'école d'architecture de Mendrisio met à l'épreuve des panneaux courbes en bois contrecollé de seulement 77 mm d'épaisseur. Les différentes faces, concaves ou convexes, s'assemblent sur des arêtes cintrées, grâce à des découpes à queues

d'aronde minutieusement ajustées et sans aucun connecteur métallique. Les croisements des fibres du bois, collé puis pressé, garantissent une excellente stabilité des courbures du pavillon et assurent l'équilibre de l'édifice dans toutes ses directions.

ploient des matériaux hautement industriels comme les panneaux de CLT ou de LVL. Les machines elles-mêmes, comme la plateforme numérique qui les exploite, sont les fruits des développements de l'industrie, dans une perspective d'amélioration de la productivité avant tout. Enfin, les modes constructifs textiles ou plissés expérimentés sont des transferts de savoirs et savoir-faire de domaines artisanaux. Alors, plutôt que d'y voir une nouvelle ère qui effacerait le passé, il est sans doute préférable d'interpréter cet âge digital comme une période de coexistence entre des régimes techniques différents, une période de nouvelles égalités, libérée de l'impératif de standardisation de l'industrie du XX^e siècle. ■

1. Hani Buri et Yves Weinand, « The Tectonics of Timber Architecture in The Digital Age », in Kaufmann H. et Nerdinger W., *Building with Timber, Paths into the Future*, éditions Prestel, Munich, 2012, pp. 56-63.
2. Gottfried Semper, *Du style et de l'architecture, écrits 1834-1869*, Éditions Parenthèses, Marseille, 2007.
3. Kenneth Frampton, *Studies in Tectonic Culture*, MIT Press, Cambridge, 1995.



Ci-contre : tracé de l'usinage des queues d'aronde sur fraiseuse CNC.

Ci-dessus : le pavillon en construction dans les ateliers Merk.

L'université comme milieu d'expérimentation



© Gramazio Kohler research, ETH Zurich

À l'instar des structures spatiales tridimensionnelles développées dans les années 1960 par Robert Le Ricolais à l'université de Pennsylvanie ou par Konrad Wachsmann au Chicago Institute of Design, l'architecture non standard 2.0 s'invente à l'université. Mais plus que

l'invention de formes exceptionnelles, le trait commun de ces laboratoires contemporains est certainement la recherche et le développement d'un *continuum* numérique, de la conception à la fabrication. Les équipes de recherche sont systématiquement pluridisciplinaires et associent



© Gramazio Kohler research, ETH Zurich

Ci-dessus et ci-contre : *Structural Oscillations*, mur en construction. Dans le laboratoire « Architektur und Digitale Fabrikation » à l'ETH Zurich, Fabio Gramazio

et Mathias Kohler usent du numérique jusque dans la réalisation des projets. La robotique industrielle sur bras articulé permet de reproduire les gestes d'un artisan.

l'architecture, les sciences de l'ingénieur, de l'informatique ou des matériaux, autour d'objets expérimentaux partagés. Il s'agit de petits pavillons ou simplement de sculptures-structures, aux formes étonnantes, souvent biomorphiques mais pas toujours, présentés *in fine* comme les démonstrateurs des connaissances nouvelles que les recherches ont créées.

GRAMAZIO ET KOHLER À L'ETH DE ZURICH

Les travaux de Fabio Gramazio et de Matthias Kohler à Zurich développent depuis près de dix ans la fabrication robotique appliquée à la construction d'édifices. Leur laboratoire *Architektur und Digitale Fabrikation* documente et expérimente une à une toutes les facettes de ces nouvelles possibilités. L'ouvrage *The Robotic Touch, How Robots Change Architecture*, publié en 2013, en dresse un inventaire détaillé. Les modes de fabrication expérimentés regroupent d'une part les outils de prototypage rapide comme les imprimantes 3D ou les fraiseuses CNC et d'autre part la robotique industrielle sur bras articulé capable de reproduire tous les gestes de l'artisan.



© Gramazio Kohler research, ETH Zurich

Le projet *Structural Oscillations* de 2008 met en œuvre une station de chantier robotique, installée dans un petit container transportable sur le lieu du chantier. Ce dispositif inaugure la possibilité d'une robotique foraine capable de construire des édifices en dehors du laboratoire. Le démonstrateur de cet outil est un mur de brique de 100 m de longueur, dont la double courbure oscille par rapport à ses axes verticaux et horizontaux, à la manière de la Cristo Obrero Iglesia d'Eladio Dieste. Cette forme, au-delà de témoigner de la dextérité du robot, confère au mur sa stabilité. Ce dispositif est réalisé par addition de briques standard et illustre la logique de discrétisation des formes complexes à partir de la répétition d'éléments simples. Un dispositif très similaire a été exposé à Orléans en 2013 pour l'exposition d'Archilab « Naturaliser l'architecture ». Cette fois-ci, les briques étaient mises en place une



© Gramazio Kohler research, ETH Zurich

LE TRAIT COMMUN DE CES LABORATOIRES CONTEMPORAINS

EST CERTAINEMENT LA RECHERCHE ET LE DÉVELOPPEMENT D'UN *CONTINUUM* NUMÉRIQUE, DE LA CONCEPTION À LA FABRICATION.

à une par une cohorte de drones. Le process constructif est aussi expérimenté en bois, à partir d'un robot à bras articulé, avec le *Sequential Wall* en 2009, sous différentes distributions algorithmiques des éléments constitutifs. Ce mur en bois deviendra une voûte en 2010 avec la *Sequential Structure*. Ces essais se poursuivent en 2013 avec *Rubble Aggregations*. Il s'agit d'une construction qui agrège intelligemment des roches irrégulières préalablement scannées en trois dimensions. Le programme informatique trouve ensuite la position idéale des roches les unes par rapport aux autres pour qu'elles s'assemblent de manière optimisée, inventant une sorte de stéréotomie aléatoire digitale. Ce que faisait sans doute déjà le paysan qui construisait un mur de pierres à joints secs pour délimiter son pré. Les outils robotiques expérimentent aussi la mise en œuvre des matières

molles, comme la mousse polyuréthane avec *The Foam*, présenté en 2008, dont les chercheurs tirent des formes alvéolaires économes de matière. À partir de 2012, le programme de recherche *Smart Dynamic Casting* poursuit ces essais avec l'extrusion du béton. Une série de poteaux torsés extrudés est ainsi produite, qui démontre la mise au point des outils de coulage robotique, comme du matériau lui-même dont la viscosité et le temps de séchage doivent être maîtrisés pour s'adapter au process d'un coulage lent continu.

ACHIM MENGES À L'UNIVERSITÉ DE STUTTGART

L'université de Stuttgart présente quant à elle chaque année, sous la forme d'un pavillon, les travaux communs de l'Institute of Computational Design (ICD) dirigé par l'architecte Achim Menges et de l'Institute for Building Structures and Structural Design (ITKE) dirigé par l'ingénieur Jan Knippers. Ils poursuivent à leur manière la tradition du « chef-d'œuvre », artefact d'exception qui conclut et synthétise les apprentissages, bien connu par les compagnons charpentiers.



© Gramazio Kohler research, ETH Zurich

Ci-contre, à gauche : en 2010, la voûte de la *Sequential Structure* est un nouvel exemple de discrétisation des formes complexes à partir d'unités simples, dont la répétition est cette fois mise en œuvre par un robot.

À droite : à partir de 2012, le programme *Smart Dynamic Casting* explore l'extrusion du béton. Les outils robotiques, comme les propriétés du matériau, doivent être maîtrisés pour s'adapter au process du coulage lent et continu de poteaux torsés.



© photos : ICD/ITKE Universität Stuttgart

Ci-contre : de la nature à la structure. Le *Research Pavilion* 2015-2016 d'Achim Menges s'inspire de la morphologie structurale d'un oursin plat. Architectes, ingénieurs et biologistes l'ont étudié pour élaborer une analogie constructive.

Le *Research Pavilion* 2015-2016 est une coque de 9 m de portée, discrétisée en une multitude de modules tridimensionnels ovoïdes, cousus entre eux. Cette architecture s'inspire de la structure des oursins plats de la famille des échinoïdes, dont le squelette est fait de petits éléments osseux, reliés entre eux par les ligaments fibreux qui lui confèrent sa souplesse. Une équipe scientifique formée d'architectes, d'ingénieurs et de biologistes s'est attachée à caractériser cette structure très particulière pour en comprendre la morphologie et le comportement. Elle l'a ensuite décrite sous forme d'algorithmes pour la modéliser en 3D. La forme continue mais non régulière qui en résulte est composée de 151 modules faits de fines plaques de contreplaqué, dont la forme cintrée est contrainte par une bande textile cousue robotiquement, aux trois extrémités. Chaque élément est à la fois rigide du fait de la contrainte donnée par la couture, et souple grâce à l'élasticité du matériau. Les modules ainsi préparés sont ensuite assemblés entre eux pour former la coque, à nouveau par une couture, manuelle cette fois-ci. Ces coutures répliquent la souplesse des connexions



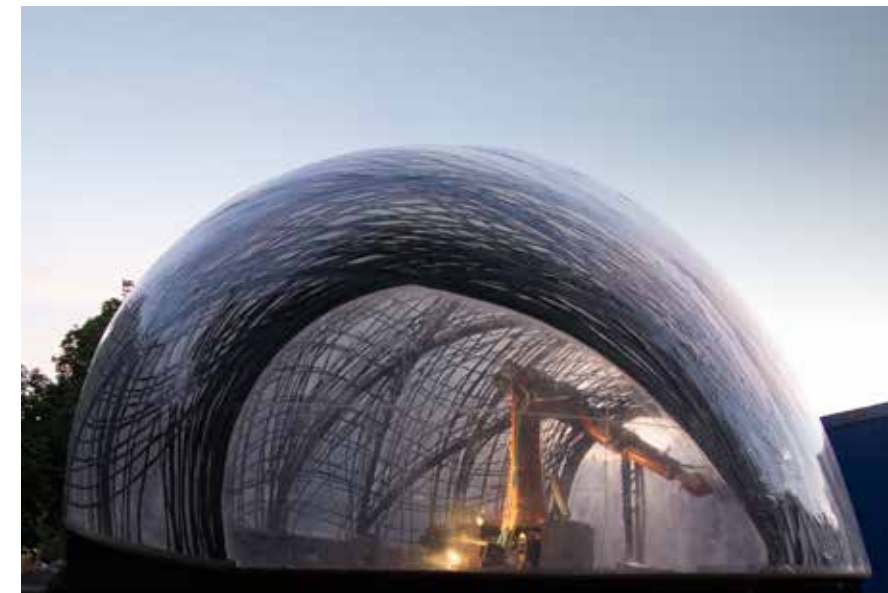
© ICD/ITKE Universität Stuttgart

fibreuses du squelette des échinoïdes. Les panneaux de contreplaqué qui devaient être extrêmement minces pour être cousus ont fait l'objet d'une fabrication spéciale à l'université, afin que les fibres du bois suivent exactement les lignes des efforts, selon la position du module dans la coque. De la sorte, il était possible d'en optimiser l'épaisseur. Il en résulte une structure très légère qui couvre 85 m² avec seulement 7,85 kg de matière par mètre carré. Le développement d'assemblages robotiques cousus comme la mise au point d'un contreplaqué spécifiquement adapté aux efforts de la structure nous indique la réciprocité complexe entre matériau, forme et fabrication robotique.

Le *Research Pavilion* 2014-2015 est quant à lui une coque textile constituée de filaments entrecroisés qui en décrivent, de manière aléatoire, les lignes géodésiques. Cet objet expérimental s'inspire du nid subaquatique d'une araignée d'eau (*agyronea aquatica*) dont la particularité est de former une bulle d'air sous-marine. À nouveau, une équipe d'architectes et de scientifiques a étudié le comportement de cette araignée durant la construction de

Cent cinquante et un modules reprennent l'articulation naturelle entre éléments osseux (surface) et ligament fibreux (interne). La structure externe du module « oursin »

est en fines plaques de contreplaqué. Sa forme cintrée est contrainte par une bande textile cousue robotiquement aux extrémités. Une couture manuelle assemble les modules entre eux.



© ICD/ITKE Universität Stuttgart



© photos : ICD/ITKE Universität Stuttgart

son nid et a analysé les règles de design décrites par les trajectoires de dépôt de son fluide organique. Ces observations ont ensuite été codées sous forme d'algorithmes, modélisées en 3D, puis exécutées par un robot. Pour sa construction, une membrane en ETFE est d'abord gonflée pour servir de coffrage perdu. Le robot prend alors place à l'intérieur de cette bulle sous pression. Son bras articulé va peu à peu reproduire la trajectoire programmée d'*agyronea aquatica* et dévider ainsi 45 km de fibres de carbone enduites de colle, à la vitesse de 0,6 m/min. En séchant, l'accumulation de fibres encroisées prend la forme d'une résille comprimée de 7 m de portée par 4 m de hauteur dans laquelle sont découpés, selon deux plans verticaux, les arcs d'entrée. Ce voile extrêmement mince qui ne consomme que 6,5 kg de matière au mètre carré

Colonne à gauche : la coque textile constituée de filaments entrecroisés du *Research Pavilion* 2014-2015 rappelle le nid subaquatique d'une araignée d'eau. Une membrane en ETFE sert de coffrage perdu contre lequel un bras articulé applique de la fibre carbone enduite de colle. Elle génère une résille dense et stable après séchage.

Colonne à droite : le *Meteorosensitive Pavilion* de 2011 fabrique une « architecture vivante » grâce à la dilatation hygrométrique du contreplaqué composite utilisé, différente selon les faces. En façade, des orifices inspirés de la pomme de pin s'ouvrent ou se ferment sous les variations de l'humidité.

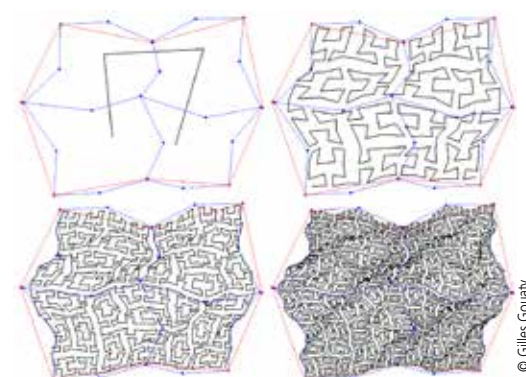


© photos : ICD/ITKE Universität Stuttgart



renouvelle à sa façon le *credo* de Robert Le Ricolais : « Portée infinie, poids nul », à l'heure de la raréfaction des ressources naturelles. Ces travaux sont en même temps ceux de la mise au point de matériaux innovants tels que la fibre de carbone enduite de colle ou celle du développement de la tête de robot capable d'en assurer le dévidement régulier. Mais ces recherches peuvent aussi conduire à des réflexions tournées vers la thermodynamique, comme avec le *Meteorosensitive Pavilion* conçu en 2011 et exposé à Orléans pour l'exposition Archilab 2013 « Naturaliser l'architecture ». Cet objet expérimental, fait de panneaux de contreplaqué composite, exploite le différentiel de dilatation hygrométrique des deux faces du matériau pour fabriquer une architecture « vivante » capable de s'ouvrir ou de se fermer au gré des conditions atmosphériques. S'inspirant de la pomme de pin qui s'ouvre ou se ferme selon le degré d'humidité de l'air, ces plaques de contreplaqué possèdent une face insensible à la vapeur d'eau, donc qui se dilatera très peu, tandis que l'autre, très sensible, se dilatera beaucoup. La différence de dilatation entre les

LE STUDIO D'ARCHITECTURE RÉUNIT AU MÊME ENDROIT, ET SUR LES MÊMES OBJETS EXPÉRIMENTAUX, LES APPROCHES DE LA RECHERCHE EXPLORATOIRE (CURIOSITY-DRIVEN) ET DE LA RECHERCHE APPLIQUÉE (PROBLEM-ORIENTED).



deux faces fera se courber la matière sous l'effet de l'humidité, ouvrant ou refermant des orifices dans l'enveloppe du pavillon. Cette recherche expérimente un dispositif intéressant de ventilation naturelle où le matériau lui-même est un capteur sensible à son environnement et peut réguler le confort intérieur d'une architecture, sans recourir à des équipements techniques consommateurs d'énergie.

YVES WEINAND À L'EPFL

Cette pluridisciplinarité de la recherche universitaire se retrouve aussi à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, dans les travaux récents du laboratoire de l'IBOIS, dirigé par Yves Weinand. Dans un court texte intitulé « The architecture studio as a model? », il énonce son ambition d'organiser son studio d'architecture à l'EPFL comme un lieu de recherche hybride pour favoriser des interactions fertiles entre les différentes disciplines concernées par l'architecture. Le studio de projet d'architecture n'y est plus pensé comme le lieu où se miment des pratiques professionnelles sous l'autorité d'un architecte enseignant, mais il réunit au même endroit, et sur les mêmes

objets expérimentaux, les approches de la recherche exploratoire (*curiosity-driven*) et de la recherche appliquée (*problem-oriented*). L'exposition « Timber Project », organisée en 2011, synthétisait les recherches exploratoires de nouveaux modes constructifs en bois, inspirés de la vannerie et de l'art japonais de l'origami.

Ces travaux, menés au sein du studio d'architecture durant les sept semestres que présentaient l'exposition, se poursuivent scientifiquement au sein du laboratoire de l'IBOIS, avec plusieurs thèses en cours ou soutenues. Leurs sujets portent autant sur le développement de ces modes constructifs innovants, leurs caractérisations mécaniques, que sur la mise au point des outils numériques nécessaires à leur conception et à leur réalisation.

En 2009, Ivo Stotz, architecte diplômé de l'EPFL, a soutenu « Iterative Geometric Design For Architecture¹ », suivi en 2010 par Gilles Gouaty, ingénieur informaticien INSA, avec une recherche de doctorat intitulée « Modélisation géométrique itérative sous contrainte² ». Ces deux recherches construisent une méthode numérique de discrétisation itérative des

surfaces complexes en s'inspirant du mode de génération des géométries fractales. Leur but est de développer des solutions techniques pour le dessin et la production de projets architecturaux complexes se basant sur des géométries non standard. Les deux thèses présentent une série de prototypes réalisés en bois, à grande échelle, au sein du laboratoire. Elles illustrent aussi l'intérêt de la réunion des compétences des départements d'architecture, de mathématiques, d'informatique et d'ingénierie civile.

Hani Buri architecte EPFL a soutenu en 2010 sa thèse « Origami – Folded Plate Structures³ », qui porte sur la mise au point de méthodes de modélisation numérique de structure plissées en vue de leur réalisation en panneaux de bois. Elle constitue une analyse architecturale, structurelle et mathématique des structures plissées. Ce travail est complété en 2015 par la thèse de Christopher Robeller architecte britannique, auteur de « Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures⁴ », qui élabore des assemblages bois-bois par découpe des bordures des panneaux, à la manière des assemblages à

Ci-dessus : recherches, au sein de l'IBOIS, sur des modalités de discrétisation de surfaces complexes à partir de géométrie fractales. La problématique est soulevée dans plusieurs thèses au sein du laboratoire.



queue d'aronde des menuisiers pour éviter le recours à des connecteurs métalliques rapportés. Ces assemblages sont étudiés en termes de géométrie, de mécanique et d'usinage robotique. À nouveau, une série de prototypes réalisée au laboratoire de l'IBOIS vient appuyer la démonstration. Ces technologies trouvent aussi des applications en situation réelle comme avec la chapelle Saint-Loup, livrée en 2008 ou plus récemment le théâtre de Vidy, au bord du lac Léman, dont l'inauguration est prévue en septembre 2017.

Les structures textiles font elles aussi l'objet de recherches approfondies. Markus Hudert architecte EPFL a soutenu en 2013 « Timberfabric : Applying Textile Assembly Principles for Wood Construction in Architecture⁵ ». Ce doctorat étudie les conditions de transfert des assemblages textiles sur les panneaux de bois minces ainsi que les différents types de canevas tridimensionnels adaptés à l'élasticité des panneaux de bois minces. Sina Nabaei en a ensuite étudié les caractéristiques mécaniques dans sa thèse « Mechanical Form-Finding Of Timber Fabric Structures⁶ » en 2015. Cette recherche visait à mettre au point un modèle numérique de

En haut, voûte en panneaux de bois selon un séquençage fractal des plis.

En bas, montage de la structure plissée du théâtre de Vidy, sans correcteurs métalliques



détermination morphologique (*form-finding*) des structures tissées qui intègre les caractéristiques élastiques des panneaux.

ET EN FRANCE ?

La France fait figure de parent pauvre de cette recherche orientée vers l'élaboration d'un *continuum* numérique. Toutefois, le laboratoire MAP-CRAI de l'ENSA de Nancy développe lui aussi, plus discrètement car avec beaucoup moins de moyens, des recherches similaires. Franck Besançon et Jean-Claude Bignon revendiquent ainsi un atavisme nancéen, depuis l'Union des



© photos : EPFL / BOIS

Arts et de l'Industrie de l'École de Nancy au début du XX^e siècle jusqu'au concept de création industrielle défendu par Jean Prouvé. Associés à l'ENSTIB d'Épinal, ils travaillent désormais sur l'élaboration d'une plateforme numérique continue de la conception à la fabrication dans la filière bois française et tentent d'associer les acteurs régionaux, universitaires et professionnels, à cette démarche. Deux expérimentations initialement présentées lors des Défis du Bois 2014, workshop annuel organisé par l'ENSA Nancy et l'ENSTIB, se sont depuis poursuivies sous

Ci-dessus : prototype de structure tissée. Au travers des multiples expérimentations menées avec ses étudiants, Yves Weinand ambitionne de faire de son studio

de projet à l'EPFL un lieu de recherche hybride favorisant des interactions fertiles entre les différentes disciplines concernées par l'architecture.

forme de recherche de doctorat sous la codirection Jean-Claude Bignon et Gilles Duchanois.

Oscar Gamez a soutenu une thèse sur la mise au point d'outils numériques de paramétrage et de fabrication robotique de structures alvéolaires aléatoires qui présentent l'avantage d'offrir un excellent rapport résistance/quantité de matière. Les panneaux de contreplaqué qui composent ces structures alvéolaires présentent des assemblages à queue d'aronde qui s'affranchissent des connecteurs métalliques.

Julien Meyer, qui soutiendra sa thèse prochainement, expérimente quant à lui l'efficacité des structures pliées non développables, donc non assimilables à des origamis, puisque ces derniers sont toujours, par définition, tirés d'un patron plan. En revanche, ces formes non développables présentent l'avantage mécanique d'être plus difficiles à déformer. La mise au point d'outils numériques qui constituent l'objet de ces recherches est élaborée à l'ENSA tandis que les prototypes destinés à tester leur bon fonctionnement sont réalisés en partenariat avec l'ENSTIB.



© Julien Meyer, MAP-CRAI, ENSA Nancy



© Oscar Gamez, MAP-CRAI, ENSA Nancy

LE LABORATOIRE MAP-CRAI DE L'ENSA DE NANCY TRAVAILLE SUR L'ÉLABORATION D'UNE PLATEFORME NUMÉRIQUE CONTINUE DE LA CONCEPTION À LA FABRICATION DANS LA FILIÈRE BOIS FRANÇAISE.

Pour décroquer l'organisation des écoles françaises et favoriser la pluridisciplinarité, le ministère de la Culture et de la Communication soutient le développement d'une chaire « bois » en Lorraine, dont la convention est en cours de rédaction. Elle réunira les compétences régionales, universitaires et professionnelles de la filière afin d'en fédérer les compétences, espérant ainsi soutenir et amplifier cette dynamique de recherche. Toutes ces architectures non standard ne sont donc que la partie émergée, médiatique et architecturale de recherches scientifiques et techniques. Elles donnent une indication assez précise de ce que peut être une « recherche par le projet » lorsque ce dernier est entendu comme un outil de connaissance et prend la forme d'un objet expérimental partagé entre plusieurs disciplines scientifiques et artistiques.

Il est néanmoins légitime de se demander si la production architecturale remarquable qui témoigne des recherches présentées n'est pas une forme d'autolégitimation et de valorisation d'ambitions technophiles. L'argument régulièrement avancé d'optimisation de la quantité de matière au service

En haut : prototype de structure pliée non développable. Au sein du MAP-CRAI de l'ENSA Nancy, Julien Meyer développe une thèse sur l'efficacité de ces structures,

particulièrement résistantes à la déformation.

En bas : prototype de structure alvéolaire présentée lors des Défis du Bois 2014 à Nancy. Oscar

d'une démarche écologique est bien tenu et fait fi de l'énergie grise consommée pour produire ces objets légers, comme des investissements importants qui, depuis plus de dix ans, n'ont pas vraiment permis de construire plus que de délicieux démonstrateurs un peu narcissiques, à l'exception notable des deux édifices réalisés par Yves Weinand qui nous indiquent les possibilités d'application dans le domaine des équipements. L'architecture y devient surtout une forme de représentation du savoir après des siècles de représentation du pouvoir, pour autant que ces nouveaux savoirs, centrés sur les outils numériques, ne soient pas simplement une nouvelle forme de pouvoir qui s'approprie les gestes artisanaux séculaires, non plus en les appauvrissant comme le faisait l'industrie du XX^e siècle, mais en leur substituant une dextérité robotique que seul un tout petit groupe élitiste, urbain et diplômé contrôlerait... ■

1. <http://ibois.epfl.ch/page-20496-en.html>, pages consultées le 9 juillet 2016.
2. *Ibidem.*
3. *Ibidem.*
4. *Ibidem.*
5. *Ibidem.*
6. *Ibidem.*

Gamez, également au MAP-CRAI, a soutenu une thèse sur la mise au point d'outils numériques de paramétrages et de fabrication robotiques de ce type de structures.

Armadillo Vault, un artisanat numérique ?



© photos : David Escobedo of the Escobedo group

Armadillo Vault est une voûte en pierre calcaire de forme parabolique. Présentée à la 15^e Biennale de Venise sous l'autorité

d'Alejandro Aravena, l'œuvre est le résultat d'un travail collaboratif entre le Block Research Group de l'ETH Zurich,

John Ochsendorf de la MIT, Matthew DeJong de l'université de Cambridge et l'entreprise texane Escobedo Group.

CETTE ŒUVRE EST LA PREMIÈRE DU GENRE À EXPÉRIMENTER NUMÉRIQUEMENT LES SAVOIRS DE LA STÉRÉOTOMIE, SOIT L'ART DU TAILLEUR DE PIERRE.

Armadillo Vault est une œuvre présentée lors de la 15^e biennale de Venise, dans le bâtiment de l'Arsenal. Elle a été conçue par le Block Research Group de l'ETH Zurich, John Ochsendorf, enseignant au MIT, et Matthew DeJong de l'université de Cambridge, en Grande-Bretagne. Cette équipe d'universitaires était associée à l'Escobedo Group, entreprise de taille de pierre basée au Texas qui s'est chargée de sa réalisation. Si les récents démonstrateurs d'architecture non standard d'Achim Menges à Stuttgart ou d'Yves Weinand à l'EPFL empruntaient plutôt aux savoirs de la tectonique, c'est-à-dire à l'art du charpentier, cette œuvre est la première du genre à expérimenter numériquement les savoirs de la stéréotomie, soit l'art du tailleur de pierre. Il s'agit d'une voûte en pierre calcaire, de forme parabolique, d'une portée libre de 18 m. Elle est constituée de 399 voussoirs d'épaisseur variable, de 15 cm aux appuis à 5 cm près de la clef. Sa finesse, son élancement général et sa complexité géométrique rappellent plus les coques ou voiles minces comprimés en béton



© photos : David Escobedo of the Escobedo group

armé, développés par l'ingénierie du XX^e siècle, de Franz Dischinger à Felix Candela, qu'elle n'évoque les ouvrages historiques de stéréotomie propres à la pierre. Elle semble flotter avec légèreté dans l'espace de l'Arsenal, entre quatre de ses piliers de briques, dont deux la traversent au droit d'*oculi* ménagés à cet effet. Cette structure repose sur trois appuis réalisés par des pièces métalliques mécanosoudées, reliées entre elles par des tirants. Une partie centrale de la voûte se retourne en trompe pour rejoindre le sol et constituer un quatrième appui salutaire.

Le nom *Armadillo* fait référence à un petit animal texan doté d'une carapace protectrice dont se sont inspirés les architectes pour concevoir leur voûte. En effet, cette dernière est discrétisée en une succession de voussoirs, de formes hexagonales et pentagonales irrégulières, qui fabriquent un motif rugueux semblable à la carapace de cet animal. Comme souvent dans ce type d'expérience, les formes de la nature influencent les auteurs, à la recherche d'un optimum structurel bio-

D'une portée libre de 18 m et constituée de 399 voussoirs d'épaisseur variable, *Armadillo Vault* semble flotter entre quatre piliers de briques

de l'Arsenal. Sa forme est aussi inspirée d'une forme de la nature, celle de la carapace protectrice d'un petit animal texan.

mimétique. Néanmoins, cette analogie ne vaut que pour l'aspect de l'extrados, dont les plans non rectifiés de chaque voussoir semblent pourtant s'entrechoquer dans un mouvement tellurique plutôt qu'ils n'évoquent une carapace animale articulée. L'intrados de la voûte est en revanche d'aspect tout à fait différent. Une texture ligneuse, striée, unifie l'ensemble des douelles jusqu'à effacer leur présence individuelle. Cet état de surface restitue la continuité d'un voile mince et donne à lire les lignes des efforts qui parcourent la voûte, de sa clef jusqu'à ses appuis.

Cette voûte a d'abord été conçue numériquement sur le logiciel RhinoVAULT, peu à peu optimisée pour ne subir que des efforts de compression, sans phénomènes parasites de flexion qui peuvent apparaître lorsque la courbure d'un arc n'est pas strictement parabolique. Ainsi, la garantie d'un édifice en pure compression permet d'obtenir une très grande finesse. Cette première phase de *form-finding* est une recherche de modélisation algorithmique qui vise un équilibre idéal entre désir de forme dans l'espace



Les blocs sont extraits dans une carrière calcaire de Quarry, au Texas, puis acheminés vers l'atelier d'Escobedo à Buda.

Les voussoirs sont taillés dans les blocs, par commandes numériques. Les pièces réservées à l'intrados sont



ensuite texturées. Une grille d'arcs croisés en contreplaqué constitue le coffrage de la voûte. Un premier montage à

blanc dans les ateliers texans a précédé l'installation à Venise.

CET ÉDIFICE A FINALEMENT L'ÂGE DE L'ARCHITECTURE QUAND ON SONGE AUX SUJETS QU'IL ABORDE, DEPUIS SA FAÇON DE SE DÉPLOYER DANS L'ESPACE JUSQU'AUX SAVOIRS DE GÉOMÉTRIE ET DE CONSTRUCTION QU'IL A NÉCESSITÉS.

et lois de la statique. Les outils numériques de calcul ont ensuite permis d'en dimensionner l'épaisseur variable, puis de discrétiser la surface en 399 voussoirs selon les règles de la stéréotomie classique. À ceci près que chaque voussoir est unique, selon la portion exacte de la surface à double courbure qu'il matérialise. Une longue nomenclature des éléments constitutifs est ensuite extraite du modèle numérique.

La phase de réalisation commence à Quarry au Texas dans une carrière de calcaire d'où sont extraits les blocs, acheminés ensuite à Buda, dans l'atelier d'Escobedo. Les voussoirs sont taillés dans les blocs, sur des scies et des fraiseuses à commandes numériques. Tandis que l'extrados est laissé plan, les douelles de l'intrados sont striées à la scie pour constituer l'effet de texture recherché. Ces stries sont ensuite délicatement brisées manuellement, leur conférant ainsi leur rugosité irrégulière.

En parallèle, le coffrage de la voûte est réalisé sous la forme d'une grille d'arcs croisés en contreplaqué qui réplique

exactement les doubles courbures de la voûte de pierre. Ce coffrage est à lui seul un chef-d'œuvre de charpenterie numérique. Une fois ce support fabriqué et installé, un premier montage à blanc est effectué dans l'atelier texan afin de vérifier que les voussoirs s'assemblent bien entre eux comme dans un jeu de construction et que l'édifice est stable. L'ensemble est alors démonté puis soigneusement colisé avant de prendre la mer en direction de Venise et d'être remonté dans l'Arsenal.

Cet étrange édifice est résolument moderne par les outils numériques dont il est issu, par sa finesse et son élancement. Il s'inscrit d'une certaine manière dans la tradition de l'art de l'ingénieur. Mais il évoque aussi quelque chose de plus profondément archaïque par l'usage de la pierre assemblée en voussoirs juste dégrossis, qui semblent s'entrechoquer dans un équilibre instable. Il nous laisse envisager que les nouveaux outils numériques puissent nous libérer de la standardisation que nous avait imposée l'industrie du XX^e siècle, pour redécou-

vrir un nouvel artisanat. Mais ses outils de conception ne sont plus ceux de l'art du trait et de l'épure; ceux de la taille ne sont plus la scie passe-partout, la pointerolle, la gouge ou le taillant. Ils sont remplacés par une plateforme numérique homogène de conception et de fabrication, capable de répliquer tous les gestes d'antan, avec un niveau de précision, de rapidité et de complexité inégalables manuellement.

Cet édifice a finalement l'âge de l'architecture quand on songe aux sujets qu'il aborde, depuis sa façon de se déployer dans l'espace jusqu'aux savoirs de géométrie et de construction qu'il a nécessités. Des travaux d'Achim Menges et Yves Weinand avec le bois jusqu'à cette œuvre de pierre de Philippe Block, cette nouvelle production architecturale est peut-être tournée vers un futur merveilleux, mais elle réveille aussi en nous le souvenir de Philibert Delorme, de ses voûtes charpentées en bois lamellé-claveté ou de ses trompes d'escaliers hélicoïdaux qui hantèrent pendant des siècles les leçons de stéréotomie. ■

© photos : David Escobedo of the Escobedo group