

Nature et architecture

De la morphogenèse du vivant à la création numérique

Université de Liège
Faculté d'Architecture
Année 2013/2014

Mémoire présenté par Adeline STALS
En vue de l'obtention du grade
de Master en Architecture

Promoteur – Mr Delvaux

Co-promotrice – Mme Jancart

« Ce qui est maintenant prouvé
ne fut jadis qu'imaginé. »

William Blake,
Le mariage du Ciel et de l'Enfer, 1790

Je remercie Mr Frédéric Delvaux et Mme Sylvie Jancart, promoteur et copromotrice, pour leur soutien, leur rigueur, la littérature proposée et leurs remarques constructives, apportés durant ces deux années de recherche et d'écriture. Leur complémentarité a été essentielle au développement de ce mémoire.

Je remercie également ma famille et mes amis d'avoir été présents pendant ces cinq années d'études et principalement dans ces moments de « charrette » mais aussi dans cette aventure qu'a été la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

11	INTRODUCTION
	Partie I
17	L'ARCHITECTURE ET L'ÉVOLUTION DE LA PENSÉE NATURALISTE
	Partie II
33	VERS L'ARCHITECTURE NON-STANDARD
35	1. Evolution des modèles structurels
41	2. La mathématisation de l'architecture
47	3. L'informatique au service de l'architecture
52	4. Le cas de Frei Otto et l'Institut pour les Structures Légères
52	Sa vie & son œuvre
60	L'Institut pour les Structures Légères
	Partie III
65	DE LA CONCEPTION À LA RÉALISATION
73	1. Outils de conception d'Otto à aujourd'hui
73	Dessin
74	Expérimentation physique
77	Photographie
79	Informatique
82	Biologie

2. Rupture entre forme et structure	85
La géométrie euclidienne comme premier langage unificateur	86
Le processus de formation comme procédé créatif	86
Relation entre forme et forces via le processus de formation	87
Dérive de l'informatique : rupture entre forme et structure	88
L'interdisciplinarité au cœur de la problématique	92
La morphologie structurale comme piste de réflexion	96
La nécessité de nouveaux outils morphologiques	97
La géométrie fractale comme « nouveau » processus de formation	98
Les pFormes comme nouvel outil de dessin	99
Une nouvelle famille de formes : les blobs	101
À la croisée de la biologie et de l'informatique	103
3. Déterminisme & modèles universels	106
CONCLUSION	113
LEXIQUE	121
BIBLIOGRAPHIE	131
TABLE DES ILLUSTRATIONS	137

MOTS CLEFS

Approche expérimentale
Architecture non-standard
Biomimétisme
Frei Otto
Modélisation numérique
Morphogenèse structurale
Multidisciplinarité
Processus de conception

INTRODUCTION

À l'heure où l'écologie est un sujet sur lequel la société prête de plus en plus d'attention, il semble primordial de trouver des alternatives à nos modes de vie et la démarche architecturale est sans aucun doute une piste majeure à explorer.

Dans cette optique, l'approche biomimétique développée depuis quelques années m'a interpellée. De plus, de tout temps et de façon plus ou moins consciente, les hommes se sont inspirés de la nature afin de faire progresser leurs modes de vie. L'évolution des technologies permet désormais d'analyser les systèmes naturels et aide l'architecte à en reproduire les principes structurels pour développer une architecture plus performante.

Ce mémoire était pour moi l'occasion d'entreprendre des recherches sur le biomimétisme mais je me suis rapidement aperçue que des dérives ont eu et ont toujours lieu à propos de ce sujet, que nombreux sont ceux qui pensent faire du « biomimétisme » profond - terme défini par Janine Benyus - alors qu'ils reproduisent les formes de la nature sans en comprendre les processus de formation.

C'est au cours de mes différentes lectures que Frei Otto a engendré un déclic dans mes recherches. Cet architecte allemand s'est penché sur une démarche similaire pendant près de quarante ans. Ainsi, dans son Institut des Structures Légères à Stuttgart, il s'est intéressé à la compréhension des fondements des phénomènes naturels qui lui permettrait d'établir des méthodes d'optimisation des structures. C'est par l'expérimentation - l'informatique ne permettant pas encore la modélisation - qu'Otto a affiné sa compréhension de la physique, tout comme l'avait fait bien avant lui Antoni Gaudi avec l'expérience de la chaînette, qui aboutit à la découverte des caténaies. L'objectif poursuivi était d'arriver à une compréhension mutuelle de la biologie, de la technique et de l'architecture. Cette quête est encore à l'ordre du jour.

Le travail que je propose n'a pas la prétention de couvrir l'ensemble des problématiques qui se rapporte à la relation entre structure et forme, mais il s'articule autour d'une interrogation : comment concevoir des structures optimisées, liées à des choix délibérés ? En d'autres termes, pourquoi le fait de se référer à la nature peut être intéressant

pour concevoir un projet rationnel, comment l'utilisation des mathématiques et de l'informatique peut interagir dans la phase de conception tout en laissant au concepteur la liberté de son degré de créativité.

Ce travail se compose de trois grandes parties : une première partie rappelant les fondements de la pensée naturaliste qui situe le travail dans son contexte architectural, allant de Léonard de Vinci à Frank Gehry principalement. Nous y aborderons essentiellement la théorie des transformations de d'Arcy Thompson. Il est l'un des premiers qui a étudié les processus spontanés de création de formes et a ainsi expliqué la morphogenèse du vivant, c'est-à-dire la filiation des espèces. Frei Otto poursuivra ces recherches près de cent ans plus tard. Nous évoquerons également la morphologie introduite pour la première fois par Robert Le Ricolais dans la conception architecturale.

Une seconde partie développera la question du passage entre le caractère traditionnel et mystique des structures à leur rationalité et optimisation. Ceci étant dû à l'avancée des connaissances mathématiques, nous nous y attarderons pour comprendre l'apport de celles-ci en architecture. Ensuite, nous établirons le rôle de l'informatique, évolution technique qui n'aurait pu être possible sans les connaissances mathématiques actuelles. Nous découvrirons la position qu'occupe cette technologie dans les bureaux d'architecture, les progrès en matière d'efficacité, ainsi que les innovations formelles qu'elle a permis. Pour poursuivre, nous partirons à la découverte de l'œuvre de Frei Otto, cet architecte ayant étudié la biologie pour concevoir autrement et nous verrons pourquoi il est devenu la référence en matière de structures légères et plus précisément de toiles tendues.

La troisième partie du travail traitera des différentes possibilités offertes aux créateurs pour les aider dans le processus de conception et en particulier celles utilisées par Otto. En effet, l'évolution des technologies et principalement de l'informatique, a relégué tout un temps au second rang, les principes de création d'antan, mais à l'heure actuelle, l'approche semble osciller entre les deux tendances. L'informatique, outil indéniablement inéluctable au XXI^e siècle, a permis de produire de nouvelles formes et d'en comprendre

bien d'autres. Il faut effectivement savoir qu'à une époque, le savoir expérimental a servi à réaliser des constructions rationnelles sans en comprendre les fondements mathématiques. De nos jours, ce sont ces incompréhensions qui prennent tout leur sens. Néanmoins, un pan entier de ce savoir s'est perdu dans la simplification des interfaces de logiciel et certains concepteurs utilisent désormais l'outil numérique sans comprendre le fondement des manipulations qu'ils opèrent. L'architecte deviendra-t-il une sorte de « designer » utilisant les performances informatiques et déléguant aux ordinateurs une part croissante de sa démarche créatrice ? Nous le découvrirons.

Nous développerons alors la rupture entre forme et structure qui s'opère dans le processus architectural actuel et qui va de pair avec la multidisciplinarité de la démarche. Nous nous attacherons à dégager ensuite les raisons de ce phénomène, le rôle que l'informatique y tient puis nous tenterons de comprendre à la lumière des recherches de Marine Bagneris, l'outil morphologique que sont les pFormes et qui favorise la continuité du processus architectural, de la conception à la réalisation, c'est-à-dire entre tous les intervenants du projet.

Pour clore ce sujet, nous exposerons plusieurs projets récents présentés au colloque d'ArchiLab fin 2013, attestant que la triade biologie, informatique, mathématique est capable d'engendrer des innovations architecturales constructives. Nous y rencontrerons des architectes maîtrisant des savoirs biologiques et techniques, comme le comportement hygroscopique et anisotropique du bois ou la manière de tisser des vers à soie, afin de faire fusionner biologie et informatique pour concevoir autrement.

Pour terminer ce travail, la réflexion s'orientera vers ces similitudes entre évolution naturelle et réflexion humaine qui aboutissent à des résultats semblables. On peut en effet se demander pourquoi les surfaces minimales sont notamment présentes dans les structures naturelles mais également obtenues par Frei Otto à la suite des recherches qu'il a menées ? Comment se forment et sont transmises les lois biologiques qui animent le vivant ? Nous tenterons d'y trouver des explications.

Partie I
L'ARCHITECTURE ET L'ÉVOLUTION
DE LA PENSÉE NATURALISTE

Depuis toujours, les hommes, intentionnellement ou non, se sont inspirés de la nature pour les aider dans leur façon de construire et d'habiter, en commençant par la cabane de l'Abbé Laugier qui décrit l'observation d'un arbre pour concevoir le premier modèle architectural d'abri primitif et démontrant l'idée des ordres chez les Grecs, puis, en passant par toute l'évolution des tentes - des tipis indiens et yourtes aux toiles tendues de Frei Otto. Nous le constatons donc, le biomimétisme profond et parfois plus superficiel, a toujours été une source d'inspiration importante pour les êtres humains.

Durant l'histoire de l'art et de l'architecture, plusieurs courants vont s'inspirer de manière plus ou moins importante de la nature. Jusqu'à l'Art Nouveau et y compris ce courant, on peut dire que la représentation de celle-ci sert essentiellement de décoration même si une dimension architectonique va émerger progressivement. L'imitation y est purement esthétique. Simultanément au démarrage de la Première Guerre mondiale, se dessine un détachement par rapport à cette approche pour laisser place à des mouvements plus géométriques comme le Bauhaus.

Ensuite, apparaissent des réalisations d'architectes comme Antoni Gaudí, qui vont au-delà de l'imitation. Son approche est basée sur l'observation de l'environnement, à l'image de Léonard de Vinci près de trois cents ans auparavant. La quête de Gaudí sera d'unir forme, espace et fonction pour former un ensemble - recherche encore au cœur des débats actuels. Il croit effectivement que les différentes parties d'un ouvrage ne sont pas la juxtaposition d'éléments autonomes.

À côté des deux pionniers de l'architecture organique que sont Gaudí et Wright, il faut mentionner Louis Henri Sullivan et Rudolf Steiner. Ces deux derniers cherchent à travers leur architecture, non pas un style uniforme, mais un processus de création¹. Dans sa célèbre phrase « Form follows function », Sullivan instaure un lien de dépendance entre la forme et la fonction pour former un ensemble cohérent. La forme, en dépendant de



Fig. 1 - Cabane de l'Abbé Laugier, 1755

¹ THEISSEN, Jean-Jacques. *Architecture bio-inspirée : la vie au service d'un développement durable : à la découverte des modèles biophiles et biomimétiques*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 2011, p. 94

la fonction, trouve sa condition d'existence. C'est ce principe générateur des formes naturelles que Sullivan instaure pour la première fois au niveau de la conception architecturale. Globalement, la quête de l'architecture organique n'est pas un style uniforme mais une stratégie de création proche des processus naturels.

Passant de l'imitation esthétique au processus de création, les technologies du XXI^e siècle vont permettre de s'approcher de l'imitation des structures et des matériaux naturels.

Cependant, c'est principalement sur l'apparence extérieure des organismes vivants que l'humain se calquera. Ce rapport aux formes naturelles commence à être théorisé dès le XVI^e siècle, quand on s'interroge sur la pertinence à reproduire la nature. Deux positions se sont démarquées et ont articulé nos modes de pensée et en particulier le milieu artistique. D'une part, le courant aristotélien, qui considère que la biologie permet de développer l'ingéniosité de l'homme dans le but d'être l'égal de la nature créatrice et d'autre part, la tradition platonicienne qui considère les inventions de l'homme comme supérieures à celles de la nature.

Dans ces deux cas, la nature apparaît comme un outil au service des finalités humaines. La révolution industrielle au XIX^e siècle amplifia cette différence ; l'engouement pour l'intelligence humaine triomphant progressivement de la passion pour la nature, même si l'industrie tirera certaines inventions du vivant, comme les ailes des avions imitant celles des oiseaux. À cette époque, l'architecture est livrée à la technicité. En opposition à la pensée naturaliste, la vision machiniste identifie chaque partie l'une par rapport à l'autre. Cette tendance est observable dans la démarche de Le Corbusier notamment, dans laquelle l'esthétique de la machine et les vertus de la standardisation sont célébrées.

Toutefois, à l'heure où la raréfaction du pétrole engendre une hausse conséquente de son prix et provoque une prise de conscience de la non-durabilité des ressources terrestres, des chercheurs se tournent vers les écosystèmes naturels durables et économes.

Entre un mode de vie basé sur la consommation, entraînant un épuisement extrême des ressources et une nature qui produit en cycle fermé, les scientifiques se questionnent de la sorte : « Peut-on continuer sur le mode à la fois intensif et extensif adopté par les hommes, ou doit-on renouer avec l'imitation de la nature et tirer des leçons de son fonctionnement local, fondé sur le recyclage ?² »

Dans les années 70 et 80, une vague de modèles placés sous le terme de modèles « bio-inspirés ou bioniques » s'est amorcée. Ces termes ont été inventés dans les années 50 pour décrire l'intégration de la biologie et de la technologie. Durant cette période, une série de structures emblématiques telles que le stade olympique de Munich de Frei Otto ont été construites. Les architectes et ingénieurs de l'époque tentaient déjà d'extraire des principes de la nature et de les transférer dans des applications architecturales.

Cette démarche initia le biomimétisme, notion inventée par l'américaine Janine Benyus et traduit du terme « biomimicry ». Il peut être défini comme « l'art de s'inspirer de la nature pour innover », mais aussi comme une manière de maintenir un équilibre présent dans la nature qui tend à disparaître suite aux multiples interventions de l'homme. En effet, des millions d'espèces ont évolué pendant près de 3,8 milliards d'années et ont ainsi accumulé des savoir-faire dont celui-ci s'inspire pour trouver des solutions soutenables à son mode de vie.

En 2007, la guilda du biomimétisme définit trois niveaux de démarche biomimétique: la forme, le processus, les écosystèmes.

Le premier niveau de réflexion se réfère à un animal ou une plante spécifique et imite l'organisme dans son ensemble. Le second niveau imite le comportement d'un organisme et inclut la façon dont celui-ci interagit avec son contexte. Enfin, le troisième niveau est l'imitation des écosystèmes et les principes généraux qui leur permettent de

2 CREISER, Charlotte. *Le Biomimétisme est-il l'avenir du développement durable ?* Pour la Solidarité, 2008, p. 4

fonctionner avec succès. L'écosystème est le niveau étudié en profondeur car il peut servir de guide à une approche de conception durable³.

Michael Pawlyn, architecte, pense également que la nature a des solutions à bon nombre de nos problèmes tels que la production d'énergie, la production d'eau douce, la fabrication de matériaux à faible empreinte écologique. Le but est donc de transcender les formes naturelles et tenter de comprendre les principes qui soutiennent ces formes et systèmes. C'est ce qui est appelé couramment le biomimétisme comportemental. Pawlyn, tout comme le pense Otto, précise que le biomimétisme ne produit pas automatiquement une architecture de qualité. Il ne faut donc pas uniquement prendre en compte la dimension scientifique car l'architecture comprend également une part de sensibilité.

Frei Otto, architecte allemand, précise son point de vue par rapport au biomimétisme. L'imitation directe de la nature animée pour la construction d'ouvrages est une voie erronée car les principes utilisés en architecture, tels que ceux des structures pneumatiques, sont similaires à ceux de la nature mais non identiques. Imiter la nature est difficile car elle est très complexe. Il n'empêche que s'y référer permet d'ouvrir des pistes à de nouvelles techniques.

« The search for differences or fundamental contrasts between the phenomena of organic and inorganic, of animate and inanimate things, has occupied many men's minds, while the search for community of principles or essential similitudes has been pursued by few.⁴ » D'Arcy W. Thompson

L'architecture primitive était une architecture de la nécessité. L'architecture minimale primitive peut être à la fois structure et ornement. Frei Otto considère que la décoration n'a de sens que si elle est essentielle. Une « belle » architecture n'est pas nécessairement « bonne ». L'idéal architectural est éthique quand il est aussi esthétique mais les ouvrages qui permettent d'atteindre cet idéal se

3 STOUFFS, Rudi ; SARIYILDIZ, Sevil. *eCAADe 2013 – Computation and Performance*. S.l. : Delft University of Technology, 2013, p. 540

4 SONGEL, Juan Maria. *A conversation with Frei Otto*. New York: Princeton Architectural Press, p. 88

font rares. Les bâtiments sont un exercice de pouvoir, même si nous n'en avons pas l'intention, parce que nous pouvons difficilement faire autrement dans la société actuelle. Le contraste entre l'architecture et la nature devient alors de plus en plus important. De plus, nous avons trop de bâtiments devenus inutiles et pourtant nous avons toujours besoin d'en construire de nouveaux. Des milliers d'espèces de plantes et d'animaux cohabitent avec les êtres humains d'une nouvelle manière dans ce système, l'espèce dominante étant l'homo sapiens.

L'homme a majoritairement appris de ses parents et des modèles fabriqués par ses congénères, mais il a rarement imité des objets naturels hormis comme motifs artistiques. Cela étant, il a fabriqué plus de matériaux différents que ceux employés par la nature. Ainsi, il peut construire et se déplacer plus rapidement que les éléments vivants. Avec les moyens techniques et artistiques à sa disposition, il est capable, comme aucune créature vivante, de développer d'innombrables nouveaux objets. Nous avons déjà pris l'habitude d'appeler certaines constructions ressources naturelles, biologiques ou même écologiques mais ceci est considéré comme erroné pour certains dont Frei Otto. Le niveau élevé de la technologie et de la science engendre plus que jamais une compréhension plus profonde de la nature ; ceci permet d'atténuer l'absurdité de nombreuses technologies et de leurs conséquences mais pas pour autant de devenir des constructions écologiques.

Frei Otto considère qu'il est temps d'exiger des bâtiments plus légers, plus économes en énergie, plus mobiles et plus adaptables, des bâtiments plus naturels, sans négliger pour autant la demande de sécurité. Il poursuit cette quête dans le développement des constructions légères : tentes, auvents, membranes gonflables.

Un passage obligé dans mes lectures fut celui de la théorie établie par D'Arcy Thompson, ce grand intellectuel à la fois biologiste, mathématicien, physicien, traducteur d'Aristote, mais aussi auteur de plus de trois cents articles et essais. En effet, cet Ecossais né en 1860, a fondé une théorie selon laquelle les formes ne seraient dues qu'à des déformations purement physiques. Cette démarche a été et est toujours reprise par certains architectes qui tentent d'établir des

formes rationnelles en se basant sur les pressions naturelles : tension superficielle, force de gravité. Thompson établit donc un rapport forme/forces basé uniquement sur de l'observation.

« Il n'est pas un animal sur cette terre qui ne soit conçu proportionnellement à cette force de gravité. Si la force de gravité venait à doubler, notre bipédie serait totalement inadaptée, et la plupart des animaux terrestres prendraient la forme de sauriens courts sur pattes ou encore de serpents.⁵ »
Sir Charles Bell

Il veut démontrer que nombreuses sont les structures de tailles variables qui peuvent être expliquées uniquement en s'appuyant sur les lois physiques. Cette thèse, s'opposant aux notions biologiques de son époque, suggère qu'il est donc inutile de penser que les mécanismes de la sélection naturelle et de l'hérédité génétique jouent un rôle dans le processus d'adaptation des formes à leur environnement.

D'Arcy Thompson considère en effet qu'à chaque génération, tout organisme est soumis à un ensemble de forces physiques et à des règles mathématiques qui le conduisent à acquérir sa forme. Les différences autour d'un modèle - la variété des squelettes - ne sont donc qu'anecdotiques : c'est l'essence même de sa « théorie des transformations » appliquée à la biologie, qui a pour ambition de prouver que par une suite de transformations géométriques, on peut passer de forme en forme, pourvu qu'elles aient un lien de parenté suffisant. D'Arcy Thompson s'éloigne de la théorie darwinienne par le fait qu'il considère comme accessoire la diversité des formes existantes alors que Darwin y voit le résultat et le moteur de la sélection naturelle.

Fig. 2 - Lien entre les crânes d'un humain, d'un chimpanzé et d'un babouin par simples transformations géométriques de la trame originale.

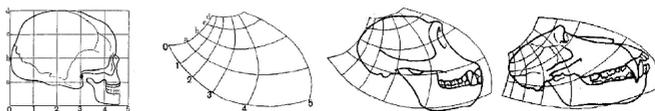


Fig. 2 - Lien entre le crâne d'un chimpanzé et d'un babouin

5 THOMPSON, D'Arcy. *Forme et croissance*. Paris : Seuil : CNRS, 1994 (1917), p. 56

D'une part, une surface est une forme fluctuante avec un contour, des limites, et d'autre part, c'est la façon dont elle s'organise, s'agence, qui la structure. Elle peut être variable mais aussi figée, représentant un modèle fixe. Elle peut aussi être le fruit d'une intention purement esthétique ou être la résultante des lois physico-chimiques auxquelles elle est soumise.

D'Arcy Thompson expose le principe selon lequel les éléments naturels s'expansent et se déforment sur la base d'un modèle précis. Ils deviennent des résultantes des mathématiques, étudiés et visualisés à l'aide des instruments de l'analyse géométrique.

Ce scientifique ne cherche pas à examiner une seule forme mais tente de trouver une règle générale applicable au monde organique et inorganique, selon laquelle les événements se répètent. L'intérêt de cette recherche est également de découvrir si, dans les mêmes conditions, un événement ou une forme identique se seraient révélés et dans le cas où les conditions varieraient, quelles en seraient les conséquences.

« Nous savions déjà, au moins depuis D'Arcy Thompson à la lumière de son célèbre ouvrage *Forme et Croissance*, que la profonde compréhension des formes exige une compréhension des processus de génération. » Jean-Marie Delarue, IL 27

On retrouve dans la théorie de D'Arcy Thompson des applications à l'ingénierie. Il étudie aussi l'efficacité de certaines morphologies par rapport aux ouvrages d'ingénierie. Il démontre l'analogie entre l'os métacarpe du vautour et la poutre composée de Warren ou les similitudes entre les lignes de tension dans la tête d'un fémur humain et dans celle d'une grue. Il étudie les principes généraux du design structurel et analyse les performances techniques, l'économie de matière. Tous ces principes sont notamment applicables dans les ouvrages d'art comme les ponts.

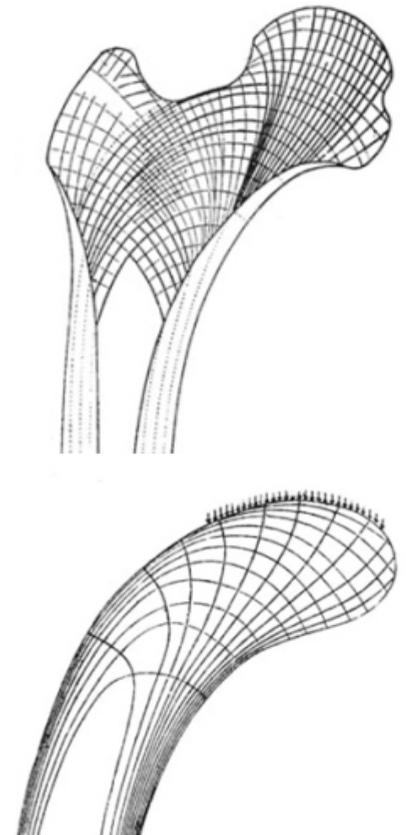


Fig. 3 - Coupe dans une tête de fémur et d'une tête de grue

« Pendant les XIX^e et XX^e siècles, l'ingénieur qui a fait de son mieux pour concevoir des poutres renforcées ou suspendues, a constaté que l'on avait, pour ainsi dire, prévu certaines de ses meilleures idées il y a longtemps par les structures osseuses de gigantesques reptiles et de grands mammifères.⁶ »
W. D'Arcy Thompson

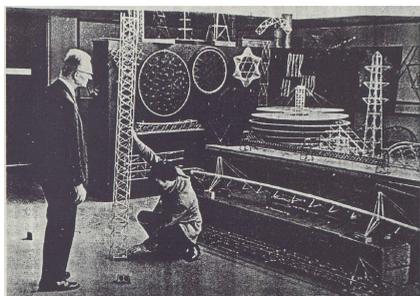


Fig. 4 - Le Ricolais dans son atelier de recherche à l'Université de Pennsylvanie

Dans cette même mesure, Robert Le Ricolais considère que la structure n'est pas seulement le système porteur mais la raison d'être de l'architecture, pouvant acquérir, au-delà de sa matérialité, un caractère poétique. Cet homme qui n'est ni architecte, ni ingénieur, ni mathématicien, s'est intéressé aux structures dès 1931 et profitera des reconstructions d'après-guerre, tout comme l'a fait Otto, pour concrétiser ses recherches et expérimenter des structures légères, modulaires, et également industrialisables. Le Ricolais partira aux Etats-Unis où il étudiera les surfaces à double courbure à l'aide de films de savon et les structures tendues. Ses recherches, à l'image de celles d'Otto, s'inspirent de l'observation de la nature. Le Ricolais dit ceci : « Il me semble que l'homme, que les objets ou structures naturelles n'étonnent pas, devrait se consacrer à toute autre chose que l'étude des structures. C'est un objet de surprise pour moi de voir les milliards de dollars sacrifiés dans des aventures planétaires, alors que notre ignorance est si grande de ce qui se passe ici-bas.⁷ »

Le Ricolais fondait sa démarche sur l'intuition : « Je procède expérimentalement par manipulations. Ce n'est jamais un calcul préétabli. Je ne suis pas un imaginaire. Il me faut avancer à petits pas, plaçant là un élément, ici un autre. Il me faut toucher et travailler de mes mains.⁸ » Ce chercheur expérimentait ses idées à l'aide de modèles physiques afin de trouver des procédés qui permettent de résoudre plusieurs problématiques de même ordre et non des solutions uniques. C'est le processus qui l'intéresse et non la réponse finale. Nous y reviendrons par la suite dans ce travail et nous découvrirons également l'importance qu'a pu et que peut encore avoir l'expérimentation. En effet, nombreux sont les architectes comme

6 PORTOGHESI, Paolo. *Nature and Architecture*. Milan : Skira, 2000, p. 152 (traduction personnelle)

7 SCHIMMERLING, André (sous la direction de). 1994. Op cit., p. 26

8 Ibidem, p. 10

Nervi, Otto, Le Ricolais, qui ont cette volonté de se rapprocher de la matière, de la visualiser et de la palper. Cette méthodologie sera très importante notamment chez les structuralistes pour confronter les recherches structurales au réel. On peut également affirmer que cette tendance a ouvert la voie au « material-based design » dont la méthodologie est de s'appuyer sur les caractéristiques des matériaux pour définir la forme et non le contraire. Nous en verrons des exemples à la fin de ce travail.

Dans le travail de Le Ricolais, les notions de continuité et de coupure, prirent le dessus sur les théories émises sur le « plein et le vide » en vogue à son époque. En effet, il s'intéresse aux lois de partition de l'espace mais également à celles qui régissent les phénomènes de forme et de force. Le Ricolais est reconnu pour avoir introduit la morphologie comme science de la conception architecturale⁹. Ces recherches sont encore à l'ordre du jour du XXI^e siècle. De plus, Le Ricolais évoque déjà à l'époque un problème bien actuel : il base son enseignement sur la réalisation de modèles physiques car pour lui, faire c'est comprendre et il laisse le pan de la théorie aux ingénieurs. Néanmoins c'est un acte assumé, considérant que ces deux études s'entremêlent. Nous illustrerons ce propos à travers l'œuvre de Frei Otto ayant mis en place un groupe de travail multidisciplinaire. C'est également ce qui s'exerce désormais dans la pratique professionnelle et de laquelle découleront plusieurs problèmes liés à la nécessité d'interdisciplinarité pour mener à bien un projet. Nous en reparlerons mais voici déjà une réflexion menée par Viollet-Le Duc en 1864 : « Que les ingénieurs prennent un peu de nos connaissances et de notre amour de la forme en tant que cet amour soit raisonné et ne se pare pas seulement du vain nom de sentiment, ou que les architectes pénètrent dans les études scientifiques, dans les méthodes pratiques des ingénieurs, que les uns et les autres arrivent ainsi à réunir leurs facultés, leur savoir, leurs moyens, et à composer ainsi réellement l'art de notre temps, je n'y vois qu'un avantage pour le public, un honneur pour notre époque.¹⁰ »

9 Ibidem, p. 11

10 MIMRAM, Marc. *Structures et formes – Etude appliquée à l'œuvre de Robert Le Ricolais*. Paris : Dunod, 1983, p. 108



Fig. 5 - Casa Batlló, A. Gaudí, Barcelone, Espagne, 1904-1906

Ce rapport forme/forces naturelles a été pris en compte inconsciemment puis consciemment par plusieurs architectes. On peut citer notamment Antoni Gaudí, Frei Otto, Heinz Isler. En effet, la recherche de rationalité a souvent fait l'objet de démarches expérimentales et scientifiques. Gaudí avait déclaré, lorsqu'il s'inspira de la forme des os pour réaliser la Casa Batlló, que l'originalité n'était qu'un retour aux origines. En effet, nous savons désormais que les trabécules formant les os se positionnent et repositionnent continuellement en fonction des forces qui s'y exercent, à l'image de ce qui est réalisé avec les fibres métalliques disposées dans le béton BEFUP au XXI^e siècle.

L'étude des mouvements avant-gardistes ne peut être menée sans parallèle avec les développements des pensées scientifiques et des moyens techniques. Les idées portées par les cubistes, les surréalistes et tous ceux qui les ont suivis dans leur quête de la suppression des codes traditionnels de l'esthétisme, comme l'avait voulu Gaudí en se détachant de l'utilisation d'arcs brisés et d'arcs en plein cintre, sont un écho constant aux progrès techniques des XIX^e et XX^e siècles. Dans un premier temps, ces recherches découlent d'une volonté de créer des spatialités inédites et non de démontrer de nouvelles connaissances mathématiques, comme c'est le cas pour la Sagrada Família de Gaudí. Cette volonté de rupture avec les modes de représentation classiques oriente le travail des artistes et architectes vers l'emploi de techniques innovantes mais aussi de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques nouvelles. Leurs recherches plastiques sur la déformation, le mouvement, l'instabilité et le hasard trouvent un vaste champ d'expression dans les matériaux élastiques, visqueux ou mous. De plus, les avancées techniques fournissent aux artistes des moyens de production et de fabrication pour exprimer différemment la perception qu'ils ont du réel.

Depuis près de vingt ans, le développement du numérique s'inscrit dans ce prolongement d'influences comme support à l'expression. L'informatique fut développée et commença à être utilisée dans la conception architecturale, d'abord pour faciliter les calculs d'ingénierie et ensuite pour faciliter le travail de reproduction architectural. Les approches déconstructivistes que l'on peut observer chez des architectes comme Gehry ou Eisenmann continuent ce mouvement d'abolition

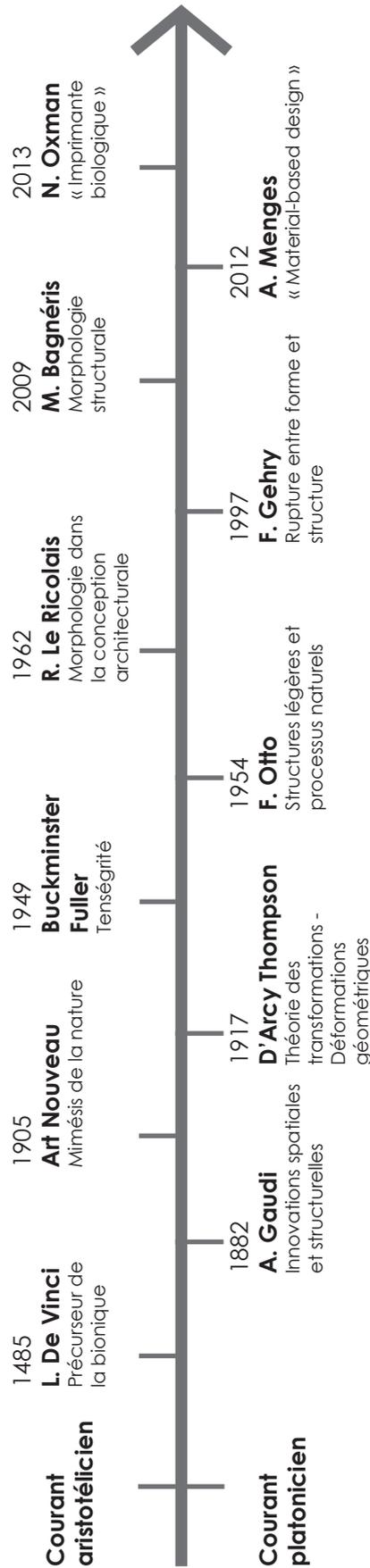
des codes du langage traditionnel comme l'avait entamé Gaudi. Dans ce nouveau courant, la forme architecturale devient l'expression des logiques conflictuelles. Les architectes se tournent vers des formes fragmentées et hétérogènes. Ensuite, les programmes consacrés à la modélisation automobile, du design ou de l'aéronautique, évoluèrent très rapidement et furent utilisés par les architectes. Cela permit à la fois de dessiner des formes qui semblaient jusqu'alors impossibles par la géométrie euclidienne mais également d'en concevoir de nouvelles. Grâce au numérique, l'architecte n'est plus contraint à manipuler un assemblage de formes statiques mais peut expérimenter des flux qui lui sont suggérés par son environnement. Cette architecture, parfois considérée comme un délire architectural, tente en réalité de répondre à des changements sociétaux et correspond en même temps à cette modification du processus de travail par l'introduction d'outils numériques de conception. On passe de la conflictualité déconstructiviste à la fluidité et la souplesse.

Le problème lié à cette évolution est qu'elle engendre la disparition du rapport concret aux matériaux. Le logiciel propose des simulations issues de modélisation qui sont des interprétations du réel. L'usage de l'ordinateur dans la conception architecturale est porteur de continuité entre les intervenants mais entraîne paradoxalement une rupture dans la réalité matérielle.

Avec l'utilisation de l'informatique, on voit décliner la relation forme/forces que l'on avait acquise. Ceci est très remarquable dans le travail de Frank Gehry dont je parlerai dans le chapitre consacré à la rupture entre forme et structure.

Cette digression vers l'histoire de l'art a permis de montrer que les apparitions récentes de projets non-standards ne sont que les manifestations par le bâti d'aspirations ancrées depuis longtemps dans la société.

Pour situer les différents acteurs que je viens d'aborder et que j'aborderai tout au long de ce travail, j'ai réalisé une ligne du temps permettant de les situer les uns par rapport aux autres afin de mieux comprendre les influences qui ont pu se mettre en place.



Partie II
VERS L'ARCHITECTURE NON-STANDARD

1. ÉVOLUTION DES MODÈLES STRUCTURELS

Comme déjà introduit dans le chapitre précédent, la structure des édifices est un sujet qui a toujours intéressé les sociétés qui se la sont appropriée en fonction de leurs besoins et expériences passées. Les nouvelles connaissances et les nouveaux moyens techniques ont permis d'optimiser ces structures. L'expérimentation et l'apparition de l'informatique y jouent aussi un grand rôle.

Au niveau historique, on voit apparaître dans l'Ancien Empire égyptien des colonnes en pierre, inspirées des troncs d'arbre et formant un soutien au toit des édifices. S'ensuivra une série d'évolutions morphologiques de la colonne, tout en imitant des éléments de la nature. À l'Antiquité, on verra également apparaître des arcs, des voûtes ou des dômes directement issus de l'observation de la nature et qui deviendront les figures de l'architecture romaine. Une des plus célèbres réalisations de l'Antiquité est le Panthéon de Rome.

Les Romains utilisèrent l'arc en plein cintre ainsi que l'arc surbaissé ; mais c'est l'architecture islamique qui s'est dotée d'un nombre important d'arcs inspirés de formes naturelles. L'arc brisé a été utilisé de manière importante en Perse dès le XIII^e siècle et en Syrie et en Egypte à partir du IX^e siècle. L'inspiration de cet arc proviendrait de la forme de certaines feuilles et fruits.

L'arc gothique, enfin libéré d'une partie des forces, a pu s'élever davantage vers le ciel, s'éloignant encore plus des codes classiques par le baroque et prenant une grande liberté dans l'arc ovale. Cette nouvelle expressivité est largement visible dans l'œuvre de Borromini.

Pendant la période médiévale, les modèles morphologiques prenaient source dans la tradition que les anciens synthétisaient mais cette transmission était entre autres, favorisée par une confiance esthétique et/ou mystique. Il n'y avait donc pas ou peu de place pour l'imagination. Cependant, une tentative d'élaboration d'un schéma de descente de charge approximatif est lancée alors qu'à cette époque, les phénomènes

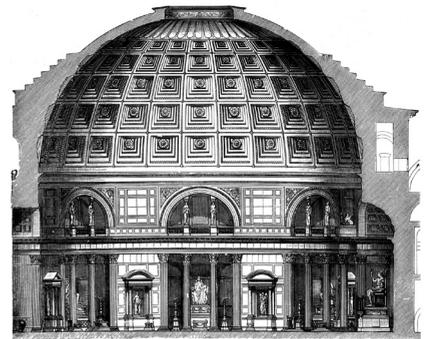


Fig. 6 - Panthéon de Rome, Italie, 27ACN



Fig. 7 - San Carlo alle quattro fontane, Borromini, Rome, Italie, 1638-1667

n'étaient pas encore mathématisés. Il s'avéra pourtant qu'il existait des partis géométriques sans logique structurelle apparente : parallélisme des contrefiches, angles droits par exemple.

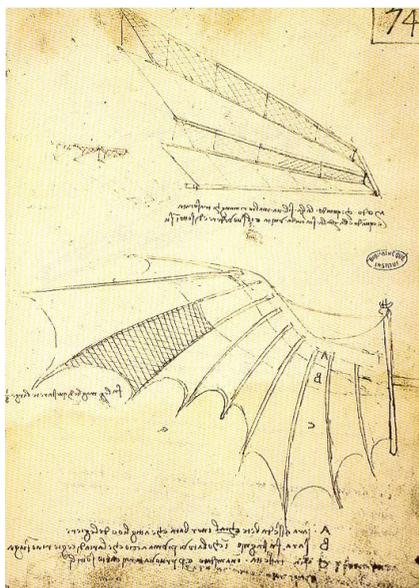


Fig. 8 - Etude du mouvement des ailes d'oiseaux, Léonard de Vinci

Dès la Renaissance, on retrouve des personnages comme Brunelleschi et Léonard de Vinci, précurseur de la bionique¹¹, offrant une nouvelle approche de la science tournée vers l'observation. De Vinci étudie les phénomènes de manière rationnelle et technique. Il délaisse souvent la partie théorique en se concentrant sur la pratique. Ses études sur le vol ou le mouvement de l'eau sont une partie remarquable de son travail. Mais de Vinci est en avance sur son temps et sa manière de penser ne trouvera pas de répondant. Il faudra attendre le XX^e siècle, pour que la bionique et les recherches de l'Italien soient remises au goût du jour. En effet, la bionique est une science qui se développe car l'idée que chaque modèle naturel puisse avoir un potentiel pour créer des mécanismes innovants, conquiert les pensées.

Avant l'avènement de la physique mathématique moderne, les connaissances en mécanique découlaient de modèles tels que l'arbre, la grotte, l'œuf et autres objets qui permettaient de guider la construction par analogie. Ces tâtonnements améliorés grâce aux expériences réalisées et aux erreurs commises, finiront par donner lieu à des règles géométriques.

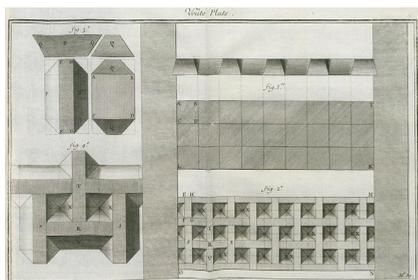


Fig. 9 - Voûte plate, Joseph Abeille, Paris, 1699

Inventée par Joseph Abeille en 1699, la voûte plate semble être le premier modèle physico-mathématique. Bien que toujours imparfait, il crée une nouvelle génération de forme structurelle.

On peut observer que l'intuition n'est plus de nature religieuse ou mystique mais les modèles acquièrent un caractère prédictif et général qui ouvre de nouveaux possibles. Cela engendra en architecture une libération du rapport à la tradition mais également des contraintes désormais liées à des règles établies. Un rapport se crée entre science, technique et architecture. L'appropriation de ces trois domaines se fait différemment

¹¹ La bionique est la science qui se base sur l'étude des systèmes biologiques pour développer des systèmes non biologiques susceptibles d'avoir des applications technologiques.

selon les représentations que ces modèles sont susceptibles de générer et selon les civilisations. Le développement de la forme commence à se diversifier.

L'une des découvertes les plus importantes du XIX^e siècle sera l'arc parabolique. Cette découverte est liée à l'étude des théories de la construction, qui a conduit à la reconnaissance de la parabole, car elle a l'avantage de correspondre à la courbe de compression. Cet arc sera notamment utilisé dans les ouvrages de Gaudi qui en fera un de ses premiers choix de formes morphologiques intéressantes techniquement et esthétiquement, s'éloignant des piliers et des arcs boutants traditionnels.

Cette découverte va amener l'architecture vers de nouveaux horizons. Eladio Dieste, ingénieur et architecte uruguayen, est un de ceux qui maîtrisent le mieux la forme caténaire à double courbure, dont la rigidité et la résistance au flambement sont dues à la morphologie de la courbure. L'église Atlantida est une de ses plus belles prouesses. On peut cependant observer une divergence entre la pensée de Dieste et celle de Gaudi. L'Uruguayen considère que la forme ne découle plus de l'observation simple de la nature comme Gaudi a pu le faire dans une certaine mesure. L'architecture biomorphique de Dieste reflète à la fois le purisme de Le Corbusier et la recherche d'une sculpture fortement symbolique et techniquement résistante¹².



Fig. 10 - Eglise paroissiale, Eladio Dieste, Atlantida, Uruguay, 1952

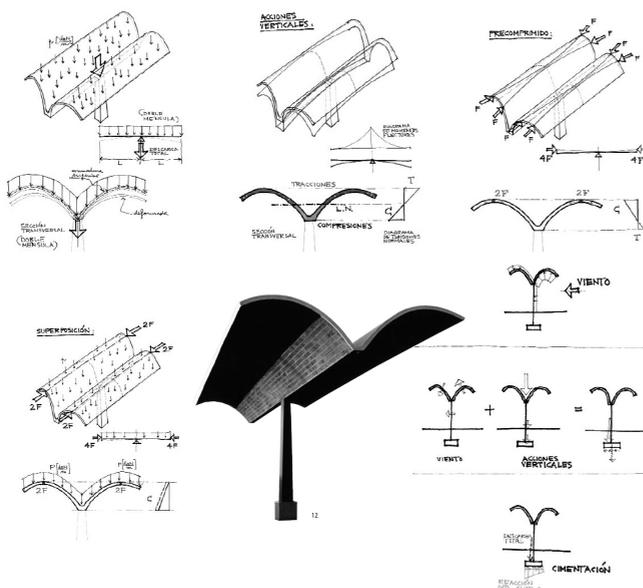


Fig. 11 - Etude structurelle de l'église paroissiale, Eladio Dieste, Atlantida, Uruguay, 1952

12 THEISSEN, Jean-Jacques. Op cit., p. 114



Fig. 12 - Séquence montrant la reconstruction informatique de l'optimisation de la structure du fronton de la façade ouest de la Sagrada Família

Avant l'introduction du calcul électronique en architecture, des architectes et ingénieurs ont utilisé des systèmes physiques pour calculer les formes optimales et les scénarios structurels comme nous en verrons dans le chapitre suivant. La découverte par Robert Hooke en 1675 qu'une chaîne pendue à ses deux extrémités prend en tension la forme qui, une fois renversée, est optimale, a conduit à son utilisation pour établir des modèles formels. Cette forme travaillant uniquement en compression est idéale pour les arcs en maçonnerie. En effet, l'arc idéal est celui qui suit la ligne de force de compression et qui permet dès lors une économie de matière. La caténaire sera très utilisée par Antoni Gaudi dans son modèle funiculaire pour optimiser ses structures. Son procédé était de relier des sacs de sable à un réseau de cordes qui pendaient depuis la caténaire afin de découvrir la forme et la distribution dans l'espace des éléments architecturaux. Comme le faisait remarquer Robert Le Ricolais, que ce soit par l'expérimentation physique ou à l'aide d'un programme informatisé d'optimisation de forme, une démarche complémentaire à celle de chercher où placer la matière consiste à chercher où ne pas en mettre. Nous découvrirons dans la troisième partie, des réalisations effectuées selon ce principe.

Ces découvertes structurelles basées sur l'expérimentation seront peu à peu mises de côté par le numérique. En effet, la structure se définit à un niveau intermédiaire entre le microscopique et le macroscopique alors que l'informatique répond aux mêmes lois à toutes les échelles. Cette « crise de l'échelle » s'accompagne également de la perte d'influence de la structure comme fil conducteur du processus de conception, en opposition aux œuvres de Gaudi dans lesquelles la structure est l'élément clef. Bien que certains ouvrages, par exemple de Le Corbusier, s'étaient déjà affranchis des règles rigoureuses de la rationalité structurelle, les principes généraux y étaient quand même appliqués et avaient des répercussions sur l'esthétique du bâtiment¹³. Aujourd'hui, on observe dans certains édifices, nombreux dans le travail de Gerhy notamment, que l'esthétique prend le dessus, reléguant la question structurelle au second rang. Dans ses projets, l'ordinateur lui permet de concevoir n'importe quelle forme sans tenir compte des contraintes structurelles et à l'aide

¹³ THEISSEN, Jean-Jacques. Op cit., p. 114

de divers assemblages, de transformer n'importe quel parti formel en une structure réalisable, bien que pas totalement optimisée techniquement. Ceci engendre le fait que les architectes se soucient peu des conséquences de leur dessin puisqu'une solution structurelle sera de toute façon trouvée. Nous reparlerons de cette insouciance qui touchera l'architecture et notamment le star-system privilégiant l'esthétique par rapport au rationalisme structurel.

Là où on pensait que le statut de la structure serait renforcé par les nouvelles possibilités, l'effet inverse se produisit. La diminution des considérations structurelles et de leur compréhension signifie que le statut de la mécanique a changé pour laisser place aux préoccupations écologiques¹⁴. De plus, l'informatique promettait un processus continu synonyme de cohérence dans la démarche architecturale et surtout entre conception et choix structurel. Pourtant, nous verrons que c'est plutôt une dissociation entre conception et réalisation qui va s'opérer. Ainsi, il y a une rupture qui va se créer entre l'image produite et la réalité des techniques constructives. Nous y reviendrons plus tard.

Un autre élément qui vient perturber la lisibilité de la structure est la matérialité. En effet, il y a un regain d'intérêt pour les textures en défaveur des structures dont la syntaxe constructive s'estompe. On est dans une crise à la fois de l'échelle mais aussi de la tectonique classique¹⁵. Si l'on prend le cas du stade olympique de Pékin, la structure peut être de grande taille tel qu'il est ou bien à l'échelle d'un bijou serti¹⁶. De plus, les nouveaux matériaux tels que les composites modifient notre perception de la matérialité et par-delà, la lecture de l'architecture, en bouleversant la distinction entre structure et matériaux. Alors que l'architecture de masse se base sur un système poteaux-poutres ou maçonnerie constituée d'éléments standardisés et juxtaposés ou assemblés, l'architecture non-standard s'en différencie par la continuité des



Fig. 13 - Maille structurelle de la toiture, Stade national, Herzog & de Meuron, Pékin, Japon, 2003-2008



Fig. 14 - Bague signée Lepage

14 Ibidem

15 On entend par tectonique l'usage de la structure comme exercice de lisibilité et principe de révélation spatial d'un bâtiment.

16 PICON, Antoine. « La crise de l'échelle et de la tectonique classique », D'ARCHITECTURES, 168, novembre 2007, p. 43

matériaux qui la constituent. Cela permet de réaliser des formes complexes, inadéquates aux structures traditionnelles.

Cette tendance va de pair avec la modification opérée dans la relation entre les corps de métier et l'interdisciplinarité qui a été mise en place pour parvenir à mener à bien un projet, puisque les composites résolvent en même temps l'esthétique et le point de vue structurel. Cette problématique se rencontre abondamment dans ce qu'on appelle les blobs dont nous reparlerons. Il n'empêche qu'à l'échelle architecturale, la continuité du matériau est difficile à conserver. La cohérence entre la conception et la matérialisation repose donc sur l'évolution des techniques.

Fig. 15 - La continuité conceptuelle est réalisée en maquette avec de la résine de verre mais une fois dans la réalité, celle-ci est impossible à conserver et on doit procéder avec un assemblage complexe d'éléments distincts. Kunsthaus, P.Cook et C.Fournier, Graz, Autriche, 2001



2. LA MATHÉMATISATION DE L'ARCHITECTURE

Nous venons de voir l'évolution des structures et des avancées technologiques au fil de l'histoire et cela est en partie engendré par le progrès des connaissances mathématiques.

Les mathématiques en général et la géométrie en particulier ont fourni à l'architecte un foisonnement de connaissances, règles et procédures sans lesquelles la conception n'aurait pu se développer de la sorte. La construction serait probablement restée un domaine répétitif dans lequel la conservation et la tradition auraient été de mise. Les mathématiques ont donc permis à l'architecture de se développer librement, utilisant de nouveaux savoirs pour accroître son potentiel imaginaire. La compréhension des mathématiques a permis progressivement de grands changements, différenciant dès lors la richesse de l'architecture cognitive de l'architecture expérimentale, bien que cette dernière ait toujours existé et ait permis de nombreuses inventions à l'image du principe de la chaînette de Gaudi. Il faut malgré tout observer l'évolution de cette science jusqu'à aujourd'hui.

Alors que nos ancêtres maîtrisaient le langage des nombres, les architectes contemporains ont quasiment tous assimilé le langage du numérique. En considérant l'omniprésence de l'informatique au sein des agences d'architecture, l'usage des mathématiques se fait plus rare et ce, suite à l'apparence des logiciels dont l'interface tend à cacher leur composition mathématique. Si nous prenons l'exemple du dessin d'une ligne, acte architectural basique, cela représente au sein d'un logiciel une série d'opérations mathématiques qui s'effectuent à notre insu afin de montrer la ligne à l'écran. À partir du XX^e siècle, on assiste à un transfert des connaissances mathématiques des architectes vers les ingénieurs, qui en avaient alors la compétence quasiment exclusive. C'est aussi suite à cette modification de conception qu'on s'aperçoit que les ouvrages marquants du XX^e siècle ont été réalisés par des ingénieurs tels que Felix Candela, Pier Luigi Nervi, Heinz Isler ou encore Frei Otto ; même s'il ne faut pas oublier que certains architectes comme Le Corbusier ont atteint dans plusieurs ouvrages, tels que la chapelle de Ronchamp ou le pavillon Philips de l'Exposition



Fig. 16 - Pavillon Philips, Exposition universelle de 1958, Le Corbusier

universelle de 1958, une relation poétique entre architecture et mathématique et ce, sans l'utilisation du calcul numérique. Quelques années plus tard, Marc Mimram prônera également l'importance de la présence des mathématiques dès le début de la conception.

« Quand les mathématiques décrivent, analysent, elles ne peuvent qu'être postérieures à l'acte créateur, elles se transforment en calcul, et deviennent les éléments de la vérification. Les réduire à un expérimental théorique c'est nier leur essence conceptuelle en la reléguant à une simple valeur de technicité.¹⁷ »

Ces relations entre ingénieurs et architectes seront très difficiles pendant de nombreuses années, l'interaction entre les deux étant réduite. Mais on peut observer qu'à l'heure actuelle, les comportements changent et les bureaux multidisciplinaires se répandent. Frei Otto entre également dans cette catégorie par la création de son Institut pour les Structures Légères, lieu de multidisciplinarité. Nous développerons ultérieurement les changements qui permettent d'améliorer ces relations.

Revenons au début de l'ère numérique où apparaissent de nouvelles opportunités de conception mettant souvent en avant des choix purement esthétiques. Nous le constaterons notamment dans le travail de Frank Gehry dans lequel la rupture entre forme et structure se révèle.

On observe d'une part, une montée en puissance et une complexification des processus mathématiques en architecture et d'autre part, une disparition marquée des chiffres eux-mêmes au sein du langage propre des mathématiques, comme nous l'avons mentionné. Mais c'est dans ce contexte que de nouvelles formes ont pu émerger. En effet, l'utilisation consciente des nombres limitait la liberté de composition que s'octroyaient les créateurs.

Il y a donc une certaine réappropriation de la culture mathématique qui tend à travailler des espaces plus fluides tels que peuvent en procurer les blobs. Cela est désormais possible grâce à la

17 MIMRAM, Marc. Op cit., p. 5

maîtrise de l'informatique. Le défi actuel est de trouver des matériaux capables de répondre à ces différentes formes. Frei Otto se penchera plus particulièrement sur les structures en toiles.

Au XIX^e et XX^e siècle, une tradition de développement de structures à coques minces a existé, sortant des tracés rectilignes reconnaissables du mouvement moderne et exploitant ces nouvelles formes pour leur stabilité. Les ingénieurs comme Candela, Nervi, Isler ou encore Otto, déjà cités, et avant eux Gaudi, ont trouvé ces surfaces grâce à des techniques de modélisation physique semblables pour trouver des formes structurellement efficaces et susceptibles de fournir le principe général du modèle; car si l'homme s'est souvent inspiré des éléments naturels pour ses inventions, la transposition de certaines techniques empruntées à la nature relevaient auparavant davantage de l'intuition que d'une réelle compréhension des lois physiques régissant les systèmes. Ce processus de recherche, partant des modèles naturels en vue de réalisations techniques, sera nommé « bionique » par Jack Steele¹⁸. Nous en avons déjà parlé à propos de Léonard de Vinci, un des premiers à s'être référé aux systèmes physiques naturels en tant que potentiel pour innover.

La conception architecturale est différente des mathématiques par le fait qu'elle s'attarde à des problèmes spécifiques liés au site, au programme, au contexte social alors que les théories mathématiques tendent à répondre à des problématiques plus génériques. Néanmoins, les deux sont liées puisque les mathématiques peuvent aider à réduire l'impact sur l'environnement, à limiter les déchets lors de la conception du projet.

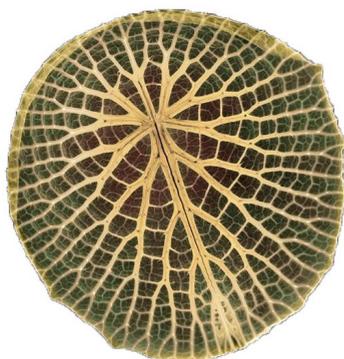
Julian Vincent dit ceci : « Les matériaux sont chers et la forme ne l'est pas. » En opposition à la technologie, la nature fait usage de matériaux peu chers.

18 Jack Steele (1924-2009), médecin américain, major de l'US Air Force. Il a entrepris l'étude d'organismes biologiques pour trouver des solutions à des problèmes d'ingénierie, un terrain maintenant connu sous le nom de « biomimétisme ».

Alors que l'homme utilise l'entièreté des atomes du tableau périodique, la nature n'en utilise que très peu : carbone, oxygène, hydrogène, azote, calcium, phosphore, potassium, soufre, sodium, chlore et magnésium ; mais elle crée des matériaux semblables malgré tout. Nous verrons qu'Otto n'est pas tout à fait d'accord avec cette réalité.

Voici deux exemples d'optimisation de la nature pour économiser la matière :

- la structure des os : la densité des filaments osseux correspond à la concentration des contraintes et à leur direction, ce qui permet d'économiser de la matière dans les zones peu sollicitées. Nous verrons dans la dernière partie de ce travail des objets conçus à partir de logiciels optimisant l'apport de matière en fonction des contraintes mécaniques ;



- la feuille de lys géant d'Amazonie a un réseau de nervures qui rigidifie la feuille sans ajouter d'épaisseur excessive. Ce processus a été repris par Luigi Nervi dans le Palazzetto dello Sport, ce qui lui a permis d'alléger la coupole et d'économiser de la matière.

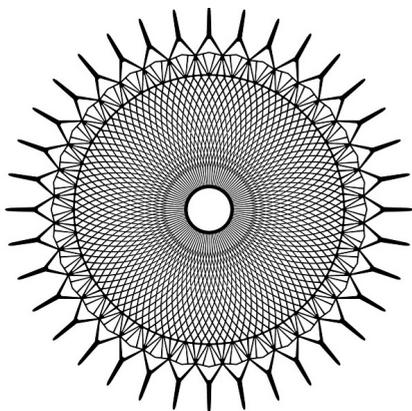


Fig. 17 - Surface intérieure d'une feuille de lys géant d'Amazonie et plan de la coupole du Palazzetto dello Sport, Nervi, 1960

Comme j'en ai déjà parlé, plusieurs techniques d'optimisation des structures nous viennent de l'imitation de processus naturels. Il faut cependant rester vigilant car certaines ressemblances ne sont dues qu'au pur hasard. Nous le verrons plus précisément dans le chapitre consacré à l'œuvre de Frei Otto. On peut aussi citer un autre exemple venant de Rafael Guastavino qui, en tentant de trouver une alternative low-tech au béton, développa une technique superposant une couche de briques en terre cuite avec une couche plus mince de béton afin de réaliser des planchers. Par après, lors des observations précises de l'ormeau - un coquillage - on se rendit compte que celui-ci utilisait une stratification similaire pour fabriquer sa coquille.

Frei Otto considère que pour construire, il n'est pas nécessaire d'avoir calculé tout à l'aide de l'informatique. En effet, les coques minces en béton utilisées par Robert Maillart pour ses ponts sont des formes qui étaient impossibles à calculer à cette époque-là. Il y a des ingénieurs comme Eduardo Torroja ou Fritz Leonhardt¹⁹, en collaboration avec Otto, qui ont permis de réaliser des ouvrages incroyables simplement par expérimentation. Leonhardt a construit des ponts avec des formes très complexes qui n'avaient jamais été construites auparavant. La seule possibilité qu'il avait dans les années 50 était de construire des maquettes en prenant une feuille d'aluminium ou de verre et de mesurer les déformations des charges produites.

Otto pense que tout n'est pas calculable mais, grâce à des expériences très précises, il est possible de connaître les formules des lois inhérentes aux modèles. Aujourd'hui, les étudiants pensent qu'ils ne peuvent pas construire s'ils n'ont pas un programme informatique adéquat, alors que construire avec les anciennes méthodes est encore possible. Cependant, il est vrai que des facteurs d'oubli et donc d'erreur durant les expériences peuvent être hasardeux lors de la construction et sont évités par l'usage de l'informatique.

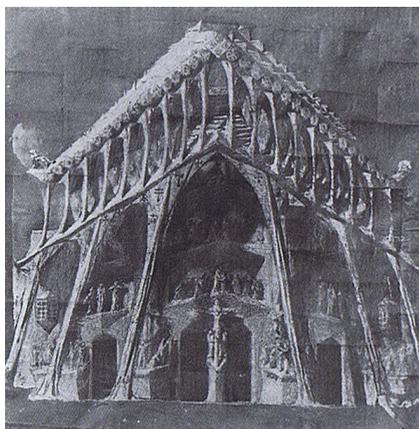
Voici un exemple reprenant les principes de conception de nos prédécesseurs avec les technologies actuelles : c'est la continuité des travaux de la Sagrada Familia d'Antoni Gaudi.

Gaudi utilisait déjà un système de courbe de surfaces réglées il y a près d'un siècle. Son travail témoigne d'une compréhension profonde des concepts organiques et inorganiques qui sous-tendent naturellement les formes. Il a su trouver des concepts forts et clairs permettant de transmettre aisément son travail aux maquetistes et tailleurs de pierre. On observe dans toutes ces formes une rupture avec les règles cartésiennes ordinaires. L'architecte a réalisé cet ouvrage sans l'aide du calcul numérique, alors que les ordinateurs sont seulement aptes à l'heure actuelle à décoder la complexité géométrique de l'église.



Fig. 18 - Pont de Salginatobel en béton armé, Robert Maillart, Suisse, 1930

¹⁹ Fritz Leonhardt (1909-1999) est un des pionniers de l'Ecole de Stuttgart, ingénieur ayant contribué à la conception et à combler les manques en matière de génie civil. C'est lui qui construisit le premier pont suspendu allemand et le plus long en Europe à cette époque.



Pour construire la colonnade manquante sur la façade ouest de la Sagrada, la géométrie de chaque élément a été analysée à partir d'une reproduction datant de 1917 et représentant l'élévation d'origine. Gaudí a expérimenté les formes par des maquettes en plâtre réalisées à l'échelle 1/25 voire 1/10. Plusieurs éléments sont semblables et pourtant ils sont tous uniques. En effet, la colonnade semble répétitive mais pourtant aucun élément ne peut être reproduit par simple translation, rotation ou symétrie pour obtenir le suivant. Les éléments formant la corniche de cette colonnade suivent la même démarche, tous semblables mais tous différents. Il a fallu utiliser des modèles de calcul paramétrique afin d'établir des relations entre les éléments et ainsi reproduire ses formes le plus fidèlement possible par rapport au dessin de l'architecte.

Dans cet ouvrage on se rend donc compte que certaines géométries obtenues par expérimentation, ici des maquettes en plâtre, se font aujourd'hui à l'aide de l'informatique. Les moyens ont changé, la compréhension des phénomènes aussi, mais le résultat est identique.

Nous allons à présent découvrir que si l'évolution des connaissances mathématiques a permis de comprendre les phénomènes physiques et ainsi de libérer le langage, engendrant de nouvelles spatialités, l'apparition de l'informatique va en faire tout autant et favoriser le développement des formes complexes.

Fig. 19 - De haut en bas
Sagrada familia, A. Gaudí, 1882, Barcelone, Espagne

Photographie prise en 1917 du dessin de la façade de la Passion.

Photo de trois prototypes temporaires de colonnes placés sur le fronton de la façade ouest.

Modélisation des découpes de pierre des éléments formant le fronton.

3. L'INFORMATIQUE AU SERVICE DE L'ARCHITECTURE

En parallèle avec la mathématisation de l'architecture évoquée dans le chapitre précédent, l'informatique est apparue et a très rapidement évolué jusqu'à nos jours où la sophistication des technologies ne cesse d'augmenter.

C'est suite au développement des moyens de communication comme le téléphone, puis la radio et les médias, que la société du numérique a été créée et a évolué.

Dans cette quête de la gestion de données, l'ordinateur marque une étape importante. En effet, c'est durant la Seconde Guerre mondiale, pour répondre à la demande à la fois de calculs sophistiqués et de rapidité, que les scientifiques mettent au point cette machine.

L'ENIAC - Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer, est le premier calculateur électronique de grande envergure. Il était destiné à résoudre les problèmes tactiques durant la guerre mais il fut achevé en 1945.

Par la suite, l'ordinateur individuel se développa pour aboutir à sa diffusion en masse dans les années 80. Du point de vue architectural, on remarque une tentative de relier l'architecture à une culture de l'informatique en plein essor, pour appuyer une nouvelle interprétation de cette discipline et l'usage de nouveaux langages.

Pendant des années, l'ordinateur a été promu comme l'expansion de la mémoire mais aussi celle des perceptions. Le progrès était caractérisé par une externalisation du savoir. Il a engendré de nouveaux gestes et de nouvelles habitudes.

Le développement de la représentation en CAO a engendré une évolution importante dans la conception d'ouvrages s'éloignant de la géométrie orthogonale. C'est à partir de ce moment que le terme de « blob » fut introduit dans le langage architectural par Greg Lynn, qui inventa ce terme lors de ses recherches sur la modélisation graphique. Il existe à l'heure actuelle, ce qu'on appelle des modélisateurs de blob qui permettent de

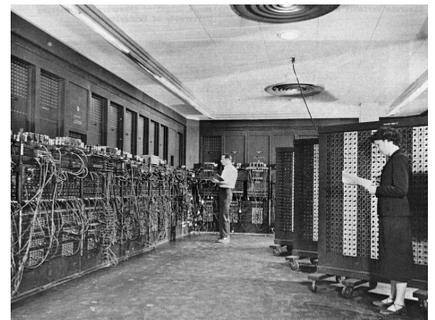


Fig. 20 - ENIAC est le premier calculateur électronique de grande envergure.

créer des surfaces fermées dont chaque nœud est déplaçable individuellement, bien qu'il ait une influence sur la forme globale. Cela permet de créer des formes souples réactives aux conditions de l'environnement dans lesquelles elles se trouvent. Il ne faut pourtant pas confondre l'architecture organique avec ces nouvelles formes car ces dernières ne sont pas toujours la transposition de mécanismes vivants.

Lorsque Greg Lynn fit entrer l'informatique dans la conception architecturale, il s'en servit comme aide complémentaire à la conception pour développer de nouvelles formes. Mais peu d'architectes se sentent aptes à utiliser ce nouvel outil dans une juste mesure, c'est-à-dire sans céder le contrôle du processus de conception à l'informatique.

C'est pourquoi les programmes de CAO ne sont pas volontiers utilisés dans les premières étapes de la projection. En effet, la modélisation d'une maquette numérique demande d'encoder des mesures précises en X, Y et Z, ce qui n'est pas souvent possible à un moment du projet où les idées sont encore floues. Cela représente aussi un changement dans la mesure où les procédures de conception n'étaient généralement pas formalisées de manière rigoureuse. Il en résulte que le duo crayon-papier reste le moyen le plus utilisé pour libérer l'esprit et exprimer, communiquer ses premières idées par essai-erreur. De plus, mais nous y reviendrons plus tard, il faut savoir que les logiciels, et d'ailleurs bien avant ça, les tables à dessin, ont été empruntés à d'autres professions de conception telles que le graphisme, les métiers d'édition ou encore le design industriel, afin que les architectes se constituent un univers de travail. Les logiciels propres à la conception architecturale ont émergé bien plus tard pour proposer des méthodologies spécifiques aux architectes. Exception faite, ceux-ci correspondent globalement aux phases en aval du processus de création car ils ne permettent pas de conserver la spontanéité de cette étape initiale du processus.

Actuellement, on peut dire que l'informatique joue principalement un double rôle : d'une part, elle permet la production de documents graphiques, ce que l'on peut appeler l'axe opérationnel ; d'autre part, il y a l'axe médiatique qui permet une meilleure compréhension du projet pour les

non-techniciens tels que les maîtres d'ouvrage. Cependant, l'informatique est également utilisée par certains en phase de conception pour trouver de nouvelles formes. Cette pratique s'applique notamment aux formes complexes, comme les blobs, que l'on peut observer davantage depuis une vingtaine d'années et classées sous le nom d'architecture non-standard. Dans cette catégorie, les outils numériques sont utilisés pour générer la forme et ont ainsi dépassé leur rôle d'outils de représentation.

Il n'empêche que certains concepteurs restent sur leur position, comme Mario Carpo²⁰ dont la pensée est similaire à celle de Frei Otto et qui dit ceci : « Les ordinateurs n'imposent pas en eux-mêmes des formes, pas plus qu'ils ne renvoient à des préférences esthétiques. On peut aussi bien concevoir des boîtes que des surfaces plissées au moyen des ordinateurs²¹ ».

Effectivement, Greg Lynn ne qualifie pas cet instrument de divin mais l'assimile plutôt comme un outil de calcul permettant de représenter aisément des formes qui ne le seraient pas par un autre moyen. Comme le pense Frei Otto, l'ordinateur possède cette capacité de relier des variables multiples sans aspect critique ; c'est pourquoi l'intervention de l'architecte et de sa sensibilité restent essentielles dans le projet. En effet, l'ordinateur n'est pas « naturel » : même s'il crée des formes qui sont temporellement et formellement ouvertes à des déformations et à des inflexions, ces formes ne sont pas « organiques »²².

Cependant, il reste certain que l'informatique a eu une influence sur les formes dessinées et en a facilité la production. De plus jusqu'alors, les formes complexes étaient décrites par des paraboloides ou des hyperboloides majoritairement mais depuis lors, les nouvelles recherches formelles peuvent être représentées par des Nurbs qui favorisent le

20 Mario Carpo, né en 1958, est un historien italien de l'architecture, spécialiste des théories et des techniques de représentation architecturales. Son travail porte sur la relation entre la théorie de l'architecture, l'histoire culturelle, l'histoire des médias et des technologies de l'information.

21 PICON, Antoine. Op cit., p. 65

22 HENIN, Gilles. *L'influence de l'informatique sur la conception architecturale de Greg Lynn*. Mémoire réalisé à l'Institut Supérieur d'Architecture La Cambre, Bruxelles, 1999-2000, p. 46

travail intuitif des courbes. Certaines manipulations informatiques rappellent le modelage faisant référence au façonnage de l'argile.

On peut donc dire que l'architecture numérique ne s'est pas dégagée totalement des méthodes de conception traditionnelles. L'informatique a surtout servi à dessiner mais ne s'est pas vue utilisée comme un outil à part du processus de conception, laissant toujours de la place à l'intuition du concepteur. Nous en reparlerons dans le chapitre consacré aux outils permettant le développement d'un projet et nous verrons plus en profondeur dans la troisième partie de ce travail, les conséquences qu'a eues l'informatique sur le processus architectural. Mais nous pouvons d'ores et déjà dire que la grande différence depuis l'informatisation de la projection est que le processus de conception est détaillé par des étapes précises. Cette procédure permet également de valider chaque étape séparément des autres.

Pour revenir à l'évolution des structures, nous avons vu que leur statut a été modifié suite à l'utilisation de l'informatique dans le processus de conception. En effet, l'usage généralisé de cette technique a rendu accessible les calculs de structure dans des phases précoces du projet. Cela permet également de réaliser des expérimentations à moindre coût, à la fois en temps et en argent.

En effet, au cours de l'histoire, on peut observer des expérimentations physiques qui ont permis parfois de grandes avancées, à l'image d'Antoni Gaudí ou de Frei Otto. L'informatique aide désormais à réaliser des simulations de ce genre en nécessitant moins d'investissement. Le fait d'utiliser cette nouvelle possibilité en phase de conception permet de valider le mécanisme de structure, d'en repérer les faiblesses, voire de proposer des alternatives mais également d'optimiser la structure ; bien que nous avons vu que Gaudí y parvenait par des moyens techniques plus rudimentaires.

Comme déjà énoncé dans le chapitre consacré aux structures, l'informatique aurait dû engendrer une communication fluide entre les différents acteurs du projet et notamment les ingénieurs. Nous reparlerons plus en profondeur des liens tissés entre les intervenants au cours d'un

projet. Mais nous allons d'abord nous tourner vers Frei Otto, architecte allemand, afin de découvrir comment il a pris en compte ces trois éléments que sont la structure, la mathématique et l'informatique au sein de sa démarche architecturale. À travers son parcours et notamment la mise en place de l'Institut pour les Structures Légères, nous verrons de manière concrète comment la morphologie introduite dans le processus de conception par Le Ricolais, a pu générer une interdisciplinarité entre architecture et biologie.

4. LE CAS DE FREI OTTO ET L'INSTITUT POUR LES STRUCTURES LÉGÈRES

Sa vie & son oeuvre

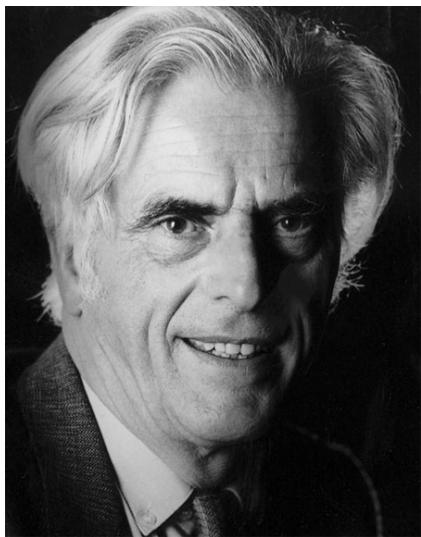


Fig. 21 - Frei Otto

Frei Otto, né en 1925, est un architecte et ingénieur allemand. Fils de sculpteur, il développa un intérêt précoce pour les planeurs puis s'intéressa au design léger suite aux expérimentations qu'il a mises en place durant la guerre. Otto a commencé ses études d'architecture à Berlin puis a séjourné aux États-Unis. C'est là qu'il subira l'influence de plusieurs architectes qui avaient quitté l'Allemagne pour fuir le régime d'Hitler : Richard Neutra, Erich Mendelsohn et Ludwig Mies van der Rohe principalement.

Otto ne cessera de critiquer la politique et l'architecture découlant du nazisme. Il s'oppose à cette architecture lourde, pérenne et monumentale. Le paradoxe se trouve ici entre son opposition à la culture nazie dans laquelle il a grandi et son attachement à la nature qui est un des fondements du nazisme, « Le sang et la terre ». C'est donc cette culture qu'il rejette qui l'a guidé sur ce chemin de l'écologie, de la légèreté, de la durabilité.

Lorsqu'Otto fut envoyé à la guerre en 1945, les matériaux manquaient mais la main d'œuvre était abondante. C'est alors qu'il commença à s'intéresser aux structures nécessitant un minimum de matériaux et il se rendit rapidement compte que le volume de matière nécessaire était lié au nombre d'éléments en tension dans la structure.

En 1954, après avoir effectué ses études d'architecture et découvert que ses expérimentations étaient de véritables innovations, il rédigea sa thèse intitulée « Le toit suspendu » qui deviendra un ouvrage de référence sur les tentes et les structures en tension. Au cours de ses recherches, il observe que les structures chargées soit en traction soit en compression sont potentiellement plus économiques que les structures soumises à la tension. C'est principalement l'exemple de la chaîne suspendue qui adopte automatiquement la forme la plus stable qui l'intéresse. Les recherches d'Otto sont menées dans le but de trouver le rapport optimum entre la forme et la structure tout comme l'avait amorcé D'Arcy Thompson entre la

forme et les forces naturelles, mais uniquement sur base d'observations.

La carrière de Frei Otto présente des alternances de phases théoriques et constructives. Les phases d'avancement théoriques préparent la voie pour innover dans la construction de bâtiments. La première phase de construction majeure a coïncidé avec les pavillons à l'Exposition horticole de Cologne et des tentes pour l'Exposition Berlin Interbau en 1957.

On peut dire que le travail de cet architecte peut être décrit comme de l'architecture expérimentale et cela pas uniquement parce qu'il tente de trouver des réponses à des problèmes nouveaux mais aussi parce qu'il adopte des processus expérimentaux tels que cités précédemment avec la chaîne suspendue. La différence principale avec D'Arcy Thompson mais également Gaudi, est qu'Otto s'appuie sur les disciplines scientifiques pour poser ses choix de formes structurelles.

En 1961, il crée un groupe de recherche « Biologie et Construction » à l'Université de Berlin, pour une compréhension mutuelle de la biologie, de la technique et de l'architecture. Par cet institut, l'architecte montre à nouveau son désir de placer l'étude des structures légères sur une base scientifique solide car cette institution devait permettre d'enquêter et de comparer des structures naturelles avec des structures architecturales. Le groupe « Biologie et construction » formé par des architectes, ingénieurs civils, biologistes, historiens, philosophes, physiciens, était l'un des groupes de recherche les plus interdisciplinaires dans le monde.

Avec la fondation de l'Institut pour les Structures Légères (IL) à Stuttgart, Otto a finalement acquis une structure de recherche suffisamment vaste pour poursuivre ses recherches multidisciplinaires sur les structures naturelles, la bionique, les structures légères, les procédés de formation et la reconstruction de méthodes de conception historiques. Une série de quarante-et-un livres innovants numérotés "IL 1" à "IL 41" fait la chronique des travaux de Frei Otto et de son équipe.



Fig. 22 - Pavillon de danse de la Bundesgartenschau, Frei OTTO, Cologne, Allemagne, 1957

On y découvre que Frei Otto entretient trois rapports avec la nature :

- la nature comme organisation : elle propose des modèles d'agencement ou d'association des éléments pouvant être de la matière inanimée ou des êtres vivants ;
- les phénomènes et objets naturels sont étudiés par la science avec ses méthodes et sa production visuelle spécifique ;
- la conception de la nature liée à l'Homme, à sa production et à son environnement, se manifeste d'un point de vue politique et idéologique.



Fig. 23 - Stade olympique, Frei OTTO, Munich, Allemagne, 1972

L'architecte allemand a effectué de nombreuses recherches sur les structures minimales, notamment pour le stade olympique de Munich construit en 1972 et le pavillon de l'Allemagne de l'Ouest en 1967 à Montréal, sur lesquels il a travaillé avec l'architecte Rolf Gutbrod et l'ingénieur Fritz Leonhardt. Les surfaces minimales sont à nouveau remises à l'honneur par les architectes du XXI^e siècle qui utilisent l'informatique.

À l'heure où les notions de légèreté, d'économie, d'adaptabilité des constructions commencent à apparaître, Frei Otto a tenté de trouver une/des réponse(s) en se référant aux processus physiques de la nature pour optimiser ses structures. Cet architecte fait partie des précurseurs de l'architecture bionique et annonce la démarche écologique : réduire la quantité de matériaux nécessaires, faciliter la construction, permettre le démontage et la réutilisation ultérieure.

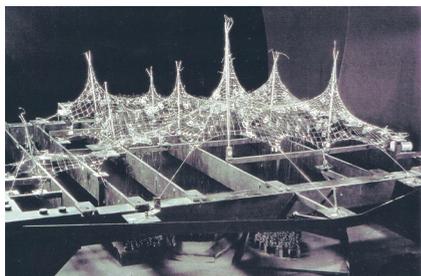


Fig. 24 - Maquette du Pavillon de Montréal, Frei Otto

La proposition fondamentale contenue dans le concept de construction légère - faire plus avec moins - est en harmonie avec les préoccupations contemporaines de l'épuisement des ressources non-renouvelables et la perturbation des systèmes naturels. Frei Otto consacre un effort de conception intense pour réduire le poids du matériel nécessaire à ses ouvrages. En un sens, le coût de l'économie de matériaux se traduit par une augmentation des heures prestées par une personne pour optimiser le système. Par exemple, il a fallu à l'équipe de Frei Otto près de 20.000 heures de travail pour développer le pavillon de Montréal, tandis que sa construction a duré trois semaines et demie ! La conception de ce bâtiment a été très poussée puisque celui-ci devait

rester en place deux ans pour ensuite être déplacé et remonté sur un autre site. Le tout avait été pensé dès le départ et compris dans le budget initial.

L'ajout de matériau ou l'apport d'énergie à une structure pour corriger les déficiences dues à la structure légère doivent être pris en compte dans l'évaluation de l'efficacité réelle d'une construction légère. En effet, toute stratégie qui consiste à réduire le poids des structures et à augmenter l'apport d'énergie à partir de la combustion de combustibles fossiles est considérée par Otto comme un paradoxe. Il voit donc dans l'architecture adaptable une solution économique car la flexibilité qu'elle offre permet de s'adapter aux changements de l'environnement.

C'est ainsi que sa volonté de lier la forme architecturale au rythme métabolique de la vie et de créer une enveloppe répondant activement aux activités spontanées de l'homme se manifeste chez Otto dès le début de sa carrière, le conduisant à l'idéalisation de l'éphémère architectural.

Contrairement à son excellente réputation en tant que chercheur, le travail d'Otto en tant qu'architecte n'est pas aussi complet. Toutefois, les projets auxquels il a participé sont presque tous extraordinaires. Majoritairement en collaboration, celle avec Peter Strohmeier, le propriétaire d'une entreprise de construction de tentes, a permis à Otto de développer les premières tentes à double courbure qui ont été construites pour des expositions ou des festivals en plein air.

Frei Otto se préoccupe des fondements de la structure. La question permanente d'Otto est la suivante : « Comment parvenir au résultat maximum en utilisant le moins de matériaux et d'efforts ? ». C'est en cherchant à y répondre qu'il a permis à la tente traditionnelle de devenir une construction moderne capable de couvrir de grandes superficies. Cette typologie est désormais l'un des plus anciens artefacts encore utilisés dans le monde moderne, notamment dans les tribus de nomades.

C'est principalement sur les structures légères en toile que l'architecte s'est attardé tout au long de sa carrière.

Il faut resituer le passé historique et économique de la tente pour comprendre d'où à où a porté l'évolution engendrée par Otto.

Les tentes sont parmi les plus anciennes constructions que l'homme ait bâties. Elles ont été utilisées comme logement dans de nombreuses cultures depuis des millénaires. Les tentes aux diverses formes et équipements ont vu le jour en fonction des matériaux disponibles, des conditions climatiques et sociales. Le développement continu à travers l'histoire a conduit à une optimisation de ces structures, comme on peut le voir à partir des tentes bédouines, la yourte, le tipi et la tente du cirque européen.

Frei Otto lance des recherches sur la structure des tentes à partir de 1950 et développe une nouvelle forme structurelle. Dans ces années-là, les tentes occupaient une place de leader sur le marché mondial de la construction. La crainte de la concurrence a entraîné une diminution des prix au détriment de la qualité, ce qui conduisit à la perte de prestige et de confiance de la part des clients. De plus, de nombreuses personnes pensaient que ce type de construction ne pouvait que s'envoler. Seuls les initiés savent que les tentes sont des ouvrages stables, même sous des conditions climatiques rudes, et qu'elles peuvent également faire l'objet de considérations esthétiques. Des avancées techniques ont malgré tout été faites, comme l'utilisation de fibres synthétiques et la protection des câbles contre la corrosion, qui ont permis de nouvelles possibilités de forme.

La concurrence est principalement venue du Japon qui effectuait aussi des recherches dans ce domaine et qui a mis en péril l'industrie européenne. Ajouté à cela la perte de confiance dans l'ensemble de l'industrie européenne suite à la baisse de qualité de la part des constructeurs, les nouvelles technologies demandant un savoir-faire important dans de nombreux domaines (ingénierie du bâtiment, architecture, mécanique des sols, ventilation, acoustique, génie des matériaux,...) qu'ils ne possédaient pas car la majorité des constructeurs de tentes n'étaient pas issus du monde de la construction. Les grands projets ont donc été abandonnés ou contractés à l'étranger

faute de ne pas avoir su mettre en place des équipes de travail de qualité. On peut noter que malgré tout, l'entreprise Stromeier est restée active dans ce domaine jusqu'en 1968.

En règle générale, ce marché est très délicat par la nécessité de planification pour mettre en place un projet avant sa réalisation. Cela demande énormément de temps mais surtout d'argent. Otto estime à un tiers du budget la partie consacrée à l'organisation et aux détails de construction.

Ses recherches et le travail de développement sont accessibles à un plus large public suite à la publication de sa thèse « *Das hängende Bach* » (Le toit suspendu) en 1954. Les principes fondamentaux montrant la voie à suivre, ont été traduits dans le domaine de l'architecture concernant les constructions de tentes qu'il a conçues avec Stromeier pour les expositions Jardin de Kassel (1955), Cologne (1957) et Hambourg (1963). Celles utilisées pour les pavillons et les espaces d'exposition ne pouvaient pas être plus optimisées en terme de formes, ni améliorées dans l'utilisation des matériaux et de capacité portante. Cet Allemand permettra des avancées notables en utilisant le modèle physique de surface minimale qui put également être simulé par ordinateur. D'ailleurs, toutes les constructions réalisées par Frei Otto et Bodo Rasch après 1970 ont été générées par ordinateur. La simulation informatique a été introduite par Klaus Linkwitz en 1966, sur la suggestion de Frei Otto.

Le travail qu'il mena sur les tentes lui permit de développer une de ses autres idées avant-gardistes qui était de remettre à jour l'idée de construire de façon modulable, pour une meilleure adaptation aux conditions climatiques. Même dans les temps anciens, les toits mobiles ont été utilisés comme protection contre le soleil et la régulation du climat dans les chambres jusqu'à la coutume romaine des théâtres et amphithéâtres qui possédaient des velums. Les toits convertibles sont construits de telle sorte que leur forme peut être modifiée aussi souvent que souhaité et en un temps relativement court. Le travail d'Otto n'a pas été de produire une nouvelle génération de toits convertibles mais de nouveaux systèmes de déplacement efficaces ainsi que des matériaux particulièrement adaptés. Le grand avantage des toits adaptables réside dans le fait que la température d'un bâtiment peut être

régulée de manière efficace sur le plan écologique et économique. L'effet de refroidissement est obtenu en empêchant la lumière directe du soleil d'atteindre les parois du bâtiment et la chaleur stockée peut être libérée par l'ouverture du toit durant la nuit.



Fig. 25 - Federal Garden Exhibition, Frei OTTO, Cologne, Allemagne, 1971

Le parapluie est le type le plus ancien de toit amovible. C'est un archétype lié à la forme et à la structure de la yourte et du tipi. Le parapluie traditionnel est apparu sous différentes formes, selon le matériau et la dimension symbolique. La forme la plus simple consiste en une tige centrale à laquelle des barres rigides ou mobiles sont fixées. Ces parapluies étaient recouverts de tissu, de feuilles, de cuir, de papier, de plumes. Les membranes en tension, les nervures et la tige centrale forment une unité de construction.

On peut dire que la carrière d'Otto présente des ressemblances avec plusieurs architectes de grandes renommées dont Buckminster Fuller : les deux ont été concernés par l'efficacité structurelle et ont expérimenté des structures gonflables. Le travail des deux architectes va bien au-delà des méthodes traditionnelles de calcul des contraintes structurelles.

Déjà Fuller avait initié la notion d'écologie en mettant en place celle de « poids de bâtiment » comme mesure du niveau de développement. Son objectif d'adaptabilité et de maison « autonome » ont fait de lui un pionnier pour Otto. La stratégie de Fuller était double : donner aux gens une plus grande liberté dans les espaces intérieurs au moyen d'un « dôme géant » et rendre les bâtiments mobiles. Deux sujets sur lesquels Frei Otto prendra le temps de s'attarder.



Fig. 26 - Music Bowl, Barry PATTEN, Melbourne, Australie, 1959

Ses créations sont considérées comme ayant été influencées par l'architecte australien Barry Patten.

Désormais, c'est Otto qui influence les autres : Rogers, par exemple pour le Millenium Dome à Londres, Grimshaw avec l'Eden Project - dôme géodésique accueillant la plus grande serre du monde, Edward Cullinan, la firme australienne PTW, avec la piscine olympique - Water Cube, Mahmoud Bodo Rasch qui est le planificateur le plus important de structures légères et des tentes dans le monde arabe, y compris pour la Grande Mosquée de La Mecque, et bien d'autres encore.

Ses recherches risquent de nous influencer encore longtemps grâce à la durabilité et l'économie de matière que recherchait Otto dans ses techniques et qui sont dans l'air du temps de l'habitat écologique.

Institut pour les structures légères

En Allemagne, Stuttgart est une ville importante en ce qui concerne l'innovation en ingénierie. C'est le siège d'entreprises de renommée internationale, comme Daimler Benz, Bosch et Porsche. Stuttgart a également donné naissance à l'un des mouvements modernes les plus intéressants en génie des structures et de l'architecture, le « Stuttgarter Bauschule », aussi connu comme l'École de Stuttgart pour la conception du bâtiment. L'école se caractérise par le niveau de compétence technique élevé des ingénieurs et des architectes, une intégration excellente des deux disciplines, les méthodes de construction de précision et la volonté de construire des structures légères. Le corps professoral de l'université a maintenu des liens étroits avec les bureaux d'études régionaux, faisant des principaux membres de l'École, des professeurs d'université et des partenaires dans les pratiques d'ingénierie. C'est cela qui leur a permis à la fois d'avoir les ressources intellectuelles et les projets concrets pour les mettre en pratique.

En 1961, Frei Otto met en place une unité de recherche biologique pour étudier les structures naturelles : l'Institut pour les Structures Légères. Le travail de recherche de l'institut consiste en une « tentative d'interpréter la nature en examinant ses constructions » c'est-à-dire l'étude des structures naturelles comme résultante d'organisation. Le but est surtout de comprendre les processus qui régissent le monde naturel par l'étude d'une série de modèles observés dans ce milieu.

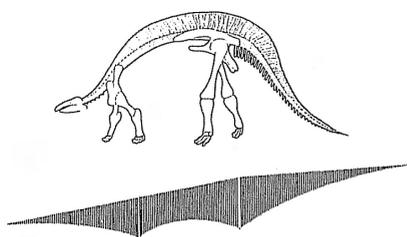


Fig. 27 - Etude du schéma mécanique d'un squelette du stégosaure, réponse formelle à une contrainte mécanique.

Puisant entre autres son inspiration dans les cellules végétales, les bulles, l'unité a permis de développer des structures en coque dont les peaux sont gonflées d'air et dont la technique continue d'être exploitée, notamment par Grimshaw. Cette méthode est issue des structures pneumatiques telles que les cellules qui sont constituées d'une membrane et d'un protoplasme. Un exemple plus concret des recherches biomimétiques est l'observation du squelette d'un dinosaure pour construire une grue conçue par Otto.

On peut distinguer trois approches de la nature au sein de l'Institut de Stuttgart :

- structuraliste, fondée sur l'observation et la retranscription des systèmes d'organisation. L'objet naturel est alors perçu comme une structure qui est décortiquée et classée selon des ordres géométriques, fonctionnels ou sociaux ;
- l'étude des systèmes permettant de dégager des principes physiques et mécaniques, des processus qui servent à la conception de l'architecture. C'est un niveau d'analyse et non d'observation ;
- système complexe dans lequel l'architecture et l'Homme doivent trouver leur place. C'est un aspect plus subjectif.

Il est rare de trouver des projets de Frei Otto dont l'architecture n'est signée que de sa plume. Comme nous en avons déjà parlé, il travaille majoritairement en association avec d'autres architectes qui lui fournissent les compétences architecturales qui lui manquent. Cela engendre une faiblesse au niveau de la connexion entre le bâtiment et son contexte, par manque de compréhension entre les acteurs du projet. Il y a dans le travail de Frei Otto un échec général dans la manière de transformer la logique pure de la structure dans l'architecture totale mais cette approche multidisciplinaire amène néanmoins des atouts au niveau de la créativité. En effet, les questions débutent par des prémices tels qu'un membre du groupe cherche à acquérir une compréhension des multiples processus de formation dans la nature. Ainsi, il peut critiquer un projet avec plusieurs points de vue et diverses possibilités de comparaison. Les stimulations provenant d'autres disciplines offrent un éventail de possibilités constructives et formelles pour innover. Le but de cette équipe multidisciplinaire est de réaliser des structures réglables, réalisables et économiquement viables dans diverses situations. De nouvelles idées et possibilités techniques peuvent émerger grâce à la rupture avec l'habitude de regarder les choses de manière familière et en expérimentant avec d'autres sciences. À travers son parcours et notamment la mise en place de l'Institut pour les Structures Légères, nous verrons de manière concrète comment la morphologie introduite dans le processus de conception par Le Ricolais, a pu générer une interdisciplinarité entre architecture et biologie.

En 1969, Frei Otto et Fritz Leonhardt, ingénieur structure et pionnier de l'Ecole de Stuttgart, furent les fondateurs du groupe de recherche « SFB 64 » qui a mené des expérimentations sur les structures de grande portée dans les facultés d'architecture et de génie civil. Ce groupe de travail a développé les bases scientifiques pour l'un des projets les plus ambitieux conçu pour les Jeux Olympiques de 1972 à Munich - les bâtiments du stade pensés comme un « paysage de tentes ».

En 1995, l'Institut pour les Structures Légères (IL) a fusionné avec l'institut dirigé par Schlaich pour former le nouvel « Institut pour les Structures Légères et le design conceptuel » (Ilek).

L'Institut des Structures Légères à Stuttgart ne fonctionne plus comme à ses débuts car il travaille à présent d'en d'autres domaines. Le successeur d'Otto est Werner Sobek. Aujourd'hui, il ne poursuit plus le développement de structures légères, bien que le terme soit resté dans le nom officiel du centre, mais il se concentre sur les réseaux en treillis, les problèmes énergétiques. Les recherches de Frei Otto n'ont pas de continuité dans l'institut mais il y a d'autres écoles dans le monde qui accomplissent un travail similaire.

Partie III
DE LA CONCEPTION À LA RÉALISATION

Après avoir décrit le parcours suivi par Frei Otto, il nous faut nous tourner vers son processus de travail et à partir de celui-ci, vers les autres moyens disponibles pour exprimer à la fois les premières idées d'un projet mais également les détails techniques nécessaires à la réalisation de l'ouvrage.

Le travail de Frei Otto est plutôt décrit comme de l'architecture expérimentale et cela parce qu'il adopte les procédures de l'expérimentateur en se basant sur les disciplines scientifiques pour poser ses choix de formes structurelles. Nous en avons déjà parlé. Cependant, il restera à voir si la tentative de donner au développement architectural les vertus de la méthode scientifique donnera des résultats intéressants pour l'avenir.

Irène Meissner²³ a écrit à propos d'Otto : « Frei Otto est un découvreur, un enquêteur et un ingénieur. Sa méthode de travail est basée sur la triade classique du travail scientifique : la combinaison significative de l'expérience, de l'expérimentation et des mathématiques.²⁴ »

D'Arcy Thompson voyait également dans les mathématiques un outil essentiel : « Je sais que dans l'étude des choses matérielles, le nombre, l'ordre et la position, constituent la triple clef de la connaissance exacte, que dans les mains d'un mathématicien, ces trois clefs donnent accès " aux grandes lignes d'un schéma de l'univers ", que le carré et le cercle nous aident, comme le charpentier d'Emile Verhaeren, à concevoir les lois véritables et fécondes qui sont la règle et la clarté du monde. [...] Et qui (référence au naturaliste Jean Henri Fabre), démiurge de la même veine que Platon et Pythagore, voyait dans le nombre le comment et le pourquoi des choses, et y trouvait la clef de voûte de l'univers.²⁵ »

Les mathématiques sont donc essentielles dans le travail d'Otto, bien que insuffisantes à son goût pour l'aider à tout expliquer. Il n'y voit

23 Irène Meissner, architecte, assistante au Musée d'architecture à l'Université Technique de Munich.

24 NERDINGER, Winfried. *Frei Otto, Complete works, Lightweight Construction Natural design*. Berlin : Birkhäuser, Architecturmuseum tu, 2005, p. 61 (traduction personnelle)

25 GONOD, Solène. *Architecture, nature et culture – Frei Otto : quelles visions de la nature et quels liens avec l'architecture révèle l'iconographie des IL* ?* Mémoire à l'école d'architecture de la ville & des territoires à Marne-la-Vallée, 2010, p. 31

pas non plus de dimension mystique ; néanmoins, elles servent à étudier, mesurer, comprendre les forces qui entrent en jeu dans les processus de morphogenèse.

Otto ne prône pas de retour à la nature car pour lui, cela est impossible en tant que tel. Il tente simplement de prouver que la technique humaine, notamment l'architecture, devrait se baser sur des modèles présents dans la nature. Pour cela, il faut en comprendre les principes fondamentaux, les causes et ses effets car la nature ne donne pas de réponses toutes faites adaptées à l'architecture. Il s'est rendu compte que les bâtiments les plus intelligents ne sont pas le simple résultat d'une imitation des structures naturelles mais de processus expérimentaux qui sont orientés vers la compréhension de processus de formation autonomes. Otto considère cependant que l'hypothèse que tous les éléments de la nature sont les plus optimaux n'est pas totalement vraie, entre autres parce qu'elle ne dispose que de peu de matériaux de construction. Il n'y a donc que la forme qui peut être optimisée et non le matériau.

« Le principal but n'est pas l'imitation superficielle de la nature mais plutôt une compréhension des structures dans tous les champs de la nature et des technologies.²⁶ » Frei Otto

En effet, Otto aidé par son groupe de recherche, tente d'expliquer la nature par le biais d'expériences sur le développement technique et non d'imiter simplement la nature. Otto appelle cela le « chemin inverse » proche de la méthode plus courante du « bottom-up ». Le développement expérimental et par-delà, les connaissances des formes, les aident à interpréter la nature qui, dès lors, peut être exploitée pour répondre aux besoins de l'architecture. Nous verrons dans le travail de Frank Gehry notamment, le processus inverse dit « top-down » qui part quant à lui d'une ambition globale détaillée progressivement.

26 Ibidem, p. 29

Comme nous l'avons déjà abordé dans la première partie, il faut faire attention que toute approche ne peut être cataloguée en tant que biomimétisme car il existe un processus itératif entre l'architecture et les recherches sur les systèmes naturels. Par exemple, Buckminster Fuller a réalisé les coupoles géodésiques et c'est ultérieurement qu'il se rendit compte en voyant des photos de diatomées, que les deux structures étaient similaires. Ce phénomène s'est également produit avec les recherches du groupe allemand sur des structures légères constituées en toiles tendues, qui ressemblent en réalité aux toiles d'araignée. Ce processus permet de mieux comprendre le principe des points de jonction des fils constituant les toiles.

Comme énoncé précédemment, Michael Pawlyn²⁷ précise que le biomimétisme ne produit pas nécessairement une architecture de qualité ; c'est pourquoi il est important de laisser place à la sensibilité du concepteur et non uniquement à l'aspect scientifique. Frei Otto est en parfait accord avec cela.

« ...In practice things do not happen so (if one could admit that mechanical beauty was a matter of pure reason): man's sensibilities intervene even in the midst of the most rigorous calculation... intervention of an individual taste, sensibility and passion.²⁸ » Le Corbusier

Otto considère que c'est l'élaboration de constructions architecturales légères et performantes qui permet de développer de l'intérêt envers les constructions naturelles correspondantes. Et si certaines formes d'organisation n'étaient pas compréhensibles à son époque, Frei Otto compte sur le développement des technologies dont l'informatique, pour faire avancer les recherches. C'est notamment la tâche de l'Institut des Structures Légères qui consiste en une « tentative d'interpréter la nature en examinant ses constructions », c'est-à-dire l'étude des structures naturelles comme résultantes d'organisation. Le but est surtout d'observer des modèles naturels pour comprendre les processus qui régissent le monde dans lequel ils

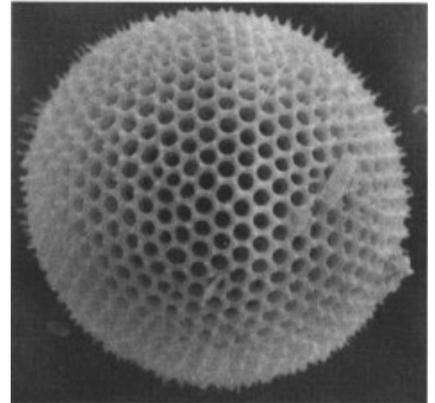


Fig. 28 - Comparaison du dôme géodésique conçu par Buckminster Fuller et l'*Aulonia hexagona*

27 Michael Pawlyn a travaillé durant dix ans en tant qu'architecte dans le cabinet de Grimshaw, ayant notamment réalisé le projet Eden. Il fonde en 2007 l'Exploration qui se concentre sur des projets écologiquement durables.

28 DREW, Philip. Frei Otto, *Form and Structure*. Londres : Crossby Lockwood Staples, 1976, p. 12

s'épanouissent. Il y a donc un point commun entre technologie et nature par le biais de l'organisation structurelle.

Ce chapitre consacré aux différents outils de conception ou de représentation utilisés en général et plus précisément dans le travail de l'architecte allemand, permet de comprendre en quoi chaque instrument et mode de réflexion peut faire avancer la démarche du projet. Nous verrons aussi pourquoi les techniques traditionnelles ne sont pas intégralement remplacées par les nouvelles technologies. Ce chapitre est en partie rédigé à la lumière du travail effectué par Chiara Silvestri²⁹ qui s'est penchée sur les relations entre ces différentes possibilités techniques, dans le cadre de sa thèse « *Perception et conception en architecture non-standard* ».

L'étude menée par Silvestri a été réalisée dans le but de déceler « le traitement perceptif et cognitif des informations spatiales complexes qui peuvent être obtenues à travers les différentes modalités de représentation d'un objet³⁰ ». Les résultats sont obtenus à partir de l'efficacité des sujets en fonction des outils utilisés et permettent de mettre en évidence des correspondances significatives entre la performance de la réponse et les informations spatiales disponibles dans chacun des moyens de représentation.

Ce qui fait le lien entre ces multiples outils de projection est l'espace mental du concepteur. Celui-ci est lié à la réalité physique par deux moyens : d'une part il y a la perception qui permet un lien entre les objets réels et la pensée du concepteur; d'autre part, les outils de représentation permettent de retranscrire de diverses façons la pensée du créateur dans un mode de représentation 2D.

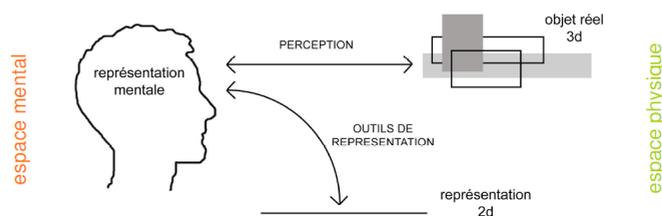


Fig. 29 - Relations entre les objets réels, l'espace mental du concepteur et les représentations 2D qu'il produit.

29 Née en 1977 et diplômée de l'Université IUAV, architecture à Venise en 2004. Elle a soutenu sa thèse de doctorat de Génie Civil en 2009 à Montpellier.

30 SILVESTRI, Chiara ; FLEURY, François ; BAGNERIS, Marine. *Morphologie et conception*, p. 20

Pour bien comprendre le processus de création architectural, il faut se rendre compte que la conception d'un ouvrage se fait toujours par nécessité physique ou morale et non comme dans les Beaux-Arts, suite à une envie compulsive, un besoin d'exprimer une émotion de la part d'un artiste. Une autre différence est la nécessité intrinsèque pour tous les ouvrages de devoir exister matériellement. Cette réalité a des répercussions directes sur la conception de ceux-ci puisqu'il y a des besoins fonctionnels et matériels à prendre en compte.

Les relations entre ces trois pôles - espace mental, réel et représentation graphique - s'exercent de manière continue car on est dans un processus itératif et cumulatif constitué de boucles répétitives entre analyse, synthèse et évaluation pour la résolution de problèmes puis de sous-problèmes qui auront des répercussions sur le global et ainsi de suite jusqu'à une solution affinée.

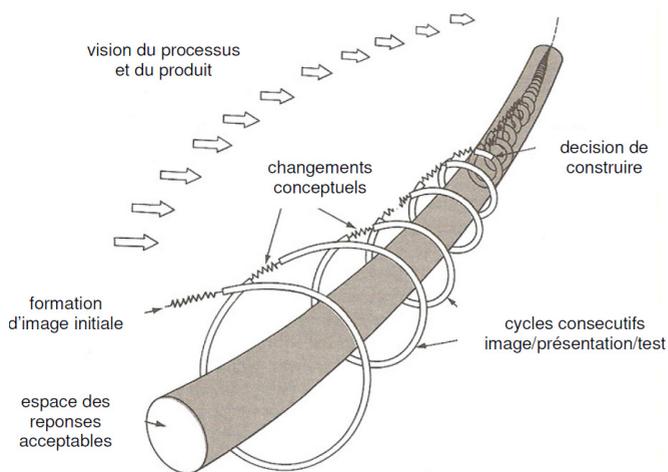


Fig. 30 - Métaphore de la spirale pour modéliser un processus de conception, proposée par Zeisel, 1984

On peut catégoriser les instruments disponibles à ce jour en deux groupes : les outils de représentation et les outils de génération de forme. Les premiers sont les plus couramment utilisés, les autres sont encore récents sur le marché et évoluent continuellement pour s'adapter à la demande des concepteurs.

Pour définir les outils de représentation, on peut dire qu'ils servent à la description d'un objet, d'un concept afin de mettre en évidence ses aspects significatifs. Ceux-ci peuvent être des plans, maquettes, croquis, textes par exemple et permettent donc d'externaliser la pensée du concepteur en vue de la communiquer.

D'autre part, les outils de génération de forme sont majoritairement des outils numériques. Ils permettent de déplacer chaque nœud indépendamment des autres malgré le fait que cela ait une influence sur la forme globale. Nous aborderons plus précisément cette technique dans le chapitre suivant qui parle des blobs, cette famille de formes récemment développée. Nous en avons déjà parlé dans le chapitre consacré plus précisément à l'informatique mais pour rappel, nous pouvons dire qu'à l'heure actuelle, ces modeleurs de forme sont encore peu utilisés par les agences d'architecture par peur de perdre le contrôle total de la conception de l'objet.

Cependant, une question cruciale persiste quand même à propos de ces outils de génération de forme : sont-ils réellement à la base d'un nouveau processus de conception ou bien s'agit-il du processus traditionnel de conception à partir de nouveaux instruments ?

Découvrons à présent ces différents outils de représentation et leurs spécificités. L'analyse de ceux-ci au travers du travail de Frei Otto a comme intérêt d'effectuer cette prospection au sein d'une mise en situation concrète, même si cela n'est pas exhaustif, et ainsi de pouvoir observer les changements effectués dans le processus de travail en fonction des difficultés rencontrées et de l'apparition de nouveaux outils.

1. OUTILS DE CONCEPTION D'OTTO À AUJOURD'HUI

Dessin

Le dessin est la technique de représentation traditionnelle de l'architecte mais ce ne fut pas toujours le cas car celui-ci n'a pas constamment construit en pensant dès le départ à la conception. En effet, cet outil a permis de faire évoluer une construction simple en une conception architecturale plus poussée. C'est seulement depuis le XV^e siècle que ce mode de représentation est utilisé comme technique d'anticipation et de communication. Selon le but pour lequel le dessin est effectué et la phase du projet dans laquelle on se trouve, il y a plusieurs méthodes de travail possibles : dessin technique, artistique, croquis, relevé...

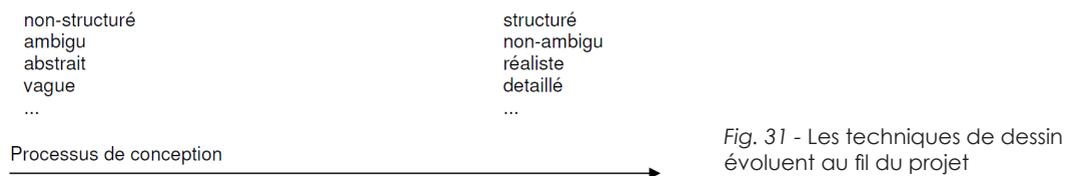


Fig. 31 - Les techniques de dessin évoluent au fil du projet

Puis, évolution faisant, cette technique a été supplantée par des outils de représentation analogues que sont les outils numériques. Or, le dessin a un rôle fondamental dans la conception spatiale, à la fois en tant qu'outil mais aussi en ayant un statut majeur dans la conception mentale car il permet le passage des images mentales aux représentations en 2D.

De manière générale, l'utilisation du dessin à main levée reste présente en phase d'esquisse et laisse place à l'informatique pour le reste de la démarche architecturale. La problématique rencontrée est donc ce manque de continuité depuis la conception jusqu'à la réalisation. Nous allons aborder les expérimentations physiques. Nous poursuivrons avec une première approche des possibilités d'utilisation de l'informatique sur lesquelles nous reviendrons plus précisément dans le chapitre suivant, afin d'analyser les conséquences de cette évolution et les solutions qui ont été mises en place.

Expérimentation physique

Comme déjà expliqué dans ce travail, Otto va travailler énormément par maquette et cet outil ne sera pas uniquement essentiel à cet architecte car bien d'autres comme Gaudi en feront leur instrument de prédilection.

L'architecte allemand a produit des maquettes, d'une part pour définir la forme exacte de l'ouvrage puisqu'elle permet d'avoir une information immédiate sur la tridimensionnalité de l'objet, et d'autre part, pour calculer les forces qui s'exercent sur la structure. Dans ce dernier cas, il faut veiller à la compatibilité de la maquette. En effet, celle-ci doit être réduite avec les proportions exactes et cela s'avère compliqué à mettre en œuvre. Si, par exemple, du béton est utilisé dans la réalité, tous ses composants comme la granulométrie des granulats, devront être réduits également, ce qui entraîne des modèles complexes et coûteux. Otto considère cependant qu'il est nécessaire de faire au minimum une maquette pour confronter le résultat informatique à une autre méthode. Cette méthodologie lui permet de trouver des structures innovantes.

Pendant la période gothique et la Renaissance, les maquettes ont constitué un outil fondamental de représentation pour la conception mais aussi pour communiquer avec les mécénats. Du XX^e siècle à nos jours, elles restent encore un outil indispensable.

Néanmoins, les maquettes physiques ont tendance à être supplantées par les maquettes numériques qui permettent de contenir dans une même représentation des informations de type géométrique, mécanique, thermique et technologique³¹.

Une des expérimentations principales d'Otto est l'utilisation d'un film de savon.

Les surfaces ainsi formées présentent deux avantages pour la construction de couvertures de bâtiments : elles sont celles qui utilisent le moins

31 SILVESTRI, Chiara. *Perception et conception en architecture non-standard*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, 2009, p. 51

de matière pour couvrir l'espace à l'intérieur du contour et elles ont une tension surfacique uniforme.

Une « machine à film de savon » a été développée et construite à l'IL pour l'enregistrement et la mesure géométrique de modèles de film de savon. Une lumière parallèle est utilisée pour projeter les modèles dans leurs dimensions réelles sur un écran ; ceux-ci sont ensuite photographiés et mesurés. Les formes produites dans l'expérience du film de savon sont construites comme des modèles de conception et de travail pour un traitement ultérieur dans le processus de conception.

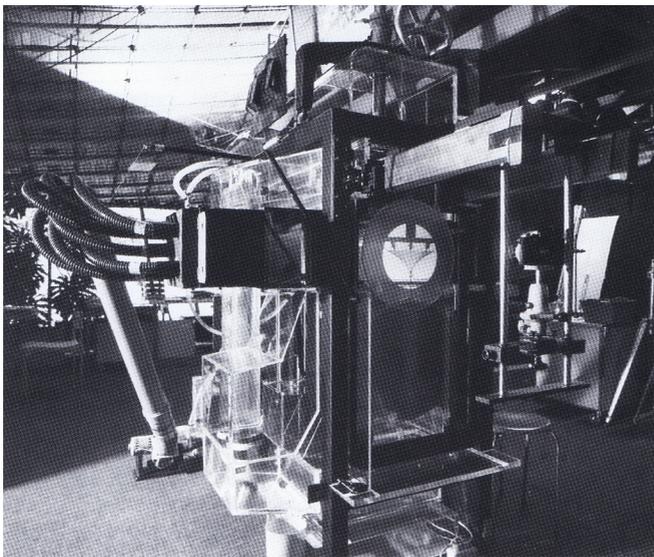


Fig. 32 - Machine à film de savon à l'Institut de Stuttgart : l'appareil photo permet de réaliser des clichés à partir desquels seront prélevées les mesures.

Une autre expérience est réalisée à partir de chaînes en suspension - cette même expérience a été utilisée par Antoni Gaudí près de septante-cinq ans auparavant.

Même lors de la conception de voûtes, d'arcs ou de coques, il est possible d'utiliser le processus d'auto-formation pour établir une forme. Nous avons déjà expliqué cette expérience de la chaînette dans le chapitre sur les mathématiques. Pour rappel de l'essentiel, si on retourne la chaînette de 180° sur un axe horizontal, on obtient une forme de voûte qui est chargée uniquement en compression. Il en résulte des formes qui ont besoin de peu de matière et qui ont, proportionnellement à leur taille, une faible masse. C'est l'une des conditions requises pour la réalisation de grandes portées.

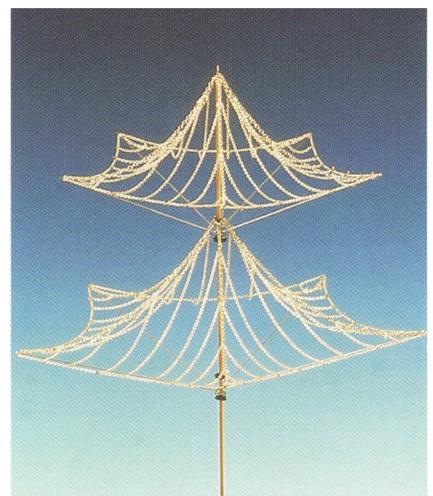


Fig. 33 - Modèle suspendu pour l'étude des toits suspendus

Un réseau dense de chaînes suspendues permet de simuler des toits en suspension qui sont stabilisés par leur propre poids. Les toits de ce genre se retrouvent désormais dans le monde entier.



Fig. 34 - Modèle avec bandes de plâtre construit en suspension et inversé une fois sec

Ce modèle a ensuite été amélioré et fabriqué à partir de bandes de plâtre. Cette technique est simple et facile à mettre en œuvre mais moins précise. Le principe réside dans le fait que les bandes sont humidifiées pour prendre la courbe optimale puis durcissent. L'avantage est que la maquette conserve sa forme même lorsqu'elle est pivotée à 180°. Ces méthodes - filets de chaînes et bandes de plâtre - peuvent servir de modèle de base pour faire l'objet d'une simulation par ordinateur afin de capturer plus précisément les formes.

Dès la fin des années 40, Otto a développé des modèles suivant ces principes en quête de formes pouvant être construites avec légèreté. Les travaux menés par l'IL sur les formes produites naturellement par des filets suspendus démontrent qu'un grand nombre de formes naturelles sont des formes dans lesquelles les efforts intérieurs sont minimaux. Depuis lors, les constructions naturelles ont été reconstruites et examinées sous l'angle de leurs lois structurelles. Les chercheurs ont également développé des programmes expérimentaux afin d'étudier ces formes d'équilibre pour les reproduire à une plus grande échelle.

Beaucoup de formes complexes peuvent désormais être imaginées mathématiquement en utilisant des méthodes numériques, sans être expérimentées par maquette physique, mais la maîtrise des méthodes de construction de modèles expérimentaux a été primordiale pour le développement de ces programmes mathématiques.

Avant l'apparition de telles technologies, Frei Otto utilisait la photographie pour comprendre et mesurer certains modèles.

Photographie

La photographie au microscope électronique est un autre outil qui a permis des avancées intéressantes. En effet, c'est grâce à J-G Helmcke qu'Otto a découvert les objets microscopiques qui pouvaient dès lors être photographiés. Cela lui a ouvert d'autres univers.

« L'expansion des horizons de l'optique grâce au microscope et à la photographie électronique, à la photogrammétrie et à la stéréoscopie, a conduit au développement de nouveaux domaines des formes biologiques dans les dernières décennies. Prenons par exemple les formes d'amibes, des radiolaires, des diatomées, des microbes, des bactéries, du sperme, des virus, etc. Les " intérieurs " des objets biologiques ont été rendus visibles grâce aux nouveaux processus photographiques.³² » Frei Otto

Frei Otto est malgré tout mitigé par rapport à la technologie, comme nous avons déjà pu le deviner et allons le constater.

Il cherche toujours à comprendre la vérité structurelle dans la réalité : c'est pourquoi il conserve énormément d'informations au sujet de ses expériences. Il est devenu expert en photographie qu'il utilise comme instrument scientifique pour l'enregistrement des données structurelles. Pour un projet de construction, il peut prendre des centaines de photos qui sont systématiquement classées afin de faciliter les consultations futures. Cela l'aide principalement à analyser le processus de construction de la forme, évaluer ses avantages et ses défauts et ainsi étendre sa connaissance structurelle. La conservation des données lui sert également à extrapoler les résultats pour d'autres projets. Frei Otto concentre son attention sur la qualité de la conception structurelle et s'il se réfère à la forme, c'est en tant que source d'efficacité structurelle. Dans cette même démarche, il choisit des matériaux moins pour leur richesse sculpturale que pour leur efficacité mécanique.

Il n'en reste pas moins qu'Otto veille à l'inscription de ses surfaces membranaires dans leur contexte environnemental naturel.

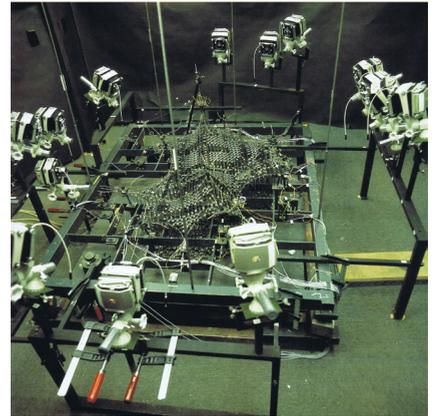


Fig. 35 - Prise de mesure du toit du Stade Olympique de Munich avec des appareils photogrammétriques.

32 OTTO, Frei, IL 3, p. 9



Fig. 36 - Maquette funiculaire de la Colonia Güell, Antoni Gaudí, 1898-1916



Fig. 37 - Maquette renforcée en époxy d'une pompe à essence, Heinz Isler, Deitingen, Suisse, 1967

Une comparaison entre Antonio Gaudí et Frei Otto révèle la proximité de leurs méthodes, en particulier l'adéquation de la forme architecturale avec la conception structurelle. Avec ce procédé de la chaînette, l'Espagnol était certain que toutes les colonnes seraient toujours comprimées et qu'il pouvait donc construire ses édifices en maçonnerie. L'architecture des églises de Gaudí chamboule un ordre vertical établi et rompt avec les schémas habituels des arcs, mais elle garde toujours la hiérarchie classique entre les différents éléments de la structure.

Ses bâtiments ont tendance à être des manifestations concrètes de diagrammes de forces. Par exemple, la forme structurelle de l'église Colonia Güell à Barcelone a été conçue sur la base de considérations empiriques structurelles. Antoni Gaudí a eu recours à un réseau de caténaires en suspension qui lui permet d'obtenir non seulement la forme précise de l'ouvrage mais aussi un modèle à l'échelle qui peut être mesuré à n'importe quel moment. En tant que pionnier de l'application de modèles structurels aux problèmes de conception architecturale, Gaudí a anticipé nombre des utilisations découvertes plus tard par Frei Otto.

L'originalité des travaux de l'IL par rapport à ceux de Gaudí réside dans la recherche de structures non plus constituées d'une juxtaposition d'éléments rectilignes isolés joints par un remplissage mais d'une structure bidimensionnelle; en ce sens, cette démarche se rapproche beaucoup de celle de Heinz Isler. Ce dernier est également à la recherche d'une forme en compression parfaite et utilise aussi des modèles réduits soumis à leur poids propre dont il étudie la géométrie par photogrammétrie avant de les retourner virtuellement. Ces deux chercheurs n'utilisent plus la maçonnerie mais des textiles ou du béton armé.

L'évolution des techniques va leur permettre d'être plus efficaces en complétant les connaissances, en stockant l'information et en facilitant les calculs. Voici une explication du rôle de l'informatique en architecture et dans l'œuvre de Frei Otto.

Informatique

En architecture, on peut distinguer deux types de logiciels informatiques :

- les logiciels de Dessins Assistés par Ordinateur - DAO - qui aident à l'édition du dessin ;
- les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur - CAO - qui permettent de construire un objet virtuel pouvant réagir selon des lois imposées par le logiciel.

Otto considère que l'ordinateur ne peut calculer que ce qui y a déjà été conceptuellement intégré et que c'est la personne manipulant le programme qui crée les formes à l'aide de méthodes de calcul. Pour Otto, les innovations ne sont donc pas possibles via un ordinateur car même si on trouve une forme via cette technique, il nous suffit d'adapter ses proportions et les matériaux pour répondre aux contraintes définies par les calculs. Mais, la forme ne sera pas imprégnée de la sensibilité artistique du concepteur. Otto pense que notre cerveau fonctionne comme un ordinateur mais en plus lent, c'est-à-dire que tout y figure et qu'il peut faire des combinaisons équivalentes voire meilleures que celui-ci. L'ordinateur a tout de même l'avantage d'être plus efficace car il permet de générer, dans un temps limité et à des échelles différentes, un nombre d'informations visuelles plus important qu'avec des outils analogiques comme le dessin ou la maquette. Otto précise que depuis 1965, il utilise également l'ordinateur pour ses calculs mais il reste persuadé que c'est un outil imprécis car, par exemple, on ne peut pas prédire avec exactitude les pressions exercées par le vent ou la neige sur un ouvrage. Frei Otto aurait-il tenu un discours semblable si les technologies avaient été aussi évoluées qu'aujourd'hui ?

Pour Otto, la solution pour mieux comprendre ce qui se passe d'un point de vue physique dans les bâtiments est de procéder à une vérification une fois le bâtiment construit, ce qui était impossible à cette époque-là, ou alors utiliser l'expérimentation par modèles, ce qu'il a fait. En effet, malgré le développement de l'assistance par ordinateur, Frei Otto a toujours gardé une attirance pour ses modèles physiques en 3D. Néanmoins, il est conscient que certaines formes sont difficilement réalisables en maquette alors que l'informatique le permet aisément. Il reconnaît que l'évolution de

cette technologie a libéré la forme architecturale dans le sens qu'elle n'est plus directement et uniquement définie par un modèle physique mais peut être retravaillée de multiples fois par l'ingénieur et l'architecte.

Comme le précise Otto, la conception par ordinateur ne peut exister sans l'intervention de l'architecte car c'est lui qui fixe les critères de mise en forme, la matérialité. Suivant ce critère, le développement des logiciels ne diminuent donc pas autant qu'annoncé par certains opposants à la technologie, le rôle du créateur en architecture.

Ainsi, beaucoup d'architectes se sont adaptés à ces techniques de représentation informatique qui constituent majoritairement une aide mais sans pour autant abandonner le dessin à main levée³³.

Frank Gehry par exemple, reconnu pour son attachement à l'utilisation des nouvelles technologies, garde le besoin de passer par l'expérimentation pour concevoir. L'utilisation du logiciel Catia – Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application – reste extérieure au processus de conception qui repose sur des outils traditionnels. En effet, c'est à partir de croquis que ses collaborateurs construisent des maquettes sur lesquelles sont appliquées des modifications purement plastiques et fonctionnelles. Ces modèles sont ensuite étudiés sur un logiciel informatique. Commence alors un travail itératif puisque les contraintes techniques obtenues par les calculs informatiques influent sur la forme, ce qui engendre une modification des maquettes physiques. Le recours à ces technologies ne signifie pas pour autant une maîtrise parfaite de la forme et c'est ce que je développerai dans le chapitre suivant consacré à la rupture entre forme et structure. Car en effet, l'informatique ne semble pas avoir résolu l'entière des problèmes en matière de rapport entre tous les aspects d'un projet.

33 KESTEMONT, Stéphanie. *L'adaptation de l'architecte face aux technologies informatiques*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture Victor Horta Bruxelles, 2010, p. 39

La complexité des propositions formelles d'architectes tels Z. Hadid ou Coop Himmelb(l)au fait intensément appel à la représentation numérique à chaque étape du processus de conception, auquel participe dès le départ de la réflexion l'équipe d'ingénieurs.

Prenons comme exemple la forme du toit du centre d'exposition BMW Welt à Munich, qui fut générée par l'application de charges sur deux grilles constituant les faces d'un treillis spatial. Une fois la forme désirée atteinte, les deux surfaces déformées furent reliées par des éléments verticaux et diagonaux afin de compléter le treillis. La complexité du toit nécessita une modélisation de la structure car chaque modification locale impliquait une modification de l'ensemble en raison de la redistribution des charges. Suite aux multiples modifications du projet, le développement de l'esthétique s'est opéré par un processus itératif qui n'a pu aboutir que par un dialogue perpétuel entre architectes et ingénieurs³⁴.

Ajouté à ces différentes possibilités que génère l'informatique, l'étude de Silvestri nous révèle que, lors de la résolution d'un problème spatial complexe, les performances des personnes familières au monde des outils numériques sont meilleures quand elles explorent un modèle numérique sur un ordinateur que lorsqu'elles le font sur une maquette réelle.

Cependant, comme déjà précisé dans les précédents chapitres, le développement de l'informatique a entraîné une rupture avec le dessin à main levée et globalement avec l'intelligibilité de la forme conçue, dans la mesure où les règles génératives de celle-ci sont cachées par l'interface et la complexité des logiciels.

En effet, l'interface se simplifie et devient de plus en plus intuitive, facilitant son usage. Ainsi, un nombre incalculable de possibilités spatiales virtuelles sont plausibles. Pourtant, on s'aperçoit qu'un décalage s'établit entre la capacité imaginative et la capacité constructive du projet. Ce qui est virtuellement possible de faire n'est pas

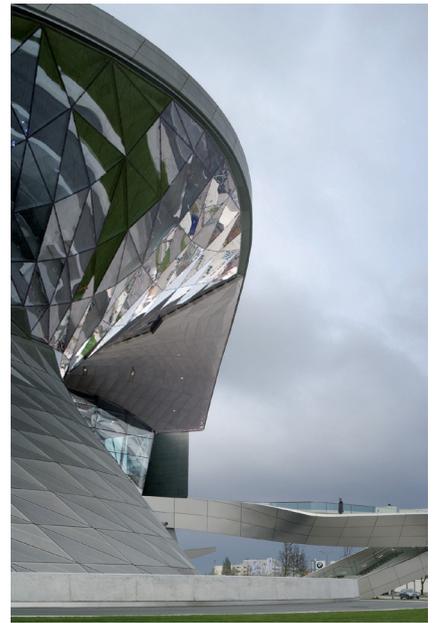


Fig. 38 - Centre d'exposition BMW Welt, Coop Himmelb(l)au, Munich, Allemagne, 2007

34 BAGNERIS, Marine. *Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard : les formes pascaliennes comme outil*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, 2009, p. 39

toujours réalisable. De plus, la cohérence entre les objets de l'espace virtuel et leur existence matérielle dans l'espace physique s'affaiblit à mesure que les outils de modélisation numérique deviennent plus sophistiqués mais surtout que les logiques génératrices de formes se font plus abstraites³⁵. Nous en avons déjà parlé mais nous y reviendrons davantage dans le chapitre suivant.

Certains prétendent que le développement des logiciels diminue progressivement le rôle du créateur dans la conception. Or, malgré cette dépendance certaine aux logiciels informatiques, celui-ci est nécessaire car c'est lui qui fixe les exigences des logiciels informatiques et qui procède à un choix selon ses désirs esthétiques, lorsque l'ordinateur lui propose différentes solutions.

Biologie

Le monde de la biologie forme une source d'inspiration importante pour le travail de Frei Otto dans la conception des constructions légères. Alors que les Métabolistes japonais se sont intéressés aux processus biologiques de la croissance car ils pouvaient s'appliquer aux structures urbaines, Frei Otto s'est passionné pour l'optimisation des formes structurelles naturelles. L'intérêt de Frei Otto pour la biologie est expliqué par sa reconnaissance du fait que les processus d'évolution des formes naturelles sont dus aux lois biologiques de sélection qui engendrent des constructions légères.

Plusieurs caractéristiques de toitures en filet sont présentes dans les toiles d'araignée. Le parallèle inconscient avec des toiles d'araignée ne sera découvert qu'après le développement déjà bien avancé des toiles tendues. La découverte de ces structures et des techniques mathématiques pour l'analyse de leur comportement structurel fournit un cadre théorique pour évaluer l'efficacité des toiles d'araignée.

« La biologie est devenue indispensable pour l'architecture – mais l'architecture est également devenue indispensable pour la biologie.³⁶ » Frei Otto

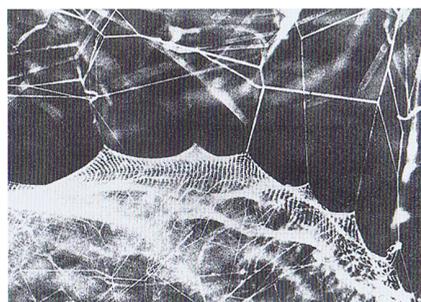


Fig. 39 - Volière à Hellabrunn, Jörg Gribl & Frei Otto, 1979-80 et toile d'araignée cyrtophora

35 SILVESTRI, Chiara ; FLEURY, François ; BAGNERIS, Marine. Op cit.

36 NERDINGER, Winfried. Op cit., p. 45 (traduction personnelle)

Frei Otto est très proche de D'Arcy Thompson du point de vue de leur pensée. Ce dernier écrit dans *Forme et Croissance*: « En résumé, la forme d'un objet n'est qu'un diagramme des forces, du moins au sens où il nous est possible de déterminer ou de déduire à partir de ce diagramme, les forces qui ont agi ou agissent encore sur cette forme. C'est donc dans ce sens strict et tout particulièrement, que la forme d'un objet est bien un diagramme des forces.³⁷ »

Nous en avons parlé au début de ce travail, D'Arcy Thompson a également son point de vue sur la question de l'importance structurelle dans un projet et énonce cela dans son remarquable traité *On Growth and Form* publié en 1917. Ce scientifique a exploré les aspects fonctionnels de la forme organique afin de définir les conséquences provoquées par les forces mécaniques et physiques sur les structures vivantes.

Un exemple de réponse à la disposition des éléments en fonction des forces qui s'exercent dessus a été découvert par l'ingénieur Culmann en 1866. En effet, les trabécules constituant les os sont disposées en fonction des lignes de force qui s'y dessinent.

« En supposant un dépôt aléatoire des trabécules dans la substance de l'os, Thompson a estimé que si elles se trouvent dans la direction de l'une des lignes de pression, elles seront dans une position d'équilibre comparative ou une perturbation minimale. En outre, lorsque la distribution de la pression des lignes de force est modifiée par des variations de charge externe, le système de trabécules est remodelé en l'espace de quelques semaines, pour s'accorder avec le nouveau modèle de répartition des contraintes.³⁸ »

Des décennies après l'invention de l'informatique, l'architecture tisse des liens étroits avec les sciences du vivant pour réinventer les formes, la manière de concevoir. Ces nouvelles méthodes conceptuelles et cette nouvelle interdisciplinarité entre biologie et architecture permet d'enquêter dans le monde du vivant sur ce qui pourrait être pertinent pour la conception

37 THOMPSON, D'Arcy. Op cit., p. 38

38 DREW, Philip. Frei Otto, *Form and Structure*. Londres : Crossby Lockwood Staples, 1976, p. 22 (traduction personnelle)

architecturale. En effet, grâce à la compréhension et à la maîtrise actuelle des algorithmes, l'homme est désormais capable de reproduire des phénomènes naturels tels que la croissance du vivant. Nous y reviendrons à la fin du chapitre suivant pour comprendre l'intérêt d'une telle démarche.

Maintenant que nous avons vu les outils principaux utilisés dans le processus de conception, nous allons nous attarder à la rupture entre forme et structure que ces derniers ont engendrée et les conséquences affectant le travail intellectuel et graphique des architectes. Ensuite, nous aborderons une solution proposée par Marine Bagnéris, à savoir les pFormes.

2. RUPTURE ENTRE FORME ET STRUCTURE

Le XXI^e siècle pose un problème de gestion architecturale qu'il faut prendre en compte tout au long de l'évaluation du projet. En effet, dès le XIX^e siècle, la multidisciplinarité des bureaux d'architecture s'est mise en place pour mieux répondre à l'évolution des technologies mais également des normes. Le regroupement de plusieurs corps de métier au sein d'un même bureau permet d'être plus pointu dans les différents domaines et ainsi d'amener le projet jusqu'à un niveau de perfection plus avancé. Ce nouveau mode de fonctionnement engendre par ailleurs un problème majeur au niveau de la coordination des différents intervenants et la gestion commune des informations, depuis la conception jusqu'à la réalisation de l'ouvrage.

Les formes libres sont générées pour donner une forme singulière à la construction soit par conception architecturale, soit par désir d'ambitions sculpturales de la part de l'architecte. Ces architectures particulières ne peuvent généralement pas être définies par la géométrie élémentaire.

On remarque donc qu'en plus de l'interdisciplinarité, les moyens de communiquer aisément sont peu nombreux voire inexistants. Et si nous pensons que les modèles d'analyse sont différents de ceux dédiés à la conception, ce n'est toujours pas le cas. Les méthodes d'analyse sont davantage tournées vers les mathématiques et l'expérimentation, et ainsi dégagées de charges sémiotiques, alors que l'activité conceptuelle est peu mathématisée et agit dans la lignée de l'intuition. Il existe malgré tout une intersection entre ces deux procédés observables dans le processus itératif. Il faut donc mettre en œuvre les méthodes permettant de se donner les moyens de faire fusionner l'analyse et le processus de conception au sein du projet.

La géométrie euclidienne comme premier langage unificateur



Fig. 40 - Palazzo Carignano, Guarino Guarini, Turin, Italie, 1679-1692

Pour faciliter ce processus de diffusion de l'information et de description des formes, une solution a été d'établir un langage appelé géométrie euclidienne, utilisé par les constructeurs depuis l'Antiquité. Il permet de décrire précisément les formes à l'aide de quelques paramètres, ce qui autorise à les reproduire avec la plus grande fidélité. Mais le problème de cette méthode est que seule une gamme limitée de formes peut être transcrite par ce langage, excluant notamment toutes les formes sinueuses. Ce vocabulaire de transmission des informations formelles réduit les possibilités qu'ont les architectes de s'exprimer, à quelques exceptions près, comme Guarino Guarini qui, grâce à une connaissance parfaite du vocabulaire, a pu malgré tout aller au-delà du langage « traditionnel ».

Si on prend l'exemple de l'arc, il est en effet aisé de reproduire la forme d'un arc en plein cintre à l'aide d'un clou et d'une corde alors que si l'on tente de reproduire la forme d'une caténaire, les outils nécessaires sont plus complexes.

Le processus de formation comme procédé créatif

À l'heure actuelle, la majorité des objets naturels restent compliqués à analyser géométriquement. Une méthode employée pour les décrire se base sur leur processus de formation comme ceux de croissance, d'érosion, de déformation, sachant que plusieurs d'entre eux peuvent interagir sur un même objet.



Fig. 41 - Crypte de la Colonia Güell, Antoni Gaudí

Gaudí a été un des premiers qui a opté pour le processus d'auto-génération dans sa démarche de conception architecturale. Celui-ci est réalisé à partir d'un modèle physique pour déterminer la structure complète d'un bâtiment. C'est ainsi que la maquette de l'église de la Colonia Güell près de Barcelone a été réalisée à l'échelle 1/10. Les charges exercées ont été simulées par des petits poids de plomb et ont permis de créer la forme

d'équilibre qui détermine la structure optimale en fonction des quelques contraintes imposées, à l'image de la méthode expliquée précédemment pour concevoir la Sagrada Familia.

Dans ce cas, l'architecte ne détermine pas directement la forme du bâtiment. Il doit donc renoncer au rôle premier qui était le sien jusqu'alors, formant directement la silhouette du bâtiment. À présent, d'une manière volontariste, l'architecte abandonne son rôle de « créateur » et se soumet au comportement du modèle, participant au processus expérimental en agissant sur les conditions aux limites de la forme. Ceci signifie que toute la forme suit les règles du modèle funiculaire. La technique est assez compliquée puisque chaque intervention locale a généralement un effet sur la structure globale. La qualité architecturale que présente l'église de la Colonia Güell est due au processus de conception utilisé.

Gaudi, bien que partant d'un schéma typologique entièrement traditionnel, est arrivé à un résultat innovant, complexe et convainquant par la cohérence du développement spatial. D'autre part, ce processus assure la réalisation d'une forme structurellement stable. Cependant, le désavantage d'avoir abandonné la géométrie euclidienne réside dans le fait que pour obtenir une construction optimale, l'architecte doit être présent sur le chantier afin de « traduire » les représentations aux ouvriers. Ceci est la conséquence de l'absence de langage descriptif disponible pour codifier les instructions d'exécution des travaux.

Relation entre forme et forces via le processus de formation

Heinz Isler a construit de nombreuses coques en béton dans les années 50 et pour ce faire, il a également utilisé des modèles funiculaires. Les formes autonomes qu'il développe ne peuvent pas être trouvées par des processus géométriques classiques en raison de la relation intrinsèque entre les forces et la forme. La clarté structurelle ainsi obtenue est une des qualités esthétiques propres au travail d'Isler.

Une approche non volontariste a également été utilisée par Frei Otto qui tire ses structures de modèles de simulation. Il les a systématiquement développées suivant le processus d'auto-génération effectué sur des modèles physiques. Ce processus d'auto-mise en forme détermine la conception des structures et permet d'expliquer celles présentes dans la nature. Frei Otto affirme que ses structures sont des structures naturelles, pas dans le sens formel du terme mais en considérant le processus d'auto-génération comme naturel. Celui-ci est en effet déterminant pour toutes les structures animales ou végétales.

Il n'y a donc pas de place pour l'idée de donner forme au nom d'une volonté subjective et individuelle mais la forme se justifie par le processus d'auto-façonnage. Par conséquent, lorsque le bâtiment fait polémique, l'architecte défend le processus de conception utilisé et non le bâtiment en lui-même.

Dérive de l'informatique : rupture entre forme et structure

Ces dernières décennies, on a vu émerger une architecture marquée par de nouvelles formes s'éloignant de l'orthogonalité traditionnelle. Les architectes ont effectivement mis à expérimenter l'outil numérique pour concevoir leurs projets. Free-form, liquid, blob, digital ou non-standard qualifient la richesse d'expressions formelles stimulée par les progrès de l'infographie. En effet, un standard définit un modèle de référence caractérisé par des règles alors que l'architecture non-standard correspond, par opposition, à des projets dont la conception est sans référence aux règles ordinairement admises. Cette non-conformité n'affecte généralement pas l'entièreté de la conception mais certains aspects peuvent être concernés par une innovation.

La conception des formes fluides existe depuis longtemps dans le domaine de l'art visuel, du design automobile et de l'aéronautique pour des raisons de technicité et d'optimisation structurelles ou parfois pour répondre à des exigences de style. Les premiers logiciels de dessin mis à la disposition des architectes dans les années 80 différaient peu du plan dessiné sur calque. L'outil correspondait avec une certaine tendance des architectes à dessiner ce qui peut être construit et à construire

ce qui peut être dessiné. La démocratisation de la technologie numérique au milieu des années 90 a rendu accessible au public des logiciels de modélisation et de calculs initialement développés pour des secteurs précis³⁹. En architecture, cette complexité formelle recherchée par les concepteurs soulève d'importantes difficultés lorsque l'ingénieur s'attache à sa mise en pratique, que ce soit en bureau d'études ou lors de la mise en œuvre.

Un exemple connu et représentatif de cette tendance est le musée Guggenheim de Frank Gehry qui marque à la fois une nouvelle architecture, une manifestation sociale et un acte culturel. L'impact économique généré par l'ouverture du musée en 1997 a déclenché dans le monde entier une grande sollicitation des architectes contemporains pour ce type d'ouvrage.

La première vague d'ouvrages conçus à l'aide de cette nouvelle technique informatisée laissera de nombreux projets non réalisés car ils sont restés cantonnés à la virtualité de l'outil et l'adaptation au réel était infaisable tellement la réalité constructive avait été niée.

Ce que l'on peut constater actuellement à propos de cette tendance n'est pas très enthousiaste. L'outil numérique a en effet permis aux architectes de générer des formes jusqu'alors inaccessibles avec les moyens traditionnels, à savoir non descriptibles par la géométrie euclidienne mais favorisant ainsi leur audace en matière de conception spatiale. En effet, derrière les interfaces simplifiées des logiciels, les formes sont élaborées à partir d'outils mathématiques nommés bézier, splines, nurbs... La modélisation obtenue est le résultat de calculs effectués à l'insu de l'utilisateur, ce qui engendre, la plupart du temps, une incompréhension de la logique de génération de la forme. Il en découle que la transmission de l'information est difficile et par-delà, la réalisation de l'ouvrage est compromise.

Il en résulte des projets aux géométries complexes, généralement gouvernés par des intentions esthétiques ne prenant pas en compte les contraintes techniques et structurelles que cela engendre. Ainsi, lorsqu'il est envisagé la transposition



Fig. 42 - Guggenheim, Frank Gehry, Bilbao, Espagne, 1997

39 BAGNERIS, Marine. Op cit., p. 9

de ces formes dites « libres » ou « non-standards » vers la construction, cela semble plus compliqué. On appelle cette méthode la démarche « top-down » qui émerge d'une intention globale, d'une image pour ensuite définir chaque élément qui compose l'ensemble.



Fig. 43 - Fiera Milano, M. Fuksas, Milan, Italie, 2005

D'autres exemples de cette rupture sont le terminal de Yokohama du bureau d'architectes FOA ou la nouvelle foire de Milan par Massimiliano Fuksas qui matérialisent des projets remplis de contradictions entre les ambitions de fluidité mises en avant sur les images de synthèse et la réalité fragmentée par la structure. Le choix de la structure porteuse et son interaction avec la couverture font apparaître des impératifs d'ordre géométrique, mécanique, matériel et technologique qui rendent difficiles l'émergence d'une solution idéale. Il faut nécessairement développer un processus itératif pour préciser les critères de performances et ainsi hiérarchiser les solutions possibles.

L'idée de continuité est structurante dans l'architecture non-standard alors que lors de sa mise en œuvre, cette intention s'effiloche par les contraintes d'exécution. Le désir premier qui fait l'existence de ce type de conception se voit utopiquement réalisable par l'informatique mais impossible dans la réalité.

C'est la conséquence probable de l'immaturation de ces approches émergentes. L'architecture non-standard pâtit d'être trop souvent décrite en termes uniquement visuels, alors que ce qui devrait la caractériser est davantage les moyens de sa réalisation. Cette architecture est ainsi à l'origine de la plupart des incompréhensions mutuelles entre architectes, ingénieurs et entrepreneurs⁴⁰.

Il y a donc deux tendances majeures : soit la forme n'est plus en relation étroite avec les autres aspects de la conception, soit les outils actuels de l'ingénierie manifestent leurs limites à créer de nouvelles formes.

Une dizaine d'années séparent le Guggenheim de Bilbao et le Musée Pompidou de Metz. Frank Gehry a utilisé des techniques habituelles et les a appliquées à un nouveau style.

40 BAGNERIS, Marine. Op cit., p. 20

Le Guggenheim ne fait donc pas l'objet d'une technologie d'exécution innovante. La structure du Pompidou intègre davantage les paramètres de conception afin d'aboutir à une cohérence mécanique et technique, ce qui n'exclut pas les difficultés de réalisation. Le défi à relever consiste donc à conserver cette diversité et cette richesse morphologique tout en retissant les liens avec l'ingénierie et la technique.

Toutes ces difficultés à établir un processus de conception et de mise en œuvre parfait, c'est-à-dire un rapport entre les idées et les moyens employés pour leur matérialisation, sont majoritairement dues au fait que l'architecture a cette particularité de devoir être réalisée. Cette matérialisation est guidée d'après des choix qui intègrent de nombreuses contraintes en termes de coût, de dépense énergétique, d'échelle, de stabilité, d'intervenants devant coopérer ensemble pour résoudre ces divers aspects.

Face à ces dilemmes techniques, les ingénieurs sont confrontés à deux écoles d'architectes. Z. Hadid, F. Gehry imposent une forme et c'est à l'ingénieur à concevoir un système structurel qui en épouse les contours. C'est donc l'ingénieur qui tente de s'adapter aux formes désirées par les architectes.

Le MARta Herford Museum conçu par Gehry illustre cet intérêt pour la forme et les performances visuelles et non celui pour le lien entre les différents aspects que prend en compte l'architecture. Dans cet ouvrage, aucun principe structurel n'est lisible à première vue. Le complexe de façade est constitué d'une superposition de couches : du parement extérieur qui joue un rôle passif donnant simplement l'aspect esthétique et repris par une structure secondaire, elle-même rapportée à une structure primaire porteuse de l'ensemble.

Le processus itératif entre maquette expérimentale et résolution structurelle via des processus informatiques puis mise en œuvre, engendre à chaque étape des inconnues technologiques qui font appel au savoir-faire des entreprises. Il y a perte d'informations à chaque étape du processus par manque de circulation des informations et chaque intervenant résout ses



Fig. 44 - MARta Herford Museum, Frank Gehry, Herford, Allemagne, 2001-2005

problèmes sans prendre en compte l'aspect global de la construction. La forme apparaît à l'origine de cette rupture de communication et d'unité.

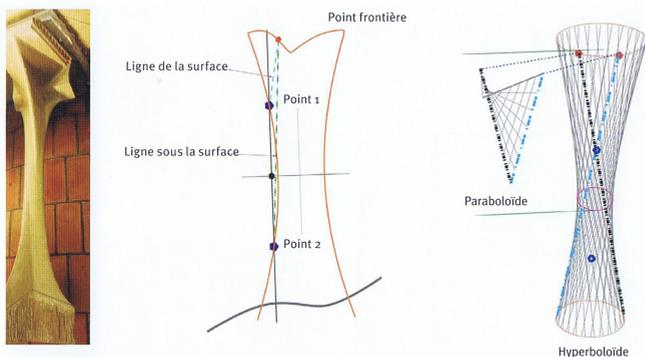
Contrairement à cela, S. Ban, T. Ito notamment, travaillent directement en collaboration étroite avec les ingénieurs pour innover ensemble et tenter d'obtenir une cohérence globale dans le projet. La maîtrise de cette complexité naissante exige un partage des compétences entre les architectes, les ingénieurs et les industriels dès la phase de conception pour garantir la transmission des intentions initiales jusqu'à l'exécution. Cette interaction intime entre conception et matérialité peut remettre en question l'identité de l'architecte ou de l'ingénieur puisque le projet devient le résultat d'un travail commun, conjuguant dans un même geste architectural, esthétisme et rationalité structurelle. L'ingénierie n'intervient plus seulement de façon limitée pour proposer des solutions plus raisonnables mais participe dès la conception pour offrir plus de créativité. Une telle définition du rôle de l'ingénieur dans le processus de conception a déjà été adoptée par M. Sasaki, M. Ikeda et C. Balmond également.

L'interdisciplinarité au cœur de la problématique

Certaines synergies entre les paramètres essentiels de conception que sont la forme, la force, le matériau, la structure et la technologie, dépendent du transfert d'informations entre les intervenants depuis l'ébauche de la conception jusqu'à la réalisation du projet. Les différentes façons de percevoir l'information viennent principalement des connaissances et de la perception des associés au projet ; et ce par le fait que les architectes ont un savoir basé essentiellement sur l'expérience alors que certaines professions ont un savoir plutôt théorique. Les problèmes de compréhension et de langage surgissent à l'interface des savoirs, alors qu'ils doivent s'unir pour mener l'expérience de front. On peut observer que la communication diffère en fonction du type de formes mis en place dans un projet. Découvrons d'abord les trois catégories de formes principales :

1 - Les formes géométriques contraintes ou formes analytiques sont conditionnées par une définition géométrique. Ce sont des formes que l'on retrouve généralement dans l'architecture classique. Les voûtes ou les dômes en font notamment parties. Leur forme conduit à une surface de révolution facile à dessiner mais aussi à construire. On retrouve aussi les surfaces réglées que sont les paraboloides hyperboliques et les hyperboloïdes de révolution qui sont très souvent réalisées par des coques minces en béton. Dans ce type de courbe, on retrouve nombreux ouvrages de Félix Candela.

Pour rappel du chapitre sur la mathématisation de l'architecture, la poursuite des travaux de la Sagrada Familia a nécessité des recherches en modélisation numérique pour allier les intentions architecturales de Gaudí aux moyens techniques actuels. Il s'agit d'une actualisation des méthodes morphologiques employées par l'architecte espagnol pour traduire des formes organiques à partir de combinaisons de formes analytiques simples. Par ce biais, l'analyse des structures en béton et la définition des coffrages font appel aux outils actuels de l'ingénierie et de la technique. La richesse de représentation graphique offerte par l'ordinateur a permis de représenter cette complexité architecturale.



2 - Les formes mécaniquement contraintes ou formes mécaniques sont celles dans lesquelles il existe un lien étroit entre les paramètres forme et forces, comme dans les travaux réalisés par Frei Otto. Un tel rapport exige une étape de recherche de forme qui définit une géométrie assurant un équilibre statique. Des logiciels dédiés aux processus

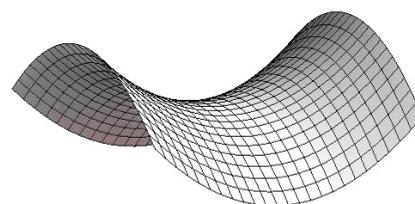
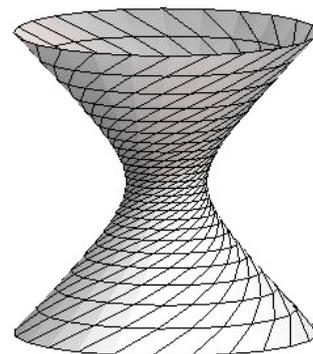


Fig. 45 - Paraboloid hyperbolique et hyperboloïde de révolution



Fig. 46 - Modélisation informatique des colonnes du fronton de la Sagrada Familia à l'aide de formes analytiques.

de recherche de forme sont capables de faire ce travail mais le recours à l'expérimentation demeure un moyen complémentaire pour appréhender et contrôler la morphogenèse.

Dans cette catégorie on retrouve les formes funiculaires notamment utilisées comme un outil de conception par Gaudi pour rechercher la forme des systèmes comprimés. C'est en partie ce qu'Otto a réalisé comme travail également.

3 - Les formes flexibles constituent une catégorie à part des deux premières, reprenant la majeure partie des projets de forme libre proposés par les architectes. Ces produits de l'architecture digitale entraînent une complexité morphologique difficilement communicable aux ingénieurs et aux entreprises. Ces formes peuvent être modifiées à l'infini par un ordinateur et sont caractérisées par de fortes courbures. On peut reprendre ces travaux sous le terme d'architecture non-standard.

En fonction des formes employées, les difficultés rencontrées dans le processus de projet seront différentes par la complexité des opérations à mettre en œuvre.

Les formes analytiques sont l'expression de ce qui peut être dessiné comme de ce qui peut être aisément construit. Cette simplicité permettait aux artisans de modéliser la forme à partir d'un vocabulaire basé sur une géométrie commune. Bien que le langage maîtrisé par chacun puisse différer, les outils utilisés n'autorisent aucune confusion sur le résultat final. Le lien entre ces différents savoirs existe bien mais le vocabulaire formel est limité et ne semble plus passionner les architectes.

Les formes mécaniques connaissent également un abandon de la part des architectes. En effet, la nécessité de main d'œuvre qualifiée est intenable financièrement. De plus, ces formes exigent un intérêt certain pour les procédés de recherche de forme que peu d'architectes ont développés. L'architecte est alors écarté de la morphogenèse des formes mécaniques qui est reléguée à l'ingénieur. Ainsi, sans connaissance mécanique pour en élargir les possibilités, le résultat formel est généralement restreint à des solutions similaires et difficilement modifiables.

Actuellement, l'intérêt des concepteurs se porte vers la troisième catégorie de formes qui ne conserve pas nécessairement le lien entre la forme et les autres paramètres de conception mais qui permet une plus grande diversité formelle.

Cette difficulté de synchronisation entre les multiples disciplines a été largement présente dans le projet du Centre Pompidou à Metz. L'étude de la structure confiée à l'origine à un bureau d'ingénierie de renommée s'est vue reprise par un autre, faute des compétences nécessaires et malgré sa notoriété. De plus, les entreprises capables de fabriquer une telle ossature n'existent pas en France, ce qui a engendré une délocalisation de la réalisation en Allemagne. Ces problématiques impliquent que ces projets « prototypes » ne respectent ni les délais, ni les coûts initialement prévus. Le budget initial de construction du Centre Pompidou a ainsi doublé lors de sa réalisation.

Les ingénieurs et architectes ont tendance à penser qu'il faut se limiter à construire ce qu'on est apte à communiquer. C'est pourquoi on peut observer parfois un retour vers le savoir géométrique afin de rendre compréhensible la forme aux différents corps de métier.

Dans les deux premières catégories, les outils d'aide à la conception permettent la continuité de communication et à terme, la réalisation de formes complexes, alors que dans le cas des formes flexibles, le paramètre de forme est l'étape du processus de conception qui demande le plus d'attention, compromettant ainsi la relation avec les autres composantes. Ces formes ont beaucoup d'intérêt pour les architectes de par les opportunités formelles qu'elles proposent, mais également parce que ces formes sont celles qui se rapprochent de celles observées dans la nature et qui par une compréhension de la croissance de celle-ci, autoriseront à terme la réalisation d'ouvrages rationnels et optimisés dans leur forme et l'usage de matériaux.

Il faut donc mettre en place des processus qui permettent la transmission précise et univoque des informations spatiales entre les concepteurs et les constructeurs.

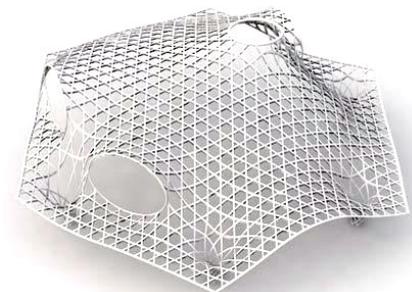


Fig. 47 - Centre Pompidou : maquette et photo de chantier, S. Ban, Metz, France, 2006-2010

La morphologie structurale comme piste de réflexion

Dans un premier temps, nous pouvons définir la morphologie, terme inventé par Goethe, pour définir l'étude des formes et structures selon tous leurs aspects. Ceux-ci peuvent être physique ou abstrait, perceptuel ou symbolique, fonctionnel ou social, spatial ou temporel⁴¹. Cette science interdisciplinaire explorant les principes généraux de la forme a été sollicitée abondamment depuis le début du XX^e siècle en raison de la nécessité de trouver une solution alternative pour définir l'espace architectural.

Plus précisément, la morphologie structurale se définit comme l'étude de la forme en relation avec les cheminements des forces transitant dans les éléments structuraux la matérialisant. Cette étude exige l'interaction de nombreux champs disciplinaires pour être abordée dans la perspective des forces, des matériaux, de l'énergie, du cycle de vie, des moyens de production, de la fonction, du coût, de la perception, de l'écologie notamment. Cette approche a pour objectif de contribuer à une prise de décisions éclairées lors du processus de conception⁴². Celui-ci identifie donc la communication entre les intervenants comme une donnée essentielle pour aboutir à un projet cohérent. La problématique de transmission rencontrée lors de l'utilisation de formes complexes vient principalement de l'inadaptation des logiciels actuels à pouvoir communiquer aisément le mode de génération des formes. Cela révèle les limites des outils morphologiques disponibles à notre époque.

Différentes études sont développées dans cette direction, dont le travail de Marine Bagneris. L'évolution des différents projets à géométrie complexe permet d'observer que les concepteurs s'orientent soit vers une hybridation des formes choisies pour en puiser les avantages respectifs, soit vers la définition de règles génératrices de géométrie complexe⁴³.

41 SCHIMMERLING, André (sous la direction de). *Pour la forme*. Paris : Le Carré Bleu, 1/93, 1993, p. 24

42 BAGNERIS, Marine. Op cit., p. 28

43 BAGNERIS, Marine. Op cit., p. 44

La nécessité de nouveaux outils morphologiques

« Cette approche [la morphologie structurale] montre que la transmission de l'information entre tous les paramètres de la conception constitue un critère de constructibilité rationnelle. La forme est à la fois responsable d'atomisation du processus de conception mais aussi capable d'en être l'élément unificateur.⁴⁴ » M. Bagneris

Ce constat révèle la limite des outils morphologiques actuels et implique la nécessité d'en proposer de nouveaux.

En effet, les logiciels les plus élaborés utilisés par les architectes sont issus d'autres industries déjà énoncées. Pourtant, les industries de chaîne de production et celles de la construction architecturale divergent sur leur rapport à la standardisation. Les premières optimisent les coûts en produisant des éléments qui permettent de fabriquer des modèles standards tandis que les secondes produisent des modèles uniques basés sur l'usage d'éléments standardisés, ce qui engendre une économie⁴⁵. La conception architecturale se sert donc d'outils numériques qui ne sont pas optimisés pour son développement et dont les programmes n'évoluent pas en fonction des besoins récents des architectes et ingénieurs.

On peut voir que dans les premiers projets non-standard, des ingénieurs comme Sasaki s'intéressent au développement d'algorithmes capables de rendre plus interactif l'échange avec les architectes, mais il se produit aussi un engouement pour les méthodes numériques basées sur des schémas d'optimisation à critères multiples. Ces outils morphologiques peuvent constituer des solutions adéquates pour les édifices aux formes flexibles puisque des critères mécaniques comme la rigidité, la résistance peuvent être introduits dans le logiciel. Dans le cas des formes mécaniques, l'outil numérique permet d'aboutir à une optimisation structurelle inatteignable par l'expérimentation physique.

44 BAGNERIS, Marine. Op cit., p. 31

45 BAGNERIS, Marine. Op cit., p. 45

De plus, ces nouvelles techniques permettent d'associer les critères esthétiques et structuraux afin d'obtenir une solution mixte et non un résultat basé uniquement sur l'optimisation de formes mécaniques ne prenant pas en compte le résultat formel. On parvient donc à retrouver une symbiose entre forme et structure.

Comme le précise Sasaki, l'ingénieur abandonne la doctrine du « less is more » pour concilier avec l'architecte un « more is more ». En effet, dans le contexte présent de crise financière et de préoccupations climatiques, la tendance d'une architecture non-standard n'est pas en adéquation avec les techniques et préoccupations actuelles. Il va s'en doute falloir rationaliser la conception et parvenir à des solutions formelles optimisées. Les recherches telles que celles de Marine Bagneris, apportent alors une contribution certaine pour permettre une meilleure maîtrise du processus de conception, garant d'une plus grande liberté de création, et favorisant une communication efficace entre les intervenants d'un projet.

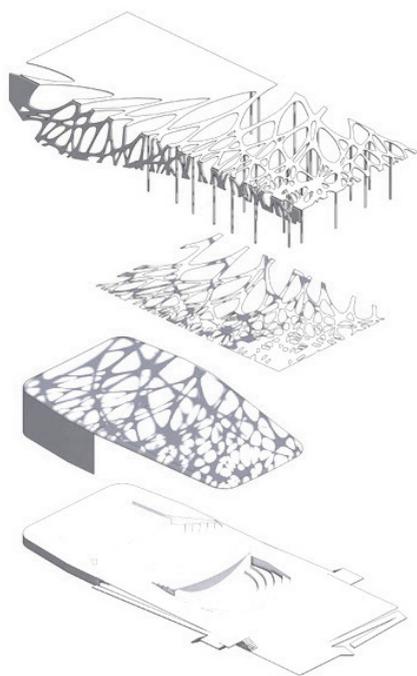


Fig. 48 - Auditorium de Saint-Cyprien, France, non réalisé, D. Serero

La géométrie fractale comme « nouveau » processus de formation

En 1974, Benoît Mandelbrot introduit le terme « fractal » pour décrire des courbes irrégulières générées par un langage algorithmique pouvant créer des formes complexes à partir de règles de transformation simple. Par opposition à la géométrie euclidienne, la géométrie fractale offre une meilleure description des formes naturelles, des formes fluides tant convoitées à l'heure actuelle. Depuis les années 80, le développement de l'informatique autorisant à la fois le calcul et la modélisation, a permis la représentation de figures géométriques jusqu'alors invisibles. Les fractals sont observables dans de nombreuses situations quotidiennes comme les nuages, les arbres notamment. Cette théorie a également envahi la sphère de l'architecture dont un exemple est l'auditorium de Saint-Cyprien de D. Serero.

Les pFormes comme nouvel outil de dessin

Les formes pascaliennes ou pFormes se sont avérées répondre à la nécessité d'adopter une méthode de représentation permettant de limiter la rupture qui s'opère entre les différentes phases du processus de projet et donc les différents intervenants. Dans un premier temps, les pFormes aident à comprendre les outils de représentation au-delà de l'image qu'ils peuvent produire. Cette compréhension permet de retrouver une continuité de l'esquisse à la réalisation en passant par le modèle numérique. En réalité, elles formulent un vocabulaire accessible aux différents acteurs, pour à la fois comprendre la morphologie du projet et en même temps échanger sur les problèmes rencontrés jusqu'à la phase de réalisation. Il est donc possible d'obtenir une cohérence dans le projet et de la conserver jusqu'à son achèvement par l'utilisation d'un outil commun : les pFormes.

Ces outils permettent d'aborder deux situations du processus de conception :

- la morphologie est préalablement fixée et il faut créer une structure qui en épouse les formes ;
- la morphologie doit encore faire l'objet d'une recherche de forme.

Si nous revenons à l'architecture textile qui a été expliquée à travers le travail de Frei Otto dans le chapitre qui lui est consacré, on peut remarquer que l'utilisation de pFormes aurait notamment été intéressante dans ce domaine. La connaissance des lignes de courbure est importante pour la conception d'une toile car les contraintes s'orientent majoritairement dans les directions principales de courbure. En respectant ces directions pour la découpe des laizes, la structure se voit optimisée et mieux contrôlée car le matériau est ainsi correctement orienté. Il faut savoir que Frei Otto parvenait à ce résultat grâce à ses expérimentations mais la technologie actuelle aurait permis d'en avoir la certitude par des données scientifiques.

Marine Bagneris, pour la rédaction de sa thèse « *Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard : les*

formes pascaliennes comme outil », a mis en place des expérimentations et notamment avec des étudiants de l'ENSA de Montpellier⁴⁶.

Le but était de comprendre et maîtriser les programmes informatiques au-delà de l'image qu'ils permettent de produire et de parvenir à une gestion des pFormes de telle manière à les appliquer à l'architecture. L'expérience fut menée à partir de trois programmes : Sketchup, Autocad et Blender.

Le premier outil utilisé fut Blender. Les étudiants ne maîtrisèrent aucune des actions qu'ils posaient simplement car ils ne comprenaient pas l'outil. De plus, la superficialité des images sur lesquelles ils se basaient ne leur permettait pas non plus d'en comprendre le processus de formation. Les élèves changèrent de méthode et donc de support pour se tourner vers ce qu'il y a de plus traditionnel : le dessin à main levée. C'est ainsi qu'ils parvinrent à épouser les courbes des formes complexes et commencèrent à en comprendre les fondements. La correspondance entre la génération à la main et la gestion des pFormes, les a conduit à la compréhension du fonctionnement profond du programme et donc à pouvoir gérer les paramètres d'influence.

Ensuite une deuxième expérience a été menée pour répondre à la question suivante : « Comment assurer la plus grande cohérence du processus qui conduit des premières esquisses à la réalisation effective de constructions à double courbure variable ?⁴⁷ » La méthodologie de travail fut identique à la première expérimentation menée.

L'efficacité des pFormes est observable à différents niveaux⁴⁸ :

- la simplification : les formes sont réalisées à partir de courbes élémentaires facilement identifiables et modifiées par une succession d'opérations simples ;

46 Voir le développement entier de l'expérimentation à partir de la page 88 de sa thèse.

47 SILVESTRI, Chiara ; FLEURY, François ; BAGNERIS, Marine. Op cit., pp. 85-86

48 Ibidem, pp. 91-92

- la continuité : les pFormes proposent une logique de génération basée sur des règles élémentaires permettant de garder une cohérence depuis la conception jusqu'à la réalisation ;
- l'appropriation aisée de cet outil est due à la compréhension du fondement du programme et donc du processus de formation des courbes, ce qui en favorise l'explication ;
- la compatibilité : cet outil peut être ajouté à d'autres logiciels, l'avantage étant de devenir le complément d'un programme déjà maîtrisé par l'utilisateur.

Une nouvelle famille de formes : les blobs

« Blob » - Binary Large Object - est donc le terme inventé par Greg Lynn pour définir des formes « molles » dont l'emplacement de chaque point dans l'espace peut être modifié. Ce terme reprend en réalité le nom d'un outil de modélisation informatique qui correspond à un nuage de points reliés entre eux pour dessiner une forme. L'ordinateur permet ainsi de travailler intuitivement ces formes. Le propre de cette technique est que chaque partie communique avec le tout.

Cette nouvelle catégorie est à différencier de l'architecture organique car la référence à la nature n'est pas récurrente, notamment chez Greg Lynn. Mais il est vrai que, si il y a réapparition de formes biomorphiques, c'est bien parce que les avancées mathématiques, biologiques, physiques mais également informatiques de ces dernières décennies et l'apparition de la bionique, recentrent l'attention sur les morphologies naturelles.

Greg Lynn travaillera beaucoup sur la notion de « pli » qui permet de garder une continuité des éléments et de palier ainsi à cette rupture qui s'est opérée entre forme et structure. Ensuite, il introduira l'informatique au sein du processus de conception en architecture afin de l'aider dans sa quête à établir une unité dans un ensemble constitué de divers éléments. Contrairement à Otto, Lynn s'accorde pour dire qu'il n'est pas maître de son œuvre. C'est effectivement l'ordinateur qui modèle tout ou partie de la forme, établissant alors une distance entre l'objet et le créateur.



Fig. 49 - Continuité conceptuelle retranscrite dans la réalité par une discontinuité des éléments, P.Cook et C.Fournier, Kunsthhaus, Graz, Autriche, 2001

Greg Lynn affirme ceci : « Je dois dire que c'est le logiciel qui prend le dessus. Il existe un langage formel qui relève de l'ordinateur, et, au départ, vous faites ce que le logiciel fait.⁴⁹ »

Ces blobs sont donc des formes virtuelles composées à partir de logiciels informatiques et générées selon des contraintes imposées par le créateur. Ils viennent remettre en question la verticalité ancrée dans les mœurs en architecture. Les blobs sont en effet établis suite à l'influence des forces du contexte actif qui les entourent et permettent de se positionner par rapport à différentes situations.

« La coque d'un bateau : celle-ci est conçue pour plusieurs situations de navigation. Pour descendre le vent, la coque est conçue comme une surface plane. Mais pour le remonter, elle est conçue de telle sorte à présenter une plus grande surface à l'eau. Evidemment, la coque d'un bateau ne change pas de forme quand elle change de direction, mais des points variables de navigation sont incorporés dans la surface de la coque. De cette façon, la topologie ne permet pas simplement d'incorporer un seul moment mais plutôt une multiplicité de vecteurs, et à partir de là, une multiplicité de temps dans une seule surface continue.⁵⁰ »

Mais, nous l'avons abordé dans le chapitre sur l'évolution des modèles structurels, si les blobs parviennent à maintenir une continuité de langage du début de la conception aux détails techniques, il n'empêche que la problématique de sa transcription dans la réalité physique est toujours de mise. Effectivement, pour reprendre l'exemple que nous avons exposé sur le Kunsthhaus de Cook et Fournier, la continuité conceptuelle prônée au départ se voit retranscrite par un assemblage complexe d'éléments dissimulés au maximum.

En effet, une des structures les plus adaptées aux variations des blobs sont les gridshells. Bien que peu de structures de ce genre aient été construites de par le monde, la première fut mise en place par Otto à Mannheim. Cette structure prend la forme et

49 CREPIN, Julie. *L'approche biomorphique en architecture*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 2006, p. 109

50 HENIN, Gilles. Op cit., p. 39

la rigidité d'une coque à double courbure obtenue par transformation d'une grille plane formée de deux directions de barres et non une surface continue. Plus la géométrie de l'ouvrage est complexe, plus grand sera le nombre d'assemblages à réaliser et donc plus coûteuse sera la construction. Une solution pour palier à ce désavantage, qui a également été appliquée au Centre Pompidou et dont nous avons parlé précédemment, est de réaliser une grille plane à l'aide de grandes poutres que l'on articule entre elles, pouvant ainsi reprendre de grandes déformations. Cette méthodologie permet d'épouser la forme imaginée mais pas de conserver la continuité matérielle malgré tout.

On peut donc conclure que si de nouvelles formes peuvent être conçues via les logiciels de génération de formes, leur transposition dans la réalité physique est toujours le lieu d'une rupture dans le processus global du projet. Une solution pour résoudre cela serait de partir de la matière pour aboutir à la forme et ainsi prendre en compte les propriétés physiques des matériaux. Voici quelques exemples pour illustrer cette méthodologie dite « material-based design »

À la croisée de la biologie et de l'informatique

Pour conclure cette évolution du langage architectural, nous allons découvrir quelques artistes et architectes ayant développé des constructions architecturales à la croisée entre biologie et informatique.

Tout d'abord, les années 2000 se caractérisent par la compréhension et la maîtrise des algorithmes génétiques. Ceux-ci permettent de retranscrire des phénomènes naturels et ainsi de façonner de nouvelles formes en mettant en place des protocoles génératifs. Les performances architecturales s'en voient améliorées d'un point de vue écologique, d'économie d'énergie et de matériaux.

Un premier exemple que l'on peut citer est Achim Menges. Cet architecte reproduit les principes biologiques de la pomme de pin. En effet, celle-ci a développé un comportement hygroscopique particulier : selon le taux d'humidité

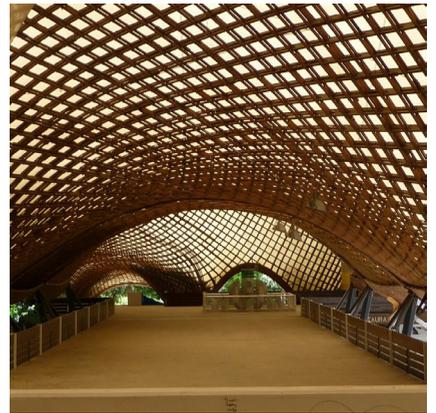


Fig. 50 - Halle polyvalente, Frei Otto, Mannheim, Allemagne, 1975

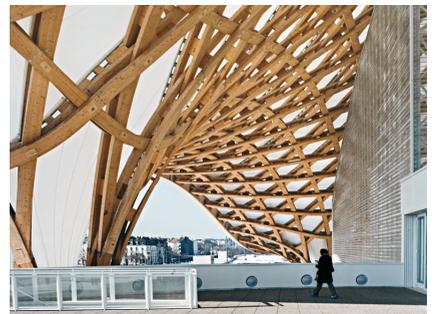


Fig. 51 - Charpente du Centre Pompidou, S. Ban, Metz, France, 2006-2010



Fig. 52 - HydroSkin, Météorosensitive Pavilion, Achim Menges, 2010-2011

de l'air, elle s'ouvre ou se rétracte. Menges va analyser ce phénomène et l'anisotropie du bois en général pour comprendre et ainsi appliquer à des éléments architecturaux de plus grande ampleur ces deux propriétés. Il conçoit ainsi en 2012, HydroSkin, Météorosensitive Pavilion qui réagit aux variations climatiques comme le fait la pomme de pin. « La matière exerce une action sur la géométrie, et réciproquement, la géométrie détermine l'état et le comportement de la matière dans telle et telle région de l'espace-temps.⁵¹ » Effectivement, c'est le comportement du bois et par-delà sa structure qui ont engendré la forme du pavillon. On part de la matière pour générer la forme, c'est le propre de la tendance du material-based design.

Nous avons vu que le rôle de l'architecte s'est vu modifié au cours de la prise en main de l'informatique par les agences d'architecture. On peut dire que dans ce cas-ci, sa tâche n'est pas de dessiner la forme mais bien d'écrire les logiques architecturales à suivre. « La forme devient un processus, née grâce à des règles à la fois organiques et mécaniques et les algorithmes apparaissent ainsi comme la description d'un processus, qu'il soit naturel ou artificiel.⁵² » L'architecte laisse donc le potentiel génératif des logiciels prendre le pas sur sa « créativité pure », devenant plutôt un chef d'orchestre. Mais si nous revenons aux écrits de Frei Otto, les lignes-guides qui sont imposées aux logiciels sont définies par l'architecte qui par cette approche garde une certaine main mise sur la forme qui sera produite. L'objectif est plutôt de concevoir des protocoles que des formes.

Pour prendre un autre cas, toujours dans cette démarche d'utiliser l'informatique et les règles biologiques pour parvenir à innover, Joris Laarman a relevé ce pari.

Avec sa collection de mobilier « Bone Furniture », ce designer va au-delà d'une démarche mimétique du vivant. C'est en plaçant le numérique au cœur de son processus de création et de fabrication qu'il se base sur la croissance des os et du végétal pour développer des algorithmes

51 BRAYER, Marie-Ange ; MIGAYROU, Frédéric. *Naturaliser l'architecture – Naturalizing*. Orléans : éd. HYX, 2013, pp. 23-24

52 Ibidem

d'optimisation capables de les imiter. Ainsi, les lignes de conduite encodées dans le logiciel s'occupent d'optimiser la forme et d'autres la structure, afin de retirer ou d'ajouter de la matière aux endroits les plus adaptés.

D'autres architectes innovent en utilisant les ressources biologiques en elles-mêmes. C'est ce qu'a fait Neri Oxman tout récemment avec le Silk Pavilion.

Son travail consiste à analyser les principes de formation des êtres vivants pour pouvoir les adapter à des structures architecturales. Elle étudie donc de très près les relations entre production biologique et fabrication numérique. Dès lors, elle décida de construire une structure en trois dimensions sur laquelle s'agence du fil de soie tendu. Elle place ensuite près de 6500 vers à soie qui vont agir comme des « imprimantes biologiques » en tissant un second niveau structurel permettant de renforcer certaines parties de la structure primaire.

« Pour Oxman, l'architecte œuvre en faveur d'une nouvelle intelligence de la conception et d'une matérialité plus qualitative que quantitative : une " Nature 2.0. " ⁵³ »

Ces derniers exemples ouvrent la voie à l'approche « material-based design » qui ne pourra être développée en profondeur ici mais dont la philosophie se situe dans la continuité de ce travail car en effet, si nous avons posé la question de l'emploi des expérimentations dans le processus de conception afin de définir la forme, une autre investigation privilégiant également l'expérimentation physique est de partir des matériaux de manière à tester leurs limites et dès lors de transposer ce savoir pour concevoir des formes adaptées aux propriétés physiques de la matière.

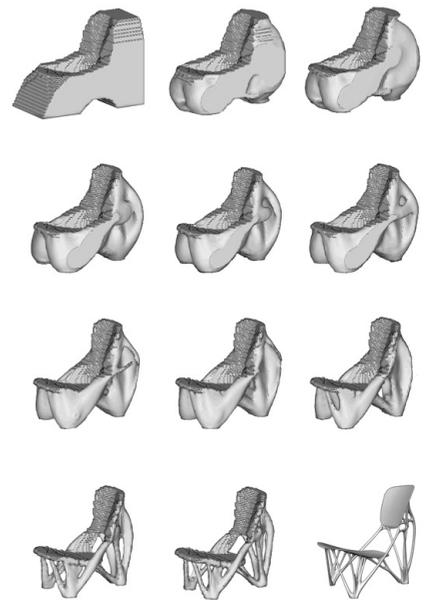


Fig. 53 - Processus d'optimisation d'une chaise de la collection Bone Furniture, Joris Laarman, 2006



Fig. 54 - Silk Pavilion, Neri Oxman, 2013

53 Ibidem, p. 214

3. DÉTERMINISME & MODÈLES UNIVERSELS

Pour finir ce travail, je consacre un chapitre à une thématique qui m'intéresse beaucoup mais sur laquelle je n'ai pu me pencher en profondeur : le déterminisme et la présence de modèles universels. En effet, certains modèles ont pu être observés dans différents domaines comme la biologie, et ont sûrement un rôle non négligeable en architecture en constituant une donnée supplémentaire dans la conception des formes architecturales.

Le « déterminisme » est donc un sujet qui intervient dans la continuité de ce travail afin de comprendre si les éléments naturels ou conçus par l'homme ont un lien malgré leurs origines divergentes. En effet, on peut se demander pourquoi les surfaces minimales se retrouvent un peu partout dans les structures végétales et animales et pourquoi l'homme, par de simples expérimentations, est parvenu à trouver comment créer des surfaces minimales sans en comprendre au départ le fondement et sans pouvoir expliquer mathématiquement le phénomène. Puis, évolution faisant, ces modèles se sont bien avérés être ce qu'il y avait de plus rationnel d'un point de vue de l'utilisation des matériaux.

Revenons d'abord à Frei Otto. C'est un structuraliste pour qui les objets naturels animés ou inanimés pourraient tous être étudiés et classés d'après leur structure. Dans ce mouvement d'idées, on mentionnera aussi Claude Lévi Strauss, un des fondateurs de la pensée structuraliste développée dans les années 60.

Dans l'Encyclopédie philosophique universelle, l'article sur la structure dit :

Structuralisme : « Derrière les phénomènes patents se dissimulent des structures complexes dont ils ne sont que des effets. [...] En conclusion, notons la dimension généralement synchronique de la recherche de structures : cette démarche cherche à dégager des dispositions constantes au-delà des événements particuliers et indépendamment du passage du temps. »

On peut appliquer cette phrase à la forme en tant que résultante de phénomènes et de forces invisibles que cherchent justement à découvrir et à comprendre Frei Otto. Par l'étude de cas particuliers, il recherche des lois universelles.

D'Arcy Thompson a aussi son avis sur ce sujet, comme déjà énoncé dans le chapitre consacré à l'architecture et l'évolution de la pensée naturaliste. Pour rappel, ce biomathématicien a toujours pensé que les formes étaient le résultat de forces naturelles, comme la gravité, qui agissent sur les éléments. Dans son ouvrage *On Growth and Form*, il tente de montrer le lien qu'il considère comme essentiel entre sciences et mathématiques car il estime que ces dernières permettent de tout démontrer.

Il ne se préoccupe pas des phénomènes d'hérédité génétique et de sélection naturelle pour expliquer les formes du vivant mais se tourne vers des phénomènes physiques comme la tension superficielle ou la gravité. La tension superficielle est importante car elle détermine la forme des organismes de petite taille tandis que les créatures de grande taille sont soumises aux forces de gravité.

« Il n'est pas un animal sur cette terre qui ne soit conçu proportionnellement à cette force de gravité. Si la force de gravité venait à doubler, notre bipédie serait totalement inadaptée, et la plupart des animaux terrestres prendraient la forme de sauriens courts sur pattes ou encore de serpents.⁵⁴ » Sir Charles Bell

Otto pense néanmoins qu'il y a probablement un savoir qui est hérité génétiquement même s'il peut être influencé par les circonstances environnementales. Prenons l'exemple de la mésange qui fait son nid sur une branche située au-dessus de l'eau pour se protéger des prédateurs terrestres. Ce dispositif retranscrit à la fois une organisation géométrique mais également un comportement social qui est transmis de génération en génération.

Ce que les scientifiques ont découvert est maintenant prouvé et non plus simplement observé ou imaginé, comme ce fut le cas pour D'Arcy Thompson. En effet, la forme d'un être vivant résulte

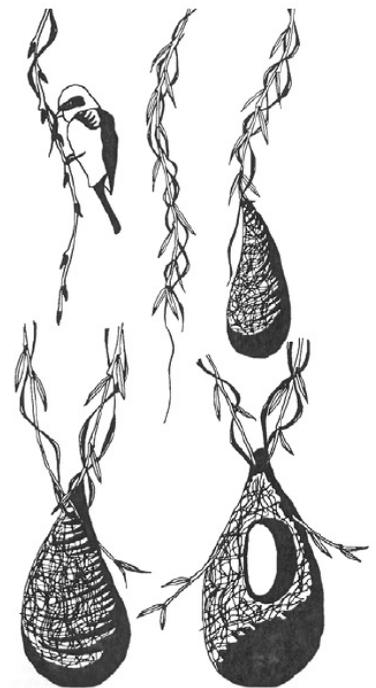


Fig. 55 - Construction du nid d'une mésange

54 THOMPSON, D'Arcy. Op cit., p. 56

des réactions d'une matière spécifique aux forces pendant une certaine durée et dans un milieu donné, comme avait pu le penser l'Écossais.

Du point de vue morphologique, un être vivant se présente comme un système déformable et variable car il est constamment soumis à diverses forces dont la principale est la gravité. Il n'a donc plus une seule configuration mais une infinité puisque son adaptation résulte à chaque moment de ses réactions aux contraintes de son environnement. Mais les modifications morphologiques ou propriétés acquises sont communes à tout ensemble de même espèce placé dans les mêmes conditions. D'autre part, la matière vivante d'un être qui naît est dotée de certaines propriétés innées, constituant un patrimoine héréditaire car elles résultent d'actions accumulées depuis longtemps.

Peter S. Stevens⁵⁵ relève un certain nombre de règles qui régulent la nature : « Chaque acteur a un répertoire limité : les pentagones font la plupart des fleurs mais pas les cristaux, les hexagones ont la charge des structures répétitives à deux dimensions mais ne remplissent jamais l'espace à trois dimensions. Au contraire, la spirale est la versatilité même, intervenant dans la réplication du plus petit virus aussi bien que dans la répartition de la matière au sein de la plus vaste galaxie. ... Il est intéressant d'observer que serpents, rivières et boucles de ficelle ondulent de la même façon, que les craquelures de la boue et les dessins d'une girafe se disposent comme le font les bulles de l'écume. »

Si ce déterminisme de forme est observable pour les matières vivantes dans la nature, la question de sa transposition à l'architecture doit se poser. En effet, lorsque Frei Otto conçut le toit du pavillon allemand de l'Exposition Universelle à Montréal, il ne savait pas encore que celui-ci ressemblait morphologiquement à une toile d'araignée. L'analogie avec celle-ci a en effet été constatée après la construction du pavillon. Otto a, quant à lui, dessiné cette forme sur base d'expérimentations. Il se pose dès lors cette question : « Quelqu'un peut-il

⁵⁵ Peter Stevens, architecte, peintre, photographe né en 1936, il dirige le bureau d'étude du Centre médical de Harvard.

percevoir quelque chose avant qu'il ne le sache?⁵⁶ ». Car en effet, si les techniques de forme et de construction utilisées par les insectes et les araignées sont ancrées génétiquement et sont vieilles en terme de développement biologique, l'ancrage génétique tend à être remplacé par l'apprentissage venant des parents chez les animaux d'intelligence supérieure ou ceux qui sont plus jeunes en terme de développement biologique, tel que l'être humain.

Effectivement, l'homme a majoritairement appris de ses parents mais il a rarement imité le processus de formation des éléments naturels, excepté pour les motifs artistiques qui sont de la simple reproduction esthétique. Cela étant, celui-ci utilise un panel de matières plus grand que celui employé par la nature. Avec les moyens techniques et artistiques à sa disposition, il est capable de développer d'innombrables nouveaux objets comme nulle autre espèce.

La technique d'Otto est de révéler les processus qui donnent forme à la forme. Il considère que ceux-ci existent et qu'il faut dès à présent les comprendre. Cette méthodologie est inverse à la démarche architecturale traditionnelle : au lieu de suivre une invention personnelle et de se baser sur les codes des modèles existants, Otto cherche dans un premier temps à identifier les processus qui peuvent l'aider dans sa quête de la conception de structures légères.

Des études récentes ont démontré la présence de certains principes géométriques innés, indépendants de l'apprentissage. Ces principes peuvent être considérés comme des « universels » formels et spatiaux qui constituent une sorte de géométrie élémentaire présente dans l'esprit humain et indépendante de l'éducation et de la culture d'appartenance⁵⁷. La compréhension des lois morphologiques qui régissent les structures permet de concevoir en connaissance de cause, en respectant les lois naturelles.

« La loi d'Euler par exemple, ordonne les éléments de dimensions différentes au sein d'une structure ; elle permet non seulement d'analyser

56 OTTO, Frei ; RASCH, Bodo. *Finding Form : towards an architecture of the minimal*. Munich : Axel Menges, 1996, p. 11 (traduction personnelle)

57 SILVESTRI, Chiara. Op cit., p. 44

la configuration considérée avec le recul de la méthode, mais également d'éviter les investigations impossibles. Personne ne pourra jamais réaliser un polyèdre régulier possédant un nombre impair de faces triangulées. Personne ne pourra jamais réaliser un dôme sphérique en utilisant simplement des hexagones puisqu'il faut obligatoirement y adjoindre des pentagones. Dans cette même course à l'impossible, la géométrie différentielle nous montre qu'on ne pourrait développer une surface à double courbure inverse.

Ces quelques exemples sont là pour nous rappeler que les lois de la forme régissent un monde réglé, que la conception ne peut être le seul fruit de l'intuition. Pourtant cet ordre n'est pas limitatif, il ouvre au contraire notre imagination constructive à la multitude des possibles parmi lesquels le concepteur doit choisir selon ses critères, selon les déterminants du projet.⁵⁸ »

Nous l'avons vu à travers les expérimentations sur les films de savon de Frei Otto, l'architecte modèle des surfaces minimales à l'image de celles que l'on retrouve dans la nature. Dans ces deux univers différents, une même quête : celle de l'économie de matière et d'énergie qui aboutit à des modèles similaires.

58 MIMRAM, Marc. Op cit., p. 107

CONCLUSION

L'idée initiale de ce travail était de développer la notion de biomimétisme afin de comprendre en quoi il peut être intéressant de se référer à la nature pour concevoir un projet architectural. Je me suis alors rendu compte que la relation à la nature pouvait être superficielle mais la théorie de d'Arcy Thompson sur la morphogenèse du vivant m'a permis de comprendre quels ont été les prémices des apports de la biologie à l'architecture. Il a en effet tenté au XIX^e siècle, de révéler les processus spontanés de création de formes et ainsi d'expliquer la filiation des espèces. Près de cent ans plus tard, s'en suivra l'introduction de la morphologie dans le processus de conception par Le Ricolais, ce qui génèrera cette interdisciplinarité entre architecture et biologie. C'est alors majoritairement à travers l'œuvre de Frei Otto que j'ai pu en découvrir les différentes facettes.

Cette réflexion sur le processus architectural conduisant de la conception à la réalisation de l'ouvrage m'a donc amenée à évaluer et comprendre d'une part l'influence de chaque étape du processus et sa nécessité, et d'autre part, celles des instruments et l'importance du choix de ceux-ci. En effet, ces différents paramètres sont souvent négligés dans le travail architectural et pourtant nous avons vu que chaque outil a son intérêt. Il me semblait donc notable de répondre aux questions suivantes : l'architecte doit-il s'adapter aux nouvelles techniques de représentation informatiques ? Quelle place occupent-elles et quels sont les apports au sein du processus de création architectural ?

La partie plus historique de ce travail a permis de prendre conscience que la nature a toujours été une référence pour l'Homme. D'ailleurs il s'y est rapporté pour faire évoluer ses modes de vie, son habitat et y trouver de nombreuses réponses afin d'optimiser ses constructions. On observe donc qu'il y a un besoin de recourir à une source d'inspiration permettant d'innover spatialement mais aussi que s'installeront une volonté d'économie de matière et une recherche de rationalité.

Un des premiers architectes à avoir concrétisé ces objectifs est Antoni Gaudi. En effet, celui-ci, à l'aide de modèles funiculaires, va aboutir à des structures rationnelles ne travaillant qu'en compression et permettant dès lors d'économiser de la matière. Cela aura également des

conséquences sur l'esthétique puisque la matière est placée selon de nouveaux critères. En effet, Gaudi, par l'utilisation de ces modèles d'auto-formation, recherchait essentiellement à conquérir des spatialités inédites, à s'éloigner des codes esthétiques traditionnels mais ne tentait en aucun cas une démonstration mathématique.

C'est ici que se formalise la différence avec Frei Otto qui travaillait pourtant avec les mêmes processus. Ce dernier avait quant à lui l'ambition de définir chaque forme à partir de bases scientifiques et non esthétiques.

Bien que ses recherches se développent aux prémices de l'informatique, c'est à l'aide de techniques plus élémentaires qu'Otto constitue son savoir expérimental.

Nous l'avons découvert, l'expérimentation physique a permis des innovations que l'outil informatique a mis de nombreuses années à égaler ; nous l'avons constaté dans la modélisation du fronton de la Sagrada Familia. Les nouvelles technologies comme les imprimantes 3D, devraient peut-être, à l'avenir, ouvrir de nouveaux possibles et ainsi reposer la question de l'expérimentation physique au cœur d'un nouveau processus itératif.

Les outils traditionnels ne sont donc pas encore prêts à être mis de côté car si l'expérimentation permet l'innovation, le dessin à main levée favorise l'expressivité. En effet, l'utilisation des logiciels dans les étapes primitives de la conception reste délicate car elle demande d'encoder des données précises à un moment du processus où les idées sont encore, elles, imprécises. Il y a donc une perte globale de spontanéité à un moment important du processus.

Cependant, nous avons pu remarquer que certains architectes se sont emparés de ces programmes et ont eux aussi réussi à innover, à l'image de Frank Gehry. Il en ressort que, si l'expérimentation encourage l'innovation, la maîtrise des nouveaux outils également.

L'apparition de l'informatique a facilité la conception de formes complexes répondant aux attentes et changements sociétaux. Par contre, cette architecture non-standard engendre une rupture entre forme et structure parce que les architectes privilégient souvent l'esthétique

sans prendre en considération les contraintes structurelles. De surcroît, la fluidité vendue par les images de synthèse ne peut être concrétisée dans la réalité car les contraintes techniques nécessitent de réaliser des assemblages complexes d'éléments. Et malgré les avancées dans le domaine des matériaux, les performances des nouveaux produits tels que les polymères ne répondent pas encore aux exigences de l'échelle architecturale. La question, abordée avec le Centre Pompidou, serait encore à élargir quant au devenir de l'artisanat dans le lien qui unit les techniques informatiques et la mise en œuvre de ces formes complexes. C'est ici qu'une autre piste s'ouvre, à savoir dans quelles mesures les matériaux de demain imposeront-ils un nouveau champ formel et par-delà peut-être, modifieront-ils à nouveau le processus de conception ?

Par ailleurs, pour répondre à l'abondance des normes énergétiques et économiques, le travail multidisciplinaire s'avère nécessaire. Mais, ce nombre important d'intervenants au sein d'un même projet requiert une communication irréprochable. On pourrait l'atteindre grâce à un processus « universel » déjà opérationnel - appelé BIM - ce qui diminue la perte d'informations au cours du processus itératif. Celui-ci est un logiciel offrant un modèle unique du bâtiment pour la gestion des données mais, il ne représente qu'un artefact par rapport à la conception et ne formalise pas les premières étapes de création.

L'informatique semble donc être à la fois la cause et la solution de ce problème de rupture forme-structure.

Nous avons constaté à travers le travail de Marine Bagneris que les outils morphologiques que sont les pFormes peuvent faire avancer les choses. Ils autorisent la prise en compte des critères mécaniques définis par l'architecte lors de la génération de la forme. Il n'en reste pas moins que la conception architecturale ne s'arrête pas à ces données mais va au-delà par l'intégration principalement du programme et du contexte. Cependant, on peut résumer l'apport des pFormes comme suit : par la compréhension de la morphologie des formes, on retrouve une continuité depuis l'esquisse jusqu'à la réalisation et ce par l'emploi d'un vocabulaire accessible aux différents acteurs.

Même si cet outil paraît résoudre une partie de cette rupture, une majorité des architectes restent malgré tout sceptiques face à ces méthodologies. Ils craignent de perdre la maîtrise de la forme et par-delà de ne plus pouvoir exprimer leur créativité.

La tendance actuelle oscille donc encore entre les deux : d'une part les architectes continuant d'utiliser les méthodes traditionnelles, d'autre part, ceux qui se tournent vers les nouvelles technologies afin de concevoir à la croisée de l'informatique et de la biologie.

Néanmoins des pistes de solutions associant les potentiels respectifs de ces méthodologies se mettent en place telles que le « material-based design », dont nous avons vu quelques exemples, et qui part des propriétés physiques de la matière pour concevoir la forme. Ainsi, une synergie s'établit entre matière, structure et forme. Cette approche fait le lien entre un processus de conception utilisant des outils plus traditionnels comme l'expérimentation et un autre employant les outils informatiques. Aucun ne semble être mis de côté mais à l'inverse, remis à jour et associés afin d'innover matériellement, spatialement et formellement.

LEXIQUE

Algorithme

Suite logique d'opérations déterminées qui permet de résoudre un problème présenté de façon mathématique. Les années 2000 sont marquées par l'émergence des « algorithmes génétiques », c'est-à-dire des formules mathématiques s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle pour générer des formes et mettre au point de nouveaux modèles d'optimisation.

En architecture, cela signifie formaliser le processus de conception selon un ensemble de procédures et d'instructions spécifiques. Ce peut être invisible pour le concepteur à travers l'interface d'un programme de CAO.

Architecture non-standard

Théorie mathématique apparue en 1961 dans les travaux d'Abraham Robinson. Cette nouvelle méthode d'analyse donnait une nouvelle place au calcul infinitésimal. Cette approche touchait alors toutes les disciplines où des systèmes algorithmiques étaient utilisés, que ce soit en physique, biologie, économie. [...] L'architecture non-standard n'induit pas un usage du numérique comme simple outil de représentation. Il s'agit d'une véritable aide à la conception. [...] Nous noterons que le terme non-standard dans le domaine architectural revient à Bernard Cache, un terme qu'il applique à la fois à la forme des ouvrages et aux pièces préfabriquées, non répétitives et souvent complexes que l'architecture numérique permet de réaliser.

<http://complexity.com>

Architecture organique

Courant existant depuis les prémices de l'architecture mais dont le terme fut appliqué à cette discipline par Burckhardt au XIX^e siècle puis repris par Bruno Zevi au XX^e siècle. Il exprime un lien entre le projet et la connaissance de la nature.

Selon François Burckhardt, l'« organique » peut être défini de deux manières :

- L'organique est basé sur un travail naturaliste ou sur un principe symbolique. La création ainsi développée a pour intention de donner à l'objet une apparence directement liée à la nature ;
- L'autre fonde l'organique sur une méthode capable de faire interagir l'invention de la forme et de l'espace en s'accordant au principe d'ordre établi par l'indivisibilité des parties.

Bruno Zévi affirme que les architectures aux formes curvilignes ne sont pas les seules qui peuvent être placées sous le terme d'architecture organique. En effet, Frank Lloyd Wright réalise des bâtiments organiques bien que ses tracés soient géométriques. Il est donc important d'insister sur le fait que l'architecture organique a pour modèle les processus de la nature et non simplement les formes qu'on y trouve.

CREPIN, Julie. *L'approche biomorphique en architecture*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 2006

Artefact

Structure ou phénomène d'origine artificielle ou accidentelle qui altère une expérience ou un examen portant sur un phénomène naturel.

Altération du résultat d'un examen due au procédé technique utilisé.

En anthropologie, produit ayant subi une transformation, même minime, par l'homme, et qui se distingue ainsi d'un autre provoqué par un phénomène naturel.

www.larousse.fr

Auto-organisation

Le terme auto-organisation fait référence à un processus spontané et dynamique dans lequel l'organisation interne d'un système, habituellement un système hors équilibre, augmente automatiquement sans être dirigée par une source extérieure. C'est une tendance, tant au niveau des processus physiques ou des organismes vivants, que des systèmes sociaux, à s'organiser d'eux-mêmes.

Au XVIII^e siècle est apparu le mouvement des Naturalistes qui cherchaient à déterminer des lois universelles afin d'expliquer la diversité des organismes vivants. On a longtemps pensé que l'apparition de structures dans un ensemble d'éléments plus ou moins couplés ne pouvait résulter que de l'action organisatrice d'un élément central, jouant le rôle de chef d'orchestre. Aujourd'hui, la plupart des scientifiques pensent qu'il existe des lois universelles (issues de la physique fondamentale et de la chimie) qui gouvernent les structures et leur évolution dans les systèmes biologiques.

Bionique

La bionique est la science qui recherche, chez les plantes et les animaux, des modèles en vue de réalisations techniques. Elle se base sur l'étude des systèmes biologiques pour développer (par biomimétisme éventuellement) des systèmes non biologiques susceptibles d'avoir des applications technologiques. La bionique étudie donc la vie avec l'objectif de comprendre les mécanismes de fonctionnement des organismes vivants et évolutifs afin de pouvoir les appliquer aux créations humaines.

Biomimétisme

Le biomimétisme – du grec, bio = vie et mimesis = imiter - est une discipline qui étudie la Nature à différentes échelles pour ensuite l'imiter et appliquer à la création humaine les principes qui gouvernent l'apparition, l'organisation, la matérialité et l'évolution des formes naturelles.

Bottom-up

Démarche intellectuelle où l'on part du détail, c'est-à-dire l'échelon le plus fin, pour consolider progressivement et opérer une synthèse. Elle est proche de la démarche inductive, qui essaie, à partir d'expériences, de formuler une théorie. C'est un processus analytique qui examine des données de base pour en tirer des généralités.

Caténaire

Courbe mathématique qui, lorsqu'elle tourne autour de son axe des x , donne la caténoïde ou surface minimale. Le mot « caténaire » est dérivé du latin *catena*, qui signifie « chaîne ». En effet, la caténaire est la forme prise par une chaîne fixée à ses deux extrémités et suspendue sous son propre poids. Par chance, lorsqu'elle se reflète dans l'axe des x , elle décrit aussi parfaitement la ligne de force d'un arc maçonné soutenant son propre poids. Une arche construite sous cette forme peut travailler en compression pure, comme la chaîne travaille uniquement en tension.

Gridshell

Ce terme est formé des mots grid et shell, qui signifient respectivement « grille » et « coque ». Il s'agit d'une famille de résilles gauches et non de coques continues, issues d'un processus de montage particulier. Ce sont donc des structures à double courbure obtenues par déformation élastique d'une grille plane sans rigidité en cisaillement. La maille rectangulaire comporte un espacement constant entre les nœuds. L'intérêt de la double courbure repose sur l'utilisation de la raideur de la forme pour couvrir de grands espaces. La forme du gridshell est obtenue par retournement d'un filet suspendu et permet d'obtenir une surface sans moment de flexion sous son propre poids.

DOUTHE, Cyril. *Étude de structures élancées précontraintes en matériaux composites : application à la conception des gridshells*. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007

Material-based design

Approche de conception partant du comportement de la matière pour générer la forme. Cette méthodologie permet d'obtenir une meilleure intégration entre la structure, la matière et la forme. Cette approche s'appuie sur les outils informatiques pour prendre en compte les propriétés de la matière dans la génération de la forme, jusqu'à la fabrication de l'élément.

Modèle

Chez une personne, il s'agira de certains caractères par lesquels elle se distingue, telle une bonne conduite. Pour un état naturel, matériel ou biologique, le modèle peut être un ensemble de propriétés que l'on considère comme essentielles à son intelligibilité. Pour un artefact humain, le modèle représente un ensemble d'attributs, de ce qui est à construire/fabriquer ou de ce qui est à étudier, sous forme d'un dessin, schéma, formule mathématique, etc.

Vient du terme latin *modulus* qui signifie à la fois module/forme et mesure. Dans sa fonction de forme, le modèle est considéré comme un prototype. Ce même modèle permet de prédire les phénomènes : en amont, le modèle devrait permettre de produire autant que nécessaire

d'estimations du phénomène pour les confronter à sa réalité en vue de la vérification et in fine de la validation. La fonction du moule sert à la mesure, deuxième fonction du modèle.

BRAYER, Marie-Ange ; MIGAYROU, Frédéric. *Naturaliser l'architecture – Naturalizing*. Orléans : éd. HYX, 2013

Morphogenèse

Ensemble des lois gouvernant le développement des formes. Genèse de la forme. Issue des sciences naturelles, où elle s'applique à la croissance des organismes, la notion est également utilisée en architecture. Du point de vue architectural, Greg Lynn a donné une interprétation intéressante de ce concept en écrivant, « l'espace de la conception est imaginé comme un environnement de force et mouvement et non pas comme un vide neutre ».

Morphologie

Étude de la forme et de la structure externes des êtres vivants dans les différentes sciences biologiques.

En grec, morphé veut dire : forme, et logos : étude, science. La morphologie est l'étude des formes, sans spécification aucune. Le sens original du terme suggère une interprétation des formes comme des entités actives, réactives et soumises à des forces.

Nurbs

Non-Uniform Rational B-Splines - Outil de description standard des courbes et surfaces dans les domaines de la CAO et du graphisme informatique. Inaccessible à toute appréhension directe, elles sont assez malmenées par les logiciels de CAO puisqu'en dehors de logiciels spécifiques comme Rhino et Maya qui les prennent pour base, les Nurbs ne sont réellement utilisées que pour la construction de cercles et de surfaces de révolution.

BAGNERIS, Marine. *Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard : les formes pascaliennes comme outil*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, 2009

Protocole (informatique)

Méthode standard constituée d'une série d'étapes à suivre qui permettent la communication entre des processus, c'est-à-dire un ensemble de règles et de procédures à respecter pour émettre et recevoir des données sur un réseau.

Sciences cognitives

Les sciences cognitives regroupent un ensemble de disciplines scientifiques dédiées à la description, l'explication, et le cas échéant la simulation, des mécanismes de la pensée humaine, animale ou artificielle, et plus généralement de tout système complexe de traitement de l'information capable d'acquérir, conserver, utiliser et transmettre des connaissances. Les sciences cognitives reposent donc sur l'étude et la modélisation de phénomènes aussi divers que la perception, l'intelligence, le langage, le calcul, le raisonnement ou même la conscience. Les sciences cognitives utilisent conjointement des données issues d'une multitude de branches de la science et de l'ingénierie, comme la linguistique, l'anthropologie, la psychologie, les neurosciences, la philosophie, l'intelligence artificielle... Nées dans les années 1950, les sciences cognitives forment aujourd'hui un champ interdisciplinaire très vaste, dont les limites et le degré d'articulation des disciplines constitutives font toujours débat.

www.wikipedia.org

Surface à double courbure

Ce sont des surfaces générées avec une directrice et un trajet courbes. Elles offrent des caractéristiques statiques exceptionnelles découlant de leurs caractéristiques géométriques. Sur le plan constructif, elles permettent de couvrir des surfaces avec un minimum de matière. Il y a deux possibilités de configuration : soit les deux courbures sont dans le même sens pour aboutir à des formes telles que la sphère ou le tore ; soit elles sont de sens opposés à l'image des hyperboloïdes, paraboloides hyperboliques.

Surface minimale

Surface de courbure nulle. La recherche sur les surfaces minimales a commencé avec les travaux de Joseph-Louis-Lagrange (1736-1813), lorsqu'il a posé la question de savoir s'il existait, pour chaque courbe ayant une limite arbitraire complexe, au moins une surface de la superficie. Les films savonneux sur une limite déformable en fil de fer se sont avérés être d'extraordinaires moyens de recherche sur cette question.

BURRY Jane and Mark. *Mathématiques et architecture*. Acte Sud, 2010

Cette condition de courbure moyenne nulle signifie que l'énergie de courbure est nulle et donc que la stabilité de ces surfaces est maximale ; elle est réalisée physiquement par tout film de savon soumis à des pressions égales de chaque côté (lorsque les pressions diffèrent, on obtient des surfaces à courbure moyenne constante).

<http://www.mathcurve.com>

Tenségrité

Ce terme, provenant de la contraction de *tensile integrity*, a été inventé par l'architecte Richard Buckminster Fuller en 1949, pour décrire la faculté d'une structure à se stabiliser mécaniquement par le jeu des forces de compression et de tension qui se répartissent entre les différents éléments qui la composent.

Un système en tenségrité est donc auto-équilibré, non par la résistance de chacun de ses constituants, mais par la répartition des contraintes mécaniques dans la totalité de la structure. Un accroissement de la pression sur l'un des éléments est transmis à tous les autres, y compris les plus éloignés.

Face à la force de gravité qui s'exerce sur l'ensemble de la matière, la tenségrité offre la solution la plus économique en termes de légèreté et de robustesse. Il n'est donc pas étonnant de voir ses principes s'appliquer à toutes les échelles du vivant (hélice de l'ADN).

Top-down

Démarche intellectuelle où, partant de l'ensemble, on décompose en éléments toujours plus détaillés, pour déboucher sur une « dissection totale », un état des lieux, une analyse de l'objet étudié. Elle peut se comparer à une démarche déductive qui part d'un concept, d'une théorie, d'une idée, pour construire les étapes nécessaires à la réalisation. Le top-down consiste d'abord à définir les grandes lignes, à les diviser en parties, puis à établir un cahier des charges pour chaque partie. Cela permet de construire un tableau de bord, et surtout d'évaluer le coût global.

BIBLIOGRAPHIE

LIVRES

- BRAYER, Marie-Ange ; MIGAYROU, Frédéric. *Naturaliser l'architecture – Naturalizing*. Orléans : éd. HYX, 2013
- BENYUS, Janine. *Biomimétisme: Quand la nature inspire des innovations durables*. Paris : Rues de l'échiquier, 2011
- BURRY Jane and Mark. *Mathématiques et architecture*. S.I. : Acte Sud, 2010
- DREW, Philip. *Frei Otto, Form and Structure*. Londres : Crossby Lockwood Staples, 1976
- MIMRAM, Marc. *Structures et formes – Etude appliquée à l'œuvre de Robert Le Ricolais*. Paris : Dunod, 1983
- MONOD-HERZEN, Edouard. *Principes de Morphogenèse générale*. Paris : Gauthier-Villars et Cie, 1927
- NERDINGER, Winfried. *Frei Otto, Complete works, Lightweight Construction Natural design*. Berlin : Birkhäuser, Architecturmuseum tu, 2005
- OTTO, Frei. *Architecture et bionique : constructions naturelles*. Denges : Delta & Spes, 1985
- OTTO, Frei ; RASCH, Bodo. *Finding Form : towards an architecture of the minimal*. Munich : Axel Menges, 1996
- PAWLYN, Michael. *Biomimicry in Architecture*. S.I. : RIBA, 2011
- PICON, Antoine. *Culture numérique et architecture*. Bâle : Birkhäuser, 2010
- PORTOGHESI, Paolo. *Nature and Architecture*. Milan : Skira, 2000
- SILVESTRI, Chiara ; FLEURY, François ; BAGNERIS, Marine. *Morphologie et conception*. Montpellier : Ecole nationale supérieure d'architecture de Montpellier, 2012
- SONGEL, Juan Maria. *A conversation with Frei Otto*. New York : Princeton Architectural Press
- STEVENS, Peter. *Les formes de la nature*. Paris : Seuil/Science ouverte, 1978
- STEWART, Ian. *Les mathématiques du vivant ou la clef des mystères de l'existence*. Paris : coll. « Flammarion Documents et Essais », 2013 (2011), traduction par Olivier Coucelle
- STOUFFS, Rudi ; SARIYILDIZ, Sevil. *eCAADe 2013 – Computation and Performance*. S.I. : Delft University of Technology, 2013
- THOMPSON, D'Arcy. *Forme et croissance*. Paris : Seuil : CNRS, 1994 (1917)
- VIOLLET-LE DUC, Eugène. *Entretiens sur l'Architecture*. France : Pierre Mardaga édit., 1977 (1863)

MEMOIRES/THESES

- BAGNERIS, Marine. *Contribution à la conception et à la réalisation des morphologies non-standard : les formes pascaliennes comme outil*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, 2009
- CREPIN, Julie. *L'approche biomorphique en architecture*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 2006
- DOUTHE, Cyril. *Étude de structures élancées précontraintes en matériaux composites : application à la conception des gridshells*. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007
- GONOD, Solène. *Architecture, nature et culture – Frei Otto : quelles visions de la nature et quels liens avec l'architecture révèle l'iconographie des IL* ?* Mémoire à l'école d'architecture de la ville & des territoires à Marne-la-Vallée, 2010
*Institut pour les structures légères et la conception (ILEK) à l'Université de Stuttgart
- HENIN, Gilles. *L'influence de l'informatique sur la conception architecturale de Greg Lynn*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 1999-2000
- KESTEMONT, Stéphanie. *L'adaptation de l'architecte face aux technologies informatiques*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture Victor Horta Bruxelles, 2010
- OXMAN, Neri. *Material-based Design Computation*. Thèse de doctorat au Massachusetts Institute of Technology, 2010
- SILVESTRI, Chiara. *Perception et conception en architecture non-standard*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, 2009
- SIMON, Albert. *Architectes... L'informatique vous menace-t-elle ???* Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture Victor Horta Bruxelles, 1986
- THEISSEN, Jean-Jacques. *Architecture bio-inspirée : la vie au service d'un développement durable : à la découverte des modèles biophiles et biomimétiques*. Mémoire réalisé à l'Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 2011

REVUES

- OTTO, Frei (sous la direction de). *Biology and Building 1 (IL3)*. Allemagne : Institut für leichte Flächentragwerke (IL), 1971
- OTTO, Frei (sous la direction de). *Natural Building (IL27)*. Allemagne : Institut für leichte Flächentragwerke (IL), 1981
- OTTO, Frei (sous la direction de). *Nets in nature and technics (IL8)*. Allemagne : Institut für leichte Flächentragwerke (IL), 1975
- OTTO, Frei (sous la direction de). *Wandelbare pneus – Convertible pneus (IL12)*. Allemagne : Institut für leichte Flächentragwerke (IL), 1975
- SCHIMMERLING, André (sous la direction de). *Création architecturale et informatique*. Paris : Le Carré Bleu, 2-3/86, 1986
- SCHIMMERLING, André (sous la direction de). *Pour la forme*. Paris : Le Carré Bleu, 1/93, 1993
- SCHIMMERLING, André (sous la direction de). *Donner des idées... Robert Le Ricolais 1894-1977*. Paris : Le Carré Bleu, 2/94, 1994
- SCHIMMERLING, André (sous la direction de). *La création architecturale et l'informatique – Première partie*. Paris : Le Carré Bleu, 1-2/2000, 2000
- SCHIMMERLING, André (sous la direction de). *La création architecturale et l'informatique – Deuxième partie : la Recherche*. Paris : Le Carré Bleu, 3-4/2000, 2000

ARTICLES

- CIBLAC T. ; UNTERSTELLER L-P. *Usage de l'image numérique dans la conception de structures*. France : ENSA de Paris la Villette, 2007
- CREISER, Charlotte. *Le Biomimétisme est-il l'avenir du développement durable ?* Pour la Solidarité, 2008
- ELSÉN, Catherine. *De l'esquisse à la maquette digitale : transformation des représentations graphiques en modèles numériques pour l'ingénierie de conception*. Liège : Lucid Group, Université de Liège, 2008
- PICON, Antoine. « La crise de l'échelle et de la tectonique classique ». *D'ARCHITECTURES*, 168, novembre 2007, pp. 43-47
- WENDLAND, David. *Model-based formfinding processes: free forms in structural and architectural design*. Allemagne : Université de Stuttgart
- BOUHAYA L.; BAVEREL O.; DOUTHE C.; CARON J.F. *Recherche de forme de Grid Shells*. France : Ecole des Ponts ParisTech, 2009

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Page de garde

www.shiro-studio.com/trabeculae.php

Fig. 1 - Cabane de l'Abbé Laugier, 1755 -

www.aroots.org

Fig. 2 - Lien entre le crâne d'un chimpanzé et d'un babouin par simples transformations géométriques de la trame originale - BAGNERIS, Marine. Op cit., p. 183

Fig. 3 - Coupe dans une tête de fémur et d'une tête de grue - THOMPSON, D'Arcy, Op cit., p. 23

Fig. 4 - Le Ricolais dans son atelier de recherche à l'Université de Pennsylvanie - SCHIMMERLING, André (sous la direction de). Donner des idées... Robert Le Ricolais 1894-1977. Paris : Le Carré Bleu, 1994, 2/94, préface

Fig. 5 - Casa Battlo, A. Gaudi Barcelone, Espagne, 1904-1906 - Photo de Frank Kovalchek, 2009

Fig. 6 - Panthéon de Rome, Italie, 27ACN -

<http://commons.wikimedia.org>

Fig. 7 - San Carlo alle quattro fontane, Borromini, Rome, Italie, 1638 -1667 - www.panoramio.com

Fig. 8 - Etude du mouvement des ailes d'oiseaux, Léonard de Vinci -

<http://mousquetairulm.hautetfort.com>

Fig. 9 - Voûte plate, Joseph Abeille, Paris, 1699 - Recueil des machines approuvés par l'Académie des sciences, 1699

Fig. 10 - Eglise paroissiale, Eladio Dieste, Atlantida, Uruguay, 1952 - www.wordpress.com

Fig. 11 - Etude structurelle de l'église paroissiale, Eladio Dieste, Atlantida, Uruguay, 1952 -

<http://fr.wikiarquitectura.com>

Fig. 12 - Séquence montrant la reconstruction informatique de l'optimisation de la structure du fronton de la façade ouest de la Sagrada Familia - BURRY Jane and Mark. Mathématiques et architecture. S.l. : Acte Sud, 2010, p. 120

Fig. 13 - Maille structurelle de la toiture, Stade national, Herzog & de Meuron, Pékin, Japon, 2003 - 2008 - PICON, Antoine. « La crise de l'échelle et de la tectonique classique », D'ARCHITECTURES, 168, novembre 2007, p. 52

Fig. 14 - Bague signée Lepage -

www.bijoux-bijouterie.com

Fig. 15 - Kunsthhaus, P.Cook et C.Fournier, Graz, Autriche, 2001 - SILVESTRI, Chiara. Op cit., p. 28

Fig. 16 - Pavillon Philips, Exposition universelle de 1958, Le Corbusier - en.wikipedia.org

Fig. 17 - Surface intérieure d'une feuille de lys géant d'Amazone et plan de la coupole du Palazzetto dello Sport, Nervi, 1960 -

nickkahler.tumblr.com

Fig. 18 - Pont de Salginatobel en béton armé, Robert Maillart, Suisse, 1930 -

forum.skyscraperpage.com

Fig. 19 - De haut en bas

Sagrada familia, A. Gaudi, 1882, Barcelone, Espagne - architecture.about.com

Photographie prise en 1917 du dessin de la façade de la Passion; photo de trois prototypes temporaires de colonnes placés sur le fronton de la façade ouest; modélisation des découpes de pierre des éléments formant le fronton. -

BURRY Jane and Mark. Op cit., pp. 35-37

Fig. 20 - ENIAC est le premier ordinateur électronique de grande envergure -

en.wikipedia.org

Fig. 21 - Frei Otto -

knowinglyundersold.wordpress.com

Fig. 22 - Pavillon de danse de la Bundesgartenschau, Frei OTTO, Cologne, Allemagne, 1957

Fig. 23 - Stade olympique, Frei OTTO, Munich, Allemagne, 1972 - fr.wikipedia.org

Fig. 24 - Maquette du Pavillon de Montréal, Frei Otto - NERDINGER, Winfried. *Frei Otto, Complete works, Lightweight Construction Natural design.* Berlin : Birkhäuser, Architecturmuseum tu, 2005, p. 232

Fig. 25 - Federal Garden Exhibition, Frei OTTO, Cologne, Allemagne, 1971 -

www.amphi-festival.de

Fig. 26 - Music Bowl, Barry PATTEN, Melbourne, Australie, 1959 - jasonmooi.blogspot.be

Fig. 27 - Etude du schéma mécanique d'un squelette du stegosaurus, réponse formelle à une contrainte mécanique - DREW, Philip. *Frei Otto, Form and Structure.* p. 22

Fig. 28 - Comparaison du dôme géodésique conçu par Buckminster Fuller et l'Aulonia hexagona - www.mathcurve.com

Fig. 29 - Relations entre les objets réels, l'espace mental du concepteur et les représentations 2D qu'il produit - SILVESTRI, Chiara. *Perception et conception en architecture non-standard.* Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, 2009, p. 77

Fig. 30 - Métaphore de la spirale pour modéliser un processus de conception, proposée par Zeisel, 1984 - SILVESTRI, Chiara. Op cit., p. 41

- Fig. 31 - Les techniques de dessin évoluent au fil du projet** - SILVESTRI, Chiara. Op cit., p. 46
- Fig. 32 - Machine à film de savon à l'Institut de Stuttgart : l'appareil photo permet de réaliser des clichés à partir desquels seront prélevées les mesures.** - OTTO, Frei ; RASCH, Bodo. Op cit., p. 56
- Fig. 33 - Modèle suspendu pour l'étude des toits suspendus** - OTTO, Frei ; RASCH, Bodo. Op cit. p. 62
- Fig. 34 - Modèle avec bandes de plâtre construit en suspension et inversé une fois sec** - OTTO, Frei ; RASCH, Bodo. Op cit. p. 63
- Fig. 35 - Prise de mesure du toit du Stade Olympique de Munich avec des appareils photogrammétriques** - NERDINGER, Winfried. Op cit., p. 265
- Fig. 36 - Maquette funiculaire de la Colonia Güell, Antoni Gaudi, 1898-1916** - www.gaudidesigner.com
- Fig. 37 - Maquette renforcée en époxy d'une pompe à essence, Heinz Isler, Deitingen, Suisse, 1967** - www.designboom.com
- Fig. 38 - Centre d'exposition BMW Welt, Coop Himmelb(l)au, Munich, Allemagne, 2007** - www.coop-himmelblau.at
- Fig. 39 - Volière à Hellabrunn, Jörg Gribl & Frei Otto, 1979-80** - www.zoolex.org et **toile d'araignée cyrtophora** - NERDINGER, Winfried. Op cit., p. 52
- Fig. 40 - Palazzo Carignano, Guarino Guarini, Turin, Italie, 1679-1692** - schools.nashua.edu
- Fig. 41 - Crypte de la Colonia Güell, Antoni Gaudi** - <http://artsandfacts.blogspot.be>
- Fig. 42 - Guggenheim, F. Gehry, Bilbao, Espagne, 1997** - www.fliparch.com
- Fig. 43 - Fiera Milano, M. Fuksas, Milan, Italie, 2005** - www.panoramio.com
- Fig. 44 - MARta Herford Museum, F. Gehry, Herford, Allemagne, 2001-2005** - www.ce-n.com
- Fig. 45 - Paraboloïde hyperbolique et hyperboloïde de révolution** - www.mathcurve.com
- Fig. 46 - Modélisation informatique des colonnes du fronton de la Sagrada Familia à l'aide de formes analytiques** - BURRY Jane and Mark. Op cit., pp. 34 ; 37
- Fig. 47 - Centre Pompidou : maquette et photo de chantier, S. Ban, Metz, France, 2006-2010** - www.centrepompidou-metz.fr
commons.wikimedia.org
- Fig. 48 - Auditorium de Saint-Cyprien, France, non réalisé, D. Serero** - www.dgdesignnetwork.com.au

Fig. 49 - Continuité conceptuelle retranscrite dans la réalité par une discontinuité des éléments, P.Cook et C.Fournier, Kunsthaus, Graz, Autriche, 2001 - www.crab-studio.com

Fig. 50 - Halle polyvalente, Frei Otto, Mannheim, Allemagne, 1975 - www.panoramio.com

Fig. 51 - Charpente du Centre Pompidou, S. Ban, Metz, France, 2006-2010 - www.centrepompidou-metz.fr

Fig. 52 - HydroSkin, Météorosensitive Pavilion, Achim Menges, 2010-2011 - www.archdaily.com.br

Fig. 53 - Processus d'optimisation d'une chaise de la collection Bone Furniture, Joris Laarman, 2006 - <http://hellomaterialsblog.ddc.dk>

Fig. 54 - Silk Pavilion, Neri Oxman, 2013 - www.creativeapplications.net

Fig. 55 - Construction du nid d'une mésange - OTTO, Frei (sous la direction de). *Biology and Building 1 (IL3)*. Allemagne : Institut für leichte Flächentragwerke (IL), 1971, p. 60

