

# Profession de l'architecte dans l'ère numérique

Karpushov Alexander





Enoncé théorique de master

**Profession de l'architecte  
dans l'ère numérique**

Etudiant

**Karpushov Alexander**

Groupe de suivi

Professeur responsable de l'énoncé théorique

**Marilyne Andersen**

Directeur pédagogique du projet de master

**Jeffrey Huang**

Maître EPFL

**Frederick Peter Ortner**

# Table des matières

01	<b>Introduction</b>	01
011	Les enjeux	01
0111	Évolution	02
0112	Révolution	03
012	Qu'en est-il de l'architecture ?	03
02	<b>Comment construire</b>	05
021	Retour à l'artisanat	05
022	De l'uniformisation à la digitalisation	07
023	Émergence du numérique	08
024	Différents processus	10
0241	Changement de masse	10
0242	Changement de phase	11
0243	Changement de structure	11
0244	Déformation	12
0245	Assemblage et renforcement	12
0246	Prototypage rapide	12
0247	Construction intégrée	13
03	<b>Comment collaborer</b>	15
031	Ingénieur et architecte	15



032	Multiplication et spécialisation	16
033	Organisation et homogénéisation	17
034	Outils de collaboration	18
0341	Communication et organisation	18
0342	Building Information Modeling	19
041	Du fonctionnalisme au performatisme	21
04	<b>Comment concevoir</b>	21
042	Utopie des villes machine	23
043	Architecture connectée	25
044	Mathématiques et l'architecture	27
0441	La théorie des graphes	27
0442	La théorie des jeux	28
0443	Les fractales	28
045	Retour à la nature	29
046	Architecture comme sculpture	30
05	<b>Conclusion</b>	33
051	Rôle de l'architecte	33



# 01

## Introduction

### 011 Les enjeux

Aujourd'hui les technologies numériques sont omniprésentes; il y a quasiment autant de téléphones portables sur la planète que d'individus. La technologie nous facilite certaines tâches et nous libèrent de certaines autres. On peut prendre, pour exemple, la nouvelle génération d'automobiles: elles sont capables de se garer toute seules, nous informent en cas de dépassement des limitations de vitesse, détectent les piétons, ralentissent en cas de rapprochement et anticipent même les manœuvres d'évitement en si elles détectent un risque d'accident. À se demander si le conducteur a toujours sa place dans un véhicule. Prenons un autre environnement, une habitation, Il est possible de définir les conditions de confort depuis son smartphone, et l'ordinateur adaptera automatiquement, la température, l'humidité, la ventilation, etc. Plus besoin d'allumer ou d'éteindre les lumières, dans une pièce, elles s'allument et s'éteignent toute seules. En plus, l'intensité s'adapte automatiquement en fonction des informations récoltées par la montre intelligente. D'ailleurs tout devient "intelligent" et "connecté": le four, le réfrigérateur, le lave-vaisselle, la machine à laver et même la télévision.

De la même façon que suite à l'industrialisation certains métiers

manuels ont été remplacés par des machines, aujourd'hui certains services sont automatisés. Il n'est pas nécessaire d'évoquer les projets pilotes de livraison par drone qui permettraient se passer des facteurs. En allant à la supérette du coin, on n'est plus obligé de faire la queue à la caisse. Ou même, certains commerces proposent aux clients de scanner eux-mêmes leurs produits. Cependant, l'envers du décor est que l'on n'a plus besoin d'autant de personnel. De plus en plus, les tâches de gestion sont réduites. Par exemple, pour une partie des produits, le système est capable de passer commande tout seul, quand le besoin s'en fait sentir. Cette pratique est généralisée dans la logistique à plus large échelle.

On peut même pousser ce constat plus loin. Grâce à l'internet, il n'est même plus nécessaire d'aller au supermarché. Il suffit de commander en ligne et n'importe quel produit peut être livré à domicile en une journée voire en quelques heures. Dans un futur proche, on imagine même se passer de cette tâche. Le réfrigérateur "connecté" et "intelligent" passera commande automatiquement en fonction de son contenu, comme dans le cas de gestion de stocks du supermarché. D'ailleurs, on n'aura même plus besoin de marchés traditionnels.

Face à ces changements, on peut se demander si le changement auquel nous assistons ne serait pas une évolution ou une révolution ? Voici leurs définitions.

## 0111 Évolution

D'après Larousse l'évolution est: "Un ensemble de ces modifications, stade atteint dans ce processus, considérés comme un progrès; développement."<sup>1</sup>

L'évolution est un processus de modification progressif. Par exemple, lorsque Charles Darwin a étudié les pinsons des Galápagos, il a constaté que la forme du bec de ces oiseaux changeait en fonction de leur alimentation.

## 0112 Révolution

Toujours d'après la même source la révolution est: "Un changement brusque, d'ordre économique, moral, culturel, qui se produit dans une société."<sup>2</sup>

A l'inverse de l'évolution la révolution implique un changement radical. Par exemple, pendant la révolution industrielle le métier à tisser a quasiment disparu au profit des machines à tisser.

## 012 Qu'en est-il de l'architecture ?

Durant mes études d'architecture à l'EPFL, j'ai été contraint de me poser la question du rôle de la technologie dans le métier d'architecte. Notre génération est-elle vouée à l'obsolescence avant même d'avoir commencé à pratiquer ? Dans cet énoncé, j'aimerais esquisser une réponse à cette question à partir de trois champs d'application des technologies numériques: la construction, l'organisation, la conception.

Dans chacun des trois chapitres, je commencerai par poser un contexte historique et culturel en détaillant l'évolution des techniques. Je présenterai ensuite les capacités techniques actuelles, puis j'essaierai de les illustrer par quelques exemples concrets.

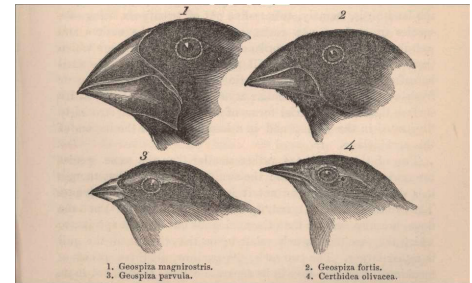


Fig. 1 : Plaque de Charles Darwin représentant les différentes variations de bec des pinçons

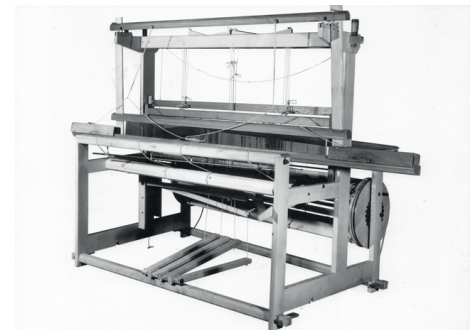


Fig. 2 : Métier à tisser traditionnel



Fig. 3 : Métier à tisser XIX<sup>e</sup> siècle



# 02

## Comment construire

### 021 Retour à l'artisanat

La question des coûts est fondamentale dans tous les domaines de production y compris dans le bâtiment. Comment construire à moindre coût ? Cette question s'est posée en tout temps. Autant chez les romains, qui, à la place d'utiliser des blocs de marbre massifs, recouraient à la construction en brique plaquée de marbre afin de conserver l'image d'une architecture noble mais à moindre coût. L'industrialisation, quant à elle, a amené l'uniformisation généralisée et l'automatisation d'un grand nombre de tâches. La révolution numérique marque le pas suivant en ce sens qu'elle apporte encore plus d'automatisation pour la production d'éléments toujours plus complexes et toujours plus hétérogènes.

En un sens, on assiste au retour de l'artisanat mais en plus efficace. En effet, si l'on prend la définition de Luca Comparo dans son livre "Digital Fabrication in architecture, engineering and construction", l'artisanat consiste en l'utilisation d'un nombre limité d'outils mais utilisés de façon créative et efficace grâce à l'acquisition d'un savoir-faire manuel et à l'expérience. Avec le temps, les outils ont été adaptés afin d'augmenter l'efficacité. Si les outils ont été perfectionnés et simplifiés, pour répondre à l'utilisation que l'on en avait. En contre partie

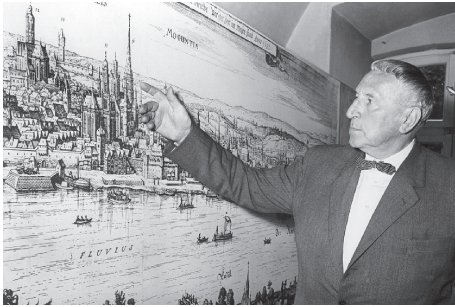


Fig. 4 : Ernst May



Fig. 5 : Siedlung Römerstadt



Fig. 6 : Margarete Schütte-Lihotsky

cette fragmentation des processus de production est responsable de la quasi-disparition du savoir-faire lié à la production de l'objet final.<sup>3</sup>

La manufacture numérique marque une sorte de retour en arrière car les outils développés sont de plus en plus polyvalents de façon à intégrer un nombre de processus de fabrications toujours croissant. Ceux-ci comprennent des centres d'usinage et des robots contrôlés par de nouveaux techniciens experts qui doivent posséder aussi bien les compétences en processus de fabrication qu'en langages de programmation permettant de contrôler les machines et les processus. Une sorte d'artisans 2.0 qui offrent la diversité de produits et bénéficient de l'automatisation des processus.

L'innovation demande des moyens importants et de ce fait est souvent ralentie par l'habitude. Pourquoi innover lorsque les choses fonctionnent déjà bien ? Ainsi, la révolution nécessite d'importants défis à relever. Et plus la pression du défi est grande, plus importantes sont les ressources mises à disposition. Les crises sont un terrain particulièrement fertile à l'innovation. Il est intéressant de voir que par le passé, l'armée a souvent été à l'origine de l'innovation. Les États n'ont jamais été aussi inventifs et efficaces que lorsque leur survie était mise en danger par des crises humanitaires, des catastrophes naturelles ou des guerres. Sans surprise, c'est pour les besoins de l'armée que les états déploient les plus grandes ressources ce qui en fait l'un des plus importants facteurs d'innovation et de création.

Le système de transports dont jouit, aujourd'hui, l'Europe a été en grande partie développé puis utilisé pour la déportation pendant la deuxième guerre mondiale. L'industrie agroalimentaire doit également son émergence aux deux guerres mondiales. En effet, les chars ont précédé les tracteurs. Les engrais ont pu être produits en grande quantité grâce aux industries de phosphates utilisés dans les explosifs, et la plupart des pesticides sont des dérivés d'armes chimiques. Dans une perspective plus proche, la livraison par drones et les véhicules autonomes ont été précédé par des drones de combat engagés en Irak et Afghanistan, ces derniers guidés par le système de géolocalisation GPS développé par le département de la défense américain. Aujourd'hui le système GPS est également omniprésent dans les différents domaines de la société civile.



## 022 De l'uniformisation à la digitalisation

L'armée est également présente dans l'innovation de la construction. Il est intéressant de constater que l'accroissement du nombre de construction en béton coïncide avec les deux guerres mondiales. La raison à cela est très simple. Le développement de l'artillerie lourde est à l'origine des bunkers nécessitant l'utilisation du béton et de l'acier. Aussi pendant la deuxième guerre mondiale les états en guerre ont vu leur industrie de béton croître et se perfectionner très rapidement. À la fin de la guerre, ces industries ont dû se diversifier pour survivre.

En Europe, à ce moment, il a fallu reconstruire des villes entières et reloger des millions de personnes. Cela a offert aux architectes une tabula rasa pour expérimenter. Le résultat de cette expérimentation a été la définition hygiéniste de standards de vie modernes ainsi qu'une production architecturale en série. Ce n'est pas par hasard, si la préfabrication et la modularisation ont envahi l'architecture de l'après-guerre. Les modernes se sont tout particulièrement inspiré des voitures produites sur des chaines de montage. Leur processus est optimisé et une voiture ne comporte que des éléments utiles. Cette référence revient constamment aussi bien dans l'agencement des espaces que dans la construction des ensembles. Les exemples les plus marquants d'unités d'habitation se trouvent sans doute en Allemagne près de Francfort. Ernst May y a construit plusieurs ensembles comme Siedlung Römerstadt . Dans le cadre de ses chantiers, Ernst May a collaboré avec Margarete Schütte-Lihotsky . Le résultat le plus connu de cette collaboration a été la cuisine moderne toute équipée, aussi connue sous le nom de la "cuisine de Francfort". Cette cuisine a été un objet d'optimisation très poussée pour réduire les déplacements et la place nécessaire. Aujourd'hui encore on utilise dans la conception de nos cuisines les principes théorisés jadis.

Les pavillons d'habitation préfabriqués sont ancrés dans le style de vie américain. L'émergence et la prolifération de ce type d'architecture aux États-Unis est encore une fois le fruit de l'industrie militaire. Nombreux sont les exemples des propositions d'habitation standardisées: les maisons Citroën et Domino de Le Corbusier, General Panel de Gropius, Usonian House de Wright, Dymaxion house et Wichita House de Fuller, Magic home de Foster Gunnison, etc. Et



Fig. 7 : Cuisine de Francfort

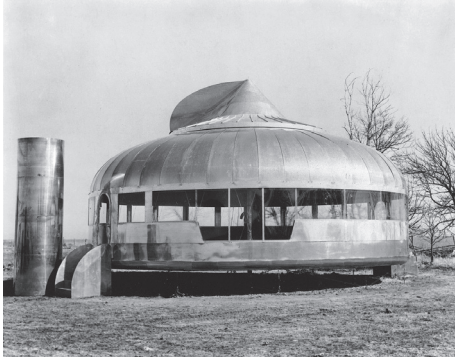


Fig. 8 : Dymaxion house de Fuller



Fig. 9 : Magic home de Gunnison

chacun de ces projets avait un réel potentiel: devenir le modèle de "l'habitation du peuple". Mais c'est le concept de Foster Gunnison qui s'est le plus répandu à travers les États-Unis. A l'origine du concept, des panneaux légers et autoporteurs fabriqués avec des panneaux en lamellé-collé et une structure en bois. Ces parois comprenaient aussi l'isolation et intégraient des fenêtres et des portes. Pour produire ces éléments, Gunnison s'est inspiré des chaînes de montage de Ford. La réduction de matière et un assemblage à la chaîne ont permis à Gunnison de réduire sensiblement les coûts. Avec seulement quelques éléments différents, Gunnison a proposé vingt-quatre modèles de maison différents. L'armée américaine s'est intéressée de très près à ce concept. Et au final, près de 200'000 maisons ont été produites pour répondre au besoin en logement du personnel militaire. Bien que le produit de Gunnison ait été fortement sollicité par l'armée, la population civile ne l'a pas trouvé suffisamment personnalisable et de ce fait, il n'a pas connu le succès espéré. Il est toutefois à l'origine d'autres systèmes plus flexibles.

Entre les années 40 et les années 50, la production architecturale en série bat son plein. A cette même époque, dans le plus grand secret, l'armée américaine développe les premiers supercalculateurs basés sur les travaux des anglais Alain Turing et Max Newman de 1936.

## 023 Émergence du numérique

Dans un premier temps, ces machines sont développées pour encrypter et décrypter des messages. Mais elles suscitent assez rapidement l'intérêt des industries à la recherche de plus de précision. La première utilisation d'ordinateurs dans l'industrie remonte à 1940. A cette époque, Parsons Corporation reçoit une commande de l'Etat américain pour des pales d'hélices des premiers hélicoptères produits en série (Sikorski). A ce moment le profil des pales est défini par dix-sept points. Pour améliorer la précision, John Parsons fait appel à Frank Stulen directeur de division au Propeller Lab. Ce dernier en utilisant un ordinateur rudimentaire, arrive à déterminer deux cents points de contrôle. Grâce à cette collaboration, Parsons développera une fraiseuse deux-axes véhiculée par deux moteurs, contrôlés grâce à des cartes perforées. Hélas, il manquera de moyens financiers pour réaliser son invention.

En 1949, US Air Force finance l'étude de faisabilité d'une fraiseuse trois-axes dirigée par ordinateur. La technologie est appelée "Numerical Control". On associe à cette technologie un important potentiel d'automatisation des processus. En 1951, une collaboration entre Air Force, Parsons Corporation et le laboratoire CervoMechanism du MIT permet de produire la première fraiseuse trois-axes contrôlée au moyen de cartes perforées "Card-a-matic Milling Machine". Cette machine offrait une grande précision et la possibilité de reproduire exactement le même élément. Il est intéressant de constater que les principes de fonctionnement de cette machine sont encore utilisés aujourd'hui. Cette nouvelle révolution permettant d'augmenter la productivité et l'uniformisation. Le gouvernement américain a lancé en 1956 le développement de toute une gamme d'outils à contrôle digital. Le projet a coûté à l'époque 62 millions de dollars. Une technologie aussi coûteuse n'aurait jamais été possible sans l'intervention de l'état. Celle-ci a permis le développement de domaines très innovants à l'époque comme la microélectronique, les systèmes de communication ou la mécanique de précision.

Une étape importante dans le développement de ces machines a été la définition du langage de programmation. Dès le départ, l'armée a spécifié que le langage de programmation devait être le même pour toutes les machines. Il porte le nom de "Automatically Programmed Tools" ou APT. Grâce à ce langage, il a été possible de définir n'importe quel processus de façon formelle. Dans les années 1970 APT a été intégré dans un standard international RS274 aussi connu sous la nomination de G-Code. En Europe des standards similaires ISO 6983 et DIN 66025 ont vu jour. La prolifération de cette nouvelle génération de machines a nécessité la formation de nouveaux spécialistes en programmation, mécanique et manufacture devant collaborer dans le processus de développement. A cette période, on a aussi vu apparaître les premiers outils CAD (Computer-Aided Design) – une interface de représentation géométrique. Cette interface permettait aux designers d'adopter une approche plus intuitive que les langages de programmation. Pour faire le lien entre CAD et NC, on a développé CAM (Computer-Aided Manufacturing). A partir des années 1970 on a commencé à mettre ces différents outils ensemble afin de créer des systèmes d'assemblage complets. Cette étape est à l'origine des centres d'usinages, des robots et des réseaux d'ordinateurs qui par la suite ont remplacé les machines mono-tâches.

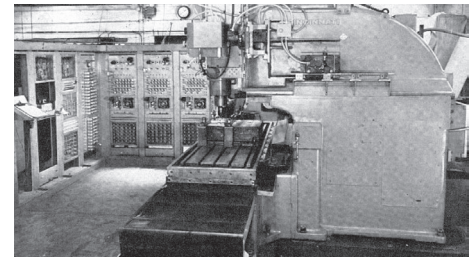


Fig. 10 : Card-a-Matic milling machine



Fig. 11 : Fraiseuse verticale à grande vitesse de commande numérique par ordinateur de haute précision (EV850L)



Fig. 12 : Processus d'usinage avec une fraiseuse verticale

## 024 Différents processus

L'apparition des machines automatisées a remis en question l'organisation des chaînes de montage. En effet, les mêmes machines pouvant usiner une très large palette de pièces, il a fallu réorganiser les chaînes de montage en regroupant les opérations que les différentes machines effectuent. Cela marque une sorte de retour à la manufacture. On peut classer les différents processus selon cinq grandes catégories: processus de changement de masse, processus de changement de phase, processus de changement de structure, processus de déformation, processus d'assemblage et de renforcement. Il s'agit ici d'une classification généralement utilisée. Chaque catégorie comprend des procédés différents. Le but de cet énoncé n'étant pas de détailler le fonctionnement de chaque machine, je me limiterai à l'explication de ces catégories qui sont toutefois extrêmement importantes pour se faire une idée du champ des possibilités. Afin de former une vision complète des technologies actuelles, j'aborderai aussi le prototypage rapide et la construction intégrée.

### 0241 Changement de masse

Ce processus vise à enlever de la matière d'un bloc afin de ne laisser que la pièce que l'on désire produire. Les méthodes sont nombreuses: forage, brochage, taillage, perçage, découpe, poinçonnage, fraisage, ponçage ou la découpe rotative. A ces méthodes, on peut ajouter le traitement par laser, bombardement d'électrons ou l'érosion chimique, électrique, électrochimique ou thermique. Le choix d'une méthode plutôt que d'une autre est généralement dicté par les coûts, la quantité de pièces à produire, les délais et le degré de précision. Aujourd'hui, indirectement lié aux coûts, on prend aussi en compte le besoin énergétique des machines. De nos jours, l'innovation dans ces machines est portée sur l'augmentation de la cadence sans perte de qualité et de précision.

### 0242 Changement de phase

Dans ce processus l'état de la matière lorsqu'elle est travaillée et

son état final différent. La plupart du temps, on chauffe le matériau afin de le rendre plus malléable. Ensuite il est déposé ou injecté dans des moules dont il prend la forme. Il existe d'autres matériaux dont la structure change complètement avec l'apport ou le retrait de l'énergie. Dans certains cas la réaction est réversible dans d'autres cas elle ne l'est pas. C'est le cas du béton. Aujourd'hui un accent important est mis sur le développement des bétons renforcés, des polymères synthétiques, des acryliques, des résines et autres matériaux composites. Souvent ces matériaux nécessitent des processus de traitement de moulage particuliers et très précis.

## 0243 Changement de structure

Dans cette catégorie les processus les plus communs sont basés sur un traitement thermique. En changeant la température de façon contrôlée, on arrive à améliorer les performances mécaniques des matériaux. C'est, par exemple, le cas de l'acier trempé. Ces procédés sont généralement coûteux en énergie et on n'y recourt que si les changements des caractéristiques des matériaux ne peuvent pas être atteints autrement.

On peut aussi changer la structure en utilisant des procédés chimiques ou électrochimiques. Cela consiste soit en l'oxydation soit en dépôt de fin revêtement métallique ou organique. La plupart du temps ces traitements sont des traitements de surface, permettant de protéger la pièce. Le dépôt peut se faire de multiples façons: immersion, irradiation, anodisation, simple revêtement, émaillage, vaporisation, etc. Comme pour les catégories précédentes, le choix d'un procédé plutôt qu'un autre se fait en fonction du coût, de la précision, de la qualité et de la quantité.

## 0244 Déformation

Comme son nom l'indique, ce processus permet de modifier la forme d'une pièce en appliquant des forces de traction, de compression ou de torsion. Il est primordial que le matériau soit malléable. On peut le chauffer ou pas, sachant que cela permet de réduire les efforts nécessaires à la déformation mais offre une moins



Fig. 13 : Usinage d'une pièce en acier par changement de phase et déformation



Fig. 14 : Presse hydraulique / de formage RTM / CNC / pour matériaux composites 120T



Fig. 15 : Prototypage rapide; impression 3D de différents objets

bonne précision. Par rapport au processus de changement de masse, celui-ci permet d'économiser le matériau et le travail. Du fait que les fibres des matériaux sont étirées et non-rompues, on arrive aussi à améliorer les caractéristiques mécaniques. La contrepartie étant la précision.

Les méthodes principalement utilisées sont le laminage qui consiste à étirer la pièce afin de lui donner la forme voulue, le modelage qui consiste à faire entrer le matériau dans une forme, le forgeage qui consiste à exercer une pression sur la pièce afin de le déformer et l'extrusion qui consiste à faire passer le matériau à travers un pourtour pour lui donner un certain profil.

## 0245 Assemblage et renforcement

Ce processus vise à assembler des éléments afin de créer une pièce unique selon la géométrie, la structure ou des propriétés désirées. Cela peut se faire de façon réversible ou irréversible. De nouveau les méthodes sont: le boulonnage, la soudure, ou au moyen de réactifs chimiques.

## 0246 Prototypage rapide

Il s'agit d'un ensemble de technologies à relativement faible coût, beaucoup utilisées dans le design. Le prototypage rapide permet de vérifier rapidement des géométries complexes, les assemblages ou des contraintes mécaniques ou spatiales.

Dans cette catégorie, il est très difficile de regrouper les machines du fait qu'elles évoluent très rapidement. On trouve certaines machines similaires à celles de la catégorie des processus de changement de masse ou de déformation, au détail près que celles du prototypage rapide sont généralement plus petites et prévues pour une utilisation occasionnelle. On y retrouve des machines comme Zund, des découpeuses laser, toutes sortes d'imprimantes 3D, etc. Ces dernières ont particulièrement évolué depuis quelques années.



Depuis une vingtaine d'années, les outils de représentations graphiques ont évolué vers des outils de modélisation. Grâce aux ordinateurs, aujourd'hui on peut se passer de l'étape des maquettes ou de prototypes matériels dans la construction. Tout peut être contrôlé depuis un modèle numérique.

## 0247 Construction intégrée

La production d'éléments complexes fini peut impliquer de nombreux processus. La planification intervient de plus en plus dans la phase de conception afin d'optimiser le produit final. On voit apparaître des outils informatiques qui permettent d'organiser et de gérer des séquences de production complètes. Ils intègrent aussi bien la fabrication que la conception, le contrôle, la planification et même le marketing. On retrouve ces technologies également dans les métiers de la construction. De plus en plus, les processus sont automatisés. Finalement, la seule limite aujourd'hui est celle des matériaux et celle des coûts. Et ces limites sont repoussées de plus en plus rapidement. De nouveaux matériaux sont inventés tous les jours et on améliore des matériaux existants. De nouveaux processus voient le jour et l'automatisation gagne du terrain, permettant de gagner en productivité et réduire le coût.

Aujourd'hui la construction complètement intégrée est limitée à quelques projets pilotes. Au Japon, où le prestige de la technologie est très important et la main d'œuvre est chère, plusieurs projet de construction de CIM (Computer Integrated Manufacturing) ont vu le jour. Shimizu Manufacturing System d'Advanced Robotic Technology est l'un des projets les plus avancés. Il s'agit d'un système entièrement automatisé. Après la définition d'un plan type, la structure produit successivement des étages d'un bâtiment. A l'intérieur de la structure des robots déplacent les matériaux, les usinent et les assemblent. Lorsqu'un étage est terminé, la structure de 1300 tonnes monte grâce à des vérins hydrauliques et les robots recommencent toute la séquence de processus. La structure à l'intérieur de laquelle les robots évoluent protège le chantier des intempéries ce qui lui permet d'avancer indépendamment des conditions climatiques et du moment de la journée.



Fig. 16 : Quartier général de Shimizu Corporation réalisé avec un système de construction automatisé

Pour faciliter le travail des machines et des robots, différents traceurs sont intégrés aux éléments de construction et les robots sont équipés d'outils de mesure à laser leur permettant de se repérer et estimer les distances. Cette méthode a été utilisée pour la première fois en 1993, pour la construction de bureaux de deux banques l'une à Nagoya, l'autre à Yokohama. Chaque chantier a été bouclé en environ six semaines et a nécessité 30% de travailleurs en moins. Leur rôle, d'ailleurs n'était plus de construire mais de contrôler le déroulement du chantier et de veiller à la maintenance des machines.

Cet exemple ne se limite pas à la construction des bâtiments mais il intègre également la planification, partiellement l'approvisionnement du chantier et la production des éléments. Les technologies actuelles permettraient probablement d'automatiser entièrement la construction de bâtiments et peut-être même certaines tâches de contrôle.

En substituant l'homme par la machine, on limite les imprévus, mais cela demande une planification toujours plus minutieuse et détaillées. Le chapitre suivant traitera de la planification et de la construction précédant la construction.



# 03

## Comment collaborer

### 031 Ingénieur et architecte

Étymologiquement, le mot "architecte" provient de Architectus, du grec *αρχιτέκτων* composé de *ἄρχω* – commander et de *τέκτων* – artisan en général ou charpentier en particulier. En d'autres termes, architecte signifie maître des artisans ou maître des charpentiers.<sup>4</sup> A l'époque gréco-romaine, le charpentier le plus expérimenté et le plus habile du chantier était nommé architecte et devenait responsable du bon déroulement de la construction de l'édifice. Au Moyen-Âge, le chef de l'ouvrage était nommé de la même façon mais parmi les tailleurs de pierre. A cette époque, la position d'architecte était un statut et non un métier à part entière comme aujourd'hui. La personne désignée architecte se devait de connaître l'ensemble des procédés et des techniques intervenant sur le chantier, afin de superviser l'ensemble des travaux.

Avec le temps, le statut de l'architecte a subi un processus de professionnalisation et a évolué vers la conception, marquant ainsi une séparation entre le développement et la construction des bâtiments. A partir du XVIIIe siècle, s'est produite une autre séparation entre les métiers de l'architecte et celui de l'ingénieur civil. Le premier a pris



Fig. 17 : Représentation d'un architecte au Moyen-Âge expliquant le projet aux commanditaires

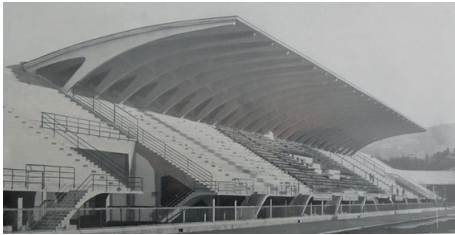


Fig. 18 : Stade municipal de Florence construit par Pier Luigi Nervi en 1929-1932



Fig. 19 : Usine de laine Gatti construite par Pier Luigi Nervi en 1951



Fig. 20 : Passerelle de Mataro construite par Santiago Calatrava en 1987

une orientation sensible et créative. Tandis que le second a suivi une direction fonctionnelle et orientée vers les enjeux techniques.

L'ingénierie structure, à son apogée au début du XXe siècle, visait à concevoir des systèmes de structures minimisant les matériaux et maximisant les capacités porteuses. Ces objectifs étaient clairs dans le milieu et toute tentative de sortir du cadre était critiquée par les confrères. Ainsi a-t-on reproché à des figures majeures de l'ingénierie comme Pier Luigi Nervi ou Santiago Calatrava de faire des compromis sur la performance au profit d'une recherche esthétique. Et pourtant ce sont bien ces personnalité qui ont annoncé la réconciliation entre les architectes et les ingénieurs.

Pendant ce temps, dans un environnement socio-politique embrasé, les architectes exploraient des champs formels bien trop importants pour se soucier de la construction. Les réflexions se portaient sur un idéal social et l'architecture qui le représentait au mieux. Aussi, l'ensemble des tâches analytiques ont été déléguées aux ingénieurs. Toutefois, chez les architectes, on trouve également des dissidents fascinés par l'esthétique structurale. Parmi eux, Viollet-le-Duc - l'un des restaurateurs de la cathédrale de Lausanne ou Antoni Gaudi - dont la Sagrada Familia est en chantier depuis 135 ans.

## 032 Multiplication et spécialisation

Bien que l'industrialisation puis le numérique aient nourri l'imaginaire des architectes, le développement des nouveaux outils est le fait des besoins des ingénieurs, afin de répondre au mieux à des enjeux techniques toujours plus importants. Les nouveaux outils ont aussi touché le domaine de l'innovation, entraînant une sorte de boucle: des outils toujours plus performants permettant d'innover et trouver d'autres outils toujours plus rapidement.

Au XVe siècle, le champ des connaissances d'une civilisation pouvait encore être détenu par une personne. Léonard de Vinci était réputé pour cela. Aujourd'hui, notre civilisation s'est tellement étendue et a tellement progressé qu'une personne seule ne pourrait consulter et encore moins emmagasiner un millième de la connaissance. De

plus, le savoir évolue et s'étend continuellement. En conséquent, on assiste à une fragmentation et spécialisation. Ceci explique en partie l'explosion de la taille des bureaux d'architecture et la présence toujours croissante de spécialistes et consultants dans des projets d'architecture. En un siècle, nous sommes passés de grandes études d'une trentaine de personnes à des bureaux d'architecture internationaux dépassant 1200 employés. D'autre part, cela peut également s'expliquer par des normes toujours plus strictes et précises et des exigences toujours plus élevées ne permettant plus à une seule personne de gérer tous les aspects d'un projet architectural.

### 033 Organisation et homogénéisation

En faisant intervenir un nombre toujours plus important d'acteurs dans l'étude d'un projet et son chantier, la question de l'organisation se pose. Très souvent, comme par le passé la coordination et la planification d'un chantier incombe à l'architecte. Dans certains cas, on fait appel à un coordinateur de projet, mais les bureaux d'architecture ont tendance à internaliser la conception et la gestion du projet. Très certainement pour des raisons financières et parce qu'il est plus simple d'instaurer une communication efficace à l'intérieur d'une grande structure verticale plutôt que dans une structure horizontale composée de sous-structures.

Les technologies numériques permettent aussi d'améliorer la gestion de projet. Elles permettent d'échanger rapidement les données, de transformer les informations de façon à ce qu'elles soient claires pour les différents protagonistes d'un projet. La technologie permet de détecter automatiquement des conflits entre les différentes interventions dans le projet.

Avec l'apparition de ces nouveaux outils sont arrivées de nouvelles normes. Les autorités ont également un intérêt dans le développement d'outils de gestion efficaces. Bien que souvent le développement de ces outils demande un investissement initial important, à moyen et long terme, ces outils permettent d'économiser des ressources humaines et matérielles. Dans certains pays la soumission de projets et demande d'autorisations de construire sont automatisées.

L'Allemagne aimerait renoncer à une soumission physique au profit d'une soumission en ligne d'ici 2020, la France souhaite sauter le pas en 2025. À Singapour, les projets de bâtiments publics doivent obligatoirement être accompagnés d'une maquette numérique au format Revit.

## 034 Outils de collaboration

Au même titre qu'il existe énormément de standards de normes différents ISO (International Organization for Standardization), AFNOR (Association française de normalisation) ou DIN (Deutsches Institut für Normung)<sup>5</sup> pour n'en citer que quelques-uns, il existe aussi énormément d'outils différents. Certains compatibles et interchangeable d'autres pas. A ce jour, dans le domaine de l'architecture et de l'ingénierie, il n'existe pas de plateformes universelles regroupant l'ensemble des outils utiles dans un projet. Pour ces raisons, il me paraît pertinent de traiter séparément les outils d'organisation, de planification et de communication, et le BIM.

## 0341 Communication et l'organisation

Il faut admettre qu'aujourd'hui, nous ne communiquons plus de la même façon qu'au début du siècle. Plus question d'envoyer des lettres ou des télégrammes. Les lettres sont remplacées par les courriels, le télégramme et le téléphone par des outils de vidéoconférence comme Skype ou FaceTime. Une nouvelle catégorie d'outils initialement prévue pour l'usage privé se reprend dans les sphères professionnelles: les messageries instantanées du type WhatsApp ou Telegram. Tous ces outils permettent avant tout d'économiser du temps et donc de l'argent. Il n'est plus nécessaire de se réunir aussi souvent. Nous sommes constamment connectés et prêts à échanger avec le reste du monde. Lorsque nous entamons un projet, l'une des grandes questions est le choix du moyen de communication. Certaines entreprises imposent une plateforme, tandis que d'autres laissent le choix libre aux équipes.

Pour établir des calendriers, attribuer des tâches, échanger les documents, gérer les budgets, les solutions d'organisation sont tout aussi nombreuses que celles de communication. On a le choix entre plusieurs gammes de produits allant du sur mesure aux plateformes

en libre accès. Pour en citer quelques-uns: Trello, Google Drive, Abacus, etc. Selon le besoin de l'entreprise et les besoins du projet, on s'oriente vers une solution plutôt qu'une autre.

## 0342 Building Information Modeling

Sans doute, l'une des plus grandes révolutions dans la gestion du projet d'architecture est le BIM. On a commencé à développer ce genre de plateformes à la fin des années 90'. Il en existe plusieurs. Mais les plus répandues sont ArchiCAD et Revit développées respectivement par Abvent et Autodesk. Leur particularité est de fonctionner avec des maquettes numériques. L'intérêt premier des maquettes numériques est de regrouper et lier les différentes données concernant un projet dans un seul fichier de façon à améliorer la collaboration entre les différents acteurs.

La maquette numérique permet aussi d'automatiser certains processus de contrôle. Plus besoin, par exemple, de mettre à jour les plans et les coupes; ils sont mis à jour automatiquement par le programme. Certaines tâches jusque-là fastidieuses comme l'établissement de plans de coffrage ou de ferrailage peuvent aussi être déléguées à l'ordinateur.

Grâce à la maquette numérique, on peut effectuer toutes sortes de simulations sur la structure, l'éclairage, le confort thermique, etc. Elle peut aussi révéler des conflits dans la conception des bâtiments comme la structure porteuse qui croiserait des réseaux sanitaires ou électriques.

Les plateformes BIM proposent souvent des outils de collaborations comme ceux d'annotation ou de suggestion de modifications. Elles peuvent aussi intégrer ou être compatibles avec des services de messageries instantanées ou comprendre des outils d'organisation. Malheureusement, ces outils sont rarement aussi complets et efficaces que des plateformes dédiées à la tâche précise de communication ou d'organisation.

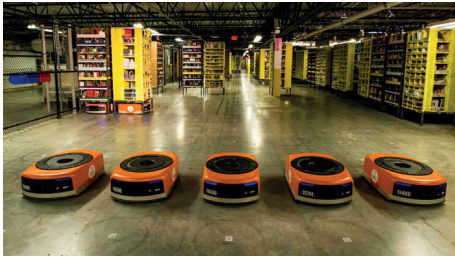


Fig. 21 : Robots préparateurs de commandes chez Amazon

Les outils de communication et d'organisation sont nécessaires aujourd'hui parce qu'un facteur humain intervient dans la conception et parce que l'on n'utilise pas forcément les mêmes outils, ni le même langage. A partir de ce qui se fait déjà dans d'autres domaines, on pourrait imaginer déléguer l'organisation et la collaboration aux machines, comme dans le domaine du supply-chain. Les centres logistiques des géants comme Amazon ou la Poste sont partiellement automatisés. En fonction de la demande, leurs systèmes sont capables d'organiser tout seuls les commandes et le transport des biens de façon autonome, en prenant en compte les délais et les coûts de transport.

A ce jour, techniquement, rien n'empêche d'établir des algorithmes de planification d'un chantier ou de commande des éléments nécessaires, les maquettes numériques comprenant aujourd'hui l'ensemble des informations sur les matériaux et les assemblages. Ce genre de tâches peut facilement être délégué à un ordinateur. En vue des économies à long terme que permet l'automatisation, ce n'est qu'une question de temps avant que l'on rencontre sur le marché des outils d'automatisation de gestion de projets.

# 04

## Comment concevoir

### 041 Du fonctionnalisme au performatisme

Comme à chaque époque, aujourd'hui l'architecture est déclarée en crise. Depuis une vingtaine d'années émergent des formes qui ne s'inscrivent dans aucunes catégories existantes. Les nouvelles formes ne revendiquent ni le retour vers l'architecture classique, gothique, ou celle de la renaissance, ni une énième rupture avec le modernisme ou le post-modernisme.

"Une grande époque vient de commencer. Il existe un esprit nouveau. Il existe une foule d'œuvres d'esprit nouveau; elles se rencontrent surtout dans la production industrielle. L'architecture étouffe dans les usages. Les "styles" sont un mensonge. Le style, c'est une unité de principe qui anime toutes les œuvres d'une époque et qui résulte d'un esprit caractérisé. Notre époque fixe chaque jour son style. Nos yeux, malheureusement, ne savent pas le discerner encore. "Ainsi commence le chapitre "Les yeux qui ne voient pas" dans "Vers une Architecture" du Corbusier. Quelques pages plus loin son auteur poursuit: "Une maison est une machine à habiter. Bains, soleil, eau chaude, eau froide, température à volonté, conservation des mets, hygiène, beauté par proportion. Un fauteuil est une machine à s'asseoir. Etc. Maple a montré le chemin. Les aiguères sont des



Fig. 22 : Chaise longue LC4





Fig. 23 : Unité d'habitation de Marseille



Fig. 24 : Unité d'habitation de Marseille, terrasse en toiture

machines à se lave: Twyford les a créées." C'est connu, les modernes étaient fascinés par l'industrie et ce qu'elle pouvait offrir. "Form follows function" était l'un de leurs mots d'ordre. Les murs, les portes les fenêtres; tout avait une fonction. Les éléments d'ornement et donc sans utilité étaient bannis. La modularité et la production en série étaient également dans l'air du temps. Le Corbusier a imaginé l'unité d'habitation de Marseille comme une machine à habiter avec tous les services nécessaires à une vie saine, y compris des installations sportives en toiture comme sur le pont d'un paquebot. Il explique également que chaque appartement est en fait comme une bouteille que l'on insère dans un porte-bouteilles. Ces éléments auraient très bien pu être préfabriqués. Et on aurait pu le voir comme la cellule minimale d'habitation.

À l'époque du Corbusier, tout devait être fonctionnel, mais aujourd'hui l'époque a changé. Nous n'avons plus les mêmes contraintes. L'architecture doit être performante. D'une part, les normes toujours plus strictes l'obligent; d'autre part, les nouvelles technologies nous permettent de faire des choses que l'on n'aurait jamais imaginées avant. Pourquoi construire des gratte-ciels toujours plus hauts des coques et des voûtes toujours plus fines, plus élancées et plus complexes ? Parce que l'on peut démontrer une performance qui est symbole de notre progrès. La technologie nous permet de minimiser la matière nécessaire. Les machines remplacent les hommes, même pour des tâches complexes et de moins en moins répétitives. De ce fait, la complexité est de moins en moins limitée par la main d'œuvre et le coût. Par ailleurs, la performance justifie les coûts.

Dans son article "The collapsing of technological performance and the subject's performance"<sup>6</sup>. Eran Neuman définit la performance. Il distingue deux performances liées aux différents contextes. Une performance technologique qui tend à optimiser l'espace et la performance subjective qui vise à diversifier l'expérience de l'utilisateur. La conception moderniste explorait uniquement la performance technologique offrant des solutions limitées et figées. Le but était d'éduquer l'utilisateur à la vie saine. L'architecture paramétrique prend en compte aussi la performance subjective, offrant à l'utilisateur la possibilité de s'approprier l'espace. Elle part de l'expérience désirée par l'utilisateur, offrant à la fois des solutions techniques mais aussi une richesse symbolique, culturelle et sociale. Dans l'approche actuelle,



l'expérience est rendue d'autant plus unique grâce à l'utilisation des médias numériques qui permettent une adaptation en temps réel. On ne conçoit plus une solution pour tout le monde mais une solution pour chacun. Dans ce processus, la forme s'efface et évolue au service d'une expérience d'utilisateur.

## 042 Utopie des villes machine

Depuis l'industrialisation, les architectes rêvent d'un monde amélioré par la technologie. Les modernes ont fait les liens métaphoriques entre l'industrie et l'architecture. Ils ont réduit le bâtiment à une machine métaphorique. Dans les années 1960, ce rêve continue à travers les idées d'Archigram, Archizoom et Superstudio. Produits du Pop Art, les trois collectifs proposent une vision utopiste de la société fondée sur la technologie.

La décennie commence avec Ron Herron, David Greene, Dennis Crompton, Mick Webb et Peter Cook qui se réunissent afin de discuter d'une nouvelle architecture sans fondations et purement théorique. La réflexion se concrétise dans la revue Archigram parue pour la première fois en 1961. Inspirés par un projet de décors du Film "Fun Palace" de Cedric Price, Archigram propose une série de projets de villes-machines modulables, nomades et éphémères, parmi lesquels: Plug-in City, A Walking City et Instant City. Bien qu'Archigram se revendique sans fondation, la vision machiniste de l'architecture renvoie clairement aux modernes et A Walking City peut très bien être vue comme machine à habiter autonome.

En 1966, Gilberto Corretti, Paolo Deganello et Massimo Morozzi, Andrea Branzi fondent Archizoom Associati. Le collectif porte un regard ironique sur le "Good Design" à travers le Kitsch. Quelques années plus tard, ils proposent un projet utopique celui de Non-Stop City. Le projet décrit une boîte à l'échelle du territoire, offrant à l'intérieur, un environnement de vie artificiel idéal. On y vivrait en communauté et chacun aurait son espace. Les architectes décrivent le processus d'emménagement comme l'évidence même.

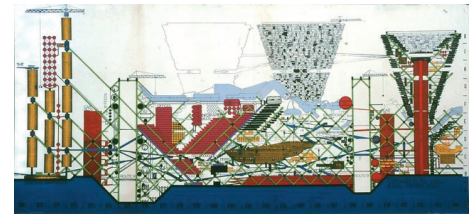


Fig. 25 : Plug-in City par Peter Cook

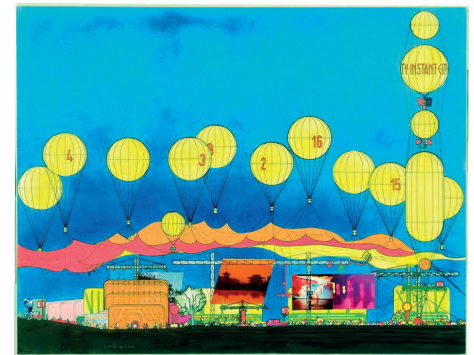


Fig. 26 : Instant City par Peter Cook

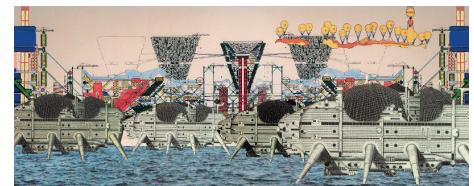


Fig. 27 : Walking City par Ron Herron



Fig. 28 : Superonda par Archizoom, meuble emblématique du design acide

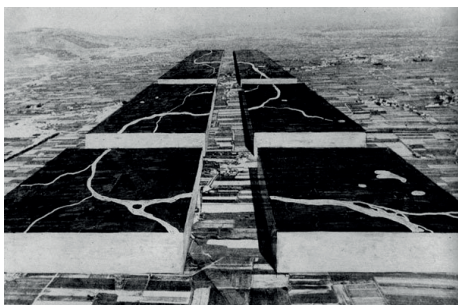


Fig. 29 : Non-Stop City par Archizoom

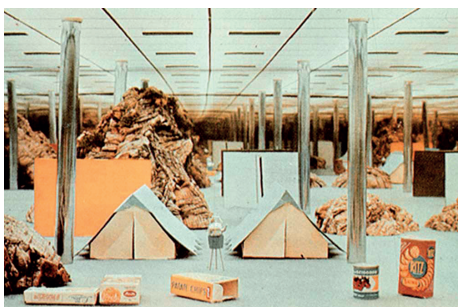


Fig. 30 : Photomontage illustrant la façon de vivre à l'intérieur de la Non-Stop City

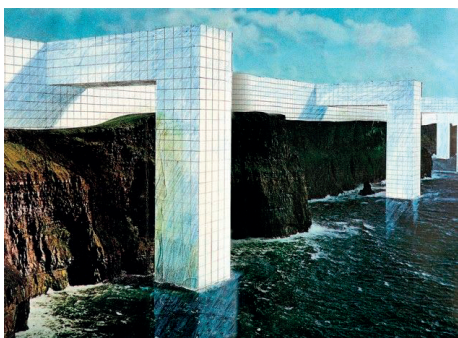


Fig. 31 : Superstructure par Superstudio

Il est important de noter qu'avant de créer Archizoom, Andrea Branzi a côtoyé les membres d'Archigram. Il partage leur goût pour le Pop Art et leur vision de la société future. Avec Archizoom, il saute un pas en abstrayant la technologie et en la rendant omniprésente au service des occupants de la Non-Stop City.

Fondé en 1967 par Adolfo Natalini et Cristiano Toraldo di Francia, Superstudio pousse l'abstraction de la technologie encore plus loin. Pour Natalini tout est politique. Et si la société occidentale désire continuer à exister il faudra qu'elle évolue radicalement. Son discours politico-social est accompagné de projets utopiste. D'abord, il propose la superstructure. Ce projet utopiste est présenté comme une structure à l'échelle du territoire suivant une grille carrée stricte. Cette grille est Technologie et revient tout au long de l'œuvre du Superstudio. Par la suite et toujours dans un discours réductionniste la Superstructure est devenue Supersurface – une grille abstraite et dématérialisée fournissant à l'homme tout ce dont il a besoin. Les hommes vivraient librement sur cette surface en n'ayant besoin de rien. Dans le monde hypothétique recouvert de la Supersurface, les hommes n'ont plus d'attaches matérielles puisque la Supersurface le leur fournit, il ne leur reste plus que jouir de leur condition sur terre.

Le propre de l'utopie est de faire rêver en repoussant les limites de l'imaginaire. Aujourd'hui, nous sommes en 2018. Hélas, nous sommes encore loin des prévisions de la génération Archigram, Archizoom et Superstudio. Toutefois, on peut concevoir qu'une partie de leur rêve s'est réalisée. Aujourd'hui, nous sommes en permanence connectés grâce à un réseau immatériel d'internet. Au quotidien, nous sommes assistés par des machines. Notre génération ne connaît plus de poinçonneurs dans les transports publics, nous achetons des billets au distributeur ou via les applications des transports publiques sur les smartphones. Pour se déplacer, la façon la plus simple est d'utiliser le GPS de son smartphone, plus besoin de carte. Pour partir, en vacances des moteurs de recherche nous permettent de trouver la meilleure offre. Pour décider d'une heure de rendez-vous, il suffit de synchroniser nos agendas en ligne ou de proposer un Doodle. Bien que la plus grande partie de l'espèce humaine soit restée sédimentaire, une existence nomade est rendue possible par la mondialisation et la technologie.

## 043 Architecture connectée

Avec les nouvelles technologies, tous les jours nous générons et récoltons un volume d'informations astronomique. Regroupées intelligemment, ces données nous permettent d'analyser notre environnement mais aussi notre comportement et nos habitudes. L'information est synonyme de pouvoir et de richesse. Et ce n'est pas par hasards que les géants du numérique comme Facebook et Google nous incitent à générer de plus en plus d'informations.

Aujourd'hui, les architectes et les urbanistes utilisent ces mêmes technologies pour concevoir des villes, des quartiers et des bâtiments qui répondent aux besoins des utilisateurs. L'utilisation de capteurs en ville peut amplifier la sécurité, fluidifier le trafic, identifier des manques programmatiques ou faciliter l'orientation. De nombreuses villes à travers le monde se dotent de systèmes de monitoring.

En même temps qu'elles croissent, les villes rencontrent d'importants défis parmi lesquels le traitement des déchets. En 2009, SENSEable City Lab de MIT a mené le projet "Trash Track" sur le déplacement des déchets à Seattle. Certains déchets ont effectué des trajets impressionnants avant d'être traités ou recyclés. Le simple fait de mesurer les choses ne permet pas de résoudre directement les problèmes mais il permet de communiquer plus efficacement sur leur existence, de faire de la prévention et envisager des solutions ciblées. Les Villes Sud-Coréennes rencontrent également des problèmes de déchets. Certaines villes ont proposé aux habitants de payer en fonction du poids de déchets qu'ils génèrent. Des bennes intelligentes permettent de facturer le montant correspondant à la production de déchets. Cela instaure un climat d'équité entre les citoyens et les incite à prendre conscience de l'impact que peuvent avoir les déchets sur l'environnement.<sup>7</sup>

D'autres villes dans le monde proposent des plateformes d'aide à la recherche de parkings. Les places de parking sont équipées de détecteurs et ils transmettent le statut occupé ou libre de la place. Cette information est communiquée à la centrale qui met ses informations à disposition des utilisateurs de voiture. Cela permet de réduire le temps passé par le véhicule dans le trafic. Et ainsi décharger le réseau routier



Fig. 32 : Supersurface par Superstudio

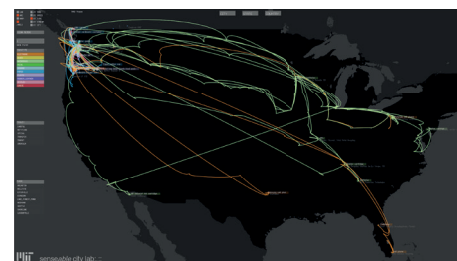


Fig. 33 : Carte produite par SENSEable City Lab retraçant le parcours des déchets entre Seattle et les lieux de traitement



Fig. 34 : Schéma des systèmes d'aide à la recherche de parking

7

Picon, Antoine. (2015). Smart cities: A spatialised intelligence (AD primers). Chichester West Sussex: John Wiley & Sons, p.40-41





Fig. 35 : La façade de The Water Cube conçu par PTH Architects peut changer d'aspect



Fig. 36 : Pavillon FreshHtwoOexpo conçu par NOX architects



Fig. 37 : Vue intérieure du pavillon FreshHtwoOexpo

et réduire la pollution. D'autres systèmes détectent les véhicules sur la chaussée et adaptent la luminosité des lampadaires en temps réel ce qui permet de réduire considérablement les dépenses énergétiques.<sup>8</sup>

A plus petite échelle, celle d'un bâtiment, les avancées dans le domaine de la domotique permettent d'utiliser les données pour adapter l'environnement à son utilisateur. La température, la ventilation et l'éclairage sont les choses le plus habituellement incluses dans le système de contrôle d'environnement domestique. Avec les nouvelles interfaces, on peut aussi contrôler à distance tous les objets connectés. Par exemple, lorsque l'on rentre, le système peut automatiquement préchauffer le four ou allumer la télévision sur la bonne chaîne. Ce sont quelques exemples discrets de technologie.

Les mêmes technologies peuvent être utilisées pour modifier l'apparence des bâtiments. Par exemple, une façade qui change d'aspect en fonction du temps qu'il fait, du moment de la journée ou qui peut être contrôlée par ses occupants ou de simples passants consciemment ou pas. Les différentes données peuvent aussi être intégrées dans la conception des bâtiments à l'étape de projet et influencer sa forme. Chose que l'on voit de plus en plus présente dans l'architecture paramétrique.

FreshHtwoOexpo, conçu par NOX Architects, s'inscrit dans la catégorie des projets d'architecture paramétrique interactifs. Sa forme extérieure est obtenue à partir de la déformation fluide de quatorze ellipses répartis sur les soixante-cinq mètres du pavillon. Ce pavillon n'accueille pas d'exposition au sens traditionnel. Son but est d'offrir aux visiteurs une expérience autour du thème de l'eau. A l'intérieur des processeurs simulent en temps réel des images et des sons d'écoulement de l'eau. De nombreux capteurs de mouvements, de son et de pression traduisent la présence des visiteurs en perturbation de ce flux, en temps réel. Cette interaction dynamique a pour but de déstabiliser l'environnement statique généré à l'intérieur du pavillon.<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Picon, Antoine. (2015). Smart cities: A spatialised intelligence (AD primers). Chichester West Sussex: John Wiley & Sons, p.42

<sup>9</sup> Burry, Jane, & Burry, Mark. (2010). The new mathematics of architecture. London: Thames & Hudson, p. 218-221

## 044 Mathématiques et architecture

Les architectes ont toujours eu un lien très étroit avec les mathématiques. Dans l'antiquité puis lors de la Renaissance, les mathématiques ont servi à établir des proportions visuellement agréables. Le Corbusier a utilisé les tracés régulateurs pour la composition de ses façades. Par la suite, il a utilisé les maths dans la définition du Modulor. La géométrie descriptive, qui a rendu possible la représentation graphique des bâtiments en plans et coupes, a aussi été empruntée à un mathématicien, Gaspard Monge. Les travaux des mathématiciens Alain Turing et Max Newman ont rendu possible la conception des premiers calculateurs. Toute la cryptographie moderne est basée sur les travaux de Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman. Sans ces outils mathématiques, le numérique n'aurait jamais pris autant d'ampleur. Et les outils numériques utilisés par les ingénieurs et architectes d'aujourd'hui n'auraient jamais vu le jour.

L'extension du numérique à l'architecture n'a pas seulement permis de perfectionner les outils existants, comme par exemple le dessin à la main devenu conception assistée par ordinateur. La puissance de calcul des ordinateurs a permis aux architectes d'accéder à de nouveaux outils mathématiques. Le sujet de cet énoncé ne portant pas sur les différents outils mathématiques dans l'architecture contemporaine, ils ne seront pas tous détaillés. Toutefois pour concrétiser leur apport à l'architecture, il me semble important d'en citer quelques-uns.

### 0441 La théorie des graphes

La théorie des graphes est un domaine des mathématiques qui traite des relations. Dans un modèle, on les représente souvent comme des points connectés. Les connections peuvent être uni- ou bidirectionnelles. La discipline est officiellement apparue en 1736 lorsque Leonhard Euler a publié l'article sur les sept ponts de Königsberg. Il y a démontré mathématiquement qu'il n'existait aucun parcours permettant de passer par tous les ponts exactement une fois.

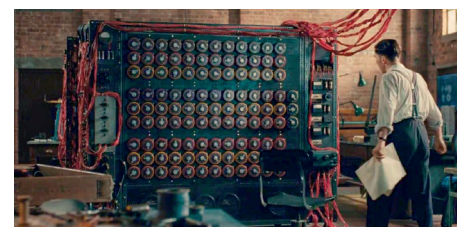


Fig. 38 : Représentation de la machine de Turing dans le film Imitation Game (2015)

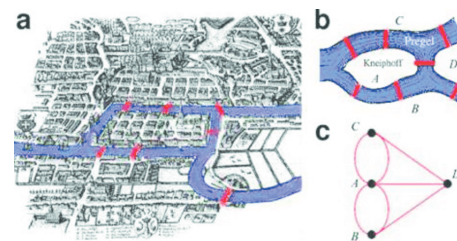


Fig. 39 : Représentation graphique du problème des sept ponts de Königsberg

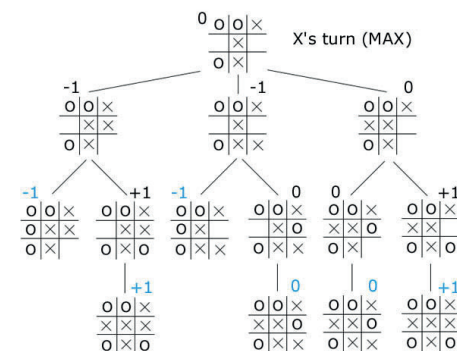


Fig. 40 : Arbre des solution du jeu de morpion

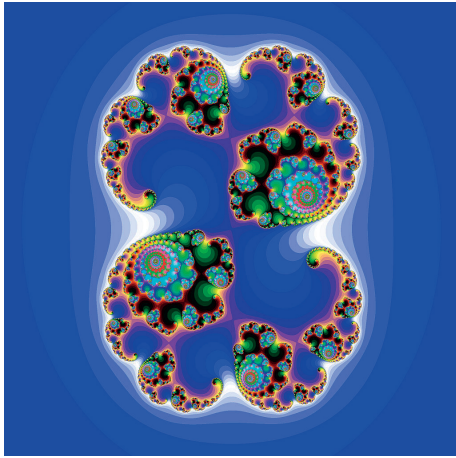


Fig. 41 : Représentation graphique de l'ensemble de Julia, fonction homomorphe

En architecture la théorie des graphes est un outil précieux pour analyser les relations entre des bâtiments, des services ou des systèmes. Elle permet de clarifier des processus de constructions complexes ou de comprendre les flux de données et la génération des informations dans un système.<sup>10</sup>

## 0442 La théorie des jeux

La théorie des jeux s'intéresse aux combinaisons résultant des choix possibles d'un joueur de "jeu stratégique". Les combinaisons sont souvent représentées soit dans une matrice de gains, soit sous forme d'un arbre où chaque embranchement représente un choix possible. Dans certaines situations, cette représentation permet de visualiser les meilleures stratégies pour chaque acteur du "jeu", indépendamment des choix des autres joueurs. Dans d'autres cas, des stratégies mixtes basées sur les probabilités de chaque joueur, permettent d'identifier des stratégies maximisant les gains de chaque partie à la condition que tous les joueurs agissent de façon rationnelle et équilibrée.<sup>11</sup>

Cet outil est particulièrement utile lors du processus de prise de décisions. Il permet de maximiser ou d'équilibrer les différents paramètres d'un projet. Il ne nécessite pas de grande puissance de calcul dans des situations simple. En revanche la complexité croît de façon exponentielle lorsque le nombre d'acteurs ou lorsque le nombre de choix possibles augmentent.

## 0443 Les fractales

En mathématiques, les fractales sont définies comme: "Objet géométrique défini par un ensemble de propriétés précises, dont celle d'être autosimilaire, c'est-à-dire que le tout est semblable à l'une de ses parties. Dans un langage plus simple, cela désigne une forme dont l'aspect ne change pas quelque soit l'échelle à laquelle on observe cette forme. Les structures fractales peuvent être générées soit par division soit par croissance."<sup>12</sup>

<sup>10</sup> Burry, Jane, & Burry, Mark. (2010). The new mathematics of architecture. London: Thames & Hudson, p. 259

<sup>11</sup> Burry, Jane, & Burry, Mark. (2010). The new mathematics of architecture. London: Thames & Hudson, p. 256

<sup>12</sup> <https://fr.wiktionary.org/wiki/fractale> - 03.01.2017, 23:56

Pour les architectes, ce principe est intéressant car d'une part, il permet d'obtenir des motifs complexes et d'autre part il permet de définir des systèmes d'agrégation rationnels pour des structures et des formes complexes. Les fractales sont d'autant plus fascinantes car elles se retrouvent dans la nature, par exemple dans la structure des nuages, les feuilles de fougères ou dans la forme des choux romanesco.<sup>13</sup>

## 045 Retour à la nature

L'image de la nature n'est pas totalement nouvelle dans l'architecture. Vitruve proposait une lecture végétale de la cabane primitive; les gothiques s'inspiraient de la nature pour la conception des cathédrales et Viollet-le-Duc comparait la construction en métal à la structure du squelette animal. Ce retour constant à la nature s'inscrit dans un cycle culturel de l'homme qui tantôt tente de maîtriser la nature tantôt s'en inspire et tente de vivre en symbiose.

Dans un contexte de réchauffement climatique, ne pouvant plus continuer à dominer la nature comme nous l'avons fait pendant tout le XIXe-XXe siècle, nous essayons de coexister avec elle. L'architecture contemporaine essaie également d'atteindre la compatibilité avec son environnement. Dans son essai "High-performance anxiety", Christopher Hight<sup>14</sup> utilise le mot "fitness". Les projets doivent s'inscrire dans un programme, dans une structure, dans un site, dans un environnement. Ainsi "fitness" devient un critère de performance.

Aujourd'hui, des labels et des technologies durables permettent de réduire nos dépenses énergétiques. On développe aussi des procédés de construction et des matériaux plus propres. Dans les concours d'architecture, on voit d'un bon œil des références à la nature.

Comme jadis, on essaie, en procédant par mimétisme, de reproduire des schémas présents dans la nature. De plus, grâce aux sciences, nous comprenons toujours mieux les mécanismes naturels et avec la puissance de calcul démultipliée, nous arrivons de mieux en mieux à modéliser et intégrer ces mécanismes. La nature génère aujourd'hui



Fig. 42 : Représentation de la cabane primitive selon Vitruve



Fig. 43 : Entrée du Qatar Education City Convention Centre conçu par Arata Isozaki

<sup>13</sup> Burry, Jane, & Burry, Mark. (2010). The new mathematics of architecture. London: Thames & Hudson, p. 258

<sup>14</sup> Grobman, Yasha J, & Neuman, Eran. (2012). Performatism: Form and Performance in Digital Architecture. London: Routledge, p. 37-42





Fig. 44 : Projet de Abalos et Herreros



Fig. 45 : Projet de l'atelier Jean Nouvel

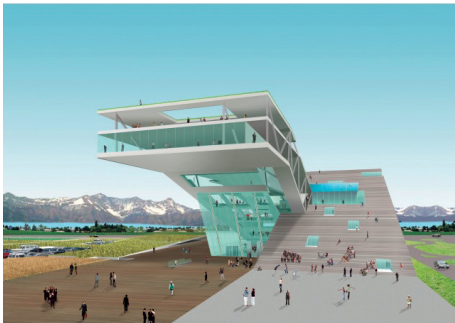


Fig. 46 : Projet de Dillier Scofidio et Renfro

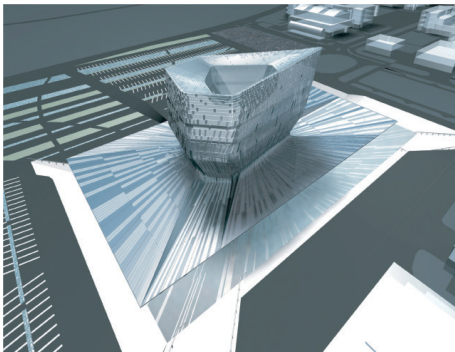


Fig. 47 : Projet de Zaha Hadid

des solutions physique mais aussi un narratif qui donne un sens à l'architecture.

Ces deux apports de la nature se retrouvent dans le projet pour "Qatar Education City Convention Centre" d'Arata Isozaki. La toiture du hall d'entrée de ce centre est inspirée des branches d'un cèdre. Avec seulement deux appuis distancés de 100 mètres la structure couvre un espace de 250 mètres. Le cèdre est un arbre local qui arrive à fleurir malgré le climat désertique, il est source de nutriment et est à l'origine de nombreux remèdes. Dans les croyances indigènes, il symbolise la connaissance divine. La forme de la structure n'est de loin pas aléatoire, elle est conséquence d'une optimisation complexe menée par l'ingénieur Mutsuro Sasaki. Pour y parvenir il a utilisé la méthode EESO (Extended Evolutionary Structural Optimisation). Cette démarche garantit la solution la plus performante.<sup>15</sup>

## 046 Architecture comme sculpture

Aujourd'hui l'architecture dispose de nombreux nouveaux outils d'analyse et elle s'en approprie de nouveaux tous les jours. Chaque énoncé de concours fait objet d'analyses pointues. On évalue des relations, on estime des impacts, on établit des scénarios, on crée des situations. Mais au final, ce ne sont pas des concepts qui offrent des espaces capables d'abriter les programmes les plus saugrenus. En architecture, contrairement à l'art où l'objet peut se concrétiser en un concept ou en une performance, il est nécessaire d'aboutir à un bâtiment bien réel. Et tel est le rôle fondamental des architectes: créer des abris. Pourtant en regardant les résultat d'un concours d'architecture, difficile de croire que tout le monde a reçu les mêmes consignes.

Pour exemple, on peut prendre le bâtiment le plus emblématique du campus - Rolex Learning Center. Le concours pour ce bâtiment a été lancé en 2004 et a recueilli 187 propositions. Au dernier tour, il ne comptait que douze bureaux et architectes: Zaha Hadid, Xaveer de Geyter, Livio Vacchini, OMA, Valerio Olgiati, Mecanoo, Herzog et de Meuron, Diller Scofidio et Renfro, du Besset et Lyon, Atelier Jean Nouvel, Abalos et Herreros, SANAA. Et même parmi ces douze projets l'hétérogénéité règne.



Chacun va de sa définition pour expliquer ce que doit être un centre dédié à l'apprentissage et accueillant une bibliothèque. Il y en a pour tous les goûts. D'un parallélépipède rectangle pur, on passe à une composition de volumes, puis à un monolithe torsadé. Certains ont proposé des structures inclinées sortant du sol et d'autres des sculptures gigantesques. Comme pour l'interprétation du programme, chaque architecte a son explication de la forme choisie. Certaines combinent comme les synergies entre les enseignants et les étudiants, la relation au paysage ou au campus reviennent dans plusieurs projets. Pourtant, le projet qui a remporté la compétition nie toute relation à l'existant. Kazuyo Sejima explique que le bâtiment génère son propre paysage, indépendamment de ce qui se passe autour. La forme évoque la topographie d'une nature abstraite. Et de l'extérieur le bâtiment évoque une sculpture minimaliste posée au milieu d'un champs.

Derrière une forme finement travaillée se cache une prouesse technologique. Le bâtiment construit sur un terrain marécageux peut structurellement se résumer en une dalle subissant des efforts gigantesques. Il a fallu développer une nouvelle composition de béton pour réaliser les deux voûtes dont certaines portées atteignent plus de huitante mètres. A l'intérieur, on retrouve l'argument du respect de la nature. Au-delà de la métaphore des paysages, RLC bénéficie de ventilation naturelle entièrement gérée par voie électronique. L'ordinateur génère des courants d'air contrôlé en ouvrant les fenêtres dans les différentes zones du bâtiment de façon à atteindre des conditions optimales.

Rolex Learning Center est un exemple de bâtiments pour lesquels la performance et la technologie sont des arguments de vente qui justifient les coûts de plus de cent millions. On imagine aisément que son design a nécessité des analyses complexes et l'intervention de nombreux spécialistes. Ce bâtiment rappelle aussi que sans les technologies numériques son existence n'aurait même pas été envisageable.

RLC s'inscrit dans une suite logique de projets qui ont repoussé encore un peu la limite du réalisable et ont demandé l'évolution et l'invention de nouveaux outils.



Fig. 48 : Projet de Herzon et De Meuron



Fig. 49 : Mecanoo



Fig. 50 : Projet de Valerio Olgiati



Fig. 51 : Projet de SANAA



Fig. 52 : Projet d'OMA

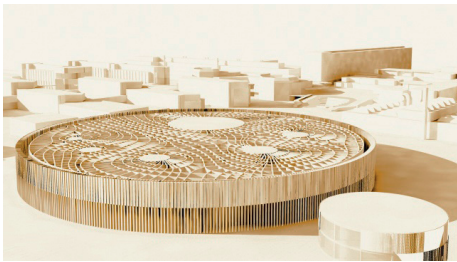


Fig. 53 : Projet de Livio Vacchini

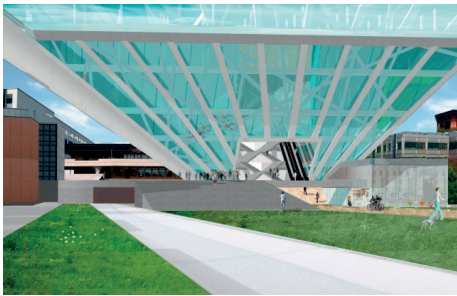


Fig. 54 : Projet de Xaveer de Geyter



Fig. 55 : Projet de du Besset et Lyon

# 05

## Conclusion

### 051 Rôle de l'architecte

Les trois chapitres précédents ont présenté en grandes lignes des différents rôles de l'architecte dans un projet d'architecture et l'évolution de ces rôles avec l'arrivée sur le marché des technologies numériques. Il est évident que les rôles de conception d'organisation et de construction ont subi des changements. Pourtant, bien que les architectes n'y soient plus toujours impliqués de la même façon, ils existent toujours. De facto, on peut affirmer qu'à ce jour, le rôle de l'architecte dans ces trois domaines a subi une évolution.

Par le passé, les architectes étaient bien plus impliqués dans la construction des édifices qu'aujourd'hui. Toutefois, il est difficile de comparer une fonction sur le chantier à l'époque et un métier à part entière aujourd'hui. La multiplication des connaissances scientifiques, l'évolution des méthodes de construction, l'adaptation des outils et la découverte de nouveaux matériaux sont à l'origine de la spécialisation des différents corps de métiers. Dans cette séparation, les architectes ont pris la voie de la conception.

La révolution industrielle a apporté la production à la chaîne qui a été reprise traduite dans le bâtiment par la préfabrication. Elle est aussi à l'origine de la disparition d'un certain savoir faire. Avec l'entrée progressive dans l'ère numérique, la capacité de calcul a été démultipliée et aujourd'hui encore elle continue à croître de façon exponentielle. Grâce au perfectionnement des machines certaines tâches leur ont été complètement déléguées. Techniquement, aujourd'hui, les machines sont capables de construire toutes seules des bâtiments. Si de telles technologies venaient à se généraliser, on n'aurait plus besoin de certains métiers. Mais le besoin d'entretien et de programmation des machines en génère déjà d'autres. A long terme, peut-être, les maçons et charpentiers seront remplacés par des programmeurs.

La spécialisation des métiers de construction rend plus difficile la communication entre les acteurs d'un projet d'architecture. En même temps le nombre des intervenants se multiplie. Et il est de plus en plus important de collaborer. Du fait que par définition, la collaboration se passe entre des individus, elle ne peut pas être déléguée aux ordinateurs. Toutefois, les technologies numériques permettent de faciliter et accélérer la collaboration.

La conception, comme la construction et la collaboration à l'ère numérique, s'est vu doter de nouveaux outils. Aujourd'hui grâce à l'informatique, on a accès à de nouvelles informations. La capacité de calcul des ordinateurs nous permet de modéliser des objets toujours plus complexes, offrant une nouvelle dimension à l'exploration formelle. Le nombre toujours croissant d'outils numériques permet aujourd'hui de déléguer certaines tâches de modélisation à l'ordinateur et d'automatiser des processus. Ainsi on peut explorer plus de variantes toujours plus rapidement. Certains outils numériques permettent de réaliser des simulations rapides sur les projets fournissant aux architectes des outils quantitatifs d'évaluations des différentes variantes. Bien que l'assistance d'un ordinateur rend le processus de conception plus simple, on ne peut toujours pas confier à l'ordinateur le choix d'une variante. Et c'est là que l'architecte ou tout autre métier créatif reste indispensable, à ce jour.

Le problème d'automatisation de la conception réside dans la formulation du problème. Les tâches pouvant être déléguées aux

machines doivent aujourd'hui être très bien définies en particulier du point de vue de la condition de la réussite. Un projet d'architecture a comme particularité de chercher à répondre à une question dont la réponse est subjective et ne peut donc pas être précisément quantifiée.

Pourtant, je pense que ce problème est sur le point d'être résolu grâce aux nombreux projets d'intelligence artificielle. Actuellement le problème se résume à modéliser le fonctionnement d'un cerveau humain numériquement. En ce moment, EPFL participe au programme "Humain Brain Project". La composante de l'école - "Blue Brain Project" vise à cartographier toutes les interactions neuronales dans un cerveau humain. Une fois que l'on aura compris précisément comment fonctionne un cerveau humain, on pourra imaginer des machines capables de raisonner et donc de concevoir de nouvelles choses.

En même temps que les institutions gouvernementales, les géants du web s'intéressent également à la question des intelligences artificielles. Par exemple, Google a développé l'intelligence artificielle AutoML dont le but est de générer des intelligences artificielles plus efficaces pour des tâches précises. AutoML a généré NASNet capable de reconnaître en temps réel, par le biais de la vidéo et des images, une multitude d'objets. Pendant ce temps, Watson l'intelligence artificielle d'IBM apprend à cuisiner. En collaboration avec New York's Institute of Culinary Education, il apprend la notion de goût et élabore des recettes afin de maximiser la performance gustative des plats.

L'écart entre une sauce et un projet d'architecture peut paraître abyssal. Mais en vérité lorsqu'on réalise que chaque année la capacité de calcul des ordinateurs double, imaginer que d'ici quelques années des machines projeteront nos habitations n'est pas si absurde. Dans une conférence, Stéphane Mallard – économiste chez Société Générale travaillant sur l'innovation et l'intelligence artificielle - explique justement que d'ici 2029, on sera capable de recréer une machine avec les capacités d'un cerveau humain.

A ce jour, nous avons imaginé nombre de scénarios impliquant des intelligences artificielles. Dans des adaptations cinématographiques, on peut citer Total Recall, Terminator, Robocop, Minority Report, Black Mirror. Ce genre de fins sont peu probables. Et peut-être à long terme les métiers créatifs seront délégués aux machines. Si un jour cela devait se produire, je pense comme Adolfo Natalini, que la société devra subir des changements profonds. Le monde ne sera très probablement plus le même. Mais j'aime à croire que l'on y aura toujours une place, même si aujourd'hui, nous ne sommes pas encore capables de la définir.

# Bibliographie

Lynn, Greg, & Canadian Centre for Architecture. (2013). *Archéologie du numérique : Peter Eisenman, Frank Gehry, Chuck Hoberman, Shoji Yoh*. Montréal, Québec: Centre canadien d'architecture.

Labbé, Claude, Novarina, Patrice, & Picon, Antoine. (2013). *Un certain regard : Abécédaire de 14 années de chroniques sur l'architecture moderne et contemporaine*. Paris: Archibooks + Sautereau.

Garcia, Mark. (2010). *The diagrams of architecture (AD reader)*. Chichester: Wiley.

Grobman, Yasha J, & Neuman, Eran. (2012). *Performativism : Form and Performance in Digital Architecture*. London: Routledge.

Kottas, Dimitris. (2013). *Architecture numérique : Nouvelles applications*. Barcelone: Links.

Kottas, Dimitris. (2013). *Architecture numérique : Nouvelles technologies*. Barcelone: Links.

Caneparo, Luca, & Cerrato, Antonietta. (2014). *Digital fabrication in architecture, engineering and construction*. Dordrecht: Springer.

Jabi, Wassim. (2013). *Parametric design for architecture*. London: Laurence King Publishing.

Picon, Antoine. (2015). *Smart cities : A spatialised intelligence (AD primers)*. Chichester West Sussex: John Wiley & Sons.

Picon, Antoine, & Colloque "Le Militaire au Cœur de la Cité". (1996). *La ville et la guerre*. Besançon: Éditions de l'Imprimeur.

Picon, Antoine, & Briaud, Joseph. (2017). *L'ornement architectural : Entre subjectivité et politique (Poche architecture)*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Hemmerling, Marco, & Tiggemann, Anke. (2011). *Digital design manual*. Berlin: DOM Publ.

Hammann, Ralph E. (2013). *Creative engineering, architecture, and technology*. Berlin: DOM.

Burry, Jane, & Burry, Mark. (2010). *The new mathematics of architecture*. London: Thames & Hudson.

Gramazio, Fabio, & Conference "Fabricate". (2014). *Fabricate: Negotiating design & making*. Zürich: Gta-Verlag.

Celnik, Olivier, Lebègue, Eric, & Nagy, Guersendre. (2015). *BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction (2e édition ed.)*. Paris: Eyrolles.

Riss, Sylvain, Talon, Aurélie, & Teulier, Régine. (2017). *Le BIM éclairé par la recherche : Modélisation, collaboration & ingénierie*. Paris: Eyrolles.

Le Corbusier. (2012). *Vers une architecture (Nouvelle éd. revue et augmentée d'une lettre inédite de l'auteur ed., Vol. 611, Champs Architectures)*. Paris: Flammarion.

Jodidio, Philip, & Baan, Iwan. (2015). *Views Rolex Learning Center*. Lausanne: EPFL Press.

# Webographie des références

Définition évolution	<a href="https://go.epfl.ch/aQ5">https://go.epfl.ch/aQ5</a>	consulté le 08.01.2018
Définition révolution	<a href="https://go.epfl.ch/aQ4">https://go.epfl.ch/aQ4</a>	consulté le 08.01.2018
Ernst May	<a href="https://go.epfl.ch/aPW">https://go.epfl.ch/aPW</a>	consulté le 30.11.2017
Siedlung Römerstadt	<a href="https://go.epfl.ch/aPX">https://go.epfl.ch/aPX</a>	consulté le 30.11.2017
Margarete Schütte-Lihotzky	<a href="https://go.epfl.ch/aPY">https://go.epfl.ch/aPY</a>	consulté le 30.11.2017
Étymologie architecte	<a href="https://go.epfl.ch/aPZ">https://go.epfl.ch/aPZ</a>	consulté le 23.12.2017
Normes et standards	<a href="https://go.epfl.ch/aQa">https://go.epfl.ch/aQa</a>	consulté le 31.12.2017
Fractales	<a href="https://go.epfl.ch/aQb">https://go.epfl.ch/aQb</a>	consulté le 03.01.2018
Conférence Stephane Mallard	<a href="https://go.epfl.ch/aQc">https://go.epfl.ch/aQc</a>	consulté le 06.01.2018
Archizoom	<a href="https://go.epfl.ch/aQd">https://go.epfl.ch/aQd</a>	consulté le 06.01.2018
Supertudio	<a href="https://go.epfl.ch/aQe">https://go.epfl.ch/aQe</a>	consulté le 06.01.2018
Archigram	<a href="https://go.epfl.ch/aQf">https://go.epfl.ch/aQf</a>	consulté le 06.01.2018
Intelligence artificielle de Google	<a href="https://go.epfl.ch/aQv">https://go.epfl.ch/aQv</a>	consulté le 07.01.2018
Intelligence artificielle de IBM	<a href="https://go.epfl.ch/aQw">https://go.epfl.ch/aQw</a>	consulté le 07.01.2018

# Webographie des illustrations

Fig. 1 : Planche de Charles Darwin	<a href="https://go.epfl.ch/aPc">https://go.epfl.ch/aPc</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 2 : Métier à tisser traditionnel	<a href="https://go.epfl.ch/aPd">https://go.epfl.ch/aPd</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 3 : Métier à tisser XIXe siècle	<a href="https://go.epfl.ch/aPe">https://go.epfl.ch/aPe</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 4 : Ernst May	<a href="https://go.epfl.ch/aPh">https://go.epfl.ch/aPh</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 5 : Siedlung Römerstadt	<a href="https://go.epfl.ch/aPk">https://go.epfl.ch/aPk</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 6 : Margarete Schütte-Lihotsky	<a href="https://go.epfl.ch/aPi">https://go.epfl.ch/aPi</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 7 : Cuisine de Francfort	<a href="https://go.epfl.ch/aPm">https://go.epfl.ch/aPm</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 8 : Dymaxion house de Fuller	<a href="https://go.epfl.ch/aPf">https://go.epfl.ch/aPf</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 9 : Magic home de Gunnison	<a href="https://go.epfl.ch/aPg">https://go.epfl.ch/aPg</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 10 : Card-a-Matic milling machine	<a href="https://go.epfl.ch/aPn">https://go.epfl.ch/aPn</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 11 : Fraiseuse verticale	<a href="https://go.epfl.ch/aPp">https://go.epfl.ch/aPp</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 12 : Processus d'usinage	<a href="https://go.epfl.ch/aPq">https://go.epfl.ch/aPq</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 13 : Usinage d'une pièce	<a href="https://go.epfl.ch/aPr">https://go.epfl.ch/aPr</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 14 : Presse hydraulique	<a href="https://go.epfl.ch/aPs">https://go.epfl.ch/aPs</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 15 : Impression 3D	<a href="https://go.epfl.ch/aPu">https://go.epfl.ch/aPu</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 16 : Quartier général de Shimizu Corporation	<a href="https://go.epfl.ch/aPv">https://go.epfl.ch/aPv</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 17 : Représentation d'un architecte au Moyen-Âge	<a href="https://go.epfl.ch/aPw">https://go.epfl.ch/aPw</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 18 : Stade municipal de Florence	<a href="https://go.epfl.ch/aPx">https://go.epfl.ch/aPx</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 19 : Usine de laine Gatti	<a href="https://go.epfl.ch/aPy">https://go.epfl.ch/aPy</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 20 : Passerelle de Mataro	<a href="https://go.epfl.ch/aPz">https://go.epfl.ch/aPz</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 21 : Robots préparateurs de commandes	<a href="https://go.epfl.ch/aP3">https://go.epfl.ch/aP3</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 22 : Chaise longue LC4	<a href="https://go.epfl.ch/aP5">https://go.epfl.ch/aP5</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 23 : Unité d'habitation de Marseille	<a href="https://go.epfl.ch/aP4">https://go.epfl.ch/aP4</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 24 : Unité d'habitation de Marseille	<a href="https://go.epfl.ch/aP4">https://go.epfl.ch/aP4</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 25 : Plug-in City	<a href="https://go.epfl.ch/aP6">https://go.epfl.ch/aP6</a>	consulté le 06.01.2018



Fig. 26 : Instant City	<a href="https://go.epfl.ch/aP7">https://go.epfl.ch/aP7</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 27 : Walking City	<a href="https://go.epfl.ch/aP8">https://go.epfl.ch/aP8</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 28 : Superonda	<a href="https://go.epfl.ch/aP9">https://go.epfl.ch/aP9</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 29 : Non-Stop City	<a href="https://go.epfl.ch/aPB">https://go.epfl.ch/aPB</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 30 : Non-Stop City	<a href="https://go.epfl.ch/aPE">https://go.epfl.ch/aPE</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 31 : Superstructure	<a href="https://go.epfl.ch/aPC">https://go.epfl.ch/aPC</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 32 : Supersurface	<a href="https://go.epfl.ch/aPD">https://go.epfl.ch/aPD</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 33 : Parcours des déchets	<a href="https://go.epfl.ch/aPE">https://go.epfl.ch/aPE</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 34 : Système d'aide à la recherche de parking	<a href="https://go.epfl.ch/aPG">https://go.epfl.ch/aPG</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 35 : The Water Cube	<a href="https://go.epfl.ch/aPH">https://go.epfl.ch/aPH</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 36 : FreshHtwoOexpo	<a href="https://go.epfl.ch/aPJ">https://go.epfl.ch/aPJ</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 37 : FreshHtwoOexpo	<a href="https://go.epfl.ch/aPK">https://go.epfl.ch/aPK</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 38 : Machine de Turing	<a href="https://go.epfl.ch/aPN">https://go.epfl.ch/aPN</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 39 : Sept ponts de Königsberg	<a href="https://go.epfl.ch/aPP">https://go.epfl.ch/aPP</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 40 : Arbre des solution	<a href="https://go.epfl.ch/aPQ">https://go.epfl.ch/aPQ</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 41 : Ensemble de Julia	<a href="https://go.epfl.ch/aPR">https://go.epfl.ch/aPR</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 42 : Cabane primitive selon Vitruve	<a href="https://go.epfl.ch/aPS">https://go.epfl.ch/aPS</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 43 : Qatar Education City Convention Centre	<a href="https://go.epfl.ch/aPT">https://go.epfl.ch/aPT</a>	consulté le 06.01.2018
Fig. 44 : RLC projet d'Abalos et Herreros	<a href="https://go.epfl.ch/aQg">https://go.epfl.ch/aQg</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 45 : RLC projet d' Ateliers Jean Nouvel	<a href="https://go.epfl.ch/aQh">https://go.epfl.ch/aQh</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 46 : RLC projet de Diller Scofidio et Renfro	<a href="https://go.epfl.ch/aQk">https://go.epfl.ch/aQk</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 47 : RLC projet de Zaha Hadid	<a href="https://go.epfl.ch/aQt">https://go.epfl.ch/aQt</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 48 : RLC projet de Herzog et de Meuron	<a href="https://go.epfl.ch/aQm">https://go.epfl.ch/aQm</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 49 : RLC projet de Mecanoo	<a href="https://go.epfl.ch/aQn">https://go.epfl.ch/aQn</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 50 : RLC projet de Valerio Olgiati	<a href="https://go.epfl.ch/aQp">https://go.epfl.ch/aQp</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 51 : RLC projet de Sanaa	<a href="https://go.epfl.ch/aQu">https://go.epfl.ch/aQu</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 52 : RLC projet d'OMA	<a href="https://go.epfl.ch/aQq">https://go.epfl.ch/aQq</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 53 : RLC projet de Livio Vacchini	<a href="https://go.epfl.ch/aQr">https://go.epfl.ch/aQr</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 54 : RLC projet de Xaveer de Geyter	<a href="https://go.epfl.ch/aQs">https://go.epfl.ch/aQs</a>	consulté le 07.01.2018
Fig. 55 : RLC projet de Du Besset et Lyon	<a href="https://go.epfl.ch/aQi">https://go.epfl.ch/aQi</a>	consulté le 07.01.2018

# Remerciement

Dans le cadre de ce travail, j'aimerais tout particulièrement remercier les personnes suivantes:

**prof. Andersen Marilyne**, pour m'avoir recardé et soutenu dans l'exploration des sujets qui m'intéressaient;

**prof. Huang Jeffrey**, pour son regard distancé sur le contenu;

**Peter Ortner**, pour les suggestions de références;

**Clémentine Blazy, Camille Favret et Camilo Pineda Serna**, pour la relecture, les corrections et leurs retours constructifs.



EPFL  
2018