

La 4D dans le BIM, la mise en données du temps.

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne - EPFL.
Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit - ENAC.
Section d'architecture - SAR.
Professeur de l'énoncé théorique et directeur pédagogique : Bernard Cache,
directeur du laboratoire des Cultures Numériques du Projet Architectural - CNPA.
Deuxième Professeure : Paola Viganò,
directrice du *Laboratory of Urbanism* LAB-U.
Maître EPFL : Elise Hautecoeur, CNPA.

Avant-propos

L'énoncé théorique constitue la partie préparatoire au projet de diplôme en architecture à l'EPFL, désigné sous le nom officiel de Projet de Master. L'étudiant choisit lui-même les membres du groupe de suivi, la thématique et le site de son étude. Par la rédaction de ce mémoire, l'étudiant pose les bases théoriques de son travail, décrit le cadre thématique, référentiel et méthodologique. Il énonce clairement et précisément la question centrale d'architecture, objet de son projet. L'énoncé théorique de master s'apparente dans son esprit à la "thèse" universitaire, bien qu'il soit de dimension et de durée d'élaboration très réduite, un semestre. L'énoncé définit également les périmètres d'étude et d'intervention, les différentes échelles de travail et débouche sur les prémices du projet, jusqu'à une possible esquisse de faisabilité.

Le Projet de Master, d'une durée d'un semestre, est un projet d'architecture mené par l'étudiant. Il s'opère de manière autonome et avec le même groupe de suivi, consécutivement à l'énoncé théorique. (EPFL, 2020)

Remerciements

Je tiens à remercier tous les intervenants sollicités pour cet énoncé théorique et le Projet de Master à venir. En particulier : Salomé Mall du Smart City Lab Basel des CFF pour la mise à disposition du site ; Bruno Gaertner et Hans-Jörg Stark de la cellule innovation des CFF à l'EPFL pour leur intérêt ; Romain Kirchhoff, directeur d'Uzufly, et son collaborateur Aurélien Brun pour leur contribution et leur expertise sur la numérisation 3D du site ; Romain Géry, directeur de scanways, et son collaborateur Guillaume Koehl, pour leur disponibilité ; l'agence Bartolo + Contré Architectes à Paris pour l'expérience en stage sur ce sujet de la 4D dans le BIM ; le laboratoire CNPA et en particulier Ahmed Wael pour son accompagnement sur le nuage de points ; Jérôme Zufferey pour son introduction à la lasergrammétrie ; enfin mon groupe d'encadrement composé des Professeur(e)s Bernard Cache et Paola Viganò, ainsi que d'Elise Hautecoeur, pour leur suivi sur cette thématique.

J'en profite également pour remercier ma famille de leur soutien continu durant mon cursus d'architecture à l'EPFL.

Résumé

En 2021, le BIM, acronyme de *Building Information Modeling*, s'impose peu à peu dans la pratique architecturale et redéfinit les contours de la profession. Bientôt incontournable dans nombre de pays qui nous entourent, son utilisation est encore marginale en Suisse, où il reste sujet à une certaine méfiance. Sans doute à cause d'une méconnaissance du phénomène. « *Buzz word*, effet de mode, trop compliqué à mettre en place » : le BIM est-il un nouveau gadget ou une vraie révolution? Cet énoncé aborde la question sous un angle théorique, en observant ce que son émergence dit de notre manière de pratiquer l'architecture, et même plus globalement d'appréhender le monde. En effet, véritable mise en données du projet de construction et prémice au déploiement d'intelligences artificielles en architecture, le BIM se fait l'écho dans notre discipline d'une mutation civilisationnelle profonde : l'avènement d'une raison articulée autour des données de masse.

Au travers de la 4D, la dimension du BIM qui se rapporte au temps, nous allons observer l'émergence de ce phénomène d'un point de vue historique et sociétal, puis étudier ses applications pratiques actuelles. Capture de l'existant, phasage du projet, planification du chantier ; quelles sont les implications de la mise en données du temps dans le projet de construction ?

Table

I. Introduction	15
II. Préambule historique : le rapport de la conception architecturale au temps.....	21
A. L'architecture à l'ère des abstractions.....	23
1. L'architecte auteur.....	23
- La société éotechnique : l'horloge à l'origine de la civilisation machiniste.	
- L'organisation du temps et de l'espace dans les monastères bénédictins.	
- La valeur du temps mesuré : capitalisme et humanisme.	
- Albertisme et chronocide.	
2. L'architecte et le savoir-faire de représenter l'espace .	33
- Des abstractions à la science moderne.	
- <i>Small Data Logic</i> .	
- La représentation architecturale comme outil d'abstraction.	
- Le rôle de l'imprimerie.	
- L'architecture et la confiance dans l'image.	
B. L'architecture à l'ère des données de masse	49
1. Géographie, temps et données.....	50
- 1855 : Maury et les cartes de navigation de l'U.S. Navy.	
- Du paysagisme au palimpseste de Corboz.	
- GIS, précurseur du BIM.	
2. Numérique et civilisation	59
- La société de l'information.	
- L'ordinateur au service de la mise en données.	
- La valeur de la donnée : masse et imprédictibilité.	
- Collecte et IoT.	
- <i>Big Data Logic</i> .	
- Un précédent : l'imprimerie et l'obsolescence de la mémoire.	
- <i>The Style of Many Hands</i> .	
- Corrélations et inexplicabilité.	

- Critique de la datafication: sobriété, souveraineté et raison numériques.	
3. Building Information Modeling.....	81
- BIM, la mise en données du projet de construction.	
- Maquette et jumeau numérique : distinguer les ambitions sémantiques.	
- Evolution ou révolution? BIM et intelligence artificielle.	
- Apprentissage profond, l'abstraction par la machine.	
- Design génératif.	
- La 4D dans le BIM, la mise en données du temps.	
III. Applications pratiques de la 4D dans le BIM.....	99
A. La numérisation 3D de l'existant. Expérience avec Uzufly...	101
1. Acquisition de données.....	102
- Lasergrammétrie.	
- Photogrammétrie.	
2. Du nuage de points à la maquette numérique	105
3. Une véritable rupture épistémologique	106
B. Les phases d'existence du projet et de ses composants	109
1. Le projet de rénovation, de transformation ou d'addition	110
2. Le projet à programme séquentiel.....	110
C. Planifier l'exécution du projet.....	115
1. Conception et exécution, un clivage anachronique?.	115
2. Le BIM dans les processus méthodes	116
- Métrés et planning objectif.	
- Modes constructifs.	
- L'étalement.	
- Suivi de l'avancement du chantier.	
- Automatiser des tâches via la programmation visuelle.	
IV. Projet de Master : transformation de la halle ferroviaire 3, Wolf Quartier, Bâle.....	121
Transformer une structure industrielle dans un quartier reprogrammé.....	123

Préface

Mon intérêt pour les logiciels BIM s'est formalisé en troisième année à l'EPFL dans le studio du Professeur Ortelli ; la mise à jour automatique des documents paraissait alors un grand gain de temps pour concevoir des projets de logements. Cet intérêt m'a guidé en stage à Paris, dans l'agence Bartolo + Contré Architectes, où j'ai véritablement découvert le BIM en milieu professionnel. Là-bas, j'ai participé à un concours pour le village olympique 2024 où nous devions répondre à deux cahiers des charges parallèles sur la maquette BIM d'un même bâtiment : après avoir accueilli les athlètes, les appartements devaient se transformer en typologies plus conventionnelles pour être habitées par leurs futurs propriétaires. Pour concevoir de manière simultanée ces deux moments d'existence du projet, nous avons alors mis en place dans la maquette Revit des phases. C'était là un moyen très pratique d'aborder la dimension *temps* du projet d'architecture, la 4D.

Convaincu par la méthode et de retour en Master à l'EPFL, j'ai continué à creuser cette dimension du temps au travers de quelques projets de transformation, dont celui de l'Unité d'Enseignement d'Introduction au BIM, donnée par Elise Hautecoeur et le CNPA. Parallèlement, les cours théoriques des Professeurs Aureli et Picon éveillaient ma curiosité sur l'histoire de la pratique architecturale, entre abstraction et révolution numérique. C'est pourquoi j'ai voulu profiter de cette énoncé théorique pour creuser quelques pistes, à la fois historiques et pratiques, sur cet enjeu de la 4D dans le BIM que j'ai nommé : la mise en données du temps.

I. Introduction

BIM est l'acronyme anglais de *Building Information Modeling*, *Building Information Model*, ou *Building Information Management*. Il désigne l'ensemble des tactiques (processus), technologies (maquettes numériques) et stratégies (managements) qui organisent un projet de construction autour de la structuration de données. Nous en ferons une présentation détaillée dans un chapitre dédié. D'abord, il est important de comprendre que cette méthode a cours tout au long du cycle de vie de l'ouvrage, de sa conception à sa démolition ; elle génère ainsi un réseau d'informations fiables, profitables tant à sa création, son analyse, son partage, qu'à sa visualisation ou sa maintenance. Dès lors sont définis des BIM *uses* qui ciblent différentes observations, simulations ou contrôles au travers de paramètres dédiés dans la maquette numérique ou des modèles reliés : calcul structurel, estimation des coûts, bilan énergétique, etc. Sur son site internet, le *Computer Integrated Construction (CIC) Research Group* de la *Penn State University* a dressé le tableau ci-après (fig. 1) des cas d'usages potentiels du BIM au travers des différents stades du projet de construction. La 4D, quatrième dimension du BIM, ou *phase planning* dans le tableau, est la dimension temporelle du projet et fait l'objet d'étude de cet énoncé théorique. Le CIC la décrit comme suit :

A process in which a 4D model (3D models with the added dimension of time) is utilized to effectively plan the phased occupancy in a renovation, retrofit, addition, or to show the construction sequence and space requirements on a building site. 4D modeling is a powerful visualization and communication tool that can give a project team the including owner a better understanding of project milestones and construction plans. (Penn State University's Computer Integrated Construction Research Group s. d.)

A cela nous pouvons ajouter la numérisation 3D, ou capture de la réalité, qui est un ensemble de méthodes de mise en données de l'existant dans le cas d'un projet de transformation, rénovation ou réhabilitation. Alors que le BIM est actuellement d'avantage associé à des constructions nouvelles, nous voulons, au travers de sa dimension temporelle, explorer les potentiels de cette méthode dans le cadre

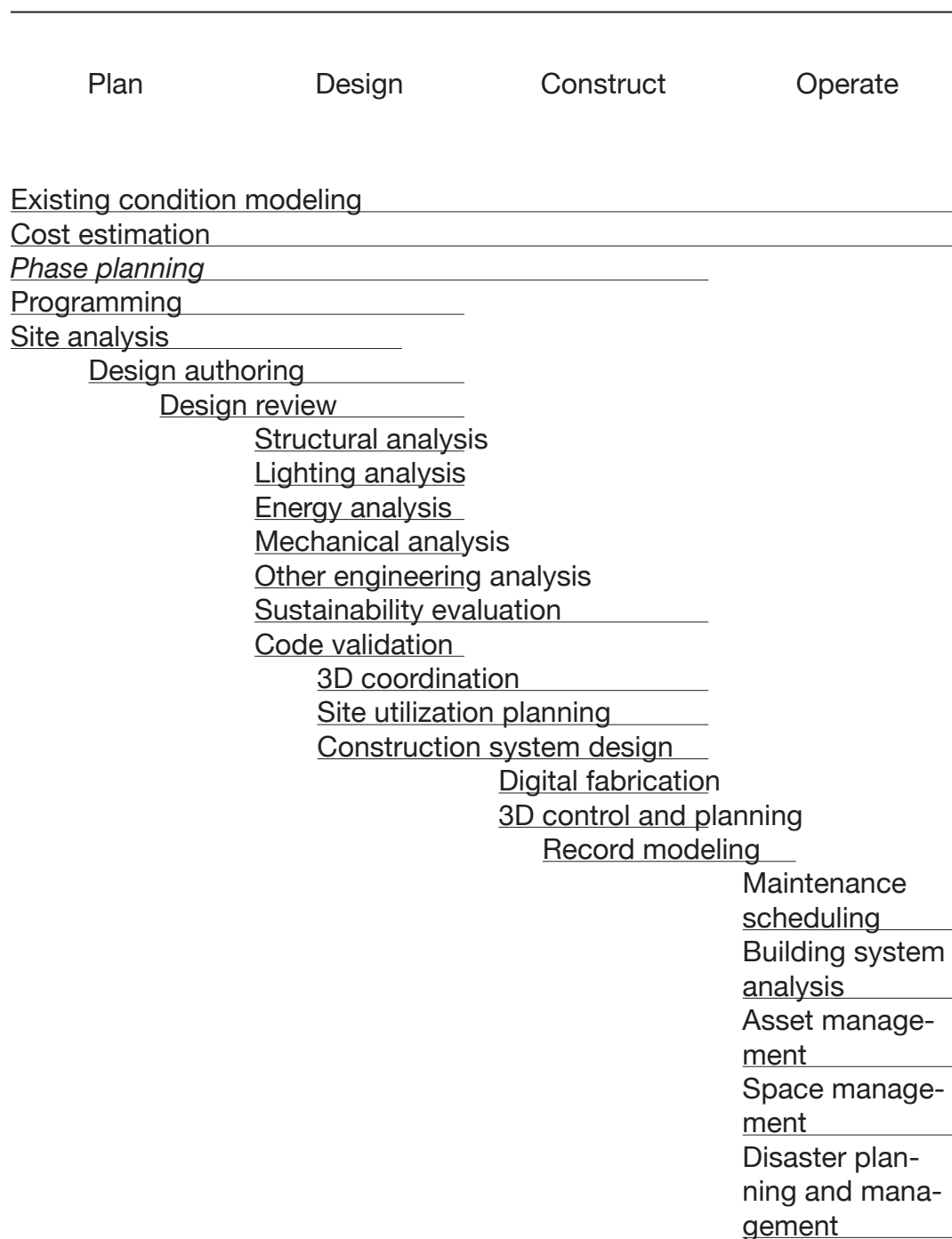


Fig. 1 : BIM uses (Penn State University's Computer Integrated Construction Research Group s.d.)

d'une intervention sur l'existant.

L'objectif de cet énoncé est, en préambule, d'approcher l'émergence du BIM et son rapport au temps d'un point de vue conceptuel et historique, en interprétant ce qu'il dit de notre manière de procéder en tant qu'architectes. Cet énoncé soumet en effet l'hypothèse que le BIM n'est pas qu'une technologie "gadget" d'architectes et ingénieurs férus de logiciels informatiques. Avec le GIS et l'IoT, le BIM forme en effet un véritable réseau de données autour du projet de construction (fig. 2). Ceci témoigne d'un processus plus global et

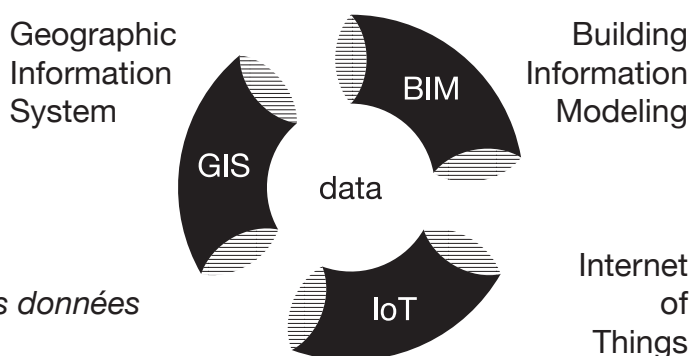


Fig. 2 : Interopérabilité des données (Géry 2019)

incarne, dans nos disciplines de la construction, une mutation civilisationnelle profonde vers une culture de la "datafication". La 4D dans le BIM, véritable mise en données du temps de la construction, est un cas d'étude très significatif de cette évolution. Quelles sont les origines, les implications et les potentiels de ce phénomène sur la pratique de l'architecture? D'Alberti aux systèmes d'intelligence artificielle, l'énoncé soumettra ainsi dans un premier temps une proposition de lecture historique en deux parties : l'ère des abstractions et l'ère des données de masse. Dans un deuxième temps, nous observerons les applications pratiques actuelles de la 4D dans le BIM : relevé par numérisation 3D, conception par phasage du projet et planification de l'exécution du chantier. Finalement, nous introduirons le Projet de Master à venir. Il s'agira de la transformation d'une halle ferroviaire à Bâle, occupée actuellement par le Smart City Lab des CFF. Ce site industriel est sujet à un projet réel de reconversion en programmes de centre-ville, et la décision retenue pour le schéma urbain a été rendue publique récemment. Nous en avons déjà effectué la numérisation 3D avec la collaboration d'Uzuffy, une startup sise à l'EPFL, et il s'agira au deuxième semestre d'en proposer une transformation menée en BIM.

II. Préambule historique : le rapport de la conception architecturale au temps

A. L'architecture à l'ère des abstractions

Nous allons observer dans cette première partie comment l'émergence de la conscience du temps mesuré au Moyen Âge est intrinsèquement liée à la construction de la figure de l'architecte à la Renaissance : une figure telle que nous la concevons encore aujourd'hui, et que nous définirions comme celui qui a le savoir-faire de projeter la conception d'une construction en abstrayant l'espace par la représentation. D'abord, l'invention de l'horloge engendra la quantification du temps qui passe, inspirant aux penseurs humanistes un rapport nouveau et angoissant à son écoulement ; la mort fut dès lors perçue comme une limite à laquelle survivre par la production intellectuelle, résultant sur l'émergence de la figure d'auteur d'une œuvre, et par extension d'un édifice. Ensuite, la quantification du temps par un système horaire absolu marqua les débuts d'une nouvelle conception des réalités du monde par l'abstraction, dont les techniques de représentation architecturale se font l'écho dans le monde de la construction.

1. L'architecte auteur

Dans un premier temps, observons donc l'émergence du temps mesuré, une abstraction qui en appellera bien d'autres. Ce phénomène est apparu en Europe au début du II^{ème} millénaire, dans un processus historique relativement étendu et à la croisée d'évolutions tant sociales que technologiques. La division de nos journées en une cadence rythmée et immuable est une composante aujourd'hui absolument essentielle de nos sociétés ; nous comprenons bien là que son émergence a eu des effets considérables dans nombre de domaines. En ce qui nous concerne dans le monde de la construction, nous verrons qu'à l'origine, l'organisation du temps a eu un impact sur l'organisation de l'espace ; aussi, la conscience de sa mesure a paradoxalement provoqué l'isolement de la conception architecturale de son continuum spatial et temporel, faisant émerger la figure d'architecte comme l'auteur d'une œuvre engendrée de son esprit.

La société éotechnique : l'horloge à l'origine de la civilisation machiniste
L'historien américain Lewis Mumford, spécialiste de l'histoire de la

technologie et de la science, raconte dans son livre *Technics and Civilization* ([1934] 2015) la genèse de la machine et des idéologies qui lui sont associées. Son récit se caractérise par un engagement écologiste critique envers la civilisation industrielle, dont il divise l'ère en trois phases, du X^{ème} siècle au début du XX^{ème} siècle -époque contemporaine à sa rédaction. Elles se distinguent successivement par des technologies liées au bois, au vent ou à l'eau (phase éotechnique, dont il est nostalgique), au charbon et au fer (phase paléotechnique, dont il est très critique), puis à l'électricité et aux alliages (phase néotechnique, dont il est enthousiaste). Cette lecture de Mumford se fonde donc sur l'idée que les technologies ont un impact fondamental sur les idéologies et les structures d'organisation des sociétés. L'ère éotechnique -eos signifiant en grec "aube"-, est donc le point de départ de la technique moderne et s'étend de l'an mil à 1750 :

Ce complexe atteint son apogée, du point de vue technologique, au XVII^e siècle, avec la fondation de la science expérimentale sur la base des mathématiques, de manipulations minutieuses, de temps précis et de mesures exactes. [...]

Au regard de la civilisation humaine dans son ensemble, la période éotechnique, bien que confuse politiquement, et caractérisée vers la fin par une dégradation croissante de la vie des ouvriers, fut l'une des plus brillantes de l'histoire. (Mumford [1934] 2015, 128-129)

La phase éotechnique débute ainsi avec l'invention de l'horloge qui reconfigure le rapport au temps de la société ; au-delà de l'instrument, la notion même de découpe du temps, et de fait la conscience d'un temps mesurable et mesuré, n'est pas innée à l'être humain. Lewis Mumford définit ainsi l'horloge, et ce au-delà de considérations purement techniques, comme le concept fondateur de notre civilisation machiniste actuelle :

[La pendule mécanique] rythme la journée du lever au coucher. Quand on considère le jour comme un laps de temps abstrait, utilisable, on ne va pas se coucher « en même temps que les poules » les soirs

d'hiver ; on invente les chandelles, les cheminées, l'éclairage au gaz, les ampoules électriques, afin de remplir chaque heure de la journée. [...]

Le temps abstrait devint un nouveau cadre de l'existence. (Mumford [1934] 2015, 40)

Abstraction totale et universellement admise d'un phénomène pourtant intangible, cette mesure du temps est devenue un principe systémique et indispensable à l'organisation de la société machiniste, dont nous sommes les héritiers. Qui s'imaginerait ainsi vivre aujourd'hui sans ce rapport à l'égrènement des heures et des minutes, véritable référence de tous nos faits et gestes quotidiens? L'horloge est ainsi à la fondation à la fois de nombre de machines, d'un point de vue très technologique, et de nombre d'abstractions, d'un point de vue plus épistémologique. Ces deux évolutions, l'une pratique et l'autre plus conceptuelle, sont donc étroitement liées par l'apparition du temps mesuré. Voyons dans quelles circonstances s'est développée cette invention révolutionnaire.

L'organisation du temps et de l'espace dans les monastères bénédictins

Cette mesure du temps est en fait liée à celle de l'espace et viendrait pour grande partie de la vie réglée des monastères occidentaux au début du Moyen Âge. Ces institutions coupées du monde et dévouées à Dieu, recherchent alors l'ordre, la règle et la discipline, pour s'élever des variations et des accidents du quotidien. Ainsi aux alentours du IX^{ème} siècle, la règle de saint Benoît, qui vise à guider la vie monastique communautaire, a commencé à se diffuser. Elle est fondée sur l'*ora et labora* : les moines doivent prendre soin les uns des autres et trouver pour ce faire un équilibre entre la prière et le travail, qui leur permette de devenir auto-suffisants. Dès lors, la mesure devient un outil fondamental dans l'architecture des monastères et entraîne l'élaboration d'un plan idéal pour un monastère bénédictin. Ce plan particulier, appelé aussi plan de Saint-Gall (fig. 3), a été conçu selon la règle de saint Benoît, qui recommandait de regrouper toutes les activités économiques, religieuses et sociales à l'intérieur du monastère lui-même, comme une tentative de réglementer tous les aspects de la vie monastique bénédictine. Conçu pour servir quelque 270 âmes, tant moines que laïcs, ce plan rassemble les bâtiments nécessaires à la communauté monastique en différents groupes et établit une grande église

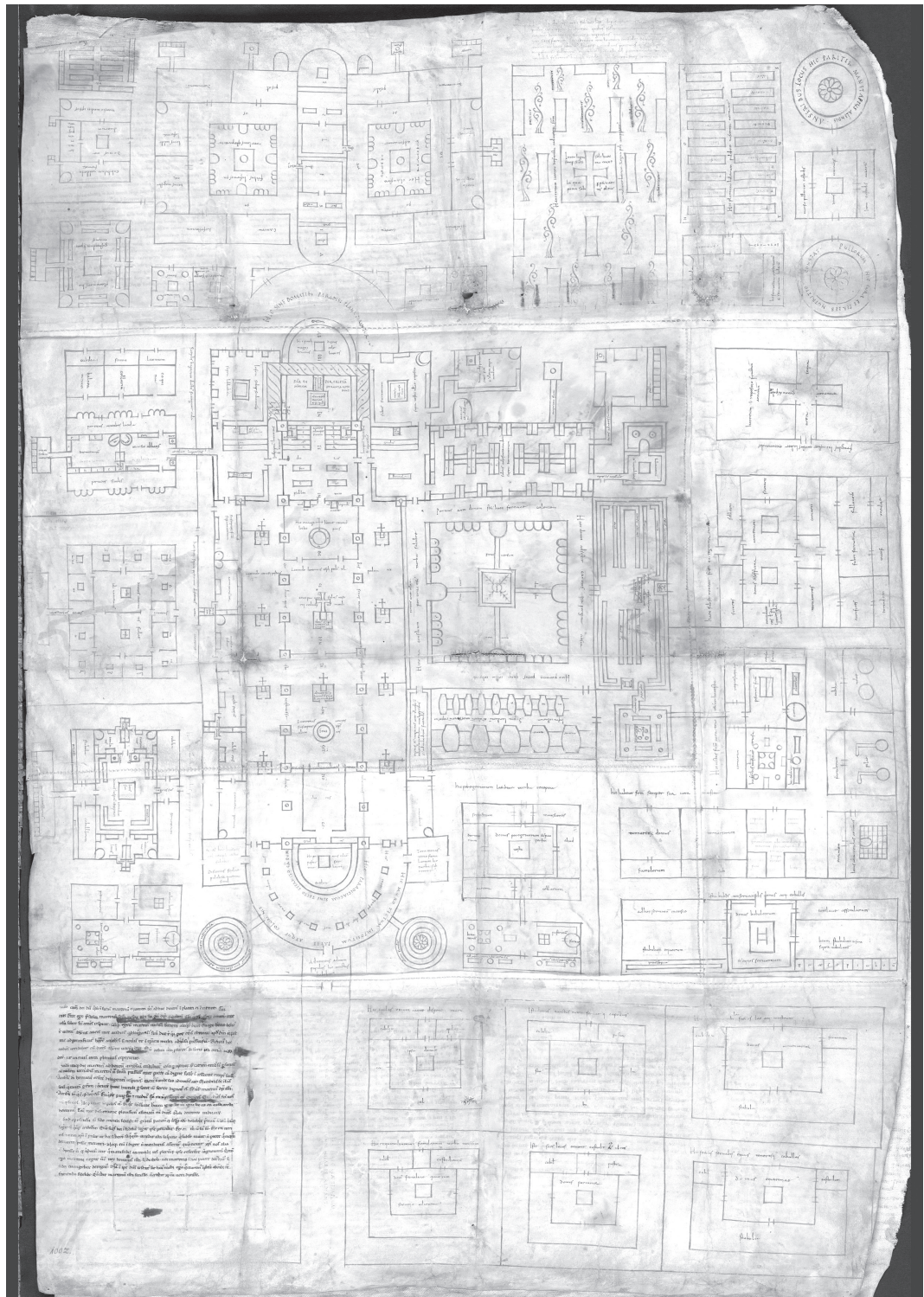


Fig. 3 : Plan de Saint-Gall (Stifts-Bibliothek St. Gallen ca. 820)

comme centre de la vie religieuse. Ce dessin n'est pas une représentation géométrique exacte, mais plutôt un plan idéalisé, un plan directeur, où chaque élément est placé là où il devrait être. Le plan utopique de Saint-Gall est l'illustration parfaite du monastère en tant qu'acte de planification, d'organisation de programmes. Dans ce lieu, tout se mesure à travers le temps et les cloches ; la meilleure façon d'exprimer cette gestion est le plan, il a en effet été créé comme un instrument de politique pour informer et réglementer la planification monastique dans tout l'Empire Franc. Ainsi la volonté d'organiser le temps a conduit à organiser l'espace.

Cette vie des moines était donc beaucoup plus régulée que l'existence séculaire ; leurs jours et nuits étaient densément rythmés par une chaîne ininterrompue d'actes de dévotion et de tâches du quotidien. Ce phénomène n'entraîna pas directement l'établissement d'un dispositif d'horaires, car cet enchaînement d'événements était plutôt bien appréhendé par l'acceptation d'une forme d'élasticité du temps, et quelques astuces comme des bougies calibrées ou la connaissance approximative de la durée de tel chant ou telle prière. La vraie nécessité de l'horloge naquit d'un problème familier à tous les monastères : le *timing* du signal destiné à réveiller les moines endormis pour le service de nuit qui initiait le cycle liturgique quotidien. On inventa alors un moyen mécanique pour le déclenchement sonore de ces cloches, et bientôt, avec quelques ajustements de proportions, on trouva le moyen d'un système régulant le relâchement de l'énergie nécessaire à un rythme régulier et prédéterminé, pour sonner le début des différentes activités monastiques. Le mécanisme fut rapidement adopté dans la vie séculaire, et un concert de cloche rythma bientôt la vie quotidienne des cités médiévales. Voyons comment cette organisation du temps se transforma ensuite en une mesure absolue et cadencée, telle que nous la concevons encore aujourd'hui.

La valeur du temps mesuré : capitalisme et humanisme

La diffusion dans la société de l'utilisation du temps mesuré a communément été associée par les historiens, dans l'héritage intellectuel de Karl Marx, au développement du capitalisme. Genèse de la modernité et ancrée dans l'invention de l'horloge, elle fut perçue comme un moyen de quantifier et monnayer le labeur humain. Or dans son livre *Building-in-Time: from Giotto to Alberti and Modern Oblivion* (2010), Marvin Trachtenberg, spécialiste de l'architecture italienne gothique et

de la Renaissance, estime que ce rôle économique de l'horloge a été surévalué au discrédit de la période moyenâgeuse précédente, présentée souvent et à tort comme une époque sombre et désorganisée -l'appellation anglaise *Dark Ages* parle d'elle-même. Selon l'auteur, cette instrumentalisation du temps par les banquiers, marchands ou propriétaires de manufactures est en réalité plutôt liée à une échelle de l'ordre du jour et d'unités de calendrier plus larges, n'expliquant donc pas en soi l'émergence d'une nouvelle conscience du temps fondée sur l'horloge. La société pré-moderne, si elle n'en avait certes pas encore les instruments d'une mesure précise, n'était en réalité pas aussi insensible au temps qu'ont pu le décrire beaucoup d'historiens. Le rapport au temps du quotidien était tout à fait différent, mais il existait bel et bien. Plus qu'à une découpe rigoureuse et universelle, il se référait à des événements qui ponctuaient la journée dans les cités médiévales, à l'image des monastères. Messes et prières, festivités, annonces officielles, changements de garde, ouverture et fermeture des portes de la ville, début et fin des marchés, sessions scolaires et universitaires, de tribunaux ou de réunions de conseils, etc. Tous ces événements étaient annoncés et appelaient à une coordination d'action par le sonnement de différentes cloches aux timbres uniques et dédiés. On se donnait ainsi rendez-vous à l'ouverture du marché ou encore à la fin de la messe. Tant et si bien que dans les plus grandes villes d'Europe, à l'aube du XIV^{ème} siècle, ces activités constituèrent un tel fourmillement que l'environnement sonore fut bientôt saturé et il advint la nécessité d'établir un temps abstrait et commun pour surmonter cette cacophonie ambiante :

A new dominant temporal voice was needed, which could not be just another set of ad hoc time signals. [...] This, I find, was the situational logic of the new public hour-clock: the production of a single new dominant, abstract standard temporal sequence, which could be used to time all event needing timing within the audio-spatial sphere of the clock, a sphere theoretically identical within the entire space of the city. (Trachtenberg 2010, 47)

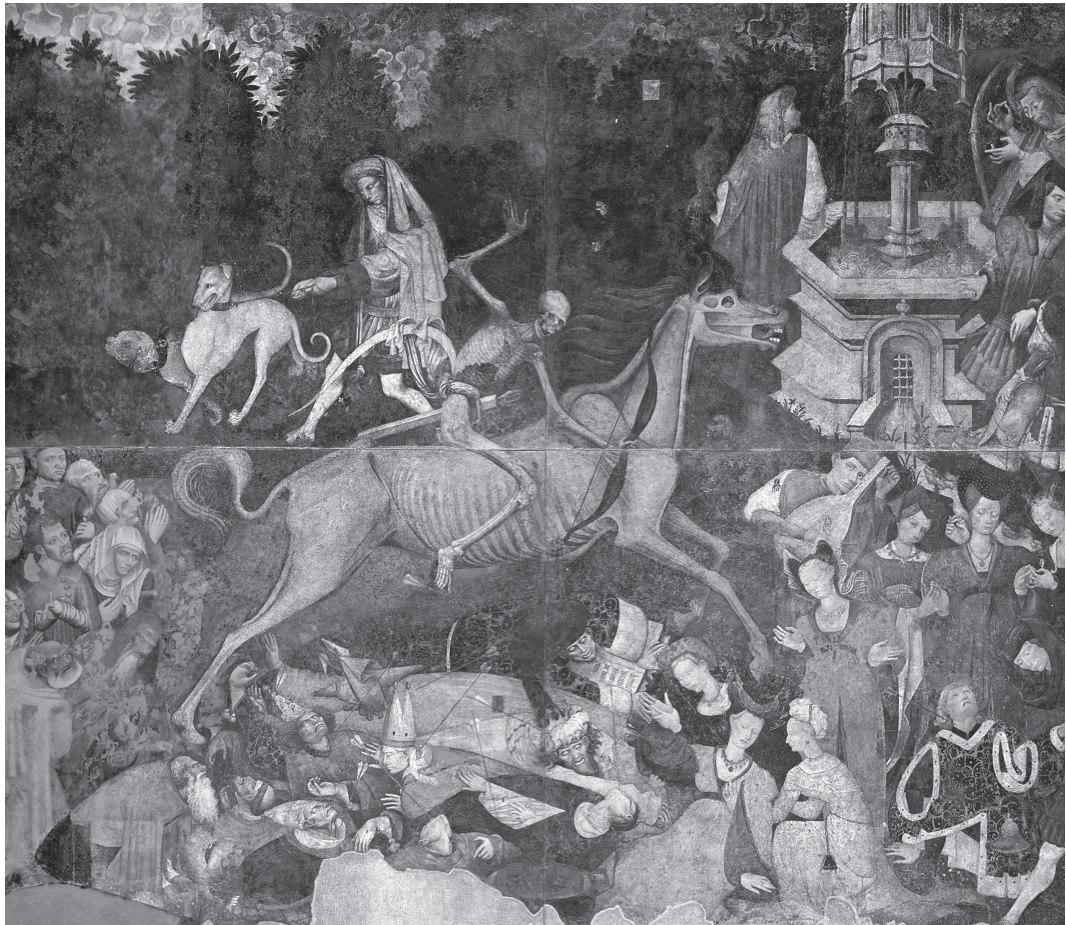
L'invention se propagea rapidement, tant et si bien qu'au milieu du XV^{ème} siècle, toutes les grandes villes d'Europe possé-

daient des horloges publiques. La nécessité du temps organisé n'est donc pas l'apanage de la Renaissance, émancipation auto-proclamée des âges sombres du Moyen Âge vers une société plus civilisée. Plus que sur la conscience du temps en soi, la rupture fondamentale se situe au niveau de la conscience de sa mesure, et donc de son écoulement. D'abord, il y a effectivement cette exploitation capitaliste : devenu mesurable et tangible, le temps est alors considéré comme une marchandise à proprement parler et un instrument pour discipliner et quantifier le travail de la classe ouvrière, comme le met en scène Mumford :

Le temps est réel : comptez-le ! Le travail est réel : pratiquez-le ! L'argent est réel : économisez-le ! L'espace est réel : faites-en la conquête ! La matière est réelle : mesurez-la ! Tels étaient les réalités et les impératifs de la philosophie bourgeoise. Si l'on excepte la survivance du dogme du salut éternel, chacun de ses élans était soumis à la règle : la règle du poids, de la mesure et de la quantité. (Mumford [1934] 2015, 62)

Trachtenberg décrit un deuxième milieu encore plus sensible à ce nouvel environnement temporel : les intellectuels humanistes. Pour l'expliquer, l'auteur souligne l'arrivée d'une autre invention parallèle à l'horloge, de technicité bien plus modeste mais datant pourtant bel et bien de la même époque -en Occident-, le sablier. Calée sur le temps absolu de la journée, la pendule n'indiquait à l'époque que les heures ; on y associait alors un sablier, un système au temps fini et indépendant, pour entamer à la sonnerie d'une horloge la durée de sessions plus courtes, telles qu'une prière ou un cours. Véritable mise en scène de la durée qui s'écoule au travers du sable s'échappant d'une ampoule de verre à l'autre, le sablier symbolisa alors une conscience nouvelle de l'égrainage du temps ; or, dans ce schéma de pensée humaniste où la condition de l'homme devenait la mesure du monde, ce phénomène entraîna un nouveau rapport d'angoisse à la mort, car perçu désormais comme une fin plutôt qu'un passage vers l'au-delà. Le temps, mesurable, était donc limité, et dès lors toute incarnation de son passage, du simple retard à la vieillesse, fut connoté négativement. En témoigne l'apparition de nombreuses œuvres d'art représentant le

Fig. 4 : Le Triomphe de la Mort, XV^{ème} siècle, Palerme (Trachtenberg 2010, 54)



corps humain dans sa fragile sensibilité à l'écoulement de la vie -des corps vieillis, meurtris, voire explicitement décharnés par le temps, comme sur la célèbre fresque *Le Triomphe de la Mort* (fig. 4), et où le sablier devint rapidement le symbole de la mort. Une mort charnelle à laquelle il s'agissait désormais de survivre, pour les humanistes, par la production intellectuelle :

Whereas the merchants and bankers made financial gain with appropriated time, transforming temporal into monetary value, the humanists interpreted the value of limited human time in explicitly personal, existential terms of individual literary study, achievement, and fame, in a powerful discursive current that vied with with early capitalism in dynamic energy. [...]

They were haunted by the awareness that their time to do all this was short and constantly slipping away, at an unknown rate, all of which redoubled their efforts to produce at least a degree of fame that might for a time survive their death. (Trachtenberg 2010, 58)

Voyons comment cette nouvelle ambition de passage à la postérité dans l'acte créatif a révolutionné la pratique de l'architecture à partir de la Renaissance.

Albertisme et chronocide

Presque paradoxalement, le nouveau rapport au temps des humanistes en signa l'affranchissement total dans l'architecture moderne, dont la pratique allait être bouleversée au cours des siècles passés, pour se classer au rang des disciplines désormais déterminées par des techniques d'abstraction. L'expression *Building-in-Time*, titre de l'ouvrage de Marvin Trachtenberg, ambitionne précisément de nous rappeler ce rapport au temps qu'avait le monde de la construction pré-moderne ; l'auteur explore dans ce livre les rouages de cette révolution de l'architecture abstraite et affranchie du temps dont l'humaniste Leon Battista Alberti fut la pièce maîtresse.

The modern concept of architectural authorship, with its emphasis on the hegemony of the founding, master architect of a project, is closely allied with the tenets of chronophobia, which demand total adherence to his design. (Trachtenberg 2010, 16)

Il faut bien réaliser que les plus grands chantiers du Moyen Âge, à l'instar des cathédrales, s'étendaient véritablement sur plusieurs siècles. Ces chantiers voyaient se succéder non seulement les personnes qui les construisaient, mais également les styles, les financements, les contextes socioculturels et même les techniques de construction. Chacun de ces paramètres était tout à fait capable de reformuler le projet original, de le transformer plus ou moins en profondeur, de le stopper, de le reprendre, de l'agrandir, d'y apporter sa contribution ou de modifier celle d'un autre, et tout cela arrivait bien plus d'une fois dans le cycle de construction du bâtiment. En réalité il n'existait pas de design original, et la nature évolutive et de couches successives était

intrinsèque à ces constructions. Le temps de la construction (*time of the building* chez Trachtenberg) dépassait le temps du monde de la vie (*time of the lifeworld*). Cette façon d'envisager un projet d'architecture nous est aujourd'hui totalement étrangère et extrêmement difficile à appréhender : nous ne considérons l'architecture que comme un état fini -et même infini au sens où elle ne doit pas évoluer. Prenons pour preuve les incessantes promesses politiques à terminer les travaux de la *Sagrada Familia* à Barcelone -avec en ligne de mire actuelle, et cela est très révélateur, le centenaire de la mort de son auteur Antoni Gaudí en 2026-, ou les débats sur la reconstruction à l'identique de la flèche de Notre-Dame. Ces injonctions démontrent que nous ne saisissons pas ce que représentait dans la tradition moyenâgeuse le projet d'une cathédrale, qui dans son essence même n'était pas moins destinée à "être construite" qu'à "avoir été construite". De manière très prosaïque, la diminution du temps de la construction s'explique évidemment par de nombreux phénomènes pratiques relatifs à l'amélioration de nos techniques, et économiquement par l'avènement du capitalisme, lié comme nous l'avons vu à l'horloge et à la nouvelle valeur capitalisable du temps mesuré. Plus conceptuellement, c'est surtout l'émergence de la figure d'auteur, d'ailleurs étrangère aux cathédrales, qui insuffla cette nouvelle ambition à l'architecture : construire au plus près du design original. L'architecture ne devenait plus qu'un acte d'abstraction, une création de l'esprit, et tout instant de la construction ne fut alors considéré plus que comme un risque de voir la réalisation de l'édifice s'éloigner du design original de l'architecte. Il fallait réduire le chantier à son strict minimum, et le temps de la construction devint le temps de l'exécution. L'architecture telle que conceptualisée par Alberti devait s'affranchir de toutes considérations spatio-temporelles, pour n'être plus qu'une abstraction en totale adéquation avec le pensée originale de son auteur. Trachtenberg souligne :

The key to his [Alberti] origination of modern de-contextualization is an adjunct to his temporal program. His absolutism concerning time had a spatial dimension, manifest most clearly in the typology of his paradigmatic building, the central-plan church whose autonomous and perfect geometric form was to be set freestanding at the center of an open, geometrical regular space. [...]

In the regime of Building-in-Time, to the contrary, there existed no such neutral, ideal space; each building was considered absolutely and radically site-bound and site-specific. (Trachtenberg 2010, 107)

Dans la tradition architecturale du Moyen Âge, les bâtiments étaient en effet enracinés dans leur environnement urbain et topographiques et parties de séquences temporelles et dynamiques de la ville. Ils s'affectaient mutuellement et une intervention constructive était en quelque sorte une modification du site. « The city fabric was a dense plasmatic continuum of matter and space produced over time by the community. [...] [Redesign was] the central, *normative act* of architectural practice in the domain of Building-in-Time. » (Trachtenberg 2010, 108-109). En s'affranchissant d'une telle dépendance au site et au temps, Alberti allait insuffler une nature véritablement abstraite à l'acte de concevoir le projet d'architecture, qui devenait alors dans son essence propre une œuvre engendrée de l'esprit de l'architecte, plutôt que de son continuum spatial et temporel. Par cet acte chronocide, Alberti faisait naître la figure de l'architecte consacré à abstraire l'espace.

2. L'architecte et le savoir-faire de représenter l'espace

Voyons maintenant comment l'acte de dessiner le projet de construction a dès lors façonné la figure de l'architecte. Les techniques de représentation codifiées et démocratisées à partir de la Renaissance, à savoir la perspective et la projection de Monge, s'inscrivent en réalité dans un mouvement civilisationnel de perception des réalités par l'abstraction. Nous allons donner une définition de cette évolution épistémologique, puis présenter les conditions sociales et techniques sous-jacentes à ce nouveau savoir-faire de représenter l'espace que s'est fabriqué l'architecte moderne.

Des abstractions à la science moderne

Dans son cours « *A History of Abstraction in Architecture* » donné en 2019 à l'EPFL, le professeur et architecte Pier Vittorio Aureli entendait dépasser l'interprétation stylistique véhiculée par le terme d'abstraction, et introduire les étudiants à une lecture plus complexe et nuancée de cette condition fondamentale dans l'histoire de la civilisation humaine :

“To abstract” comes from the Latin verb *trahere*, which means to pull something essential out from the totality of which it is a part. Abstraction is a process through which man seeks to reach generic frameworks rather than specific solutions. With the rise of early states and complex societies, abstraction became the condition sine qua non of government. Large quantities of people, goods, and agricultural produce could effectively be governed only by reducing them to abstract signs to be computed. Yet this process of abstracting reality into signs impacted reality itself, as physical space itself was ordered and formalized according to the abstractions of calculus and economic rationality. (Aureli 2019)

Par *early states*, Aureli évoque évidemment des civilisations bien antérieures à celle du Moyen Âge. En effet, le propos de cet énoncé n'est pas d'affirmer que les abstractions sont l'apanage exclusif de cette période que nous analysons entre l'apparition de l'horloge et l'apogée de la science moderne. La géométrie, par exemple, est une abstraction historiquement fondamentale développée durant l'Antiquité déjà ; Aureli insistait par ailleurs sur son impact décisif dans le monde concret comme méthode de mesure du terrain et par là, dans le parcellement et la privatisation du sol. Cependant, la quantification du labeur humain dans notre civilisation machiniste, une valeur des plus abstraites et liée comme nous l'avons vu à l'apparition de la conscience du temps mesuré au Moyen Âge, marque un véritable tournant de la modernité. En invoquant une "ère des abstractions", l'idée de cet énoncé est donc plutôt de définir cette période comme profondément déterminée par l'émergence d'abstractions liées à la mesure du temps, qui a engendré un rapport abstrait à la quasi totalité des réalités de notre monde. En effet, l'horloge fut l'instrument qui autorisa la découpe nécessaire mais abstraite du temps, et elle intégra peu à peu la société toute entière. Elle donna aux humains un rythme régulier et synchronisa leurs actions. Par sa propension à être universelle, cette mesure du temps a dès lors ouvert la voie à l'utilisation de méthodes quantitatives et abstraites pour mesurer toutes les réalités du monde et de la nature, résultant selon Mumford sur l'invention de la science

moderne :

L'invention de la méthode expérimentale dans les sciences [est] la plus grande réalisation de la phase éotechnique. [...] L'impersonnalité relative des nouveaux instruments et des nouvelles machines - en particulier l'automate - a certainement contribué à établir la croyance en un monde également impersonnel, de faits bruts et irréductibles, agissant de façon aussi autonome qu'un mouvement d'horlogerie et indépendamment de l'observateur. [...] Aucune des inventions qui suivirent le développement de la méthode scientifique ne fut aussi importante, pour remodeler la pensée et l'activité de l'humanité, que celles permises par la science expérimentale. (Mumford [1934] 2015, 148)

Dans leur ouvrage *Big Data: la révolution des données est en marche*, Viktor Mayer-Schönberger, professeur à l'Institut Internet d'Oxford et Kenneth Cukier, éditeur "data" au magazine britannique *The Economist*, présentent également la mesure de la réalité comme principe fondateur de la science moderne :

Que l'on mesure un phénomène et ce dernier allait nous devenir compréhensible, telle était la conviction implicite. Plus tard, on a associé la question de la mesure à la méthode scientifique d'observation et d'explication, à savoir la capacité à quantifier, enregistrer et présenter des résultats reproductibles. « Mesurer les choses, c'est les connaître », énonçait lord Kelvin. Une affirmation qui a fait autorité. (Mayer-Schönberger et Cukier, 46)

Cela relève de l'évidence aujourd'hui, car nous en sommes les héritiers, immergés dans cette manière de voir les choses. D'un point de vue épistémologique cependant, cela relève de postulats propres à notre civilisation, et d'autres sociétés à travers l'histoire sont arrivées à la connaissance par d'autres moyens. Il est important de le conceptualiser, car nous verrons que la mise en données engendrée

par la numérisation est à même de renverser ce paradigme, et qu'il est possible d'articuler une autre forme de raison autour des données de masse pour accéder à d'autres vérités tout autant valables ; l'architecture nous servira d'exemple pratique pour démontrer que cela n'a rien d'une utopie. Revenons-en d'abord au paradigme de cette ère des abstractions, dont Mumford livre une très belle définition :

Il existait une philosophie de l'univers, bien articulée suivant des principes purement mécaniques et qui servit de point de départ à l'ensemble des sciences physiques et aux améliorations techniques ultérieures. [...]

En résumé, ce que les sciences physiques appellent le « monde » n'est pas l'objet global de l'expérience humaine courante, mais la partie de cette expérience qui se prête à l'observation exacte, objective et aux généralisations. (Mumford [1934] 2015, 64-65)

Mesurer un poids, une distance, une charge d'électricité, en se référant à la lecture du curseur d'un appareil mécanique conçu à cette fin, revenait à limiter le risque d'erreur d'interprétation et à supprimer les différences d'expériences et d'histoires individuelles. Plus grand était le degré d'abstraction et de restriction, plus grande était la précision de référence. En isolant des systèmes et des séquences causales simples, les sciences laissaient croire qu'un ordre analogue existait dans tous les aspects de l'expérience. (Mumford [1934] 2015, 322)

En fait, cette approche des réalités par l'abstraction est fondamentalement liée au fonctionnement du cerveau humain. Incapable de mémoriser et d'analyser l'infinité du monde qui l'entoure, l'homme a développé des techniques dans son esprit pour pouvoir les approcher et les conceptualiser en en compressant la substance. Observons ce mécanisme.

Small Data Logic

L'expression *small data logic* fait référence à l'historien de l'architec-

ture Mario Carpo qui la conceptualise dans son livre *The Second Digital Turn : Design beyond Intelligence* (2017). Il décrit dans cet ouvrage ce fonctionnement des abstractions qui ont fondé notre manière de penser et les définit comme des stratégies de compression de données :

To some extent, all of the most successful cultural technologies in history must have been at their start, either by design or by chance, data-compression technologies. As information processing was always expensive and technically challenging, only media that could offer good data-compression rates -that is, that could trim the size of messages without losing much content- could find a market, take root, and thrive. The alphabet, an old and effective compression technology for sound recording, is a case in point. (Carpo 2017, 19)

Partant de là, le livre tire son titre d'un tournant numérique qui bouleverse cette réalité : le paradigme des données de masse, que nous allons développer plus loin.

Expliquons pour l'instant pourquoi Carpo le qualifie de deuxième révolution numérique : dans la pratique de l'architecture, la première fut considérée à l'époque comme la démocratisation de l'ordinateur. Observons donc rapidement son impact pour mieux revenir au concept de *small data logic*. Ce nouvel outil a dans

un premier temps changé nos façons de faire, en passant de la table à dessin à des logiciels de conception et de fabrication assistés par ordinateur, rendant possible la manipulation de lignes et de surfaces lisses et courbes ; elles ont donné naissance à un style et une forme visible d'une nouvelle ère numérique qui a laissé une marque indélébile sur l'architecture contemporaine, avec des ouvrages comme le musée d'art moderne de Graz de Peter Cook et Colin Fournier construit en 2003 (fig. 5), que nous avons appelés communément *blobs*. L'ordinateur a alors été considéré comme une libération formelle, du fait de sa

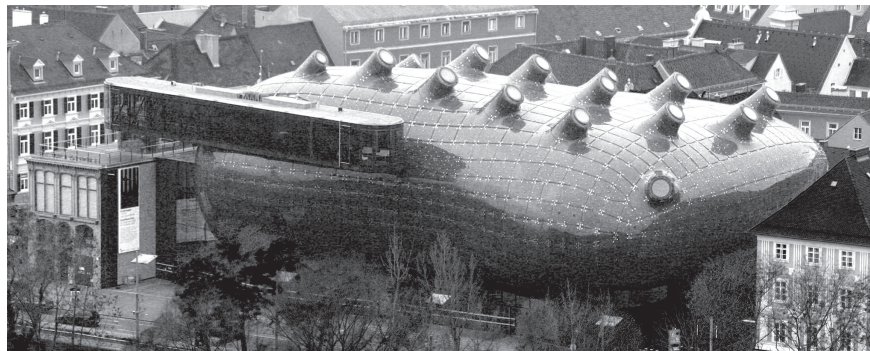


Fig. 5 : Musée d'Art de Graz, Peter Cook et Colin Fournier. (Marion Schneider et Christoph Aistleitner)

capacité à concevoir en trois dimensions, permettant de dépasser les limites du champ de représentation orthonormé de la géométrie descriptive. Dans son ouvrage *Culture numérique et architecture*, le professeur d'histoire de l'architecture et de la technologie Antoine Picon explique :

Le développement de l'architecture numérique a indéniablement bénéficié de la séduction exercée par des formes qu'il aurait été très difficile d'obtenir au moyen des outils de conception traditionnels. [...] Ce qui est nouveau, ce n'est pas seulement la variété des surfaces et des volumes, mais aussi la possibilité de les écrire rigoureusement au moyen de l'ordinateur. (Picon 2010, 70)

C'est en effet un changement majeur dans les outils de représentation de l'architecte, avec des conséquences indéniables sur certains ouvrages eux-mêmes. Cependant, cette évolution est trompeuse car finalement très formelle et donc assez marginale. Il ne s'agit pas de porter ici un jugement positif ou négatif sur ce courant architectural ; plutôt d'en saisir le fondement pour présumer que la pratique architecturale sera, avec les big data, bien plus profondément bouleversée par le numérique. Carpo avance en effet que ces réalisations n'ont rien d'une révolution et s'inscrivent à l'inverse dans la continuité de cette époque fondée sur les abstractions du cerveau humain, dont il estime que la manière de fonctionner se base sur la nécessaire compression des données. En quelque sorte, une *small data logic* :

Over time we learned to extrapolate, generalize, infer, or induct formal patterns, and we began to record and transmit condensed and simplified interpretations of the facts we observed, instead of longer, fuller descriptions of the facts themselves. Theories tend to be shorter than the description of the events they refer to, and indeed syllogisms, the equations, then mathematical functions, were, and still are, very effective technologies for data compression. They compress a long inventory of events that happened in the past into a very short script,

generally in the format of a causal relationship, from which we can deduct many more events of the same kind, if similarly structured-past or future indifferently. (Carpo 2017, 35)

Cette idée de compression des informations s'applique par ailleurs à l'hypothèse de Trachtenberg sur l'émergence du temps de l'horloge dans les cités médiévales ; une découpe absolue, commune, et surtout réduite à vingt-quatre signaux. Cette abstraction du temps synchronisa ainsi les activités dans la cité, devenues trop nombreuses pour en retenir toute l'information profusée par la cacophonie saturante de cloches concertant tous azimuts. Ce rapprochement entre les thèses de ces deux auteurs renforce l'idée du rôle prépondérant joué par la mesure du temps comme la genèse d'une conception du monde fondée sur l'abstraction, et par extension la compression de données. Au rang de ces nouvelles approches, les techniques de représentation en architecture s'inscrivent parfaitement dans le moule. Voyons comment cette *small data logic* a fondé nos pratiques en architecture, de l'émergence du dessin de représentation aux outils 3D qui ont rendu possibles les *blobs*.

La représentation architecturale comme outil d'abstraction

Cette nécessaire compression des données pour l'esprit humain que théorise Carpo a donc structuré nombre de sciences et de disciplines développées par l'homme jusqu'à nos jours, et qui sont en fait fondées sur l'abstraction. La perspective comprime un espace, c'est-à-dire une réalité tridimensionnelle infinie, sur un support plat et limité, par un habile procédé de l'esprit humain ; alors que la géométrie descriptive, ou projection de Monge, consiste à couper le projet en un nombre restreint d'endroits, déterminés précisément dans le but que ces dessins assemblés puissent abstraire dans l'esprit le projet dans son intégralité. En 1802, dans l'introduction au *Précis des leçons d'architecture données à l'École polytechnique*, l'architecte et professeur Jean-Nicolas-Louis Durand expliquait, à propos de l'usage du dessin :

Le dessin sert à se rendre compte de ses idées, soit lorsque l'on étudie l'architecture, soit lorsque l'on compose des projets d'édifices, il sert à fixer ses idées, de manière qu'on puisse à loisir les examiner

de nouveau, et les corriger, s'il est nécessaire. (Durand 1802, 32)

Ceci dans un système de représentation qui n'a pas d'équivalent dans la réalité perçue par nos sens, qui est tridimensionnelle. Car le dessin était avant tout un outil, un habile processus pour abstraire et représenter l'espace. Durand en appelait même à exclure le lavis des dessins géométraux, car non-essentiels à la méthode. Dans l'introduction à son livre *Numérisation 3D & Construction* (2019), l'expert en construction numérique Clément Valente souligne ainsi :

[La 3D] n'est pas vraiment une évolution technologique, on a toujours parlé et travaillé en trois dimensions. Notre cerveau est conçu pour raisonner dans un environnement mental tridimensionnel, notre vision stéréoscopique en est la preuve extérieure incontestable. [...]

Nous raisonnons en 3D, or dessiner en 2D n'est qu'une interprétation dégradée de nos pensées. (Valente 2019, 6-9)

La perspective et la projection de Monge ne sont en rien instinctives, en dépit de la normalité qu'elles incarnent pour un architecte habitué à les utiliser. Elles sont des techniques fondées sur l'abstraction de l'esprit humain, pour appréhender la réalité de l'espace en compressant les données sur le support disponible, une planche de papier. Mais Carpo va encore plus loin. L'architecture des *blobs*, telle que le musée de Graz, s'inscrit, elle-aussi, parfaitement dans une *small data logic*. Ce courant se fonde sur l'utilisation des *splines* et des NURBS. Ces fonctions ont été théorisées -avant l'invention de l'ordinateur- comme moyen d'abstraire la géométrie complexe de carrosseries de voitures, pour pouvoir en reproduire et partager les formes. Puis leur manipulation a été facilitée et popularisée par ce nouvel outil qu'était l'ordinateur, une super-machine à calculer : ce sont donc des techniques basées sur la géométrie analytique et le calcul, un moyen de compresser et d'abstraire un nombre infini de formes libres dans des formules mathématiques. La manipulation 3D de formes complexes sur des logiciels tels que *Rhino* n'est finalement qu'un nouvel outil de représentation basé lui-aussi sur l'abstraction. Carpo conclut : « The

mathematics of free-form is thus the zenith and culmination of a historical process [...] perhaps the ultimate small-data technology of modern science. » (2017, 64-65)

Le rôle de l'imprimerie

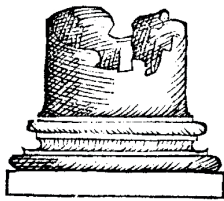
En parallèle de cette inscription de la pratique architecturale dans un mouvement de fond lié à l'abstraction, nous allons observer maintenant le rôle prépondérant qu'a joué, elle-aussi, l'imprimerie en tant qu'outil dans la formalisation du métier d'architecte depuis la Renaissance. Son impact sur la définition de notre discipline comme un acte de représentation a été fondamental ; à l'aube de l'avènement du numérique, ce processus nous éclaire sur le bouleversement que peut provoquer l'émergence d'un nouvel outil.

Lewis Mumford théorise dans *Technics and Civilization* l'idée qu'une technologie, pour émerger, a besoin de se faire rencontrer l'invention d'un moyen technique et d'une aspiration concrète, dans une société donnée, à laquelle va répondre ce nouvel outil. Tel est le cas de l'imprimerie. Si Johannes Gutenberg en a affiné les instruments et les processus vers 1440, cette invention avait déjà été connue des Perses ou des Egyptiens, tandis qu'on attribue l'invention du papier aux Chinois ou qu'on retrace la première utilisation de caractères métalliques en Corée (Mumford [1934] 2015, 149). En terme de technique pure, cette invention et la maîtrise de ses composants s'est développée en plusieurs endroits à travers l'Histoire. Mais, si l'on retient en Occident que la technologie a émergé avec Gutenberg, c'est parce qu'elle y a trouvé un véritable terreau favorable à son éclosion : la naissance du protestantisme. La traduction et la diffusion de la Bible dans la population, à une vitesse vertigineuse pour l'époque, sont le fruit d'un soulèvement face aux injustices de l'Eglise couplé à un désir d'émancipation du pouvoir papal de nombreux princes et rois à travers l'Europe. Il est d'ailleurs révélateur que le courant se soit mieux enraciné au nord du continent, loin des répressions du pouvoir papal. L'outil a donc émergé au service d'une problématique sociétale.

Dans son ouvrage *Architecture in the Age of Printing: Orality, Writing, Typography, and Printed Images in the History of Architectural Theory* (1998), Mario Carpo retrace l'émergence de cet outil et son appropriation dans la pratique architecturale. A l'origine, l'imprimerie imaginée par Gutenberg était une technologie de reproduction du texte : elle cristallisa donc le clivage fondamental entre

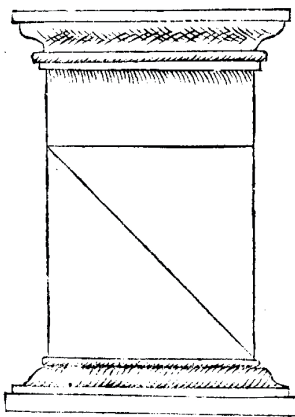
protestants et catholiques sur le vecteur de transmission du message religieux, respectivement par le texte ou par l'image -vitraux, tableaux. En effet, l'imprimerie embrassa la fonction de diffuser à grande échelle les traductions protestantes des textes bibliques, en langues vernaculaires. Parallèlement, les leaders protestants tels qu'Ulrich Zwingli ou Jean Calvin, condamnèrent l'idôlatrie véhiculée par les images sacrées, en associant la représentation du divin à du paganisme, et incitèrent à l'iconoclasme : de nombreuses œuvres furent ainsi saccagées à travers l'Europe. Aux catholiques l'image, aux protestants le verbe. Dès lors, l'Eglise riposta d'une pierre deux coups lors du concile de Trente, tenu en 1563, en bannissant la popularisation des Ecritures en langues modernes tout en réaffirmant le rôle didactique des images religieuses : « Thanks to images, the illiterate populace (*indocta plebs*) could be educated in the articles of the faith, instructed in the stories of the Scripture, and incited to the imitation of the lives of the saints. » (Carpo 1998, 82). Dans un tel contexte, l'émergence de l'image imprimée fut donc freinée dans un premier temps, car les imprimeries se développaient essentiellement dans le monde protestant pour y diffuser la Bible, un environnement qui condamnait donc le recours aux images. L'image imprimée était également techniquement difficile à réaliser, nécessitant de la gravure sur bois, et donc chère. Néanmoins on s'aperçut vite qu'elle possédait un grand potentiel pour démocratiser la transmission du savoir, à l'image de ce que prônait l'Eglise catholique pour les images sacrées : plus simples et directes, et donc plus efficaces. En architecture, alors qu'au XV^{ème} siècle, Alberti devait toujours faire face au défi de transmettre ses principes par le verbe, on eut bientôt le moyen de procéder différemment. On vit émerger un peu partout des manuels sur les ordres, sur la géométrie ou sur la stéréotomie. Ainsi Sebastiano Serlio réalisa son célèbre traité sur l'architecture en huit volumes illustrés, avec pour vocation de servir de manuel pour les architectes. De la même manière, Guillaume Philandrier illustra le traité de Vitruve (extrait en fig. 6), et cette interprétation fit école, jusqu'à populariser l'idée erronée que les images faisaient partie de l'original -qui n'avait pourtant aucune vocation à proposer des modèles à reproduire et fondait son propos plutôt en termes de principes. En quelque sorte, l'image imprimée permit donc de vulgariser les traités d'architecture, en diffusant au plus grand nombre des modèles très clairs à reproduire, alors que seuls les architectes les plus avertis se plongeaient auparavant dans la lecture et l'interprétation des traités. Le style se diffusa

chilo siue Scotiae, sed istius septimis partibus fiant regulae duae quibus clauditur.



STYLOBATA erit proportionis diagoniae, idest altus quantum est ab angulo Plinthe basis, quae parium est laterum, ad aduersum angulum, latus ad perpendicularum dictae Plinthe. Ei al-

titudini pro Coronice & Basi adduntur quintae partes, sed Coronix diuidetur in partes tres, duae dabantur Cymato cum regula quae ipsius est pars tertia, altera Astragalo & regulae, quae etiam ipsius tertia parte constat. Basi in duas diuisa parteis, vna Plinthe tribuetur, altera in duas diuidetur, Torus vniam accipiet, partito quod

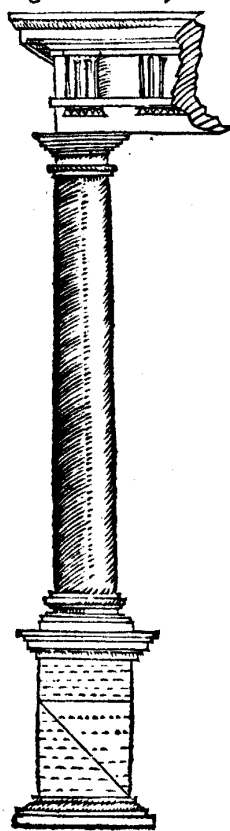


superest in tria, Astragalus duas habebit parteis, Regula tertiam.

PARTIVM Dorici generis nomina et series huiusmodi sunt, TRABEATIO = NIS, Regula. Sima, Cymatium superius, Corona, Cymatium inferius, Tenia vbi capitula tri-

glyphorum, Triglyphi cum Metopis, Tenia, Regula in

Epistyllo vnde pendent guttae sex, CAPITVLI, Regula, Cymatium, Plinthus, Echinus, Annuli tres, Hy-



potrachelium. COLVMNÆ. Astragalus, Apophygis superior, & Apophygis inferior. BASIS. Torus superior, Regula, Scotia. Regula, Torus inferior, Plinthus. STYLOBATAE. Coronice. Regula, Cymatium. Astragalus, Regula. Quadratum diagonium. Basis. Regula, Astragalus, Torus, Plinthus.

SEQUITVR genus tertium. Ionicum, in quo explicando, non licet quod in superioribus, incipere a summa trabatione, idest Coronice, sed quod ima trabs, idest Epistylum, est veluti modulus quo i dimetredis aliis partibus vsuri sumus, inde initium capere necesse est. Epistylum Ionicum non est simplex ra-

Fig. 6 : Guillaume Philandrier, In decem libros Vitruvii [...] annotations, 1544 (Carpo 1998, 66-67)

rapidement, avec pour revers de la médaille une application sans doute trop rigoureuse et mimétique, alors que l'architecture antique s'accordait en fait rarement avec la doctrine de Vitruve. Comme le souligne Mumford : « La feuille imprimée était, avant l'uniforme militaire, le premier produit entièrement standardisé, fabriqué en série. » (Mumford [1934] 2015, 62). Carpo avance ainsi l'hypothèse que cette diffusion de l'image architecturale par l'impression et le mimétisme consécutif du style Renaissance est à l'origine de la standardisation en architecture :

Serlio's orders supplied the basic structural grammar for Renaissance and modern methods of architectural composition. They provided an articulate repertoire (paradigmatic and syntagmatic) of standardized

and repeatable architectural components that could be combined in accordance with strict rules and that functioned as semantic signs. The Serlian orders are architectural microdesigns, ready for use but with some assembly required. The user must select, combine, and construct the parts. (Carpo 1998, 49)

Or cette manière de pratiquer l'architecture est quasi similaire à l'usage d'un alphabet, comme termine de le souligner Carpo, assimilant donc l'architecture de la Renaissance à une *small data logic* -ce concept qu'il développera vingt ans plus tard dans *The Second Digital Turn : Design beyond Intelligence*.

The very idea that architecture composition can be reduced to the reassembling of a limited number of elementary parts recalls the combinatory function of alphabetic language. [...] The Serlian architect, as a typographic composer, chooses and matches pre-designed elements - elements whose composition may generate in one case a line of type and in another an architectural syntagma. (Carpo 1998, 54)

Dès lors, les traités d'architecture illustrés jouèrent un rôle déterminant dans la définition de l'architecture comme une pratique d'abstraction, en tant que vecteur de compression de la discipline, dans un ensemble restreint de composants idéaux. Trachtenberg dénonce ainsi ce recours à l'image comme une crise de la relation au site et au temps du projet architectural, véritable origine de la rupture avec l'ère de ce qu'il a nommé *Building-in-Time* :

Modern architects have tended to think - in "default" planning mode, as it were, deflecting progressive contextualist countercurrents - of a building plan as an ideal formal construct, conceived *ex novo* in and for an ideal, neutral, empty Cartesian conceptual space. [...] This inclination to radical abstraction has been abetted by the frequent conflation of architecture with the normative (not site-specific) work of art. It has been heightened by the way that many

important buildings have been increasingly experienced not directly but in the free-floating images of publications, [...] filled with ideal designs meant for anywhere and nowhere, site-specificity being virtually irrelevant or incidental to their value or significance. (Trachtenberg 2010, 107)

L'architecture et la confiance dans l'image

Comme nous l'avons vu précédemment, le dessin d'architecture s'inscrit dans un processus historique du raisonnement humain par l'abstraction. La perspective a ainsi été théorisée en 1415 à Florence par Filippo Brunelleschi et codifiée en 1436 par Alberti. A partir de là, nous pouvons vraiment parler d'une méthodologie de la représentation de l'espace par le dessin. Une perspective est une construction qui vise à reproduire un espace tridimensionnel sur l'outil dont on disposait à l'époque : la planche à dessin, soit un champ d'expression bidimensionnel. Elle répond à des règles de construction scientifiques. Cela dit, il est intéressant de relever qu'elle n'a pas de réelle valeur en tant que technique de transmission d'information, car elle n'est pas facilement commensurable : c'est-à-dire qu'il est impossible de communiquer directement à partir d'une perspective les dimensions d'un espace. La géométrie descriptive a quant-à-elle des racines plus anciennes, mais la technique a véritablement été théorisée et diffusée par le mathématicien Gaspard Monge à Paris au début du XIX^{ème}, qui lui a d'ailleurs donné son nom dans le langage courant -projection de Monge. Son principe est de représenter un objet ou un espace tri-dimensionnel en un minimum de projections orthogonales -ce qui permet d'en conserver la mesure des angles et des longueurs. Nous voyons bien là la technique d'abstraction et la *small data logic* sous-jacentes : transmettre l'information avec un minimum de données. Monge a donc théorisé cette méthode comme un véritable outil de division systématique et technique des objets et des bâtiments en plans, sections et élévations, choisis avec précision pour abstraire le sujet dans son ensemble et le représenter rigoureusement tant sur le plan géométrique que dans ses mesures. Le dessin d'architecture devint ainsi un véritable outil de transmission de l'information ; au point que les perspectives furent même généralement interdites dans les concours à Paris jusqu'en 1850 car incapables de fournir de telles informations analytiques.

Malgré cette opposition historique à leurs débuts,

ces deux méthodes se complètent encore aujourd'hui dans la pratique de l'architecture et peuvent être analysées comme une seule et même grande révolution : celle de la confiance dans les images. Cette fin de la méfiance dans la représentation, qui prévalait autrefois, est due à la codification de ces techniques, mais pas seulement. En effet, le réel terreau pour faire émerger cette évolution a été la popularisation et la reproductibilité de l'image par l'imprimerie que nous venons d'évoquer. Ce nouvel outil a permis de travailler avec la confiance totale dans l'image : car le dessin d'architecte était désormais à la fois construit scientifiquement et parfaitement reproductible à l'identique. Carpo souligne cette convergence de la connaissance et de la technologie, réunies à l'époque vers la confiance dans l'image :

Before the Renaissance, the main vehicle for the recording and transmission of visual data was verbal, not visual [...] images are always deceitful, never reliable, and never true to reality, [first because] classical antiquity bequeathed, and likely knew, no geometrical rules for making pictures -rules whereby every painter could make the same copy of the same object, and each viewer could extract the same data from same drawing. Second, in the absence of identical reproductions in print, all manual copies of drawings were at the mercy of the talent and good will of each individual illuminator, miniaturist, or draftsman. (Carpo 2017, 102-103)

C'est donc avec ces utilisations de la perspective et de la projection de Monge, qu'a émergé le rôle de l'architecte dans la construction ; il s'est défini comme un acte de notation, une notation de confiance, car scientifique et reproductible. C'est ainsi de la convergence entre la capacité de représenter, c'est à dire d'abstraire l'espace, un véritable savoir-faire, et la popularisation d'un nouvel outil, l'imprimerie, qu'est née, à cette époque, la figure de l'architecte telle qu'on la conçoit encore aujourd'hui. Cette relation est fondamentale, et doit nous éclairer sur la révolution numérique qui se déroule actuellement sous nos yeux : la conception du monde articulée autour des données de masse offre un terreau de développement à la fois à un nouveau mode de connaissance et à de nouveaux outils technologiques, qui se

répondent et s'enrichissent mutuellement, comme nous l'analyserons au prochain chapitre. Picon évoque ce parallèle entre l'émergence du dessin d'architecte et le tournant numérique :

Il pourrait se révéler aussi radical et durable que la transformation qui a donné naissance à la discipline architecturale au début de la Renaissance. A cette époque, l'adoption de nouveaux outils et de nouvelles procédures, des projections coordonnées en plan, coupe et élévation, à la représentation perspective, étaient inséparables de phénomènes comme l'émergence des figures de l'architecte et de l'ingénieur et la place nouvelle prise par la conception. De façon similaire, la généralisation des outils numériques semble liée à une série de mutations affectant la définition et le contenu de l'architecture. (Picon 2010, 8)

Voyons désormais la portée des ces mutations provoquées par ce qui constitue la véritable révolution épistémologique de notre temps, les données de masse.

B. L'architecture à l'ère des données de masse

Depuis le début du XX^{ème} siècle, nos sociétés se sont progressivement articulées autour de nouveaux phénomènes relatifs à l'émergence de la numérisation. La nécessité de recenser et d'organiser les produits et les services à grande échelle, la course aux systèmes informatiques militaires, la démocratisation de l'ordinateur civil, le déploiement d'internet, l'adoption des réseaux sociaux, puis aujourd'hui les recherches sur l'intelligence artificielle ont connu des développements d'une telle rapidité que nous peinons presque à réaliser leur impact profond sur notre civilisation. La rupture épistémologique est pourtant majeure, et malgré les tournants historiques dont chacune de ces évolutions pourraient se réclamer indépendamment, toutes s'agrègent autour d'une même composante essentielle : notre rapport à la donnée de masse. En effet toutes les nouvelles technologies numériques, rendues possibles grâce à une multitude d'influences et de découvertes scientifiques, ont participé d'une mise en données des réalités du monde qui nous entoure, processus autrement appelé "datafication". Au-delà des avancées techniques sous-jacentes, il s'agit de comprendre d'où vient ce phénomène dans une perspective globale et civilisationnelle. Nous pouvons désormais appréhender les réalités qui nous entourent par les données de masse, ou big data, alors que les limites biologiques de notre cerveau, en terme de rétention de l'information, nous avaient jusqu'alors conduit à développer des outils d'abstraction. Dans quelles circonstances ce besoin du recours aux données de masse s'est-il manifesté? Comment influence-t-il notre rapport au monde, et comment cela se traduit-il dans le domaine de l'architecture? Mayer-Schönberger et Cukier nous livrent un début d'explication :

Les big data concernent trois grands changements d'état d'esprit qui sont liés et, par conséquent, se renforcent mutuellement. Le premier est le fait que nous soyons capables d'analyser de grands ensembles de données se rapportant à tel ou tel sujet au lieu de nous retrouver contraints de nous accommoder de bien plus petits ensembles. Le deuxième

concerne la prise en compte du désordre bien réel des données et non de privilégier leur exactitude. Le troisième est un respect croissant pour les corrélations plutôt que pour la quête perpétuelle d'une insaisissable causalité. (Mayer-Schönberger et Cukier 2014, 29)

Nous devinons bien là les contours d'une rupture épistémologique profonde dans notre rapport à la réalité. Nous allons observer ce processus au travers de trois chapitres : d'abord une illustration du phénomène de par son émergence dans les disciplines géographiques, ensuite un exposé de son développement historique et de sa relation aux outils technologiques, puis enfin sa concrétisation dans la pratique architecturale, à savoir l'émergence du BIM.

1. Géographie, temps et données

Se plonger dans les disciplines géographiques est intéressant pour introduire le phénomène big data. D'abord car l'exemple a vocation à illustrer concrètement l'hypothèse. Ensuite car la cartographie, la planification territoriale, l'urbanisme, ou encore le design de parcs et jardins sont autant de disciplines liées à la géographie, qui ont un rapport très connexe avec l'architecture. Or comme nous le verrons, il se trouve que ces disciplines ont fait preuve, peut-être parfois sans même s'en rendre compte, de nombreux coups d'avance sur l'adoption de processus liés aux données de masse. Voyons pourquoi.

1855 : Maury et les cartes de navigation de l'U.S. Navy

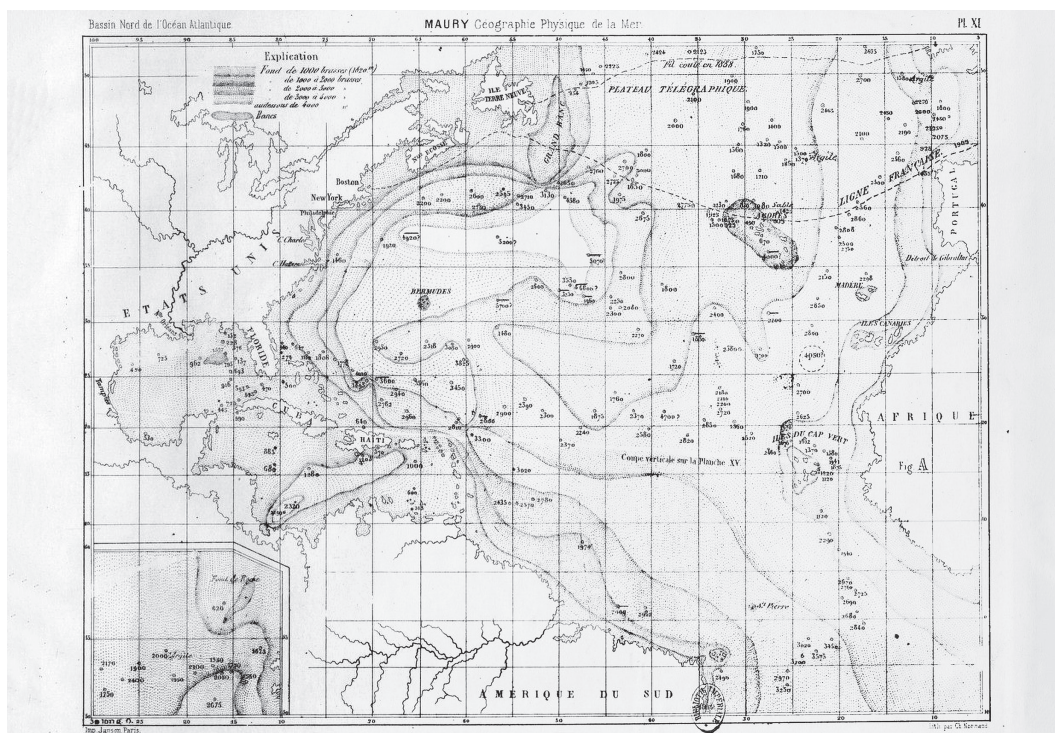
Viktor Mayer-Schönberger et Kenneth Cukier, dans leur ouvrage *Big Data : la révolution des données est en marche*, racontent l'émergence de l'ère des données de masse, ses conséquences et ses potentiels. Ils distinguent le phénomène de mise en données de la numérisation informatique. L'ordinateur, en tant qu'outil, a certes été un formidable accélérateur de ce processus, mais n'explique pas en soi son avènement. Avec l'histoire de Matthew Fontaine Maury, les deux auteurs datent au XIX^{ème} siècle la première mise en données de masse qui a eu un impact fondamentale sur sa discipline : la cartographie maritime. Celle-ci a ouvert la voie à une nouvelle approche de la réalité par l'information. Maury, officier de l'U.S. Navy, suite à un accident l'empêchant de re-

prendre la mer, récupéra en 1842 la direction du "Dépôt des cartes et instruments de navigation". L'océan, avec ses courants, ses vents et ses tempêtes, était alors considéré par les marins comme un monde de l'inattendu, dont il n'était pas possible de comprendre le fonctionnement. Et ceux-ci se fiaient alors avant tout à leurs habitudes, n'hésitant pas à rallonger les trajets, parfois de manière absurde, par des itinéraires tenus pour plus sûrs. Maury avait, lui-aussi, expérimenté l'océan et il avait constaté la récurrence de certains phénomènes en certains lieux. Il sentit bien qu'il y avait là un moyen de comprendre l'océan. Il se donna pour objectif d'en récolter toutes les expériences possibles, au travers de témoignages, de livres ou de cartes :

Au fur et à mesure que Maury dépoussiérait les livres tâchés par l'eau de mer avant de les ouvrir pour y jeter un coup d'œil, son enthousiasme augmentait. Là étaient les informations qu'il recherchait : des observations sur le vent, sur l'eau et sur le temps dans des zones particulières à des dates spécifiques. [...] Maury agrégea les données et divisa toute la surface de l'océan Atlantique en cases de cinq degrés de longitude et de latitude. Pour chaque case, il consigna la température, la vitesse et la direction des vents et des vagues, ainsi que le mois, puisque ces conditions diffèrent selon les saisons. En les associant, les données firent ressortir des modèles et donnèrent l'indication d'itinéraires plus efficaces. (Mayer-Schönberger et Cukier 2014, 92-93)

Puis il entreprit de récolter de nouvelles informations en imposant à la Marine américaine des formulaires de navigation. Le succès grandissant, il échangea ses cartes avec des marchands contre de nouvelles données ; tout un réseau d'informations se mit en place, et on organisa même un système de bouteilles jetées à la mer, contenant des données et repêchées plus tard par les bateaux participant, pour encore mieux approcher le comportement de l'océan. En dévoilant de la sorte des itinéraires maritimes plus pertinents, Maury réduisit les temps de trajet de près d'un tiers. Il publia ainsi en 1855 son œuvre phare *The Physical Geography of the Sea* (extrait en fig. 7) ; il avait alors reporté 1,2 million de points de données. Vents, courants

Fig. 7 : Carte de l'Atlantique Nord par M. F. Maury, 1855 (Bibliothèque nationale de France)



marins, tempêtes, changements de température ; les réalités du monde géographique sont extrêmement complexes et surtout très versatiles. Si le soleil se lève tous les jours du même côté, ce n'est pas le cas du vent. Par l'abstraction et la science moderne, les savants ont pu déterminer les mouvements célestes ; approcher les phénomènes météorologiques par les mêmes procédés semblait impossible. Voilà une discipline qui se détermine plus facilement par la donnée de masse. La météo ne s'explique pas, elle se corrèle. Cette histoire montre que toutes les réalités du monde ne sont pas forcément saisissables par le principe de causalité et que la donnée de masse permet de beaucoup mieux appréhender certaines réalités, avec des applications très pratiques. En jouant sur la langue française, nous pouvons noter que le temps de l'horloge avait ouvert la voie aux abstractions, alors que le temps météorologique a lui ouvert la voie aux données de masse.

[La méthode de Maury], largement similaire aux techniques actuelles des big data, était stupéfiante sachant que les seuls outils d'alors étaient le crayon et le papier. Avec son histoire, on comprend

que l'utilisation des données est antérieure à la numérisation. Aujourd'hui, nous avons tendance à confondre les deux, alors qu'il est important de les séparer. (Mayer-Schönberger et Cukier 2014, 95)

La mise en données n'a donc pas émergé par l'outil, mais bien par son potentiel intrinsèque. Aujourd'hui, d'autres disciplines se montrent plus ou moins propices à cette approche, ce qui provoque parfois de grands remous, car le chemin vers la connaissance propose désormais plusieurs itinéraires. Sans entrer dans un argumentaire trop détaillé ni prendre position, nous avons constaté, par exemple, avec la controverse autour de l'hydroxychloroquine pour soigner la Covid-19 un débat de fond sur la méthode ; les infectiologues se déchirent entre le principe d'"une nouvelle maladie, un nouveau médicament", c'est-à-dire à chaque effet sa cause, et la réutilisation de ce médicament générique qui ferait la preuve de son efficacité par une agrégation massive de données favorables (Rameaux 2020). Pour évoquer un tout autre domaine, le monde de la traduction aussi, a été chamboulé ces dernières années ; les géants de la *tech* ont été surclassés par la petite plateforme *DeepL*. Sur le même principe que le site *Linguee* -duquel elle a évolué- elle fonde ses traductions sur la corrélation massive de textes existants pour proposer des interprétations extrêmement convaincantes (Coldewey et Lardinois 2017). Nous détaillerons plus tard le fonctionnement de cet apprentissage par la machine. Pour l'instant notons simplement que si certaines disciplines sont plus susceptibles que d'autres d'être impactées par les données de masse, et sans aller jusqu'à postuler la fin du raisonnement causal, on peut tout de même envisager que toutes les activités devraient, de près ou de loin, ressentir les effets de ce phénomène. Il en sera de même pour la construction, et il s'agit désormais d'en anticiper les potentiels.

Du paysagisme au palimpseste de Corboz

Il est en fait révélateur que la première mise en données de masse relevée par Mayer-Schönberger et Cukier concerne une discipline géographique ; elle met en lumière le rapport entre nature, temps et données. En effet, le travail de Maury touche aux comportements de l'océan : or ces éléments de la nature comme les courants marins, les vents, ou les averses -le temps météorologique-, et il en va de même pour des éléments terrestre comme la végétation ou les crues de cours d'eau,

comportent une dimension temporelle intrinsèque. Ces phénomènes montrent une grande variabilité et évoluent dans le temps. Pour approcher la compréhension de leur comportement, l'histoire de Maury démontre que la récolte et la corrélation de données fonctionne beaucoup mieux que l'établissement de règles abstraites, qui avaient échoué jusque-là à imposer à la discipline une vision rationnelle de l'océan. En quelque sorte, leur évolutivité temporelle rend impossible l'appréhension de ces réalités par les méthodes de la science moderne, qui cherche à l'inverse à figer le réel dans des lois brutes et irréductibles, et donc intemporelles. Dès lors, il est intéressant pour nous de considérer ici le rapport à l'abstraction de quelques disciplines de planification et de construction empreintes de ces phénomènes liés à l'évolutivité de la nature.

Dans la conception des jardins par exemple, la dimension temporelle est une composante essentielle, car intrinsèque aux éléments naturels qu'elle traite : le jardin a une sensibilité évidente aux saisons, de même que sa végétation connaît une croissance au fil des jours et ou des années. Il existe ainsi une tension entre la variabilité propre à la nature et le moment abstrait et figé sous-entendu par une planification. Ce débat a d'ailleurs nourri de nombreux questionnements dans l'histoire de la discipline : d'abord, il incarne l'opposition entre jardin français, extrême structuration de la nature, et le jardin à l'anglaise, redécouverte plus sauvage et poétique. Aujourd'hui, cette valeur du temps est portée par les théories de Piet Oudolf, concepteur de jardin néerlandais et figure de proue du mouvement *New Perennial*. Oudolf a notamment créé les Jardins du souvenir à New York et végétalisé la *High Line* à New York. La vocation de son approche est de comprendre les principes généraux permettant des combinaisons végétales réussies dans le temps et dans l'espace. Oudolf propose ainsi de prendre en compte les rythmes et les liens dans le design des jardins, en insistant sur la croissance d'un paysage conçu au fil du temps. Ainsi la couleur des fleurs ne relève pas d'un objectif en soi mais d'un moment d'existence du jardin, qui doit être riche de sens au fil de toutes les saisons et donc du temps.

Ensuite, on retrouve également cette tension entre temps et abstraction dans la manière d'aborder les projets d'architecture du paysage : le philosophe de l'architecture et du paysagisme Sébastien Marot l'illustre dans son essai *Sub-urbanisme / sur-urbanisme* (2011). Il y compare deux textes sur Central Park de Robert Smithson

d'une part, et de Rem Koolhaas d'autre part, révélateurs de leur rapport très différent à l'architecture du paysage. Smithson dévoile sa vision du parc par un ensemble de photos mettant en scène ses mutations, ses mouvements de terrain, ses fluctuations et ses transformations. Marot explique :

Un paysage ou un monument de nature hautement urbain (le parc), célébré à tort comme un morceau de nature formel et statique, enrichi pour résister à sa digestion par la métropole, est décrit comme un chantier permanent où la plasticité de la nature est sans cesse mise en scène et sollicitée : un « site du temps » plutôt qu'un « jardin de l'histoire ». (Marot 2011, 306)

A l'inverse, Koolhaas considère Central Park comme un projet abstrait de son site, une surface programmée tapissée sur le sol de la nature. Ainsi un parc ne relève pas moins d'un programme que de ses conditions spatio-temporelle, une vision qui se traduit d'ailleurs dans le vecteur de transmission privilégié, le dessin, et que l'on retrouvera dans sa proposition pour le parc de la Vilette à Paris. Marot décrit :

Le site est presque entièrement *produit*, plutôt que déduit de sa situation initiale. [...]

La troisième dimension n'est pratiquement conférée à cette tapisserie qu'à travers la superposition mentale de ces diagrammes plats et de ces surfaces inframinces. Pas une seule photographie du site, même sous forme de montage, n'est versée au dossier. (Marot 2011, 335-338)

Au-delà de ces débats sur la planification de programmes touchant à la nature (jardins, parcs), cette étroite relation de la géographie au temps s'impose désormais aussi à l'échelle des territoires et des activités humaines. L'historien de l'art, de l'architecture et de l'urbanisme André Corboz a ainsi introduit il y a quarante ans le concept de palimpseste -un parchemin manuscrit déjà utilisé, dont on efface les inscriptions pour pouvoir y écrire à nouveau. Cette métaphore est ainsi un instrument pour se confronter à la dimension évo-

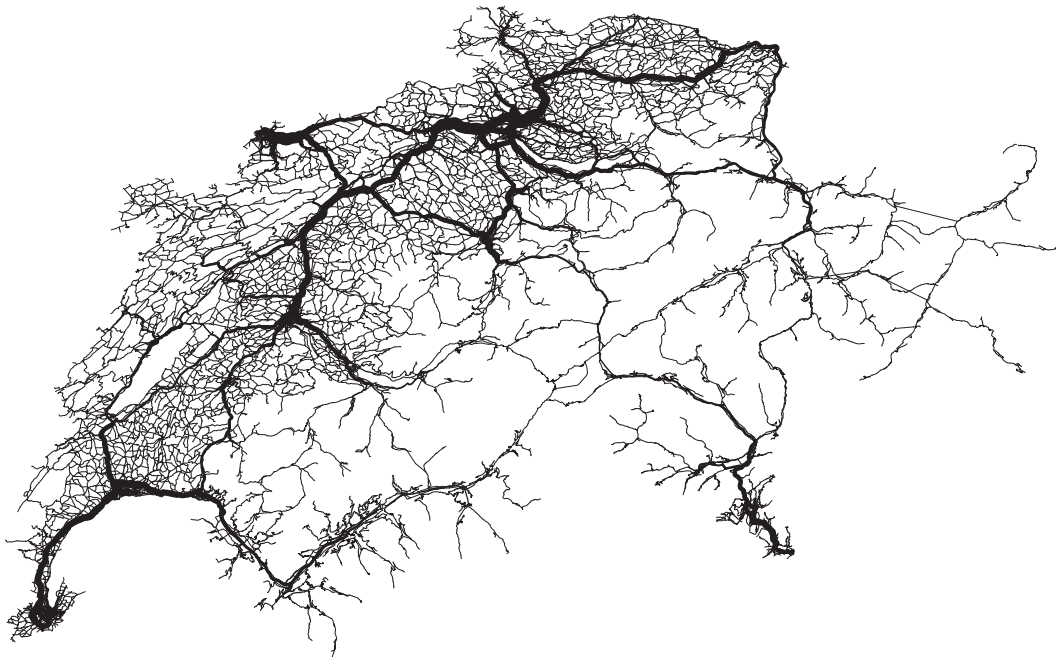
lutive du territoire, à sa lecture dans le temps. Selon Corboz, la *tabula rasa* avait été pendant deux siècles la logique principale des urbanistes. Cette conception de l'aménagement comme un champ opératoire abstrait ne fait plus sens, et le territoire doit plutôt être considéré comme le produit d'une très longue et très lente stratification, qu'il importe de saisir avant d'y intervenir :

Le territoire, tout surchargé qu'il est de traces et de lectures passées en force, ressemble plutôt à un palimpseste. [...] Chacun est unique, d'où la nécessité de « recycler », de gratter une fois encore (mais si possible avec le plus grand soin) le vieux texte que les hommes ont inscrit sur l'irremplaçable matériau des sols, afin d'en déposer un nouveau, qui réponde aux nécessités d'aujourd'hui avant d'être abrogé à son tour. (Corboz 1983, 13)

GIS, précurseur du BIM

Cette idée de palimpseste évoque par ailleurs le concept du programme scientifique européen *Venice Time Machine*, développé à l'EPFL par le professeur Frédéric Kaplan et ses équipes et réunissant plus de 300 chercheurs à l'international. Son ambition est de révolutionner notre perception de l'histoire du monde en en construisant un miroir virtuel 4D, à partir d'une multitude de données récoltées dans les archives : d'abord concentré sur Venise, ce modèle, recouvrant la ville et reliant directement les informations de son passé, permettra aussi de mieux planifier son avenir. Son principe se fonde donc précisément sur les big data. Cet ambitieux projet futuriste ne doit cependant pas cacher le fait qu'en réalité, le recours aux données de masse s'est déjà extrêmement démocratisé dans la discipline urbanistique, grâce aux logiciels GIS. Voyons comment.

Comme nous l'avons vu en introduction, GIS est l'acronyme anglais de *Geographic Information System*, qu'on retrouve aussi sous sa traduction française SIG, pour système d'information géographique. Dans le monde de la construction, le GIS compose donc avec le BIM et l'IoT un réseau d'interopérabilité autour de la donnée. Il désigne un système conçu pour récolter, traiter, et analyser toutes sortes de données spatiales et géographiques : courbes de niveau,



NO	FROMNODE	TONODE	TYPENO	SYSTEMNO	LENGHT	NUMLANES	KAPAZIT	GESCHW	VOL_TOT	VOL_LI	VOL_LW	VOL_LZ	VOL_PW
945	1107	1108	15	LI,LW,LZ,P	1	3	81741	80	79900	9123	3843	3102	63832
942	1105	1106	15	LI,LW,LZ,P	1	3	81741	80	74253	8169	2693	2796	60597
569	702	703	11	LI,LW,LZ,P	1	3	81741	120	70725	9862	2753	4147	53963
570	704	705	13	LI,LW,LZ,P	1	3	81741	100	70725	9862	2753	4147	53963
1808	703	704	21	LI,LW,LZ,P	1	3	81741	100	70725	9862	2753	4147	53963
596	733	736	11	LI,LW,LZ,P	0	3	81741	120	68337	8166	3072	4148	52952
100000900	736	99990558	11	LI,LW,LZ,P	2	3	81741	120	68337	8166	3072	4148	52952
9999978	1106	99100472	15	LI,LW,LZ,P	0	3	81741	80	67454	7555	2674	2780	54445
599	738	739	11	LI,LW,LZ,P	2	3	81741	120	67405	8272	2610	3909	52614
821	731	732	13	LI,LW,LZ,P	2	3	81741	100	67380	8040	2796	3919	52623
100000512	1107	99100472	15	LI,LW,LZ,P	0	3	81741	80	67199	9183	2540	2810	52666
892	1073	15042	14	LI,LW,LZ,P	0	2	57783	80	66548	5173	1656	2275	57445
590	726	727	13	LI,LW,LZ,P	0	3	81741	100	66134	7711	2837	4057	51529
947	1081	1111	15	LI,LW,LZ,P	0	3	81741	80	66012	10038	3713	2775	49486
571	705	706	14	LI,LW,LZ,P	0	3	78923	80	65689	9151	2472	3650	50415
566	699	700	13	LI,LW,LZ,P	1	3	81741	100	65677	8258	2372	4156	50890
567	700	701	11	LI,LW,LZ,P	0	3	81741	120	65677	8258	2372	4156	50890

...

Fig. 8 : Valeurs de charge 2020 du trafic routier suisse (opendata.swiss)

réseaux routiers, ferroviaires ou fluviaux, localisations de villes, de bâtiments ou de points naturels, etc. Ce type d'outil est déjà très implanté dans les agences d'architectes qui pratiquent de l'urbanisme ou des études cartographiques. Le concept est le suivant : géoréférencer et attacher de la donnée aux représentations géométriques et numériques -points, vecteurs ou encore polygones- d'éléments spatiaux et géographiques -routes, bâtiments, terrains, etc-. Les fichiers de type GIS sont ainsi de véritables bases de données, telles qu'on en trouverait sur les tableurs Excel d'un comptable, pour vulgariser. L'intérêt est le rattachement de tout type d'informations aux éléments étudiés. Prenons le réseau routier suisse par exemple, tel qu'en figure 6 : à chaque route, représentée par une polyligne, est rattaché un ensemble de renseignements concernant les charges de trafic en 2020. On peut imaginer d'autres types de renseignements, telles que la largeur, le nombre de voies, la vitesse maximale, ou encore le nombre d'infractions commises en 2020. Les possibilités sont infinies. Cela permet ensuite à l'utilisateur de trier, classer, analyser, et nous avons fait ressortir par exemple ici une carte où l'épaisseur des routes est déterminée par la colonne "volume total". A l'instar de la Suisse, de nombreux pays ont mis sur pied des plateformes internet publiques qui permettent de télécharger ce type de données pour les manipuler ensuite dans des logiciels de cartographie. Véritablement développés à partir des années soixante et démocratisés à la fin du siècle, les systèmes GIS se fondent donc sur une mise en donnée essentielle : la géolocalisation. Mayer-Schönberger et Cukier expliquent ce processus dans leur chapitre *quand l'emplacement se transforme en données* :

La géolocalisation que ce soit de la nature, des objets ou des personnes constitue bien évidemment une information. [...]

Il devenait alors possible d'identifier, d'enregistrer, de calculer, d'analyser et de communiquer en format numérique normalisé un emplacement « géospatial ». La position pouvait être mise en données. (Mayer-Schönberger et Cukier 2014, 106-107)

Sans entrer dans un exposé technique de ces évolutions, -systèmes de coordonnées et de projection, satellites, etc. que les deux auteurs présentent très bien-, il faut surtout saisir ici la

vocation du GIS : étudier de la donnée de masse. Car cet attachement d'informations aux représentations numériques d'éléments réels est, comme nous le développerons, précisément l'objectif du BIM à l'échelle du bâtiment. Mais d'abord, prenons un peu de recul et voyons par quels processus historiques a émergé cette relation à la donnée de masse.

2. Numérique et civilisation

Nous développerons ici un aperçu de l'histoire des systèmes informatiques, pour comprendre leur origine, leur vocation et possiblement leur finalité. A quel besoin a répondu l'invention de ces technologies, et dans quel contexte? Que cela nous apprend-t-il de leur fonction présente et future? Comme nous le verrons, les outils numériques, au premier rang desquels l'ordinateur, ont été inventés pour appréhender l'infinité de l'information qui compose notre réalité. Ils ont permis à l'être humain de la mettre en données, de la stocker, et de la retrouver.

La société de l'information

La société de l'information est en général située par les historiens dans la continuité de la société industrielle. Elle marque l'avènement d'un monde où de nouveaux modes de communication et de partage de l'information opèrent un rôle essentiel ; la numérisation de l'information par l'ordinateur s'inscrit en cela dans la continuité de l'invention de l'imprimerie puis de la presse écrite, en tant que processus de transmission de la connaissance. Or comme nous l'avons vu justement avec l'imprimerie, l'émergence d'une nouvelle technologie n'est pas une explication en soi à l'émergence d'un nouveau mode de société. L'outil est au contraire la réponse à un nouveau besoin suffisamment conséquent pour lui donner corps. Il s'agit de comprendre le terreau civilisationnel et le changement de conception du monde qui a requis l'émergence de la technologie numérique, pour en déterminer la vocation originale et de là sa finalité qui dessine en grande partie le monde d'aujourd'hui et de demain. Picon souligne :

Le rôle clef joué par l'outil numérique ne doit pas toutefois conduire à s'enfermer dans un déterminisme technologique étiqué. [...] [Ce processus historique de transformations] débute en réalité avec

l'émergence d'un nouveau type de société fondée sur l'information à la charnière des dix-neuvième et vingtième siècles. Ainsi que l'ont montré des historiens comme James Beniger, Alfred Chandler et James Cortada, c'est la société de l'information qui a rendu l'ordinateur possible, et non l'inverse. (Picon 2010, 9)

Les nouvelles technologies de la seconde révolution industrielle -développement de l'automobile et de la chimie grâce à l'utilisation du pétrole et de l'électricité-, eurent pour conséquence une hausse majeure de la circulation et de la consommation des marchandises à la fin du XIX^{ème} siècle. On vit alors l'émergence des premières grandes compagnies industrielles ou commerciales comme *General Electric* ou *Sears, Roebuck and Company*. A la manière des sociétés de chemins de fer, la nécessité émergea pour ces entreprises d'organiser leurs activités à très grande échelle. Comment appréhender alors ces nouveaux volumes faramineux d'informations concernant la production, le stockage ou encore la distribution de leurs marchandises? Picon développe :

Toutes les solutions proposées afin de résoudre ce que James Beniger a qualifié de "crise du contrôle" reposent sur la production et l'utilisation de quantités massives de données, que celles-ci soient sous forme de tables de temps, d'inventaires, ou encore de fichiers clients. (Picon 2010, 18)

En parallèle de ces entités industrielles et commerciales, toutes les structures des sociétés occidentales se complexifièrent de la sorte, avec par exemple l'émergence d'une économie de plus en plus tournée vers les services. Les différents niveaux de gestion de la vie publique, à commencer par les Etats, requièrent alors une quantité massive d'informations concernant la population pour être capable d'administrer ces nouveaux besoins dans des domaines comme l'économie, la sécurité ou encore la santé.

De manière symptomatique, l'une des inventions les plus importantes de l'époque, la tableur, qui

utilise l'électricité pour lire les données stockées sur des cartes perforées, est mise au point afin de faire face à ce dernier besoin. L'ingénieur Herman Hollerith la conçoit pour le recensement américain de 1890 qui aurait été impossible à dépouiller sans l'aide de la mécanographie, dans la mesure où le recensement de 1880 était encore en cours de traitement sept ans plus tard. (Picon 2010, 19)

A l'origine de la compagnie *International Business Machines (IBM)*, les historiens considèrent cette invention de Hollerith comme l'ancêtre de l'informatique, autrement dit du traitement automatique de l'information. Car la mécanographie, qui utilise donc un système de cartes perforées, se fonde sur le principe d'une réaction binaire de la machine à l'impulsion électrique, un principe qui est encore aujourd'hui à la base du fonctionnement des outils numériques. Elle s'accompagne dans les bureaux de toutes autres sortes d'inventions comme les machines à écrire ou les enregistreurs, dont la finalité commune est le traitement de données de masse, permettant d'organiser ce nouveau mode de société articulé autour de l'information à très grande échelle.

L'ordinateur au service de la mise en données

L'invention de l'ordinateur au cours de la seconde guerre mondiale est la concrétisation de ce processus historique. A la croisée de multiples préoccupations et influences diverses, il est le résultat de l'assemblage d'un ensemble de technologies très complexes mais dont la finalité commune est l'appréhension des données de masse. Picon présente certains de ces domaines, que nous résumerons ici. D'abord, la mécanisation du calcul : les prémices remontent au XVII^{ème} siècle avec les inventions par Wilhelm Schickhardt et Blaise Pascal de machines à additionner, puis par Gottfried Wilhelm Leibniz avec celle d'une machine à multiplier. On retrouve ainsi des évolutions de ces inventions dans les bureaux au début de la société de l'information. Picon évoque ensuite la logique mathématique et le calcul symbolique, avec des explorations de Leibniz, George Boole, Claude Shannon ou Alan Turing qui contribuent à une réinterprétation du calcul en termes logiques. Il y a ensuite les bénéfices apportés en terme de vitesse de traitement grâce à l'électronique, expérimentée notamment par John Vincent Atanasoff. Le

champ des domaines contribuant à la genèse de l'ordinateur est donc vaste. Mais à nouveau, malgré l'importance de toutes ces considérations technologiques, c'est bien d'un contexte social que va émerger l'outil :

Au sein de cet écheveau complexe de lignées et d'influences, la Seconde guerre mondiale fait figure de catalyseur avec ses besoins massifs de calcul et ses exigences de rapidité. Utilisant quelque 17 468 tubes qui occupent une vaste pièce, l'ENIAC, le premier calculateur électronique de grande envergure, est initialement destiné à répondre au défi posé par le calcul des tables de tirs. (Picon 2010, 27)

Arrivé en réalité trop tard pour participer à ce conflit pour lequel il avait été développé, l'ordinateur va jouer ensuite un rôle central dans la guerre froide, articulée autour de l'émergence des armes atomiques. L'ordinateur coordonne alors des systèmes de plus en plus complexes dans cette course à l'armement, résultant sur un nombre massif d'innovations utiles à sa technologie. Les réseaux de machines se développent et avec eux l'idée d'un monde fini, à la merci d'une destruction de l'homme et complètement encerclé de systèmes satellitaires et de télécommunication. L'emprise sur le monde de la société de l'information était devenue totale. Les systèmes n'ont ensuite eu de cesse de se perfectionner et ont massivement pénétré la société civile ; nous passerons ici sur une présentation détaillée de ces progrès qui sont en cours encore aujourd'hui. Simplement, il est fondamental de noter que cet outil est à la conjonction d'un nombre massif de technologies et procédés nouveaux, se regroupant sous cette même finalité d'appréhender l'information du monde par la donnée de masse, une capacité échappant comme nous l'avons vu au cerveau humain.

Avec l'ordinateur, il semble en réalité possible de mettre en données toute l'infinité des réalités qui nous entourent ; et ceci avec un principe conceptuellement très primitif de suites de 0 et de 1, le système binaire. Toute l'information y est exprimée sous une suite de deux états, vrais -1- ou faux -0- ; cela se traduit pour l'ordinateur dans la réception ou non d'un signal électromagnétique pour chaque état. Ce principe est appliqué à la numérisation de chaque lettre et de tout autre type d'information ; ainsi le mot *architecture* cor-

Code en base				Carac- tère	Signification	Code en base				Carac- tère	Signification
10	8	16	2			10	8	16	2		
0	0	00	0000000	NUL	Null (nul)	64	0100	40	1000000	@	Arobase
1	01	01	0000001	SOH	Start of Heading (début d'en-tête)	65	0101	41	1000001	A	Lettre latine capitale A
2	02	02	0000010	STX	Start of Text (début de texte)	66	0102	42	1000010	B	Lettre latine capitale B
3	03	03	0000011	ETX	End of Text (fin de texte)	67	0103	43	1000011	C	Lettre latine capitale C
4	04	04	0000100	EOT	End of Transmission (fin de transmission)	68	0104	44	1000100	D	Lettre latine capitale D
5	05	05	0000101	ENQ	Enquiry (demande)	69	0105	45	1000101	E	Lettre latine capitale E
6	06	06	0000110	ACK	Acknowledge (accusé de réception)	70	0106	46	1000110	F	Lettre latine capitale F
7	07	07	0000111	BEL	Bell (sonnerie)	71	0107	47	1000111	G	Lettre latine capitale G
8	010	08	0001000	BS	Backspace (espacement arrière/supprimer)	72	0110	48	1001000	H	Lettre latine capitale H
9	011	09	0001001	HT	Horizontal Tab (tabulation horizontale)	73	0111	49	1001001	I	Lettre latine capitale I
10	012	0A	0001010	LF	Line Feed (saut de ligne)	74	0112	4A	1001010	J	Lettre latine capitale J
11	013	0B	0001011	VT	Vertical Tab (tabulation verticale)	75	0113	4B	1001011	K	Lettre latine capitale K
12	014	0C	0001100	FF	Form Feed (saut de page)	76	0114	4C	1001100	L	Lettre latine capitale L
13	015	0D	0001101	CR	Carriage Return (retour chariot/retour à la ligne)	77	0115	4D	1001101	M	Lettre latine capitale M
14	016	0E	0001110	SO	Shift Out (code spécial)	78	0116	4E	1001110	N	Lettre latine capitale N
15	017	0F	0001111	SI	Shift In (code standard)	79	0117	4F	1001111	O	Lettre latine capitale O
16	020	10	0010000	DLE	Data Link Escape (échappement en transmission)	80	0120	50	1010000	P	Lettre latine capitale P
17	021	11	0010001	DC1	Device Control 1 à 4 (contrôle de périphérique)	81	0121	51	1010001	Q	Lettre latine capitale Q
18	022	12	0010010	DC2		82	0122	52	1010010	R	Lettre latine capitale R
19	023	13	0010011	DC3	Device Control 1 à 4 (contrôle de périphérique)	83	0123	53	1010011	S	Lettre latine capitale S
20	024	14	0010100	DC4		84	0124	54	1010100	T	Lettre latine capitale T
21	025	15	0010101	NAK	Negative Acknowledge (accusé de réception négatif)	85	0125	55	1010101	U	Lettre latine capitale U
22	026	16	0010110	SYN	Synchronous Idle (attente synchronisée)	86	0126	56	1010110	V	Lettre latine capitale V
23	027	17	0010111	ETB	End of Transmission Block (fin de bloc de transmission)	87	0127	57	1010111	W	Lettre latine capitale W
24	030	18	0011000	CAN	Cancel (annulation)	88	0130	58	1011000	X	Lettre latine capitale X
25	031	19	0011001	EM	End of Medium (fin de support)	89	0131	59	1011001	Y	Lettre latine capitale Y
26	032	1A	0011010	SUB	Substitute (remplacement)	90	0132	5A	1011010	Z	Lettre latine capitale Z
27	033	1B	0011011	ESC	Escape (échappement)	91	0133	5B	1011011	[	Crochet ouvrant
28	034	1C	0011100	FS	File Separator (séparateur de fichier)	92	0134	5C	1011100	\	Barre oblique inversée
29	035	1D	0011101	GS	Group Separator (séparateur de groupe)	93	0135	5D	1011101	]	Crochet fermant
30	036	1E	0011110	RS	Record Separator (séparateur d'enregistrement)	94	0136	5E	1011110	^	Accent circonflexe (avec chasse)
31	037	1F	0011111	US	Unit Separator (séparateur d'unité)	95	0137	5F	1011111	_	Tiret bas
32	040	20	0100000	SP	Space (espacement)	96	0140	60	1100000	`	Accent grave (avec chasse)
33	041	21	0100001	!	Point d'exclamation	97	0141	61	1100001	a	Lettre latine minuscule a
34	042	22	0100010	*	Guillemet	98	0142	62	1100010	b	Lettre latine minuscule b
35	043	23	0100011	#	Croisillon	99	0143	63	1100011	c	Lettre latine minuscule c
36	044	24	0100100	\$	Dollar	100	0144	64	1100100	d	Lettre latine minuscule d
37	045	25	0100101	%	Pour cent	101	0145	65	1100101	e	Lettre latine minuscule e
38	046	26	0100110	&	Esperluette	102	0146	66	1100110	f	Lettre latine minuscule f
39	047	27	0100111	'	Apostrophe	103	0147	67	1100111	g	Lettre latine minuscule g
40	050	28	0101000	(	Parenthèse ouvrante	104	0150	68	1101000	h	Lettre latine minuscule h
41	051	29	0101001	)	Parenthèse fermante	105	0151	69	1101001	i	Lettre latine minuscule i
42	052	2A	0101010	*	Astérisque	106	0152	6A	1101010	j	Lettre latine minuscule j
43	053	2B	0101011	+	Plus	107	0153	6B	1101011	k	Lettre latine minuscule k
44	054	2C	0101100	,	Virgule	108	0154	6C	1101100	l	Lettre latine minuscule l
45	055	2D	0101101	-	Trait d'union, moins	109	0155	6D	1101101	m	Lettre latine minuscule m
46	056	2E	0101110	.	Point	110	0156	6E	1101110	n	Lettre latine minuscule n
47	057	2F	0101111	/	Barre oblique	111	0157	6F	1101111	o	Lettre latine minuscule o
48	060	30	0110000	0	Chiffre zéro	112	0160	70	1110000	p	Lettre latine minuscule p
49	061	31	0110001	1	Chiffre un	113	0161	71	1110001	q	Lettre latine minuscule q
50	062	32	0110010	2	Chiffre deux	114	0162	72	1110010	r	Lettre latine minuscule r
51	063	33	0110011	3	Chiffre trois	115	0163	73	1110011	s	Lettre latine minuscule s
52	064	34	0110100	4	Chiffre quatre	116	0164	74	1110100	t	Lettre latine minuscule t
53	065	35	0110101	5	Chiffre cinq	117	0165	75	1110101	u	Lettre latine minuscule u
54	066	36	0110110	6	Chiffre six	118	0166	76	1110110	v	Lettre latine minuscule v
55	067	37	0110111	7	Chiffre sept	119	0167	77	1110111	w	Lettre latine minuscule w
56	070	38	0111000	8	Chiffre huit	120	0170	78	1111000	x	Lettre latine minuscule x
57	071	39	0111001	9	Chiffre neuf	121	0171	79	1111001	y	Lettre latine minuscule y
58	072	3A	0111010	:	Deux-points	122	0172	7A	1111010	z	Lettre latine minuscule z
59	073	3B	0111011	;	Point-virgule	123	0173	7B	1111011	{	Accolade ouvrante
60	074	3C	0111100	<	Inférieur	124	0174	7C	1111100	|	Barre verticale
61	075	3D	0111101	=	Égal	125	0175	7D	1111101	}	Accolade fermante
62	076	3E	0111110	>	Supérieur	126	0176	7E	1111110	~	Tilde
63	077	3F	0111111	?	Point d'interrogation	127	0177	7F	1111111	DEL	Delete (effacement)

Fig. 9 : Table des 128 caractères ASCII (Wikipedia)

respond pour l'ordinateur à cette suite de signaux : 01100001 01110010 01100011 01101000 01101001 01110100 01100101 01100011 01110100 01110101 01110010 01100101, comme le montre la figure 9 (Wikipedia 2020). Développons maintenant en exemple le pixel, bien familier des architectes car il est la composante de base des images que nous traitons au quotidien par exemple sur Photoshop. En réalité, le pixel est une information de couleur destinée à être interprétée par l'ordinateur ; c'est-à-dire qu'il n'est rien d'autre que cette suite de 0 et de 1. Voyons comment cela fonctionne : une image numérique est formée d'un ensemble de points que sont ces pixels (de l'anglais *PIC*ture *EL*ement). Ils sont contenus dans un tableau à deux dimensions, hauteur et largeur, qui constitue ce que nous interprétons comme une image. La "définition" de cette image est tout simplement le nombre de pixels constituant le tableau, soit le nombre de lignes par le nombre de colonnes. Chaque pixel de ce tableau transmet à l'ordinateur une information de couleur, dont il existe plusieurs types de codage exprimés en bit par pixel (bpp). Pour cela rappelons d'abord rapidement ce qu'est un bit : dans le code binaire utilisé par l'ordinateur pour enregistrer des informations, 1 bit permet de stocker 2 états (2^1) : 0 ou 1 ; 2 bits permet de stocker 4 états (2^2) : 00, 01, 10 ou 11 ; 4 bits permet de stocker 16 états (2^4) : 0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 1100, 1010, 1001, 0110, 0101, 0011, 1110, 1101, 1011, 0111 ou 1111 ; 8 bits permet de stocker 256 états (2^8), etc. Analysons dès lors le codage de couleurs le plus fréquemment rencontré par les architectes, le RVB. Chaque pixel à l'écran est obtenu par le mélange de trois couches, rouge verte et bleue. Avec un codage RVB 24 bits, nous aurons ainsi 8 bits par couche, soit $2^8 = 256$ états possibles par couche sur chaque pixel, leur superposition permettant d'obtenir toute la gamme des couleurs. L'ordinateur est donc capable d'appréhender dans cette configuration, et cela pourrait être augmenté, 256^3 soit 16'777'216 couleurs. La palette de couleurs de Photoshop nous permet de vérifier ce nombre, avec la possibilité à partir d'un tel pré-réglage de donner à chacune de ces trois couches une valeur de 0 à 255. Observer le poids d'une image est un exercice révélateur pour constater que nous avons bien à faire là à une telle suite de 0 et de 1 : en effet, en termes de stockage, un ensemble de 8 bit équivaut à 1 octet -1024 octets forment un kilo-octet (Ko), et 1024 kilo-octets forment un mega-octet (Mo). Ainsi, si nous enregistrons une image en format non compressé -par exemple .bmp- d'une définition de 1400 par 800, soit un tableau de 1'120'000 pixels, et codée sur 24 bits, alors cette

suite de 0 et de 1 pèsent 3,2 Mo. C'est là tout simplement le résultat de la mise en données de la couleur. (Isdant 2009)

La valeur de la donnée : masse et imprédictibilité

Le sujet de la valeur des données est très complexe et dépasse largement le cadre du monde de la construction ; c'est un bien non tangible et que nous ne sommes pas encore habitués à manipuler. Tentons toutefois d'en approcher le fonctionnement pour soumettre quelques hypothèses. Mayer-Schönberger et Cukier insistent sur un point : les données sont un bien non rival, c'est-à-dire qu'elles peuvent être réutilisées et donc prendre une valeur autre que ce pour quoi elles ont été collectées, *a posteriori*. Dès lors, on ne peut pas prédire à l'avance la valeur d'une donnée, c'est pourquoi les géants de la *tech* en amassent un nombre massif, sans but *a priori*. Par exemple, l'objectif d'une firme qui conserve vos données de localisation n'est pas de connaître vos déplacements personnels pour vous "espionner". Son intérêt se trouve dans la masse : en collectant les déplacements d'un nombre significatif de personnes, elle pourra vendre cet ensemble de données par exemple à une société qui chercherait où placer ses panneaux publicitaires, ou à une société qui souhaiterait développer un GPS "malin", capable de détecter les parcours les moins embouteillés. De la même manière, si je conçois un projet d'hôtel à Lausanne au quartier du Flon, je pourrais être intéressé à acheter un ensemble de données m'indiquant si les touristes s'y déplacent plutôt seuls, en couple ou en famille, et s'ils prennent le petit-déjeuner plutôt sur place ou dans les boulangeries avoisinantes, ce qui me conseillerait sur la conception des chambres ou de la salle à manger. En procédant de la sorte, j'aurais une utilisation *a posteriori* d'un ensemble de données collectées depuis des années par la société qui me vendrait cet ensemble.

La valeur des données se déplace de leur utilisation initiale vers ses futures utilisations potentielles, un phénomène qui a un impact sérieux, notamment sur la manière dont les entreprises évaluent les données en leur possession et aussi sur l'autorisation d'accès qu'elles y donnent. [...] A l'ère des big data, *toutes* les données seront considérées comme précieuses par définition. [...]

La vraie valeur des données dépasse largement

celle qui a été extraite lors de leur première utilisation. (Mayer-Schönberger et Cukier 2014, 123-125)

Or, dans notre discipline de l'architecture, cela pose de véritables interrogations. Ce phénomène rend en effet impossible l'évaluation de la valeur de génération d'une donnée. C'est très perturbant dans notre cas, puisqu'en concevant des projets, nous créons de la donnée. Valente développe :

La maquette numérique 3D ne se limite pas à offrir une réponse plus satisfaisante que la 2D pour les besoins de transcription de nos idées ; elle devient également le socle d'une infinité de données sémantiques créant le support d'une intelligence embarquée. (Valente 2019, 9-10)

En sachant que des algorithmes sont actuellement développés pour interpréter de la donnée architecturale (par exemple des plans, nous le développerons plus bas), nous pouvons formuler quelques hypothèses dans ce sens. Prenons le cas d'un ouvrage assez connu des architectes suisses : le *Floor Plan Manual*¹ du bureau des bâtiments de la ville de Zurich. Ce recueil à succès compile plus de 1200 plans d'étage de projets résidentiels primés dans la ville entre 1999 et 2015. Un tableau très utile en fin d'ouvrage classe les projets par nombre d'appartements desservis par circulation, par orientation ou encore par morphologie du volume. Une telle base de données, au regard des intelligences artificielles qui se développent aujourd'hui, avec ces algorithmes entraînés peu à peu à déchiffrer des plans d'architectes, constitue un véritable "trésor de guerre". Dans un autre registre, un manuel comme le *Neufert*², compilation massive de dimensions se rapportant à l'utilisation de l'espace par le corps humain, pourrait voir un jour ses données nourrir une intelligence artificielle. En résumé, si l'architecture est vraiment destinée à être autant rationnelle que l'envisageait Jean-Nicolas-Louis Durand il y a deux siècles, alors nous pouvons rapidement imaginer une intelligence artificielle capable

1 Amt für Hochbauten Stadt Zürich, *Floor Plan Manual: Non-profit Housing*, Hochparterre (Zurich, 2017).

2 Ernst Neufert, *Neufert : les éléments des projets de construction*, 11e édition revue et augmentée (Paris: Dunod, 2014).

d'en mettre en données les paramètres puis d'en concevoir les espaces.

De la même manière, dans le cas du BIM tel qu'utilisé aujourd'hui, le problème se formule comme tel : l'architecte conçoit non plus en formes abstraites, mais avec des objets renseignés. Imaginons une plate-forme *cloud* où seraient enregistrées toutes les maquettes numériques de tous les bureaux d'architectes. Nous aurions là une base de données pharaonique dont la valeur combinée des données serait invraisemblable. Car les données font valeur non en tant que telles, mais en tant que masse et en tant que bien réutilisable. Tout un champs d'interrogations juridiques s'ouvre ainsi pour le monde de la construction, par exemple sur la propriété des données et leur réutilisation ou sur la propriété intellectuelle de la génération de données architecturales.

Collecte et IoT

Dès lors, puisque sa valeur est intrinsèquement imprévisible, n'importe quelle donnée représente potentiellement une mine d'or à retardement ; parallèlement, plus l'ensemble est massif, plus il aura d'intérêt. Ces deux phénomènes expliquent la course à la collecte, massive et aveugle des grandes compagnies de la *tech*. Plus leur récolte est grande, plus il sera légitime de se tourner vers elles pour acquérir un ensemble de données. Et plus le champ couvert est vaste, plus les possibilités de revente sont nombreuses. Il arrive ainsi que des applications de téléphone exigent dans leur processus d'installation, de pouvoir accéder à des données improbables et non nécessaires à leur bon fonctionnement, comme à notre liste de contacts ou notre localisation : la collecte est hasardeuse mais riche de potentiel. Dans le cas d'un bâtiment, il faut admettre que la collecte d'une donnée a pour but premier d'améliorer son fonctionnement propre : par exemple des courbes de température dans des pièces nous aviseront sur un réglage de chauffage plus adéquat. Toutefois, cette même donnée ajoutée à celle de pléthore d'autres bâtiments pourrait profiter à la planification d'une future construction, en la corrélant par exemple avec les volumes, les matériaux ou les surfaces vitrées des espaces chauffés. Une telle méthode combinerait donc des données de type BIM générées à la conception du bâtiment, et des données de type IoT générées à son utilisation, comme l'explique Valente :

Le BIM repose sur une base de données 3D et un processus collaboratif. Ce partage de données permet de nouvelles créations de valeur dont l'optimisation repose sur une approche globale « en cycle de vie ». La gestion numérique des ouvrages reposant sur des maquettes 3D qualifiées de "Digital Twins" ouvre la porte à la quantification de nos environnements. L'IoT (Internet des objets) par ses capteurs et actionneurs accessibles en temps quasi-réel, révèle des phénomènes méconnus. Instrumenter notre environnement permet de nouvelles perceptions et capacités d'analyse, de modélisation et de prédiction. (Valente 2019, 25)

Il existe aujourd'hui de nombreuses recherches sur ces *smart buildings*. A l'EPFL par exemple, le bâtiment de mécanique, dessiné par l'architecte Dominique Perrault, fonctionne comme un véritable laboratoire géant, terrain d'expérimentation pour des chercheurs de l'EPFL qui y étudient, grâce à des capteurs, le déplacement des personnes à l'intérieur des locaux, mais aussi l'optimisation de la gestion énergétique de l'édifice (Pessina s. d.). Dans cette optique, les chercheurs du Laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction -IMAC- dirigé par le Professeur Ian Smith, ont mis au point récemment des capteurs répartis sur des planchers, capables d'enregistrer les vibrations du sol provoquées par les pas. Cette méthode pourrait notamment être utilisée pour l'aide d'urgence dans les maisons de retraite, la sécurité dans les banques, ou la gestion énergétique des bâtiments (Jollien 2020). Avec de telles technologies, nous voyons donc que des capteurs IoT pourront intégrer n'importe quel élément de nos constructions. De telles données sur le déplacement des gens à l'intérieur des espaces, au-delà du fonctionnement propre au bâtiment, pourraient nous servir en tant qu'architectes à identifier de meilleurs schémas de circulation à l'intérieur de nos futurs projets. Voyons donc comment fonctionnerait un tel recours aux données de masse.

Big Data Logic

L'expression fait à nouveau référence à Mario Carpo dans *The Second Digital Turn : Design beyond Intelligence*, en antithèse à la *small data*

logic développée plus haut. L'auteur identifie donc le cœur du tournant numérique dans notre relation à la donnée. L'esprit humain est incapable de composer avec une information trop importante, d'où le développement d'abstractions comme l'alphabet ou la mesure du temps : ainsi il est intéressant de noter la proximité du nombre de lettres et d'heures, vingt-six et vingt-quatre, et que l'on apprend l'alphabet comme l'on apprend à compter. De la même manière, combien de couleurs sommes-nous capables de nommer et de nous représenter à l'esprit? Aussi entre vingt et trente, pourtant le champ du spectre visible est indéfiniment divisible. Combien d'accords de base existe-t-il en musique, en comptant les majeurs et les mineurs? Vingt-huit. Notre cerveau a besoin de compresser et trier l'information. Prenons l'alphabet : nous avons réduit l'infinité des sons produits par nos bouches à vingt-six lettres, en les combinant ensuite pour élaborer des mots, que nous classons enfin dans un dictionnaire pour mieux les retrouver. Un ordinateur en revanche peut concevoir l'information dans toute sa globalité et récupérer une donnée particulière quasi instantanément parmi une masse quasi infinie et désordonnée. Cette capacité est la clef de voûte de la *big data logic*. L'exemple phare dévoilé par Carpo est le courrier électronique. Un humain qui reçoit de la paperasse administrative physique va classer ces différentes lettres, par exemple par thèmes (assurances, téléphonie, impôts, etc), puis par émetteur, puis par date. Ce système lui permettra de retrouver dans son classeur une lettre particulière, car il n'aurait évidemment pas la capacité intellectuelle de retenir la place de chacune d'elles dans un porte-documents désordonné, d'où la terminologie classeur. Dans la problématique similaire d'une boîte de courrier électronique -on parle de boîte et non plus de classeur-, l'ordinateur est lui capable avec une simple recherche de retrouver instantanément n'importe lequel des courriers dans la boîte laissée en vrac ; nul besoin de classer. Cette quasi instantanéité d'exécution dans la recherche d'un élément ciblé est donc le phénomène fondateur de la *big data logic*. Elle fait s'estomper à la fois la nécessité d'ordre et d'abstraction de la donnée. Pourquoi classer des typologies lorsqu'une simple barre de recherche avancée permet de trouver la configuration idéale pour son projet de logement quatre pièces orientés est-ouest avec séjour en double-hauteur? Pourquoi établir des lois abstraites qui prétendent régir le dimensionnement de toute poutre lorsque l'ordinateur peut retrouver instantanément pour chaque poutre particulière une poutre similaire ayant existé plus tôt et qui nous donnera l'information

nécessaire? Carpo développe cet exemple à propos des formules utilisées par les ingénieurs :

These formulas, or rules, derive from regularities detected in many actual beams that broke in the past and predict how most beams will break in similar conditions in the future.

However, [in an ideal big data world], the experimental breaking of every beam that ever broke, could be notated, measured, and recorded. In that case, for most futur events we are trying to predict, we could expect to find and retrieve a precedent, and the account of that past event would allow us to predict a forthcoming one - without any mathematical formula, function, or calculation. (Carpo 2017, 38)

Nous pourrions donc baser nos conceptions architecturales sur une récolte de données relatives à des bâtiments existants, comme avec notre exemple du déplacement de personnes dans le chapitre précédent. Mais en réalité, nous n'avons même pas besoin de nous tourner vers le passé réel, comme l'a exploré précisément à ce propos le BIM *Manager* et *Data scientist* Ahmed Hamieh dans sa thèse de doctorat *Planification automatique de chemins à l'intérieur de bâtiments basée sur un modèle BIM* (2018). Car l'ordinateur, pour reprendre l'exemple de Carpo, peut également simuler l'existence d'une infinité de ces poutres aux dimensions différentes et feindre leur comportement structurel, avant d'en sélectionner la plus optimale. Cette hypothèse signe la fin de la science moderne fondée sur la capacité d'abstraction de l'esprit humain.

Un précédent : l'imprimerie et l'obsolescence de la mémoire

Dans cette obsolescence de la capacité d'abstraction fondatrice de nos sciences modernes, nous pourrions voir une simplification du processus de raisonnement, et donc une certaine contradiction avec l'idée de progrès véhiculée par les technologies numériques - toujours plus haut, toujours plus fort, toujours plus complexe. En réalité, c'est peut-être l'inverse qui pourrait se produire. Ainsi Mumford avait déjà perçu il y a bientôt un siècle que ce flot d'informations des nouvelles technologies menaçerait le recours de l'esprit à nos techniques d'abstractions

: « Contrebalançant la commodité des communications instantanées, les grandes abstractions, telles que l'écriture, la lecture, le dessin, les capacités de réflexion et d'action délibérée se trouveront affaiblies. » (Mumford [1934] 2015, 246). Tournons nous à nouveau vers l'histoire pour comprendre ce paradoxe : l'émergence de l'imprimerie nous a déjà enseigné à quel point l'adoption massive d'une technologie provoquait l'effondrement de la capacité humaine correspondant à l'objectif du nouvel outil : la transmission écrite démocratisée par l'imprimerie a fait s'effondrer la transmission orale, et par extension la formidable capacité à retenir de mémoire des pans entiers de savoir ; par exemple le savoir architectural, transmis oralement pendant des siècles, et ce depuis l'Antiquité déjà comme le soulignait Carpo dans *Architecture in the Age of Printing: Orality, Writing, Typography, and Printed Images in the History of Architectural Theory* :

Vitruvius declares that he too has tried to be brief so that his writings may be the more easily memorized [...] Libraries existed in the ancient world, but normally, before Gutenberg, a scholar did not have at his disposition more than a very limited number of manuscripts» (Carpo 1998, 24-25)

Dès lors on apprenait par coeur l'essentiel du savoir. Plus facilement transmissible, par rapport à une maquette, la parole avait aussi l'avantage d'être plus générique pour édicter des principes dans un traité ; aussi plus secrète dans un monde médiéval où les constructions étaient menées par des guildes et des maîtres-maçons, soucieux de conserver leurs secrets professionnels.

What we find in medieval Europe is a culture that necessarily privileged verbal discourse over images when it came to transmitting technical knowledge. This context appropriated a normative architectural theory founded on a corpus of geometric rules that were transmitted orally and kept secret by initiates. (Carpo 1998, 36)

Ce phénomène de la transmission orale n'était évidemment pas restreint aux seules disciplines de la construction. Toute

la richesse structurelle de la poésie par exemple (vers, rimes), qui avait précisément pour but d'en faciliter la mémorisation, nous témoigne de cette tradition passée, rendue possible par une capacité mentale qui s'est aujourd'hui effondrée dans nos sociétés modernes. Car l'imprimerie nous a offert un outil de transmission du savoir plus efficace, rendant cette capacité humaine obsolète. Qui, aujourd'hui, est capable de réciter une narration de plus d'une minute? Plus grand monde, et les troubadours ont d'ailleurs disparu. Ainsi il ne viendrait à l'idée d'aucun architecte d'apprendre par cœur le contenu du *Neufert*, car le manuel se trouve à disposition. Appliquons maintenant ce constat à la *big data logic* et à l'architecture : qui, demain, sera mandaté pour abstraire l'espace par le dessin, alors que la société aura d'autres vecteurs plus efficaces? Déjà avec les outils actuels, nous n'avons par exemple plus la nécessité de savoir faire un relevé à la main, ni de projeter des ombres sur une façade en élévation. Demain, comme nous le verrons plus loin, nous n'aurons plus besoin de dessiner des plans masse ou des typologies, car la machine nous en dévoilera les configurations optimales. Tous ces savoir-faire se perdront peu à peu à mesure que les outils big data optimiseront nos processus. La réponse sonne donc dramatiquement le crépuscule de la figure actuelle de l'architecte, troubadour malheureux, parmi d'autres, du tsunami *big data logic*.

The Style of Many Hands

Nous avons établi précédemment la construction de la figure de l'architecte à la convergence de deux phénomènes : l'émergence du concept d'auteur chez les humanistes et la capacité d'abstraire l'espace par sa représentation en dessin. Dans un monde de big data, avançons le clairement, le second pilier a donc vocation à s'effondrer. Reste que le premier n'est pas loin d'en être à son apogée : notre société occidentale est en effet plus que jamais centrée sur l'individu, et tout prête à surpasser sa mort par ses accomplissements : les artistes sont glorifiés, mais maintenant aussi les sportifs et tout autre type de célébrités. En architecture, la starification a d'ailleurs atteint son paroxysme, alors que des prix sont distribués à tout va pour récompenser et faire passer à la postérité les meilleurs d'entre nous. On organise des *Gaudí tours* à Barcelone, tandis que toutes les métropoles s'arrachent les projets de star-architectes. La question du style a d'ailleurs pris une part prépondérante dans la discipline. Comment donc concilier l'effondrement et l'apogée respectives de ces deux piliers historiques de notre métier

d'architecte?

Dans *The Second Digital Turn : Design beyond Intelligence*, Mario Carpo n'est en réalité pas plus optimiste pour la pérennité du paradigme d'auteur, même s'il convient que les architectes se battent sans doute pour ne pas l'abandonner. Il livre ainsi cette hypothèse : dans le monde numérique, la notion d'auteur n'est pas aussi évidente que dans le monde physique. En effet, les réalisations du monde numérique sont sujettes à une évolution permanente, et ne relèvent jamais d'états finis. Les mises à jour sont invariablement possibles -prenons l'exemple des décors d'un jeu vidéo en ligne par exemple- alors que dans le monde physique il s'agit d'arrêter un design définitif avant de le matérialiser -cela vaut autant pour un édifice, qu'un objet ou une peinture. Un deuxième aspect est la multitude des auteurs : un article wikipedia par exemple, ou un logiciel open-source comme qgis, sont l'œuvre d'une infinité d'intervenants inconnus qui ont peu à peu créé ensemble ces réalisations numériques. Carpo appelle ce phénomène le *style of many hands*, et il se trouve que le monde physique et en particulier l'architecture ne sont en réalité pas à l'abri d'une telle évolution. Et ce précisément avec l'émergence du BIM, dont la collaboration est un principe fondateur :

The spirit of BIM posits that all technical agents participating in design and construction should collaborate using a shareable information model throughout all stages of a project, and that design decisions should be agreed upon by all parties (clients, designers, and contractors). In such instances, architectural authorship might take the form of some consensual "leadership", curiously resembling the organization of labor that prevailed in late-medieval building sites before the rise of Alberti's modern authorial paradigm. (Carpo 2017, 140-141)

Corrélations et inexplicabilité

Au-delà de notre discipline et de manière bien plus globale, la véritable rupture épistémologique du recours aux données de masse repose sur l'avènement de prises de décision par corrélation, comme l'avait initié l'officier Maury avec ses cartes de navigation. Près d'un siècle et demi plus tard, les géants du web s'appuyèrent aux débuts d'internet

sur cette même méthode pour bâtir leurs empires et séduire des millions d'utilisateurs. Ils savent désormais nous recommander de manière quasi parfaite la prochaine vidéo, musique, livre ou vêtement, et ceci en comparant simplement nos comportements à ceux de milliers d'autres consommateurs. Cette méthode résulte d'une véritable stratégie comme le révèlent Mayer-Schönberger et Cukier dans un récit sur les débuts de la firme Amazon : appuyant à l'origine ses recommandations de livres sur des comptes rendus rédigés par une équipe éditoriale, elle expérimenta une nouvelle méthode, fondée sur la corrélation des masses de données qu'elle récoltait à mesure que ses visiteurs cliquaient à droite ou à gauche ; ce système se révéla rapidement bien plus efficace dans sa capacité à provoquer des achats supplémentaires. Alors, même si rien ne permettait d'expliquer pourquoi les données recommandaient tel livre à la suite de tel autre, la firme adopta rapidement cette méthode au détriment de ses collaborateurs humains "raisonnant":

En connaître la raison [d'une recommandation] réserverait sans doute d'agréables surprises, mais ne présenterait aucun intérêt pour stimuler les ventes. [...] Les big data démontrent qu'il existe une autre démarche, plus pragmatique à certains égards. Les systèmes innovants de recommandation mis au point par Amazon ont fait ressortir des corrélations efficaces sans en connaître les causes sous-jacentes. Savoir *quoi*, et non *pourquoi*, est largement suffisant. (Mayer-Schönberger et Cukier 2014, 67-68)

Les décisions fondées sur la donnée de masse sont donc intrinsèquement inexplicables. Aussi, ce n'est pas par hasard si cette émergence de la corrélation est due pour une part prépondérante aux géants d'internet, qui l'adoptèrent pour augmenter leur rentabilité. Car l'entrepreneuriat est un domaine où même si les décisions ne s'expliquent pas, la nécessité de croître économiquement n'en appelle qu'à l'efficacité, incitant dès lors à ériger les données en décideurs absolus -or, nous verrons que dans d'autres disciplines, la disparition du lien de causalité pose un débat fondamental. Cette *big data logic* est ainsi en train de s'imposer au monde dans le sillage des géants numériques, à mesure de leur inexorable accroissement. Dans le cas de l'architecture,

imaginons un instant ériger un édifice dont la structure aurait été générée par corrélation de données simulées par un ordinateur. Les paramètres nous échapperaient ainsi complètement, et l'équilibre de cette structure serait tout à fait inexplicable par nos lois scientifiques. Quid de la responsabilité d'un éventuel effondrement? L'architecte et *Data scientist* Stanislas Chaillou formule cette nouvelle condition de l'inexplicabilité, dans sa thèse sur l'intelligence artificielle en architecture :

AI lets the computer create intermediary parameters, from information either collected from the data or transmitted by the user. Once the "learning phase" achieved, the machine can generate solutions, not simply answering a set of predefined parameters, but creating results emulating the statistical distribution of the information shown to him during the learning phase. This concept is at the core of the paradigm shift brought by AI. The partial independence of the machine to build its own understanding of the problem, coupled with its ability to digest the complexity of a set of examples, turns upside down the premise of Parametricism. Since not all rules & parameters are declared upfront explicitly by the user, the machine can unexpectedly unveil underlying phenomena and even try to emulate them. It is a quantum leap from the world of heuristics (rule-based decision making) to the world of statistics (stochastic-based decision making). (Chaillou 2019, 16)

Nous présenterons plus loin le fonctionnement de cet apprentissage par la machine. Mais nous saisissons bien là la véritable rupture épistémologique qui nous attend au sein même de notre discipline architecturale. Comment accepter d'ériger une structure proposée par une IA sans pouvoir en expliquer, et donc garantir, son équilibre? En nous tournant vers l'histoire, nous pourrions trouver un précédent révélateur. En effet, avant l'ère des abstractions, la solidité d'une structure était garantie par sa proportion ; les hommes construisaient des édifices aux fondations massives et à l'allure compacte, avec des principes fondés notamment sur des systèmes d'ordres.

C'est par une abstraction que des formes modernes d'architecture se sont développées, entraînant un rapport nouveau à la solidité : plus précisément grâce à l'apparition des calculs et dessins d'ingénieurs, théorisés autour du concept de circulation des forces à l'intérieur des structures, un principe totalement abstrait. Les structures n'étaient plus solides par la proportion, mais par la science ; ces deux époques distinctes eurent donc deux manières propres d'approcher la "vérité" de la solidité constructive, toutes deux valables l'une autant que l'autre (Picon 2019). Ainsi la clé de cette rupture épistémologique, en architecture, se trouve avant tout dans notre rapport sensitif à la réalité et non à la légitimité de la conception en tant que telle. Car en vérité, un visiteur temporel parachuté du monde romain à notre époque ne ferait pas plus confiance à un pont suspendu qu'à un pont généré par une IA. Car son rapport à la notion de solidité trouvait son sens dans la proportion de l'édifice. Après l'ère de l'abstraction qui la plaçait dans l'analyse scientifique, à nous maintenant de placer cette confiance dans la donnée de masse. Cet exemple est extrême car il fait appel à des sensations de sécurité -et à terme dans la pratique à des considérations sur la responsabilité. Mais en réalité, la conception par la donnée de masse et sa part d'inexplicabilité impacteront de la même manière notre rapport à toutes les composantes de l'architecture, des typologies aux matériaux.

Critique de la datafication: sobriété, souveraineté et raison numériques

Du recensement américain de 1890 aux outils d'intelligence artificielle en développement, la finalité est toujours la même : extraire la connaissance de la donnée de masse. Cependant, si le phénomène regorge de potentiels, il doit aussi s'accompagner d'une conscientisation et d'un regard critique. Observons en quelques pistes. Le rythme effréné du progrès technologique devance aujourd'hui celui de nos propres existences. Si bien que dans de nombreux domaines, les aînés sont dépassés par les nouveaux outils et processus adoptés par les générations suivantes. Je l'ai moi-même perçu à l'échelle de quelques années à l'EPFL, constatant que les volées suivantes bénéficiaient année après année de l'optimisation des logiciels pour être plus efficaces, sur les rendus par exemple. Cela pose des questions sociales évidentes dans la pratique, comme la formation continue en milieu professionnel. Plus conceptuellement, la datafication est une évolution si radicale pour nos sociétés, qu'il s'agit d'écouter les rares voix critiques sur le phénomène

; ceci alors même qu'il a court et qu'il est donc difficile de poser des diagnostics relativement pérennes. Tentons tout de même de présenter ici ces quelques pistes de réflexion : la sobriété, la souveraineté et la raison numériques.

En France, le principe de sobriété numérique a été développé depuis 2008 par la communauté GreenIT.fr ; elle alarme sur l'empreinte environnementale du numérique et vise à la réduire par des services et des usages plus modérés. Dans son rapport de 2019 *Empreinte environnementale du numérique mondial*, cette association préconise par exemple la réduction des objets connectés et des stockages de données, ou l'augmentation de la durée de vie des appareils. Alors que beaucoup se figurent le progrès tel que la technologie se solutionne elle-même -vers plus de besoins, mais avec des capacités sans cesse renouvelées de compression et d'optimisation des données-, la démarche de sobriété numérique s'inscrit plutôt dans un mouvement global de théorisation de la décroissance ; ses partisans militent pour une société plus sobre et de *low-tech* en réponse aux enjeux de sortie des énergies carbonées, une transition essentielle pour freiner le réchauffement climatique mais aussi inéluctable face à la raréfaction du pétrole et donc de l'énergie. Ainsi en 2018, le groupe de réflexion *The Shift Project*, bien connu du milieu et présidé par l'ingénieur et spécialiste de l'énergie et du climat Jean-Marc Jancovici, a sorti lui-aussi un rapport nommé *Pour une sobriété numérique*, sous la plume de son groupe de travail «Lean ICT» dirigé par Hugues Ferreboeuf. Le numérique serait responsable selon ce rapport de 3,7% des émissions de CO₂ mondiales en 2018. Leurs auteurs veulent conscientiser la population sur cet important bilan carbone du numérique, tant pour les appareils -énergie grise et utilisation-, que pour l'exploitation des données. Si le besoin en électricité est évident au branchement d'un ordinateur à une prise électrique, il faut aussi prendre en compte le bilan des plateformes dites de *cloud computing* : hébergements de photos ou documents, services de messagerie en ligne, réseaux sociaux, et même tout simplement les sites internet sont en fait de gigantesques plateformes d'hébergements de données sollicitables sur internet à tout moment. Cela veut dire dans la réalité physique que ces données sont stockées dans des *data centers* : soit un ensemble pharaonique de serveurs allumés en continu, capables ainsi de répondre à tout moment à la requête de l'utilisateur. Le big data a donc une réalité tangible et il est trompeur de la conceptualiser comme un nuage. La tendance à la *cloudification*

massive de ces services est ainsi un problème majeur car en quelque sorte elle vise à dispenser l'utilisateur de sa responsabilité face à la donnée en en cachant sous le tapis les dépendances relatives -création, stockage, ou flux continu : nous apprenons aux enfants à éteindre la lumière, le diagnostic devrait être tout à fait similaire. L'architecture est particulièrement concernée car génératrice de volumes massifs de données. Typiquement, des plateformes proposent désormais de faire tourner certains services sur des serveurs en ligne -V-Ray par exemple pour des calculs de rendus visuels-, ou sont carrément complètement basées sur le cloud (SimScale par exemple, plateforme de simulations structurelles et fluides). Si bien que l'énergie de conception de ces données nous paraît tout à fait volatile, alors qu'en réalité elle aura été très importante. En cela le BIM pose aussi des questions fondamentales à son déploiement, car la tendance est d'aller vers la mise en ligne des maquettes numériques pour permettre la collaboration instantanée des différents acteurs du projet. Or le volume de ces fichiers est très important. Peut-on se permettre d'aller vers ce tout-en-ligne en espérant une optimisation de la performance énergétique de ces services? Ou doit-on dès à présent envisager une sobriété numérique -par exemple dans l'archivage des projets sur des serveurs physiques et déconnectés? Il en va de la responsabilité environnementale individuelle mais aussi de la crédibilité des partisans du BIM de manière générale.

Deuxièmement, la souveraineté numérique, qui incarne peut-être l'enjeu le plus connu du grand public actuellement, car elle touche aux questions de sécurité des Etats et de manipulation politique des données personnelles. Le sujet a été très médiatisé avec les affaires Snowden ou *Cambridge Analytica*, puis encore plus en 2020 avec les débats sur la récolte de données médicales et sociales par les applications de traçage du COVID-19, la limitation de la firme chinoise Huawei sur le déploiement de la 5G en Europe, ou encore avec le documentaire à succès de Netflix *Derrière nos écrans de fumée (The Social Dilemma)* (Orlowski 2020). Le souverainisme numérique dénonce un capitalisme de surveillance et de manipulation de masse des comportements par l'exploitation des données personnelles ; cette idée soulève le caractère idéologique sous-jacent du rapport qu'entretient une société avec l'utilisation des données et par conséquent la nécessité pour un état ou un individu d'en disposer souverainement. La question est centrale en Europe, qui s'est construite philosophiquement sur les libertés individuelles mais qui est pour l'instant asservie numérique-

ment à d'autres régions du monde, principalement aux Etats-Unis pour les services et à l'Asie de l'Est pour les produits. Ainsi le 16 juillet 2020, la Cour de Justice de l'Union Européenne (CJUE) a annulé la décision d'adéquation de la Commission européenne qui validait depuis août 2016 le Bouclier de Protection des Données UE-États-Unis ; autrement connu sous le nom de *Privacy Shield*, ce mécanisme d'auto-certification pour les sociétés établies aux États-Unis d'Amérique a donc été rejugée par la CJUE comme garantie juridique insuffisante pour transmettre des données personnelles de l'Union Européenne vers les États-Unis (CNIL s. d.). Ce même été, l'Etat français a décidé d'imposer de lourdes restrictions à Huawei quant au déploiement de la 5G sur son territoire. La prise de conscience est donc à l'œuvre sur le Vieux Continent. Dans cette optique, le BIM soulève le débat de la numérisation de l'habitat : les capteurs qui intègrent peu à peu nos espaces se révéleront encore bien plus intrusifs que nos écrans et la question se pose de la destination, possession ou réutilisation de ces données. Beaucoup s'en dédouant par ce sophisme vieux comme la collecte des données : « je n'ai rien à cacher ». Or comme nous l'avons vu, cet argument n'est pas recevable et est même un leurre car l'intérêt de la donnée ne réside pas dans l'individu particulier, mais bien dans la masse. Si les Etats souhaitent aujourd'hui politiser et réguler cette collecte de données, ce n'est pas seulement par un idéal de protection de la sphère privée de leurs concitoyens -historiquement comme nous l'avons vu, les administrations publiques sont elles aussi à l'origine du processus- ; c'est plutôt qu'ils ont réalisé le danger de la manipulation politique par la donnée de masse.

Cela nous mène vers une dernière critique, celle de la raison numérique. Moins médiatisé, cet enjeu est pourtant encore plus essentiel et global que le débat précédent qui se limite aux données à caractère personnel -car toutes ne sont pas forcément relatives à la vie privée, certaines concernent des machines ou des éléments naturels par exemple. Cette critique vise donc à remettre en cause toute la présentation en amont sur la *big data logic* : une vérité peut-elle être énoncée par une masse de données? Peut-on faire confiance aux ordinateurs? A qui attribuer la responsabilité de l'effondrement d'une structure proposée par une IA? A quelle éthique répondront des systèmes d'armes létales autonomes? L'écrivain et philosophe technocritique Eric Sardin est l'un des rares intellectuels français à penser ce changement de civilisation dessiné par la numérisation, et à remettre

en question la pertinence-même de l'adoption des outils big data : leur raison nous échappe. Pire, elle n'a pas de fondations solides et est manipulable dans son essence propre : car pour énoncer une vérité appuyée sur une corrélation, un choix s'opère sur les données prises en compte. Prenons notre exemple cartographique sur les valeurs de charge du trafic routier (fig. 8). Nous pourrions en conclure que très peu de marchandises transitent par les Alpes Suisses entre le sud et le nord du pays. L'ensemble de données est vérifiable, mais le raisonnement omet par exemple le fait que la Suisse a adopté une stratégie ferroviaire pour le transport des marchandises ; d'où l'apparence d'un trafic très réduit entre le Tessin et le plateau alémanique, qui est en réalité un axe majeur du transport européen de marchandises. Cela démontre que les big data se rapprochent de l'absolu en tant qu'ensemble, mais pas de la vérité absolue en tant que corrélation, car il y aura toujours des conditions omises, volontairement ou non. Dès lors même si les données sont avérées, le choix d'un ensemble de données plutôt qu'un autre relève d'une décision, et donc la raison par la donnée de masse est une raison utilitariste, là où tout l'intérêt de la raison par l'abstraction était d'extraire une vérité absolue et reposant sur des postulats, ouvrant la voie à la contradiction et à la vérification. Dans son ouvrage *La vie algorithmique: critique de la raison numérique* (2015), Eric Sadin livre ainsi ce regard extrêmement critique sur la raisonnement par corrélation de données de masse, en forme de sonnette d'alarme :

C'est la faculté herméneutique proprement humaine qui est peu à peu repoussée ou sacrifiée dans nombre de cas, s'abandonnant à l'évidence du constat avéré et inflexible. *Puissance d'impact* adossée à son « prestige mathématique », qui n'appelle pas la contradiction, l'enquête minutieuse, la recherche pas à pas, l'effort consubstantiel propre à tout processus de discernement, qui de surcroît recouvre par l'apparence de sa *véracité* un *pouvoir performatif*.

Car l'événement épistémologique majeur qu'il faut saisir -décrypter plutôt- au-delà de ces attributs renvoie au fait que tout résultat d'équation est aussitôt appelé à être *exploité* sous de multiples formes. Modalité d'appréhension à visée exclusivement *utili-*

taire, qui transforme chaque circonstance en *graphe capitalisable*, ne laissant jamais en repos les états de connaissance, les situant comme la base hautement informée d'actions à entreprendre, inspirées et garanties par la puissance de définition prouvée des processeurs et des algorithmes. « Néo-utilitarisme » qui renoue avec la philosophie utilitariste de Jeremy Bentham, concepteur du dispositif architectural pénitentiaire à visibilité intégrale, le Panoptique que la priorité accordée au *temps réel* renforce et universalise, l'érigant comme l'acmé d'une relation *continuellement fonctionnelle* entretenue à un environnement se manifestant sans point aveugle *au fil* de l'expérience individuelle et collective. (Sadin 2015, 104-105)

Voilà donc quelques arguments pour s'obliger à considérer le phénomène big data et éviter la politique de l'autruche. Car mépriser ses potentiels, c'est aussi négliger ses risques. Voyons désormais comment le BIM incarne cette mutation dans notre discipline.

3. Building Information Modeling

Nous allons désormais présenter le déploiement actuel du BIM, avant de livrer quelques hypothèses sur son devenir, au regard de l'analyse historique effectuée en préambule. Enfin, nous concluons ce chapitre avec les enjeux de la mise en données du temps dans le BIM, qui signent le retour au premier plan de cette dimension dans le projet architectural.

BIM, la mise en données du projet de construction

L'acronyme BIM, dont la prononciation évoque à nos oreilles comme un bruit d'explosion, laisserait croire qu'il n'a été choisi que pour assumer son caractère révolutionnaire. Or, ces trois lettres sont en réalité pleines de sens et très révélatrices du phénomène. Le B signifie *Building*, ce qui se réfère en anglais à tout type de construction -bâtiments, infrastructures, aménagements ou autres-, mais aussi à l'acte de construire. I désigne *Information*, soit la donnée intégrée, vérifiée, validée et échangeable. Enfin M, comme nous l'avons vu en introduc-

tion, peut prendre trois sens : *Modeling* pour modélisation d'objets et d'informations, *Model* pour maquette numérique exploitable, et *Management* pour mise en place de processus d'organisation. La première évolution qui frappe, lorsque l'on prend en main un logiciel BIM, est la composition par éléments. L'architecte ne se sert alors plus d'abstractions géométriques -soit des lignes comme sur Autocad, ou des volumes comme sur Rhino. La première des données étant en effet : qu'est-ce que cet objet? Ainsi l'architecte aura des outils comme "mur" ou "fenêtre" avec lesquels il composera le projet. C'est en fait une approche très similaire à la réalité constructive d'aujourd'hui : l'industrie et la standardisation y ont une place très importante, et un édifice est un ensemble de pièces et d'éléments réalisés par différents acteurs. Le BIM permet ainsi d'intégrer ce principe dès la conception.

Le deuxième aspect est le caractère tri-dimensionnel du logiciel, qui vise à interpréter le projet dans son entièreté, plutôt que par une somme minimale de représentations en Monge. Cela est indispensable pour envisager le processus comme structuration de données du projet. Toutefois, l'interface 2D existe bel et bien dans un logiciel BIM et est même essentielle. Simplement, le plan ou la coupe ne sont plus des abstractions couchées sur la planche, mais plutôt des projections de la maquette, et sont d'ailleurs paramétrables à volonté. Le BIM réarticule donc la conception architecturale autour de sa reproduction en maquette, certes numérique, mais de manière similaire à la configuration pré-Albertienne de l'architecture, lorsque la représentation scientifique en dessins n'existait pas encore. Par ailleurs, le recours au Monge ne disparaît pas totalement. Ainsi sur Revit, on pourra créer des objets en les dessinant en Monge dans une interface dédiée -la création de familles-, un outil que l'on peut même regretter de ne pas être encore disponible sur son principal concurrent Archicad.

Avec ces dessins, qui sont en réalité des projections de la maquette, un autre élément frappant est la mise à jour automatique des documents. Modifiez une fenêtre en plan et tout se mettra à jour : il n'y a plus besoin d'aller répercuter la décision en coupe, ou de passer du temps à redessiner les élévations, avec tout le concert d'ombres et de textures que cela implique. Cela n'empêche pas non plus de concevoir en coupe, ou en 3D : le fait est que tout est relié. Il en résulte évidemment un gain de temps énorme sur les tâches graphiques, mais en vérité le principe fonctionne aussi pour les données : les surfaces des pièces par exemple dans Revit se mettent à jour auto-

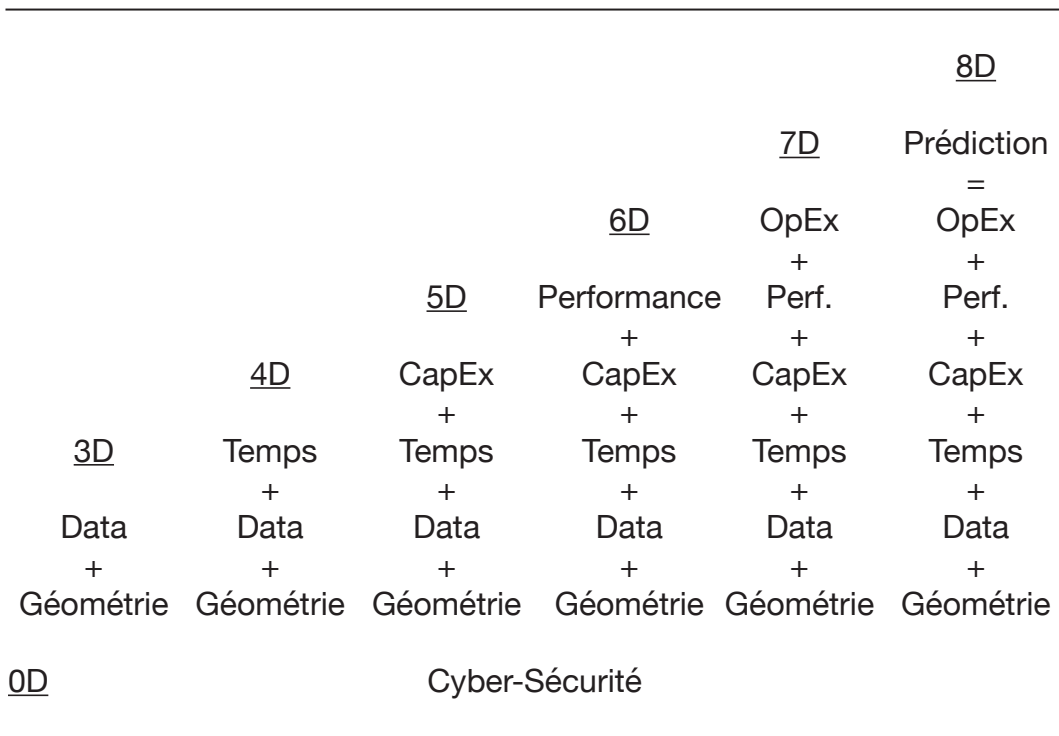


Fig. 10 : Les dimensions du BIM (Haute-coeur 2019)

matiquement lorsque l'on modifie les murs, et toutes les nomenclatures de manière générale répondent automatiquement à la mise à jour de la maquette. Car l'essentiel dans le BIM est en réalité l'information. Véritable mise en données du projet de construction, le BIM s'est vu attribué ce que nous appelons des dimensions, comme le montre la figure 10. L'une d'elle est la 4D, soit les données relatives au temps, sujet de cet énoncé et dont l'usage sera développé plus bas. Mais à titre d'exemple, les informations de coûts, la 5D, peuvent elles-aussi être ajoutées directement aux éléments, ce qui indiquera dès la conception le budget global nécessaire à la réalisation du projet.

En outre, la collaboration est également un principe fondateur du BIM. Au travers de la maquette BIM, l'information est partagée directement entre tous les intervenants. Or, le processus de construction est traditionnellement mené en ingénierie séquentielle, c'est-à-dire que les étapes se réalisent et se valident les unes après les autres. A l'inverse, le processus de construction BIM introduit une ingénierie concourante, ou simultanée, permettant de réduire le cycle et de mieux répondre aux attentes. Cette collaboration répond aussi au fait que les besoins et les systèmes d'un bâtiment sont aujourd'hui de plus

en plus complexes. Enfin, l'interopérabilité pose la question de l'*open BIM* et du *close BIM* : faut-il privilégier des processus et des standards ouverts pour laisser une plus grande liberté, ou à l'inverse intégrer des environnements de travail fermés, mais permettant des échanges plus directs? Le *close BIM* pose non seulement la question du logiciel à adopter parmi une série d'alternatives, mais aussi, ensuite, la version de ce logiciel à privilégier pour l'ensemble du groupement intervenant sur la maquette.

Enfin, signalons que le BIM a désormais été plus

Fig. 11 : Profil des agences d'architecture françaises qui travaillent en BIM (Hochscheid et Halin 2020)

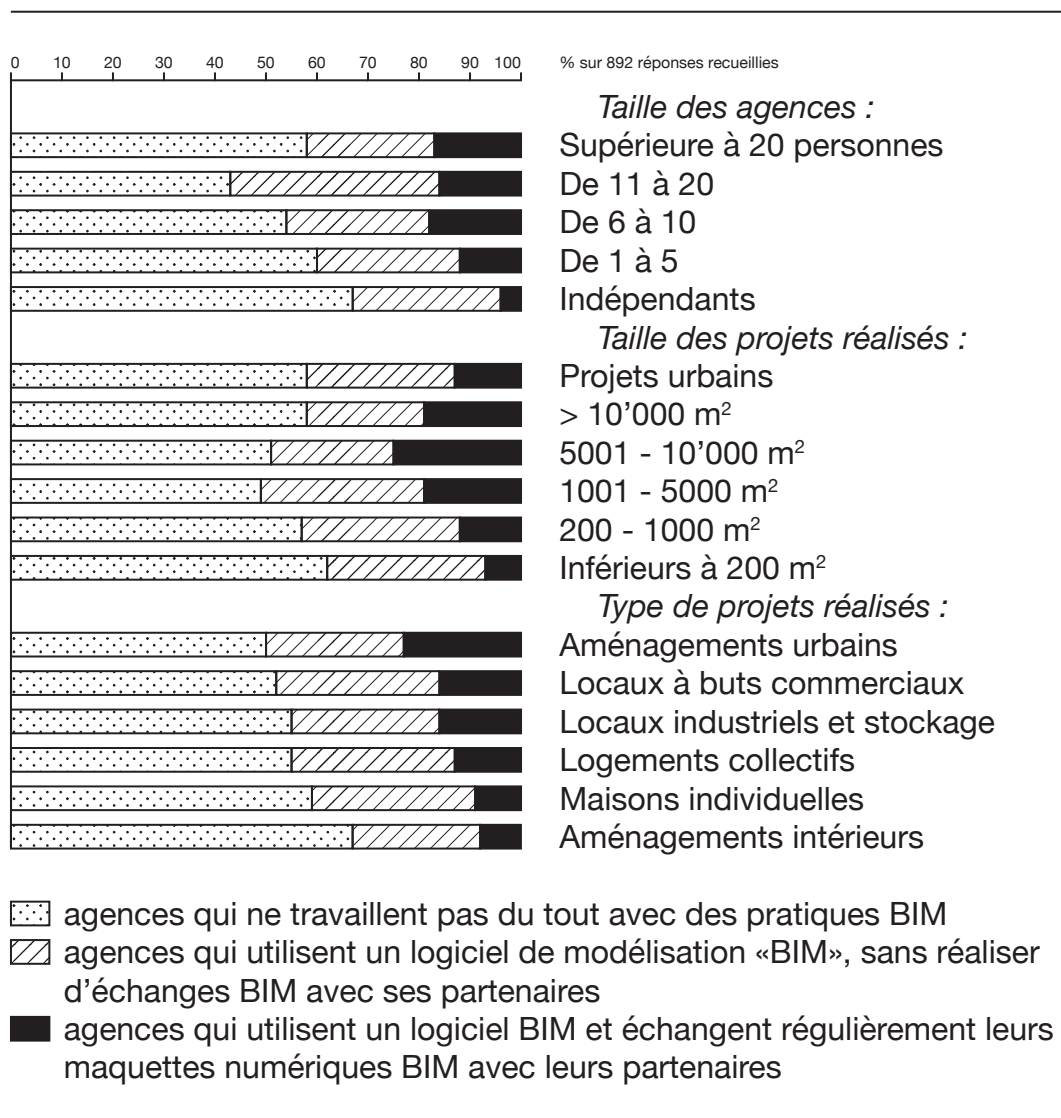
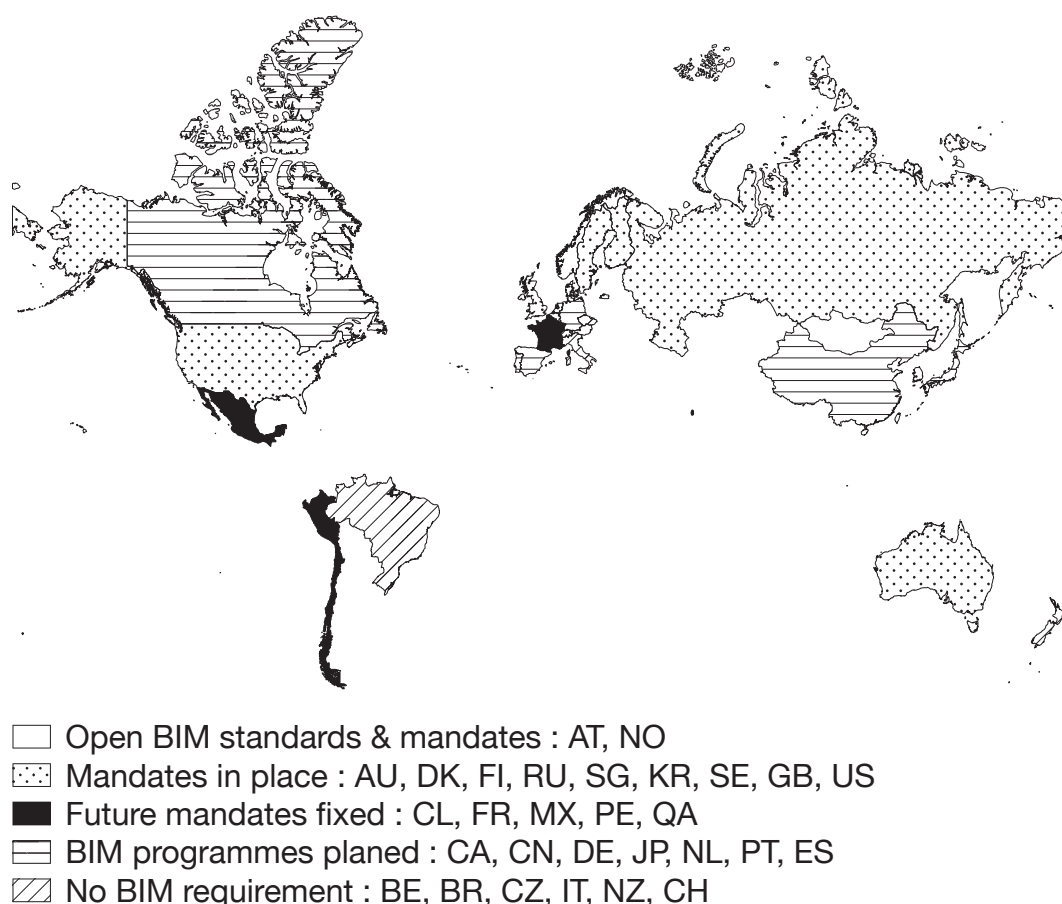


Fig. 12 : Le BIM dans le monde en 2016 (Haute-coeur 2019)



ou moins adopté selon les configurations d'agences et selon les pays, dont certains prennent des mesures pour favoriser son intégration. La figure 11 livre un regard de la situation chez nos voisins français, tandis que la figure 12 donne un aperçu plus global de la situation mondiale. Notons pour terminer qu'en réalité, le monde de la construction est relativement en retard sur cette transition. En effet, l'industrie, notamment, a vécu sa révolution technologique et numérique bien avant le secteur du BTP, avec des principes peu ou prou similaires. Ainsi en 1990 déjà, le Boeing 777 et ses 3'000'000 de pièces avaient en effet été modélisés numériquement sur le logiciel Catia. (Hautecoeur 2019)

Maquette et jumeau numérique : distinguer les ambitions sémantiques
 Une expression revient fréquemment lorsque l'on évoque le BIM, il s'agit du "jumeau numérique", ou *digital twin* en anglais. Le concept

n'est cependant pas tout à fait similaire à celui de maquette numérique. Comme on l'a vu, la maquette fait référence à cet outil ancestral de l'architecte et doit donc être perçue comme un véritable outil de conception du projet. Le terme de jumeau fait, quant-à-lui, peu sens à ce stade. Il est même dangereusement trompeur, car il porte l'idée que le BIM ambitionne de modéliser un alter ego numérique de l'édifice projeté jusque dans ses moindres détails. Beaucoup d'architectes ont ainsi une certaine crainte de se lancer dans le BIM, et font part couramment de cette inquiétude selon laquelle le processus impliquerait de devoir gérer une trop grande complexité immédiatement. En fait, le terme de maquette se veut précisément porteur d'une toute autre symbolique ; dans la réalité physique, les maquettes ont des échelles déterminées, qui impliquent des niveaux de reproduction de la réalité propres à chaque phase de la conception du projet. Ainsi on commencera, par exemple, par des études urbaines à partir de maquettes volumétriques au 1:1000, jusqu'à, par la suite, pousser le mimétisme dans la réalisation de maquettes de détail au 1:5. D'autres facteurs de précision que l'échelle vont rentrer en compte, tels que la matérialité, la véracité des couches et des assemblages, ou encore la solidité structurelle, etc. Ces décisions dépendent de ce que l'architecte désire mettre en place pour étudier le projet. Dès lors, il ne lui viendrait pas à l'idée de se lancer, à corps perdu, dans la réalisation d'une maquette physique, sans en avoir déterminé au préalable les objectifs. La vocation de la maquette BIM est tout à fait similaire et les dangers non moindres face à une sur-production non nécessaire : il est fondamental, avant de se lancer dans un processus BIM, d'en déterminer les tenants et les aboutissants. Si la maquette numérique n'a intrinsèquement pas d'échelle -on peut zoomer et dézoomer à l'infini-, il existe cependant des niveaux de détails pour chaque élément et des grilles d'organisation qui permettent d'anticiper les niveaux de modélisation nécessaires à tel ou tel usage futur de la maquette BIM. Ainsi, nous constatons que la révolution BIM n'est pas foncièrement différente de processus intellectuels auxquels nous sommes habitués et formés. Au regard du bouleversement numérique qui attend nombre d'autres disciplines, nous nous en sortons même plutôt bien avec le BIM. Les architectes devraient ainsi véritablement le considérer comme une formidable opportunité de développer, par des outils numériques, un procédé ancestral qui leur est cher, l'anticipation du projet en maquette.

Le jumeau numérique est quant à lui, à proprement

parler, un jumelage. A ce titre, au-delà du processus BIM de conception, il se réfère surtout au cycle de vie de l'ouvrage, s'appuyant sur différents capteurs de l'IoT pour numériser, par exemple, les flux de température ou de ventilation à l'intérieur d'un espace. Plus qu'une copie conforme de sa réalité physique, il faut surtout comprendre par jumeau numérique du bâtiment, une mise en données de ses comportements et de ses usages, face à des phénomènes aisément perceptibles par la data, ce qui permet de mieux en apprivoiser la maintenance. Le terme n'est ainsi pas moins destiné aux gestionnaires du bâtiment, qu'à ses concepteurs. Valente développe :

Numériser un ouvrage au cours de sa construction permet l'obtention d'un DOE numérique 4D (des informations en trois dimensions physiques auxquelles est ajoutée la temporalité des données) et permet de recréer des "Jumeaux Numériques" (ou "Digital Twins") des ouvrages. Les gestionnaires peuvent alors exploiter le potentiel du PLM en se reposant sur cet avatar numérique. Les caméras de surveillance, compteurs de visites, thermostats et autres objets connectés, en lien avec la domotique et l'intelligence des bâtiments, peuvent alors être reliés à la maquette numérique et offrir une réponse efficace à un monitoring en temps réel des ouvrages. L'analyse des données hébergées au cours des années laisse entrevoir une infinité d'applications en termes de maintenance des ouvrages. (Valente 2019, 24)

Evolution ou révolution? BIM et intelligence artificielle

Le BIM est-il donc simplement un ensemble de nouveaux outils à disposition des architectes, ou annonciateur d'une mutation profonde de la discipline? Comme nous l'avons vu, l'avènement des big data marquera sans aucun doute un tournant civilisationnel profond. La figure de l'architecte dessinateur, si caractéristique de l'ère de l'abstraction, est appelée à évoluer ou à disparaître. Conceptuellement, la rupture est très nette. Dans les faits cependant, nous n'allons pas abandonner toutes nos techniques : l'imprimerie n'a pas fait disparaître le recours à l'écriture manuscrite, et de la même manière le BIM ne signifie pas la fin absolue du recours à la projection de Monge, qui reste comme nous

l'avons vu un élément central des logiciels BIM actuels. Surtout, nous pouvons jouer d'un avènement des big data qui n'est pas si soudain dans l'adoption de ses outils, et dont l'intrusion dans nos vies se révèle bien plus progressif que l'on ne peut l'imaginer. Nous devons adapter nos méthodes et redéfinir notre métier, afin qu'il évolue en parallèle et avec la datafication de nos sociétés. Mais ceci, sans attendre un quelconque *D-Day* de l'avènement numérique. Car dans l'imaginaire collectif, la rupture est peut-être trop nette et relève pour l'instant d'un imaginaire futuristique : la numérisation se résumerait actuellement à des objets qui facilitent notre quotidien, et leur finalité serait encore à venir, dans un perfectionnement tendant vers ce grand concept que nous avons nommé "intelligence artificielle". En somme, nous attendons pour prendre conscience de ces enjeux, une société du futur où l'on croiserait des androïdes et des robots volants dans les rues de Lausanne : c'est-à-dire une intelligence artificielle robotisée dont la réalité physique serait tout à fait tangible. Voyons pourquoi cette vision est erronée et nous fait passer à côté des vrais enjeux, déjà bien actuels.

Nous l'avons exposé, les systèmes big data opèrent d'une manière tout à fait différente du cerveau humain. En cela, le terme d'intelligence artificielle, utilisé à tort et à travers, est trompeur car il exprime l'hypothèse que le numérique vise à mimer le comportement humain. Il renvoie dès lors dans l'opinion publique à cette image fantasmée de robots androïdes qui aspireraient à simuler notre existence, et nous attendons encore ce jour comme l'avènement de l'ère numérique -en témoignent des films comme *Blade Runner* ou *I, Robot*. Cette vision, tirée de la science-fiction, n'est ni l'origine, ni la visée de ces systèmes. Ils n'en ont tout bonnement aucun intérêt, puisque leur vocation historique, comme nous l'avons vu, est d'appréhender l'information de masse : or, ils en sont déjà bien plus capables que nous, dans leur fonctionnement intrinsèque, puisque nous les avons créés précisément pour cet objectif. A l'inverse, notre intelligence humaine n'est-elle pas cette capacité à abstraire l'infinité du monde qui nous entoure dans les limites biologiques de rétention de l'information de notre cerveau? Le Larousse la définit comme l' « ensemble des fonctions mentales ayant pour objet la connaissance conceptuelle et rationnelle » (Larousse, 2020). L'intelligence serait donc l'alphabet ou la gamme musicale, la *small data logic* de Mario Carpo en quelque sorte. Des mécanismes inutiles aux technologies numériques : nous avons inventé ces outils de *big data logic* précisément pour s'extraire de cette

condition. Ils n'ont donc aucune vocation à nous imiter. L'expression intelligence artificielle, sans remettre en cause tous les travaux qui s'en réclament, est donc dans l'idée qu'elle entend véhiculer, très voire trop vague, comme le soulignent des experts tels que Sadin, cité précédemment, ou Yann LeCun, dont nous aborderons le travail plus tard. Le drame étant que cette expression nous fait passer à côté du vrai sujet, la donnée de masse, et procrastiner son questionnement dans le débat public. Ainsi, ces systèmes sont en réalité déjà parmi nous ; leur intrusion dans nos vies est bien plus fluide et spontanée -ou insidieuse et permissive, c'est selon- que l'image fantasmée. Dans notre discipline de l'architecture, par exemple, il faut bien réaliser qu'un utilisateur de Qgis ou de Revit procède d'ores-et-déjà par des outils s'appuyant sur de la donnée de masse. Mais voyons plutôt comment ce phénomène pourrait prendre un tournant encore plus conséquent.

Apprentissage profond, l'abstraction par la machine

L'apprentissage profond, ou *deep learning*, se rapproche véritablement de ce que l'on pourrait admettre comme de l'intelligence artificielle, du moins sur le principe. Voyons pourquoi. Le chercheur français Yann LeCun est considéré comme l'un des inventeurs de cette méthode, qui a éclaté au grand jour dès 2012. Il est important d'introduire ce concept car nous verrons qu'il a un potentiel énorme dans l'automatisation de la conversion des nuages de points en maquette BIM, ce qui faciliterait beaucoup la numérisation du bâti existant, mais également dans le design génératif, un phénomène absolument révolutionnaire pour la pratique de disciplines créatives. L'apprentissage profond est un sous-ensemble des méthodes d'apprentissage automatique, ou *machine learning*, que nous allons définir dans un premier temps. L'apprentissage automatique soumet l'hypothèse que des algorithmes peuvent apprendre en étudiant des exemples très nombreux, s'appuyant donc sur des ensembles de big data. L'idée est que la machine corrèle les similitudes de cas particuliers pour en tirer des généralités, et qu'elle les extrapole à des cas qu'elle n'a jamais rencontrés. Ce processus est principalement applicable à la reconnaissance de textes, d'objets ou encore de personnes dans les images, et est donc fondé sur des données de pixels, telles que nous les avons décrites précédemment ; la technique est très prometteuse pour la perception automatique de l'environnement, dont la voiture autonome est l'application la plus connue du grand public. Elle pourrait être adaptée à la qualification

automatique des nuages de points, les technologies de captation étant également similaires, comme nous le verrons dans le chapitre sur les applications de la 4D.

Restons d'abord sur l'aspect théorique. Le tour de force des chercheurs de l'apprentissage automatique est d'avoir identifié et désarçonné cette rupture entre la *small data logic* et la *big data logic* : avant leurs découvertes, il était peu pertinent d'envisager le raisonnement de la machine comme s'approchant de l'intelligence, car le processus, malgré d'incessants progrès, était toujours réductible à ce principe binaire de 0 et de 1, fondateur des systèmes numériques. Loin de prétendre extraire la machine de cette condition, les chercheurs de l'apprentissage automatique ont emmanché ce paradigme par l'autre extrémité. Ils expliquèrent qu'en réalité, les réseaux neuronaux du cerveau humain, à la base de notre intelligence, fonctionnent également sur un principe binaire : chaque neurone étant chargé de transmettre ou non, par l'impulsion d'un signal électrique, l'information aux neurones suivants. Dès lors, si notre intelligence humaine est également binaire à sa base, pourquoi avons-nous développé des techniques d'abstraction? Selon LeCun, notre limite d'appréhension de trop grands volumes de données ne relève pas d'une incapacité, mais d'une stratégie pour économiser de la ressource. La puissance du cerveau a ainsi été quantifiée et il apparaît qu'il utilise très peu d'énergie : il se compose d'un système de 85×10^9 neurones, disposant chacun de 1'000 à 10'000 synapses avec d'autres neurones, sur un cortex de 2'500 cm² par 2 mm d'épaisseur, et consommant 20 à 25 Watt (LeCun 2016). Pour économiser l'énergie de la sorte, et c'est une constante chez tous les animaux, le cerveau apprend, ce qui lui permet de modifier l'efficacité des synapses. D'où l'idée d'apprentissage automatique : car les systèmes numériques se trouvaient précisément dans la même impasse, les opérations pour atteindre des corrélations de plus en plus complexes s'avérant bien trop nombreuses, et donc coûteux en temps et en énergie : il fallait alors s'inspirer de l'intelligence humaine et abstraire un certain nombre de données pour rendre le processus plus efficace. Ceci par un système similaire au motif de connexion entre les neurones analysé par les biologistes dans le cortex visuel des animaux : un ensemble de neurones multicouches transmettant de petites quantités d'information. Les chercheurs calquèrent donc sur ce modèle les réseaux convolutifs, -CNN ou ConvNet de l'anglais *Convolutional Neural Networks*- transmettant un à un de petites quantités d'informations

par des algorithmes relativement simples. Selon LeCun, le principe est vraiment élémentaire et il est même curieux qu'il n'ait pas été creusé plus tôt ; avec un tel fonctionnement, l'efficacité actuelle de nos machines serait tout de même pour l'instant encore inférieure d'un facteur de l'ordre d'un million par rapport à nos cerveaux, -en 2016, progrès en cours-.

Le postulat de l'apprentissage automatique est que le monde est compositionnel : chaque élément est composé d'autres éléments, qu'il est possible de corréler dans une masse d'exemples. Ainsi, une voiture est composée de roues, d'un pare-brise, de phares, etc, qui permettent ensemble d'identifier l'élément voiture. On peut constater là le potentiel pour la numérisation du bâti, dans une vision durandienne de l'architecture et dans le principe de classification des éléments intrinsèques au BIM. Cet état compositionnel de la réalité vaut aussi pour les lettres, qu'on va assembler pour former des mots, puis des phrases, puis des idées. Un tel principe de construction d'objets complexes à partir de pièces élémentaires est donc proche de la *small data logic* théorisée par Carpo. C'est à dire qu'il est possible de déterminer des caractéristiques intermédiaires de l'image, plutôt qu'en étudier à chaque fois les pixels un par un : ce processus a d'abord été imaginé à l'aide d'un algorithme intermédiaire d'extraction des caractéristiques qui, présenté dans un second temps au réseau de neurones, permettait de diminuer drastiquement la quantité de données en entrée par rapport à l'image brute. Sur le principe, c'est une véritable abstraction de l'image, assimilable à de l'intelligence : cependant dans les faits, cette étape de construction des caractéristiques de l'image a d'abord été réalisée par des humains, c'est-à-dire que c'est essentiellement le concepteur de cet algorithme intermédiaire qui accomplissait le travail d'intelligence. L'apprentissage profond a révolutionné précisément cet aspect. Il se définit comme « un ensemble de méthodes d'apprentissage automatique tentant de modéliser avec un haut niveau d'abstraction des données grâce à des architectures articulées de différentes transformations non linéaires » (Wuillemin 2016). C'est donc une forme d'apprentissage et de progression de la machine par l'expérience, plutôt que par l'assistance humaine. Les chercheurs désiraient sauter cette étape d'intervention de l'homme, et admettre dès lors de commencer le processus par une entrée massive de données, d'où l'appellation de réseau profond. En persistant dans cette voie que peu de scientifiques tenaient pour prometteuse, les chercheurs consta-

tèrent qu'en entraînant peu à peu le réseau de neurones, les couches supérieures déployaient d'elles-mêmes ces caractéristiques communes, essentielles à la reconnaissance d'un élément sur une image. Et pouvaient les réutiliser et les perfectionner de cas en cas. C'est-à-dire que l'algorithme se fabriquait lui-même les concepts nécessaires à identifier chaque objet, démontrant que l'homme n'avait pas besoin de les lui indiquer. Cette révolution s'imposa ainsi en 2012 au *Large Scale Visual Recognition Challenge*, une compétition d'algorithmes de reconnaissance d'image. Un algorithme d'apprentissage profond y prouva son efficacité en dominant largement tous les autres -score de 16% contre 26% pour le deuxième. Toute la recherche et l'industrie s'intéressent depuis à cette méthode. Il faut bien comprendre qu'avec cette révolution, la machine est désormais dotée d'une capacité d'abstraction, lui permettant de compresser la donnée pour appréhender plus rapidement la réalité : toute la définition que nous avons donnée de la *small data logic* développée par Mario Carpo, à la base de l'intelligence humaine. (LeCun 2016, Louapre 2016)

Design génératif

Avec cette méthode, des systèmes sont désormais capables de décrire des images par du texte, une aide bienvenue entre autres pour les malvoyants ; elle est aussi utilisée par les réseaux sociaux pour identifier les personnes sur les images ou modérer automatiquement les contenus. Au-delà d'une telle automatisation des tâches, cette indépendance à l'intervention humaine ouvre également le champ à des identifications que nous ne maîtrisons pas nous-mêmes : notamment dans l'imagerie médicale, pour détecter précocément des tumeurs qu'un médecin ne verrait pas encore à l'œil nu. L'univers du son, de la musique à la reconnaissance vocale, est aussi impacté par cette méthode, car les signaux perçus sont traduisibles en images. Ce phénomène est révélateur : dans le cas de plans d'architectes, un mécanisme d'apprentissage profond se basera sur des images en pixels, nul besoin donc d'avoir des plans "propres" bien vectorisés et bien classifiés. Ce qui importe surtout au mécanisme d'apprentissage profond est le volume de la base d'images, qui est, en l'occurrence, très fournie en architecture au vu de l'inventaire de catalogues en tous genres. Pour revenir au *deep learning*, ces convolutions ont également été appliquées à la quatrième dimension, c'est-à-dire au temps : les systèmes identifient désormais non seulement un objet, mais aussi son mouve-

ment dans une vidéo -qui n'est autre qu'une suite d'images-, fonction très utile pour la voiture autonome. Aujourd'hui déjà, les modèles de la marque Tesla ont intégré ces techniques pour conduire de manière autonome sur l'autoroute, je l'ai moi-même déjà expérimenté en Suisse. Aussi selon LeCun, Facebook possède désormais un système capable non seulement de reconnaître les objets, mais d'en redessiner les contours exacts : nous constatons bien là, l'intérêt pour la qualification des nuages de points. (LeCun 2016, Louapre 2016)

Au-delà de ces tâches de reconnaissance, ce mécanisme possède en réalité un potentiel encore bien plus vertigineux : la création. Les réseaux convolutifs, capables de reconnaître un élément sur une image, sont désormais aussi calibrés pour produire de nouveaux éléments à partir d'une série donnée, un phénomène très prometteur pour le design génératif, ou *generative design*. Donnez à un système d'apprentissage profond une série d'images de chambres, il vous en créera une similaire. Théoriquement appliqués à l'architecture, tous ces processus signifient que si nous disposons d'une base de données suffisante, par exemple de plans (et nous en avons donné des pistes précédemment), nous pourrions indiquer à la machine la typologie de logement désirée sous forme de texte, qu'elle saura interpréter. Elle plongera ensuite dans la base de données de plans, dont elle saura d'elle-même identifier et comparer tous les éléments, pour enfin nous proposer un plan idéal par rapport aux critères que nous aurons posés. Cette révolution du design génératif est tout sauf utopiste, et a déjà bel et bien court : les domaines de la création et de l'abstraction sont donc tout, sauf à l'abri du phénomène *deep learning*. Ainsi en 2018, Spotify a publié un album entièrement composé avec l'aide de systèmes d'apprentissage profond, baptisé *Flow Machines*. En 2016 également, des chercheurs dévoilaient *The Next Rembrandt*, un tableau original créé par un algorithme dans le style du peintre néerlandais (Muncanovic 2019). La question se pose alors de savoir si la machine crée ou si elle copie. Pour couper la poire en deux, nous pourrions dire qu'elle s'inspire, et finalement nous n'agissons pas différemment en tant qu'humains ; un architecte apprend à produire des plans durant sa formation, à l'aune d'une multitude de références. Ainsi en architecture, rappelons qu'Autodesk a annoncé le 17 novembre 2020 l'acquisition de Spacemaker pour un montant de 240 millions de dollars nets. Cette société norvégienne offre de mettre à disposition des architectes la conception générative basée sur l'intelligence artificielle pour explorer les meil-

leures options d'aménagement urbain, « [en itérant et optimisant] très tôt diverses options de conception, tout en tenant compte des critères de conception et des données comme le terrain, les cartes, le vent, l'ensoleillement, la circulation et les flux. » (Di Giacomo 2020). L'architecte et *Data Scientist* précité Stanislas Chaillou a par ailleurs été engagé par cette société et y travaille au développement de conception générative de typologies de logements, qui s'ajoutera donc à l'aménagement urbain. (Chaillou et Wulff Wold 2020). En tant que système optimisant drastiquement nos processus d'architectes, la révolution de l'intelligence artificielle est donc bel et bien à portée de main, prête à prendre la relève de nos techniques d'abstraction. En témoignent à l'EPFL, les travaux des ateliers du Professeur Jeffrey Huang ; au-delà, il existe même déjà dans le monde construit des projets d'envergure conçus avec de tels outils, comme le bureau d'Autodesk à Toronto qui est le premier exemple à grande échelle d'un espace de bureau conçu de manière générative (Walmsley s. d.). La conception générative a aussi été récemment utilisée par OMA sur le projet de nouveau stade du Feyenoord Rotterdam, pour optimiser le placement des sièges du stade et la façade du niveau inférieur (BIM+ 2020).

La 4D dans le BIM, la mise en données du temps

Nous allons aborder dans ce dernier chapitre de préambule historique, l'objet central de cet énoncé : la 4D dans le BIM. Comme nous l'avons vu avec l'imprimerie de Gutenberg ou la tabulatrice de Hollerith, l'émergence d'un nouvel outil ou processus s'inscrit en réponse à des nécessités plus vastes. Si nous avons désormais explicité les principes sous-jacents au BIM, pourquoi mettre en données en particulier le temps au sein de ce processus? En quoi les architectes ont-ils besoin de reconsidérer cette dimension? Quelle est la valeur de la donnée temps dans le monde de la construction? D'abord nous l'avons vu, notre civilisation machiniste s'est fondée sur la valorisation du temps mesuré et découpé, et nous voyons bien là l'intérêt de planifier rigoureusement les séquences d'un chantier pour gagner en efficacité. Mais plus en amont se cache aussi un autre processus historique, lié à la quête de durabilité dans le domaine du bâtiment. Aujourd'hui, nous devons prendre en compte le fait que les constructions représentent, à long terme, des déchets d'un volume faramineux. Il s'agit dès lors de ne plus envisager un projet d'architecture comme immuable, et de ne plus le concevoir dans une utopie d'éternité comme le faisaient les bâtisseurs des

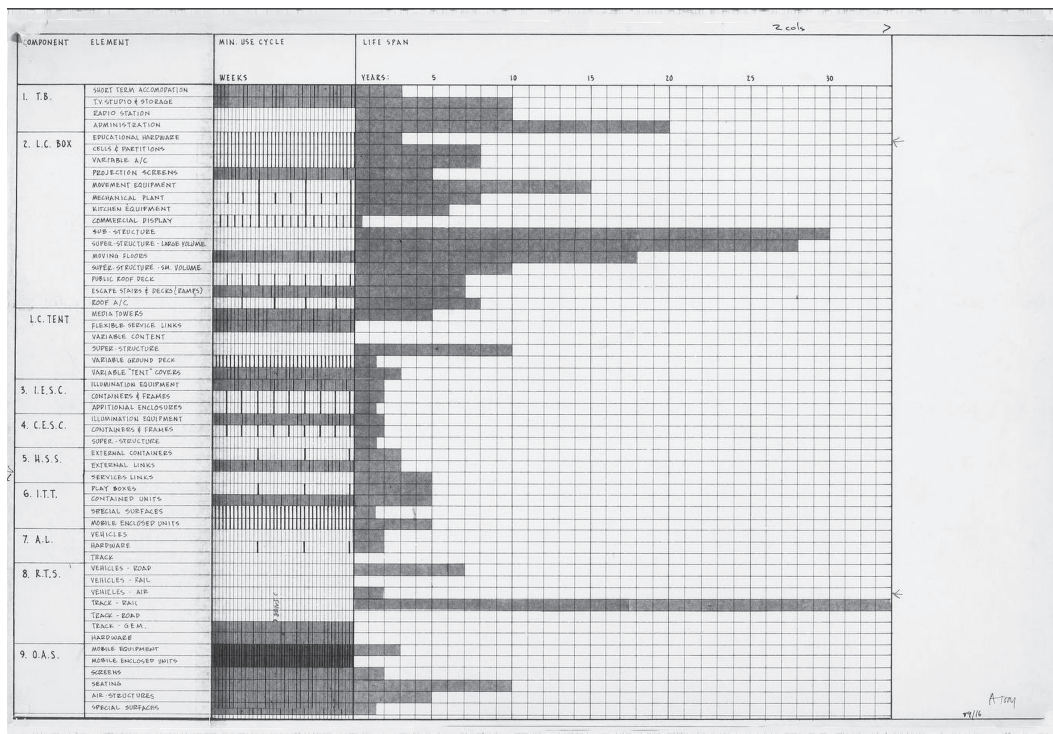


Fig. 13 : Atom: Graph of use cycle and lifespan (Price 1968)

cathédrales. Le *time-of-the-building* de Trachtenberg s'est en effet réduit comme peau de chagrin : ce n'est désormais plus le temps du chantier qui voit passer les évolutions du *time-of-the-lifeworld*, mais bien le projet fini en lui-même. Ainsi la transformation, la rénovation ou la réhabilitation du patrimoine bâti vont devenir des enjeux majeurs, portés par la nécessaire participation du monde de la construction aux efforts écologiques qui nous attendent. Au-delà des interventions sur l'existant, il faut désormais également intégrer cette notion comme composante essentielle des projets de nouvelles constructions : comment concevoir des espaces qui soient flexibles, et comment anticiper leurs usages futurs? Ces questions sont portées par exemple à l'EPFL par le Professeur Corentin Fivet sur la question du réemploi des structures. En vérité, le mouvement a déjà éclos il y a un certain nombre d'années. En ce sens, il est passionnant de se pencher sur les travaux de l'architecte britannique Cedric Price. A partir des années soixante, il développe l'idée d'une architecture "impermanente" : en effet, un bâtiment est destiné à évoluer. Le temps est ainsi la quatrième dimension à considérer lors de sa conception. Le rôle de l'architecte est désormais d'anticiper les changements dans une société qui évolue

rapidement, mais aussi de considérer les cycles de vie des éléments qui composent le projet d'architecture, comme le dévoile son dessin en figure 13. Trachtenberg évoque à ce sujet tout un éventail international d'individus et de groupes influents ayant travaillé à ces questions dans les décennies qui ont suivi la Seconde Guerre mondiale :

Cedric Price, the Smithsons, Reyner Banham, and Archigram in Britain (as well as the lesser-known John Weeks), Team 10 across Europe, the Metabolists in Japan, and Kevin Lynch in the United States. They sought in diverse ways to counter the High Modernist obsession with the timelessly perfect architectural object of desire with a vision of architecture as process, and to devise new conceptual and methodological strategies that would allow buildings and city-planning schemes to evolve with changing user and technological needs through time. Thus, for example, seeking to accommodate architecture to a volatile lifeworld, the widely advocated "flexible plan" idea, as described by one of its opponents, "starts from the certainty that the right solution does not exist because the problem is in a continuous state of motion, and therefore always temporary." (Trachtenberg 2010, préface, 17)

Cet enjeu du temps a ainsi été abordé dans une récente conférence à Paris sur le futur de l'architecture, débattue par plusieurs architectes dans le cadre des Journées nationales de l'architecture 2020. Lorsque l'animateur suggérait que le 21^{ème} siècle serait celui de la transformation, Odile Decq dévoilait ainsi sa vision : ce qu'il faut arriver à faire comprendre à des clients aujourd'hui, c'est qu'un bâtiment a plusieurs futurs. Lorsque l'on commande un immeuble de bureaux, il s'agit d'envisager qu'il puisse un jour être transformé en immeuble de logements. A l'inverse si l'on fait un immeuble de logements, pourra-t-il abriter plus tard des activités tertiaires, ou autres? Odile Decq cite ainsi l'exemple d'une crèche allemande qui avait été conçue pour devenir plus tard une maison de retraite, ce qui répondait à un constat sur le futur de la démographie allemande (Decq 2020, 01:57:20). Nicolas Dorval-Bory rebondissait ensuite dans cette

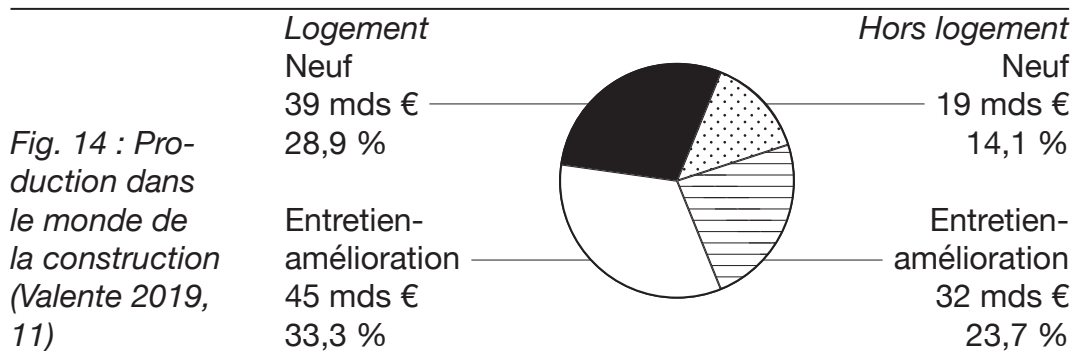
conférence sur le fait que dans un projet de transformation, il est plus évident d'introduire une dimension temporelle, qu'on aurait peut-être pas eu si on avait travaillé directement sur du neuf. Cela alerte sur la nécessité d'être conscient de la durée de vie potentielle des éléments qu'on met en œuvre. En projetant un mur en placo-plâtre, on sait qu'il va peut-être durer cinq ans, s'il est bien entretenu, alors que si l'on dessine, par exemple, un mur en béton, même s'il aura la même apparence en dessin, il existera pour les 200 ans à venir. Cette conscience temporelle est extrêmement riche. (Dorval-Bory 2020, 02:06:50)

La 4D dans le BIM vise précisément à mettre en données cet enjeu du temps de la construction. Voyons en désormais les applications de manière beaucoup plus pratique.

III. Applications pratiques de la 4D dans le BIM

A. La numérisation 3D de l'existant. Expérience avec Uzufly

Dans le cadre de l'architecture, la numérisation 3D désigne un ensemble de processus visant la capture de la réalité du bâtiment en 3D et sa modélisation en maquette numérique BIM. Les technologies employées sont diverses, et certaines sont d'ailleurs communes à d'autres disciplines telles que la cartographie, la voiture autonome, les jeux vidéos ou la sauvegarde du patrimoine. Dans un processus BIM, la numérisation 3D a de multiples potentiels : état des lieux, communication, archivage, suivi du chantier, mesure et contrôle 3D, etc. Surtout, l'intervention sur l'existant reste un domaine à développer dans le déploiement du BIM, souvent associé plutôt à des constructions neuves ; or, le potentiel est très important comme le souligne Valente avec le graphique de la figure 14. La numérisation 3D offre, dès lors, une base très intéressante à la modélisation de l'existant, et son principe est par ailleurs très en adéquation avec le concept de mise en données, qui est



comme nous l'avons vu à l'origine épistémologique de l'émergence du BIM. Valente souligne ce potentiel :

Le BIM est un outil exceptionnel et une formidable opportunité pour les constructions neuves. Nous pouvons créer virtuellement un bâtiment et le faire ensuite sortir de terre sur cette base. Mais que faire s'il s'agit de rénover un bâtiment? [...] Construire du réel sur la base d'un modèle virtuel est simple (c'est

ce que nous faisons tout le temps), mais concevoir virtuellement sur la base d'une [sic] environnement réel est chose bien moins aisée. Il devient alors nécessaire de «virtualiser le réel». [...] pour modéliser une maquette numérique sur la base d'un environnement existant, nous avons besoin d'un modèle numérique 3D de l'existant : il faut donc le numériser. (Valente 2019, 10)

La modélisation de l'existant relève d'un BIM *use* spécifique dans nombre de classifications, comme celle que nous avons retenue de la *Penn State University* (fig. 1), car elle implique des tâches qui lui sont particulières. Dans le cadre de ce Projet de Master cependant, nous l'avons considérée comme faisant intrinsèquement partie du processus 4D, en tant que mise en données de l'existant, et donc du temps passé de la construction. L'idée est d'avoir ainsi une prise en compte plus complète du rapport au temps d'un projet d'architecture mené en BIM, et également d'expérimenter pratiquement ces processus de numérisation 3D dans le cadre du projet consécutif à cet énoncé théorique. Le site du projet, une halle ferroviaire à Bâle que nous décrivons en conclusion, a ainsi déjà fait l'objet d'une capture 3D et le nuage de points a été traité.

La startup Uzufly, spécialisée dans la génération de maquettes numériques ultra photoréalistes, nous a prêté main forte sur cette numérisation 3D, avec ses drones et son savoir-faire. Je tiens donc ici à remercier particulièrement son directeur Romain Kirchhoff et son collaborateur Aurélien Brun pour cette contribution et le partage de leur expertise professionnelle. Nous avons ainsi assemblé leur capture photogrammétrique du quartier effectuée au drone, avec notre scan laser de la halle, comme le montrent les figures 15.

1. Acquisition de données

L'acquisition de données désigne les processus de capture de la réalité en une reproduction numérique 3D désignée sous le nom de "nuage de points". Elle s'envisage non seulement dans le relevé de l'état existant d'un bâtiment, ce qui nous intéresse ici, mais également dans la phase de réception d'un projet pour constater son état tel que construit. A cet effet, toute une série de technologies sont envisageables, des radars aux sonars, mais deux d'entre elles émer-

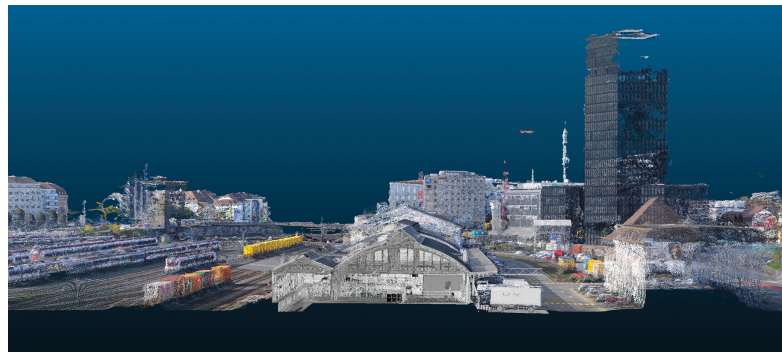


Fig. 15 : Capture 3D de la halle 3, Wolf Quartier, Bâle

Avec la collaboration de Romain Kirchhoff et Aurélien Brun (Uzufly), et d'Ahmed Wael (CNPA).



Vidéo du nuage photogrammétrique, réalisée par Uzufly : <https://youtu.be/7C-PZg-SURTI>



gent véritablement et se complètent : la lasergrammétrie et la photogrammétrie.

Lasergrammétrie

Le scan laser 3D, qui repose sur la technologie LiDAR, génère un nuage de points en balayant l'espace avec un faisceau laser qui lui donne la mesure très précise de sa distance à chaque point. Elle utilise donc des données de distance, en principe depuis une station fixe.

Le nombre de points mesurés au terme de la captation est sans comparaison avec un relevé traditionnel, les jeux de données dépassant habituellement le million, voire le milliard de points. Le temps de captation est également fortement réduit, et la précision encore accrue. (Valente 2019, 28)

Pour un relevé d'architecte, l'atout majeur est l'exactitude totale des géométries et dimensions du nuage de points, puisque le scanner se base sur le principe de la distance. Quelques points négatifs sont toutefois à mentionner : le coût élevé de l'appareil d'abord, qui n'est pas forcément envisageable pour de petites agences ou pour un usage restreint. Ensuite, le capteur LiDAR n'est pas censé être en mouvement, il doit rester fixe pour mesurer l'environnement de manière uniforme, ce qui risque de compliquer la tâche pour capturer, entre autres, une toiture ; il existe tout de même des technologies pour envisager le laser sur des éléments mobiles -drones, sacs à dos, etc.-, qui visent à retracer la trajectoire de l'appareil pour en déduire le mouvement. Mais la méthode, de par son concept même, conduit invariablement à une perte de qualité du nuage. Enfin, même si elle peut être colorisée, une capture au laser n'aura pas la qualité texturale de la photogrammétrie.

Photogrammétrie

La photogrammétrie quant-à-elle s'inspire du principe de vision stéréoscopique humaine ; des algorithmes reconstruisent l'espace en 3D en recoupant des images capturées selon des points de vue différents (phénomènes de parallaxe) par un appareil de photographie. Elle utilise donc des données de pixel.

Cette méthode est ancienne et se fonde sur le principe de corrélation d'images acquises selon des points de vue différents qui permet la reconnaissance automatique de points homologues. (Valente 2019, 53)

Cette méthode est donc à priori plus accessible pour un architecte, car elle ne nécessite qu'un appareil photo. Elle a aussi le mérite de pouvoir être montée sur des appareils mobiles, comme cela a été le cas à Bâle avec les drones d'Uzuffy. Cela dit, le procédé pour obtenir un résultat qualitatif demande un peu plus d'expérience et d'efforts sur place qu'en lasergrammétrie, car il s'agit d'anticiper et de multiplier les bonnes prises de vue pour aider la machine à reconstruire le nuage de points. Aussi, sur des projets de grande envergure et sans appareil d'automatisation des prises de photos comme ceux montés sur les drones, la capture sera nettement plus fastidieuse que de laisser tourner le laser. Enfin, plus conceptuellement, le nuage photogrammétrique ne sera toujours qu'une reconstruction algorithmique et, à ce titre, moins précis qu'un relevé lasergrammétrique. D'ailleurs, même si ces algorithmes sont de plus en plus habiles, certaines structures complexes et surtout répétitives peuvent être difficiles à appréhender pour la machine, qui a besoin de repères identifiables pour déterminer les points de vue dans l'espace des différentes photos. Ainsi, il vaudra mieux capturer un espace avec un peu de désordre plutôt que bien rangé.

Pour terminer sur une hypothèse un peu ambitieuse, rebondissons sur le caractère non rival des données, développé en préambule, et posons-nous cette question utopiste : les photos stockées sur les *clouds* de tout un chacun pourraient-elles un jour être réunies et servir à une numérisation 3D photogrammétrique du monde entier? Conceptuellement en tout cas, cela semble envisageable.

2. Du nuage de points à la maquette numérique

Avant de modéliser la maquette à partir de ces captures, il faut traiter l'acquisition de données. Assembler les prises d'abord, pour obtenir un nuage de points cohérent : même si des automatisations existent, avec par exemple la reconnaissance de cibles à disposer lors de la capture, il faut parfois assembler certaines scènes à la main lorsque l'ordinateur n'en a pas été capable. Il faut ensuite

nettoyer le nuage pour supprimer les informations inutiles ou le bruit résultant, par exemple, du passage d'un élément en mouvement durant la prise. A partir de là, le *Scan to BIM* désigne l'insertion du nuage de points dans le logiciel de modélisation, qui va servir comme d'un calque en sous-couche à la construction de la maquette de l'existant. A ce titre, des automatisations sont également en sérieuse voie de développement grâce à la voiture autonome, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre sur l'apprentissage automatique :

Les véhicules autonomes doivent numériser leur environnement pour être capable d'y évoluer. Mais ils doivent également le comprendre en caractérisant les nuages de points captés par le LiDAR. [...]

Compte tenu de l'évolution incroyablement rapide des véhicules autonomes, la convergence technologique permettant une application courante et à grande échelle de la caractérisation automatique des données de numérisation 3D appliquée au bâtiment est très proche. (Valente 2019, 184)

3. Une véritable rupture épistémologique

La lasergrammétrie et la photogrammétrie sont donc deux procédés bien différents, avec des possibilités d'utilisation et des résultats propres. Selon le but recherché, on peut choisir l'un ou l'autre : une voiture autonome ou un ingénieur structure baseront leurs calculs de distance sur une technologie LiDAR, tandis qu'un musée ou jeu vidéo choisira plutôt la photogrammétrie pour numériser une sculpture ou un décor. En architecture, en vue de remodeler un bâtiment, l'utilisation d'un laser s'avère sans doute plus fondée car il est intrinsèquement plus précis, étant basé sur des rapports de distance. Les géométries obtenues seront exactes et ce à une échelle très fine. La photogrammétrie, même si elle est de plus en plus précise, ne sera toujours qu'une reconstruction ; elle sera très intéressante à l'échelle d'un quartier par exemple, comme le démontre Uzufly. Le choix dépend aussi du but recherché : une capture pour évaluer le vieillissement d'une infrastructure structurelle demandera ainsi plus de précision que le projet de rénovation d'une maison. Le site est également une condition importante : comme nous l'avons vu, la lasergrammétrie exigera une prise en station fixe, alors que la photogrammétrie est envisageable à partir

de drones ou autre machine en mouvement. Enfin, le choix dépend aussi des moyens : un scanner laser est un investissement sérieux, et une agence modeste d'architecture se tournera plus facilement vers de la photogrammétrie pour un petit projet. Si possible, on cherchera en fait à combiner les deux, comme nous l'avons fait à Bâle. A titre d'exemple typique, dans le cas de captures de bâtiments patrimoniaux, le nuage de points sera généré à partir d'une prise au laser pour avoir la géométrie et le détail vraiment très fin, puis on viendra y plaquer la texture et les couleurs obtenues à l'aide du relevé photogrammétrique.

L'acquisition de données est significatif du passage de l'abstraction à la donnée de masse. Car la lasergrammétrie et la photogrammétrie ne révolutionnent pas la discipline seulement dans la pratique et les outils ; le principe-même est intrinsèquement différent. La capture 3D est, en effet, une véritable mise en données de l'existant, et Valente souligne l'importance d'une rupture sémantique :

Le terme de «relevé» sous-entend qu'une action sur le site concerné est nécessaire pour chacune des prises d'information [et ce terme] est devenu réducteur. Il est donc de plus en plus courant de désigner l'action de numérisation 3D sous les termes de «capture de la réalité». Le terme de «capture» véhicule un tout autre message : « je vais sur place, je capture la scène, puis la ramène au bureau pour y travailler ». (Valente 2019, 195)

Un relevé classique s'inscrit en fait dans une *small data logic*, que nous pourrions même extrapoler à l'idée de *small data pratique*. Avec un double-mètre et un calepin, un arpenteur humain n'a pas la possibilité de noter chaque distance et chaque angle de l'espace. C'est là, toute la vocation des nouveaux outils de capture de la réalité. Ou plutôt, ils en récoltent chaque point. La différence est majeure et reflète ce passage de l'abstraction à la mise en données. Là où la mesure d'une distance ou d'un angle est la relation entre deux éléments et donc une notion abstraite, le positionnement d'un point dans l'espace est à l'inverse une donnée très concrète. Nous voyons ici que se mettent en place des procédés de récolte de la donnée de masse dans le monde de la construction, qui nous font basculer dans un nouveau rapport au monde existant.

B. Les phases d'existence du projet et de ses composants

Comme nous l'avons vu précédemment, la dimension temporelle des projets d'architecture relève d'enjeux majeurs à notre époque. Les processus BIM y apportent une réponse particulièrement efficace lors de la conception du projet, avec l'implémentation dans les maquettes de données dites de « phases de construction » sur Revit ou de « filtres de rénovation » sur Archicad. Ces options sont, bien entendu, personnalisables et nous allons en présenter deux applications. Malgré des interfaces et appellations propres, et des manipulations quelque peu différentes, les deux logiciels se basent, à partir de ces deux menus, sur un système très similaire. Le projet dans son ensemble se voit attribuer plusieurs phases personnalisables, qui se rapportent à des moments définis de son existence. Sont ensuite assignés à chaque élément du projet, autant physiques -murs, fenêtres, etc- que conceptuels -pièces, espaces-, des états d'existence par rapport aux phases du projet dans son ensemble. Ainsi, nous pourrions déclarer que tel mur apparaît à tel moment d'existence du projet, et qu'il disparaît à tel autre moment. Cela aura un impact direct sur la représentation du projet dans les documents, qui pourra s'effectuer avec différentes combinaisons : afficher seulement l'existant, l'existant plus le projeté, l'existant plus le démolli, etc. L'impact aura aussi bien évidemment lieu sur toute la donnée générée en conséquence, ce qui est précisément l'intérêt du BIM. Nous pourrions ainsi sortir des nomenclatures par phases, étudier le volume d'éléments démolis ou rajoutés, ou concevoir le projet avec une vision instantanée de l'impact de chaque décision sur plusieurs phases. Il faut bien saisir ici la différence avec le fait de concevoir plusieurs variantes pour un projet -par exemple lorsque l'on veut proposer à un client plusieurs solutions d'agencement. Ici nous parlons bien d'une seule et même maquette, et non de copies dans deux fichiers distincts ou l'une à côté de l'autre dans le même fichier, pas plus que nous ne parlons de calques, comme l'on procéderait avec un dessin traditionnel. Non, à travers la 4D dans le BIM, nous avons bien la possibilité d'appréhender cette dimension du temps de manière similaire à la réalité : sur un même bâtiment, apparaissent et disparaissent des éléments au fil de son évolution.

1. Le projet de rénovation, de transformation ou d'addition

La rénovation, la transformation ou l'addition sont des projets d'intervention sur un bâtiment existant. Sa modélisation préalable est donc nécessaire comme nous l'avons vu avec la numérisation 3D. D'autres méthodes existent bien entendu pour y parvenir, par exemple à partir de plans s'ils sont disponibles. Pour se faciliter la tâche, on pourrait envisager de simplifier l'existant comme un ensemble de volumes non renseignés, et de l'avoir dans le logiciel comme une sorte de sous-couche au futur projet. Toutefois, l'intérêt de modéliser l'existant correctement en BIM est multiple : d'abord, il nécessite un temps d'analyse, ce qui engendre une meilleure compréhension des tenants et aboutissants du bâtiment. Ensuite, si la démolition est un acte très aisé numériquement avec le bouton *erase*, dans la réalité non seulement son coût est conséquent et à anticiper, mais elle a aussi un impact important sur le déroulement d'un chantier. Le BIM permet ainsi de véritablement projeter l'acte de démolir. Ensuite, en classifiant rigoureusement ce qui reste de ce qui ne reste pas, il est plus commode de projeter les nouveaux éléments qui vont s'y ajouter. A nouveau, il ne s'agit vraiment pas de calques, même si le procédé en revêt l'apparence : la donnée temps est véritablement intégrée à chaque élément et l'affichage relève de paramètres dédiés.

Dans le cadre de l'unité d'enseignement : introduction au BIM d'Elise Hauteceur à l'EPFL en 2020, nous étions invités à proposer une transformation de deux étages du célèbre 1111 Lincoln Road d'Herzog & de Meuron en appartements de luxe. Nous avons mis en place cette méthode de phasage comme le montre la figure 16. Ce procédé de conception a soulevé quelques questions intéressantes : notamment, le percement d'une dalle doit-il se classer comme élément démoli ou comme élément nouveau? Aussi, des questions se posent sur les éléments nécessaires à conserver pour garantir l'équilibre de la structure, ou en lien avec le scénario de montage du chantier.

2. Le projet à programme séquentiel

Au-delà d'une intervention sur l'existant, les phases peuvent également s'appliquer à des états futurs du bâtiment, qu'ils soient réellement projetés ou envisagés comme une possibilité de reprogrammation du bâtiment. Imaginons l'exemple d'Odile Deck cité précédemment, avec des garderies qui avaient le potentiel à long terme

-
- Existant
 - Démoli
 - Nouveau

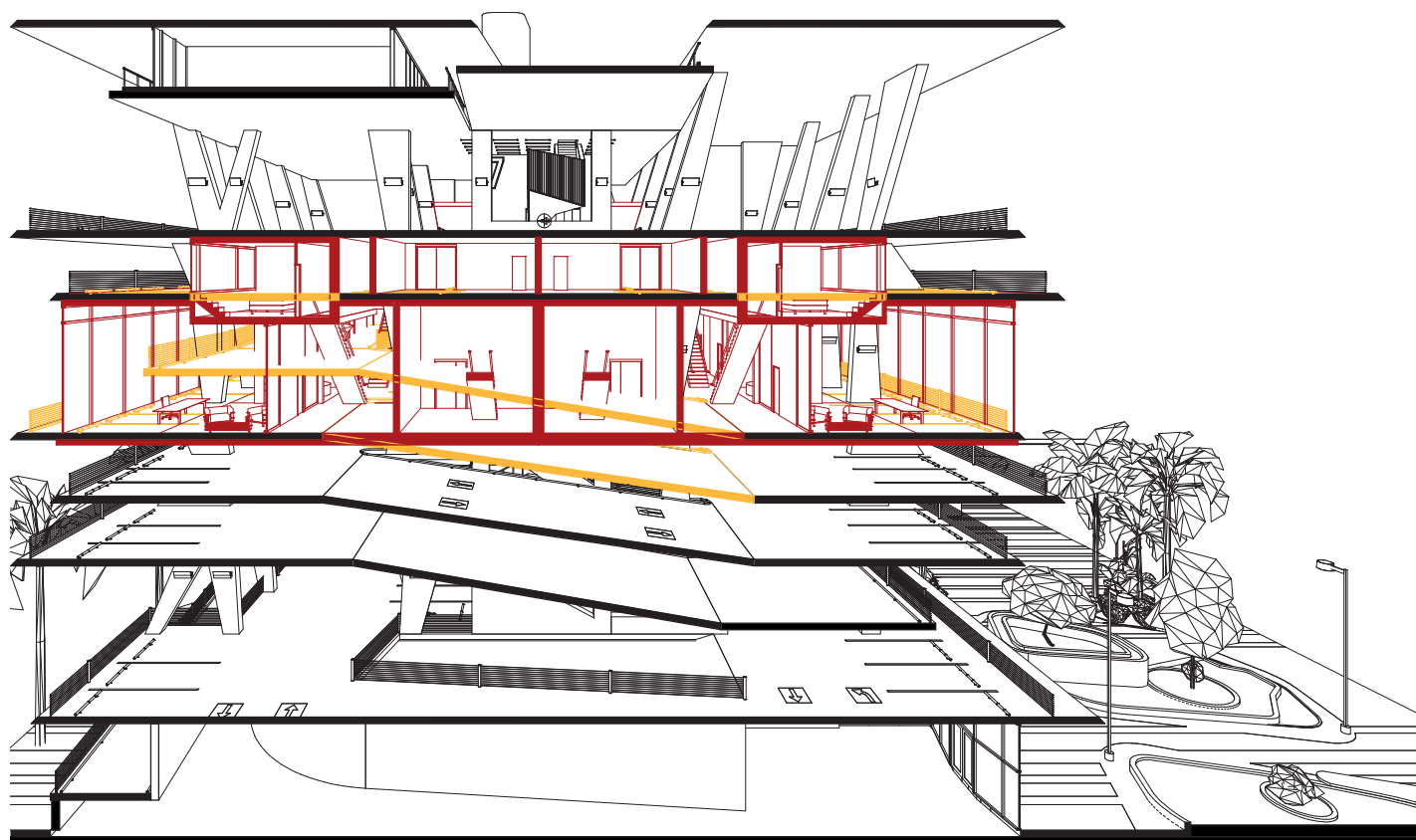
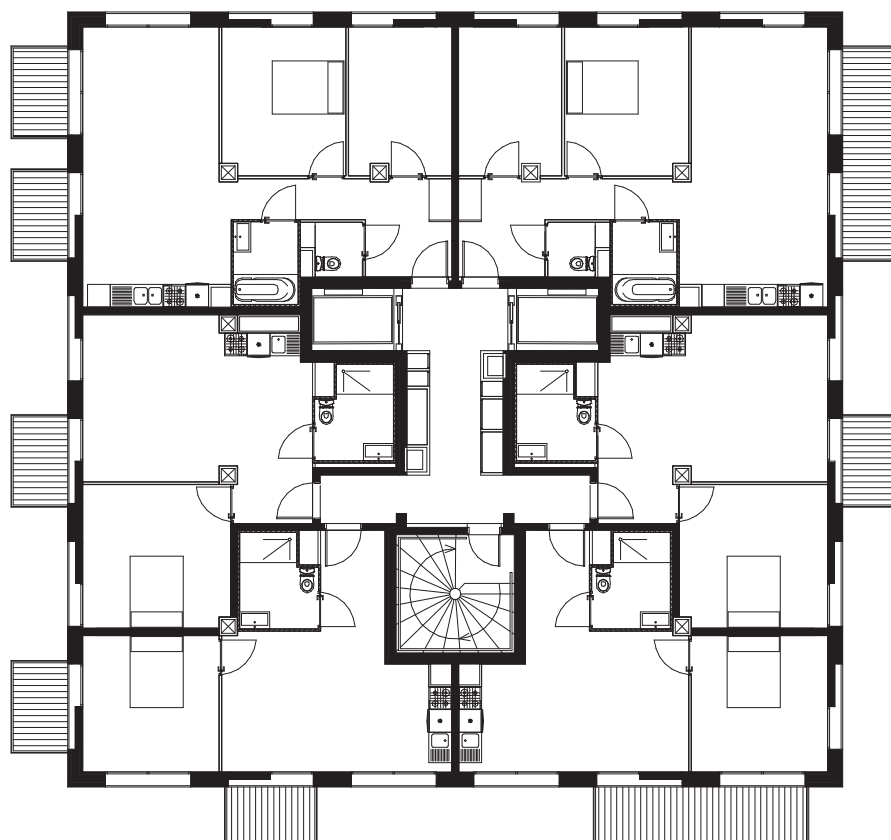
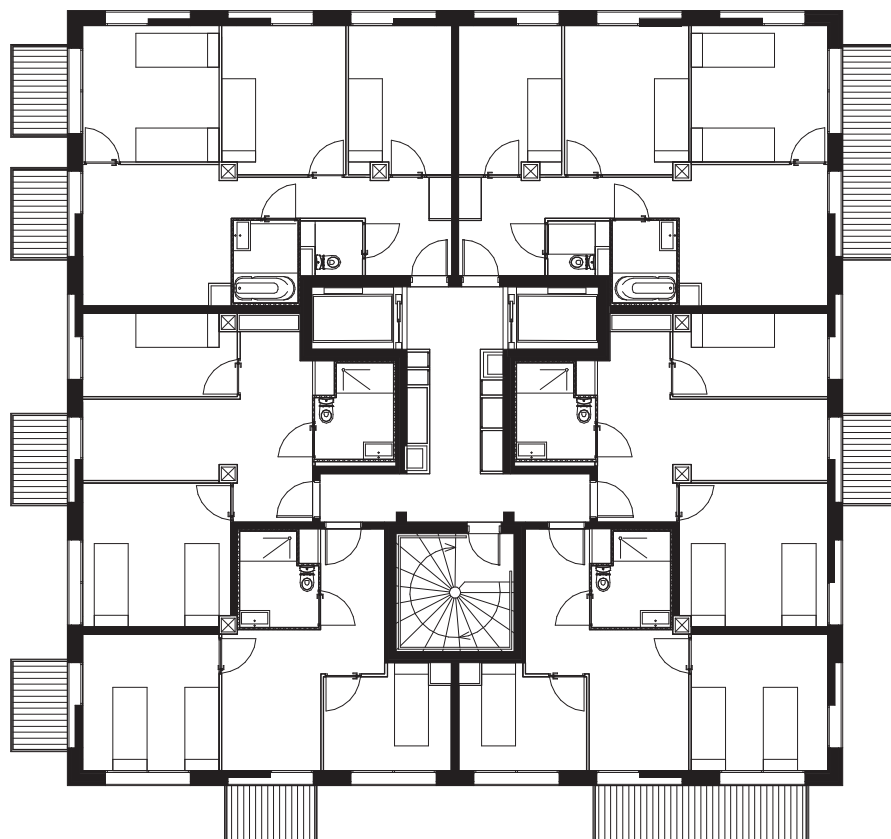


Fig. 16 : 1111 Lincoln Road, Herzog & de Meuron. Projet étudiant de transformation, UE R : Introduction au BIM, EPFL (Dupart, Léveillé, Millius, Vouilloz et Hauteceur 2020)

Fig. 17 : Village olympique de Paris 2024 : une même maquette BIM pour deux phases d'existence projetées du bâtiment.

Plans R+3 du bâtiment E1a, Lot E. Phase Jeux (haut) et phase Héritage (bas).

Bartolo + Contré Architectes.



⌚ 1:200

de devenir des maisons de retraite. Dans une idée similaire, l'agence Bruther a conçu récemment des logements dont les parkings auront le potentiel spatial de se transformer en logements, portant l'idée que les voitures seront moins nombreuses à l'avenir. La flexibilité des espaces devient donc un enjeu fondamental à notre époque. Le BIM permet de véritablement anticiper ces hypothèses. Au-delà de scénarios spéculatifs, il y a des projets dont des phases futures peuvent véritablement être planifiées à l'avance. Ainsi, une maison familiale pourrait être projetée avec l'ambition de transformer peu à peu les chambres des enfants en studios semi-autonomes pour plus d'indépendance à leur adolescence ; puis d'être finalement totalement séparées de l'ensemble jusqu'à devenir des appartements indépendants, pour pouvoir les louer une fois les enfants partis. Dans des scénarios à plus court terme, imaginons aussi des projets où la saisonnalité a son importance, par exemple dans des stations touristiques qui connaissent un fort afflux à certains moments de l'année : dès lors comment adapter par exemple un supermarché à une présence cyclique des touristes?

Enfin prenons un exemple que j'ai eu l'occasion d'expérimenter très concrètement, lors d'un stage à Paris dans l'agence Bartolo + Contré Architectes au printemps 2019. Nous avons participé aux concours de lots pour le village des athlètes des Jeux olympiques de 2024, au sein de groupements multi-disciplinaires et donc avec un haut niveau de déploiement du BIM en processus collaboratifs. Or, il se trouve que de tels événements sportifs internationaux posent depuis des décennies la question de la réutilisation des infrastructures édifiées. Dans le cas des logements du village olympique de Paris, deux cahiers des charges furent donc soumis aux architectes, à concevoir simultanément pour les mêmes bâtiments : la phase Jeux, avec ses conditions spécifiques pour accueillir les athlètes olympiques et paralympiques, puis la phase Héritage, avec un cahier des charges plus conventionnel. Nous avons dès lors introduit un phasage 4D dans la maquette Revit, qui nous a permis de véritablement gérer la conception de ces espaces avec leur dimension temporelle : en ouvrant dans deux fenêtres distinctes le même plan paramétré sur deux phases différentes, nous pouvions véritablement concevoir simultanément les deux cahiers des charges sur le même espace, telle qu'affiché en figure 17. Il suffisait simplement de renseigner, sur chaque élément créé, sa phase de montage et sa phase de démolition.

C. Planifier l'exécution du projet

1. Conception et exécution, un clivage anachronique?

Nous avons beaucoup exploré l'impact du BIM sur la conception du projet de construction. Sa phase d'exécution n'en est pas moins chamboulée par ces nouveaux processus ; le BIM permet de prendre en compte très tôt la réalisation du projet, au point de désaffermir la frontière hermétique entre conception et exécution, qui s'était constituée comme on l'a vu à partir de la Renaissance. D'abord, il est entre autres possible de travailler dans une maquette BIM directement avec des objets disponibles sur le marché, par exemple des fenêtres ou des éléments sanitaires : des entreprises mettent en effet à disposition leurs modèles téléchargeables directement sur leurs sites web. Ensuite, l'aspect collaboratif du BIM intègre dès le début du processus tous les acteurs des différents corps de métier, ce qui pourrait nous rapprocher d'une configuration pré-Albertienne, comme soulevé dans le chapitre *The Style of Many Hands*. Ces exemples sont terre-à-terre mais en fait assez révélateurs : le projet conventionnel d'architecture qui se base sur l'abstraction nécessite un processus de conversion, semé d'incertitudes, entre la conception et l'exécution : la 2D devient 3D, le rectangle devient fenêtre, et la ligne en pointillé devient une poutre porteuse. Avec un peu de recul, il paraît absurde de persévérer dans cette voie. Quid des possibles conflits entre certains éléments, quid de la performance thermique du bâtiment ou quid de son comportement structurel? Aujourd'hui, nous pouvons grâce à la big data numérique anticiper le projet et ses composants dans toute leur plénitude. Or à notre époque, une construction est bien plus complexe qu'à la Renaissance d'un point de vue systémique : les matériaux, les réseaux (plomberie, électricité, chauffage, etc), les exigences de performance (thermique, acoustique, etc) se sont démultipliées et il est sans doute temps de reconnaître avec modestie que nos outils ne sont plus adaptés, et que la situation hégémonique de l'abstraction architecturale est dépassée. Le BIM non seulement anticipe et vérifie toutes ces considérations, mais permet surtout de les intégrer comme de véritables décisions de conception. Nous voilà peut-être de retour à une

configuration pré-Albertienne de la construction. Et la mise en donnée du temps de l'exécution, cette composante balayée par les architectes de la Renaissance, y est tout sauf étrangère. Voyons pourquoi.

2. Le BIM dans les processus méthodes

En tant qu'étudiant, il est difficile de se figurer pratiquement la planification d'un chantier. C'est un aspect fondamental du métier d'architecte et du BIM, mais qui reste inexploré au stade des études. Le titre de ce passage emprunte donc volontairement son nom à un chapitre de Maxime Balitrand dans son mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur CNAM spécialité BTP, « L'intégration du BIM dans le processus des méthodes » (2020). Les potentiels du BIM dans le cadre de l'exécution d'un projet y sont très détaillés, et leur reprise ici est presque telle quelle, condensée et a surtout vocation à ouvrir des pistes de développement au projet de Master consécutif à cet énoncé. Le terme de « méthodes » employé par Balitrand se réfère à un ensemble de processus d'optimisation des délais de réalisation du gros-oeuvre. Il en mentionne une quinzaine dont il en identifie cinq où l'usage du BIM a dès aujourd'hui un très fort potentiel. Ce sont donc cinq pistes sujettes à développement pour le semestre prochain, bien que certaines relèvent plutôt de tâches propres à l'ingénierie.

Métrés et planning objectif

Un métré opérationnel consiste à quantifier les éléments basiques constitutifs du projet par niveau et par zone : poteaux, poutres, voiles et sols. La maquette BIM permet de générer automatiquement ces métrés, car l'objectif est précisément d'y avoir renseigné les informations nécessaires à une telle identification. Avec l'outil nomenclature, nous pourrions extraire un tableau donnant par exemple le nombre de poteaux à tel étage et dans telle pièce, de même que le total de mètres linéaires correspondants. Ensuite, chaque élément de construction a une durée contractuelle -c'est-à-dire une estimation du temps de montage nécessaire-, et en les croisant avec le métré obtenu précédemment, on obtient un planning objectif. Il nous donne la durée optimale du gros-oeuvre, le nombre de jours de grue, l'enclenchement des tâches, les effectifs, etc... Une pondération d'aléas doit y être ajoutée, puis l'on peut établir un phasage des tâches à réaliser par jour, en prenant en compte les effectifs, le matériel de chantier ou encore les

durées d'exécution ou de maturation des matériaux -séchage du béton par exemple. Avec tout cela nous pourrions définir un diagramme de Gantt qui est, en quelque sorte, un calendrier des différents processus de construction envisagés sur le chantier. L'usage d'une maquette BIM permet donc d'affecter ces renseignements temporels directement aux géométries concernées. Nous implémenterons donc la donnée sur les éléments dans Revit après avoir créé les paramètres nécessaires ; nous importerons ensuite le modèle sur Navisworks, qui juxtapose dans son interface une visualisation 4D du montage du projet à un diagramme de Gant : nous pourrions y définir les tâches, et y assigner les différents éléments récupérés de Revit. Balitrand résume les potentiels d'un tel planning 4D :

- 1- Simuler les séquences de construction et de façon plus générale la bonne coordination générale des travaux;
- 2- Synchroniser les livraisons et éviter les ruptures de production;
- 3- Mieux sécuriser le travail sur le chantier;
- 4- Etudier l'accessibilité des engins et leur installation (ex : grue mobile);
- 5- Servir d'outils de communication avec des personnes extérieures au projet (ex : pompiers). (Balitrand 2020, 52)

Modes constructifs

Les modes constructifs sont très parlants du retour en fanfare de la donnée temps dans le projet de construction grâce à la quatrième dimension du BIM : ils désignent précisément « les aspects liés à la réalisation de l'ouvrage et à l'acte de construire » (Balitrand 2020, 54). L'élément n'est plus considéré comme un état simplement final : on y intègre les données se rapportant à sa construction. A titre d'exemple un poteau en béton armé peut être préfabriqué ou coulé sur place, en coffrage caisson ou en coffrage modulaire, etc. Cette planification est révélatrice d'un nouveau mode de conception de l'architecture par la donnée, mais surtout essentielle dans la pratique, car elle aura un impact sur les matériels, les effectifs, les temps de réalisation, en somme sur la coordination générale du chantier. Un usage BIM permet d'identifier ce genre de contraintes, et de mettre à jour en temps réel toutes les

modifications pour étudier et comparer différents scénarios. La séparation des tâches dans le paysage professionnel actuel confine encore cette composante à un statut de "résolution" du projet, mais dans une démarche big data, elle pourrait tout à fait être intégrée dès le début de la conception.

L'étalement

L'étalement ou étagage consiste à poser des éléments temporaires de soutien sur un ouvrage quelconque pour supporter des charges et éviter un affaissement, généralement constitué de pièces de charpente en bois et/ou en métal, lors de la construction de différents ouvrages -par exemple des poteaux pour soutenir le coffrage d'une dalle en béton armé, le temps qu'elle sèche et puisse se porter toute seule. La planification de l'étalement est donc essentielle pour assurer la bonne tenue d'un chantier. Non seulement le BIM se prête bien à la modélisation de ces structures, mais encore la notion de 4D y est intrinsèque car leur disposition évolue au fil du chantier comme le souligne Balitrand :

L'étalement au cours d'un chantier est en rotation perpétuelle en raison des phases d'étalement et de la réalisation de nouveaux niveaux qui amèneront des charges aux niveaux inférieurs. L'étalement nécessite beaucoup de matériel et son inventaire peut rapidement devenir très chronophage. (Balitrand 2020, 63)

Suivi de l'avancement du chantier

Une maquette BIM permet de réaliser un pointage régulier du chantier, en renseignant l'état d'avancement des différents éléments, et par conséquent du chantier. Ceci permet de comparer avec ce qui avait été prévu et d'ajuster les échéances en fonction. A nouveau le BIM génère les métrés automatiquement sur la base des éléments renseignés, ce qui optimise le temps nécessaire et la précision du suivi. Dans une démarche big data, cela permet aussi à l'entreprise de construction d'avoir à la fin du chantier, un regard complet et renseigné sur ce qui a mieux fonctionné ou non par rapport à la planification originale, pour s'améliorer sur un prochain chantier.

Automatiser des tâches via la programmation visuelle

La planification BIM d'un chantier implique certaines tâches répétitives et fastidieuses, comme le renseignement d'informations sur des éléments similaires. Sans compter que, comme nous l'avons vu avec la génération automatique de métrés et autres informations, le BIM permet un retour quasi instantané des impacts des décisions prises, et est donc sujet à un processus de décisions moins linéaire que sur un processus classique. Afin de limiter ces manipulations, il existe des logiciels de programmation visuelle comme Grasshopper ou Dynamo qui permettent d'effectuer des scripts sans codage. Balitrand argumente : « La réalisation d'un script permet de gagner du temps lors de la modélisation mais aussi lors des modifications ultérieures puisqu'il suffira de modifier les valeurs de certains paramètres pour que la structure se mette à jour en conséquence. » (Balitrand 2020, 70). Et de mentionner les exemples d'utilisation suivants : modélisation complexe comme le ferrailage d'une poutre, ajout de fonctionnalités supplémentaires comme des détections de clash particulières, automatisation de tâches fastidieuses notamment en vue des nomenclatures, et exports de données particulières au format Excel. (Balitrand 2020, 73)

IV. Projet de Master : transformation de la halle ferroviaire 3, Wolf Quar- tier, Bâle



Transformer une structure industrielle dans un quartier reprogrammé

Le Projet de Master consécutif à cet énoncé théorique aura pour objectif la transformation d'une halle industrielle des CFF (Chemins de fer fédéraux suisses) à Bâle. L'enjeu est d'explorer le potentiel de la 4D dans le BIM sur une reprogrammation d'un bâtiment existant et protégé. En Suisse, les centre-villes des agglomérations urbaines s'agrandissent, en s'étendant notamment sur des espaces industriels autrefois en situation de périphérie ; la transformation de tels espaces est un défi majeur en terme de préservation du patrimoine bâti industriel et de durabilité de la construction. Les CFF, propriétaires de nombreux terrains de la sorte, ne s'y trouvent pas par hasard : leur cellule immobilière est le plus grand propriétaire foncier du pays et participe pour beaucoup au financement de nos infrastructures ferroviaires. Ce phénomène avait donc été envisagé comme une véritable stratégie d'acquisition de terrains à forte valorisation dans le futur, un futur dans lequel nous sommes désormais entrés. La 4D est un BIM *use* très en adéquation avec ce sujet. Après une première prise de contact, les CFF nous ont rapidement mis en relation avec le *Smart City Lab Basel*, leur cellule d'innovation qui est justement sise provisoirement dans les halles de cette gare de marchandises en voie de transformation au sud-est de la cité rhénane. Ce futur quartier, appelé Wolf, ambitionne de devenir le site le plus « intelligent » de Suisse. En effet, les CFF sont un acteur majeur de l'innovation en Suisse, et les technologies numériques et l'utilisation des données ouvrent de nouvelles possibilités, que les CFF et le canton de Bâle-Ville testent avec des partenaires sur le site. A partir du printemps 2019, différentes start-up ont ainsi pris place dans les halles et développent de nouvelles idées pour la mobilité et la logistique du futur, du quartier Wolf et de la Suisse en général (Mall 2020). De par son caractère étudiant, ce travail n'est pas officiellement lié au *Smart City Lab*, qui a cependant montré son intérêt pour les potentiels du BIM développés dans ce travail ; il nous a donc ouvert l'accès à la halle principale du quartier Wolf pour en effectuer la capture 3D et en proposer une transformation.

Ce projet s'inscrit ainsi dans un scénario réel, et anticipe les concours d'architecture à venir. Le nouveau quartier ur-

bain prendra place sur une partie de cette gare de marchandises, dont l'activité sera partiellement transférée au nord de la ville. Le schéma urbain a été présenté le 20 février 2019, sur la base des deux propositions des agences Christ & Gantenbein et EM2N issues d'une étude réalisée en 2017. La solution retenue propose une cour s'étendant dans une direction est-ouest, les bâtiments historiques étant sauvegardés pour renforcer l'identité du nouveau quartier. Elle prévoit environ 73'000 m² d'espace résidentiel, 36'000 m² de bureaux et de services, 62'000 m² pour des usages commerciaux et logistiques et 11'000 m² pour des équipements publics, le commerce de détail et la restauration. Vie et travail seront séparés en une cour résidentielle et une cour commerciale. La mobilité joue un rôle important dans le développement de ce quartier. Outre une piste cyclable et une station de bus prévues le long de la St. Jakobs-Strasse, la halle 3, objet de ce Projet de Master, sera l'élément central de cette mobilité : une longue passerelle sur rails pour le trafic non motorisé est prévue depuis la halle vers le sud. En outre, un arrêt séparé du S-Bahn est prévu dans la halle, dont la structure conçue en deux voûtes est déjà à cheval entre le quartier et les rails -la plus petite voûte abrite ainsi déjà une voie ferrée. Le site est donc actuellement occupé par le *Smart City Lab* pour des utilisations pionnières. Dans la prochaine étape de planification, le canton de Bâle-Ville et les CFF établiront un plan de développement et des concours d'architecture auront lieu. Les premières étapes des nouvelles constructions sont actuellement prévues à partir de 2024 (Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt s. d.). C'est donc en anticipation de ces concours, et plus particulièrement celui de la halle ferroviaire 3, que sera développé ce Projet de Master sur la 4D dans le BIM.



Fig. 18 : Halle 3, Wolf Quartier, Bâle

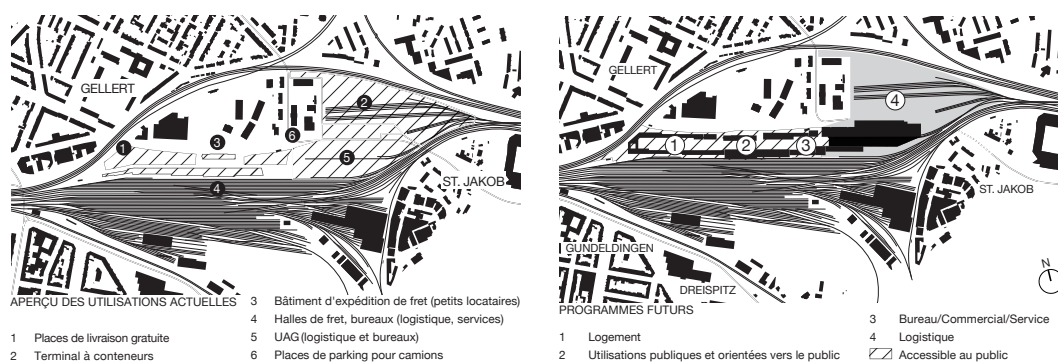


Fig. 19 : Wolf Quartier, projet indicatif 2019 (Christ & Gantenbein, EM2N)

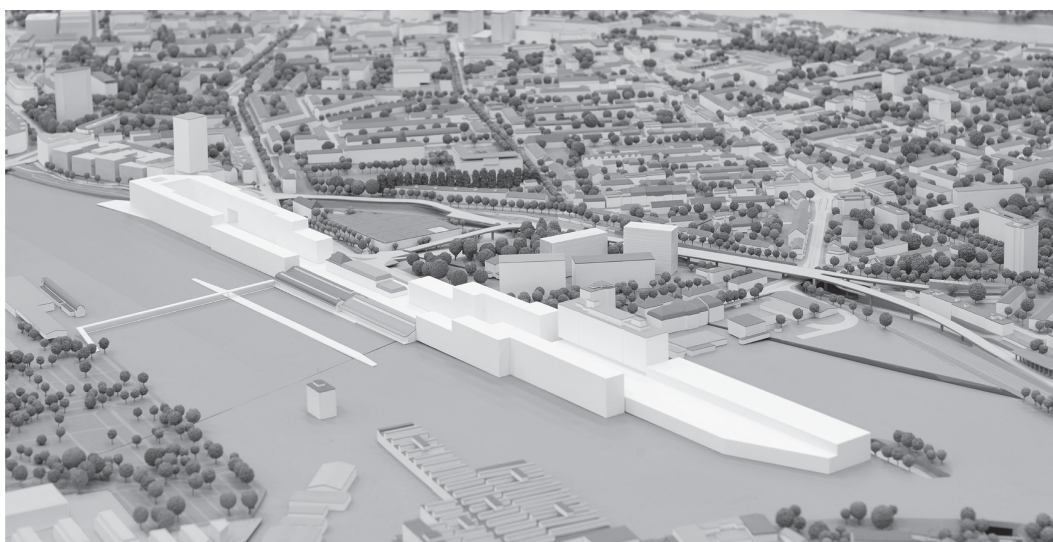


Fig. 20 : Maquette du projet indicatif dans la maquette urbaine du canton de Bâle-Ville (Pitschmann)

Index des figures

Fig. 1 : BIM uses

Penn State University's Computer Integrated Construction Research Group, « BIM Uses », consulté le 25 octobre 2020, http://bim.psu.edu/bim_uses/. Modifié.

Fig. 2 : Interopérabilité des données

Romain Géry, « Acquisition de données » (Module N°5 du cours *AR-484 Introduction au BIM* de Elise Hautecoeur, Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 16 octobre 2019). Non accessible au public. Modifié.

Fig. 3 : Plan de Saint-Gall

Plan de Saint-Gall, ca. 820, encre sur parchemin, 113 x 78 cm., Stifts-Bibliothek, Saint-Gall, consulté le 9 novembre 2020, http://www.stgallplan.org/en/index_plan.html. Modifié.

Fig. 4 : Le Triomphe de la Mort

Le Triomphe de la Mort, 1446, fresque détachée, 600 x 642 cm., Galleria Regionale di Palazzo Abbatellis, Palerme. Wikimedia Commons. Consulté le 4 décembre 2020, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trionfo_della_morte,_gi%C3%A0_a_palazzo_sclafani,_galleria_regionale_di_Palazzo_Abbatellis,_palermo_\(1446\),_affresco_staccato.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trionfo_della_morte,_gi%C3%A0_a_palazzo_sclafani,_galleria_regionale_di_Palazzo_Abbatellis,_palermo_(1446),_affresco_staccato.jpg). Vue dans :

Trachtenberg, *Building-in-Time from Giotto to Alberti and Modern Oblivion*, 54. Modifié.

Fig. 5 : Musée d'Art de Graz

Marion Schneider et Christoph Aistleitner, *Kunsthhaus in Graz, Austria; seen from Schlossberg*, 26 novembre 2006, consulté le 28 octobre 2020, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graz_Kunsthhaus_vom_Schlossberg_20061126.jpg. Modifié.

Fig. 6 : Guillaume Philandrier, In decem libros Vitruvii [...] annotationes

Guillaume Philandrier, *In decem libros Vitruvii [...] annotationes*, 1544, 78-79, Bibliothèque de Genève, la-257. Vu dans : Carpo, *Architecture in the Age of Printing: Orality, Writing, Typography, and Printed Images in the History of Architectural Theory*, 66-67.

Fig. 7 : Carte de l'Atlantique Nord par M. F. Maury (1855)

Matthew Fontaine Maury, *Bassin Nord de l'Océan Atlantique*, in Matthew Fontaine Maury, *Géographie physique de la mer. ATLAS*, trad. par Paul-Augustin Terquem (Paris: J. Corréard, 1861), 25, planche 11, consulté le 14 novembre 2020, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9642181s/f25.item>. Modifié. Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de

France.

Fig. 8 : Valeurs de charge 2020 pour le trafic routier suisse
opendata.swiss, « Valeurs de charge 2020 pour le trafic voyageurs et pour le trafic marchandises », consulté le 9 novembre 2020. <https://opendata.swiss/fr/dataset/vm-uvek-shapefile-2020>. Carte : auteur.

Fig. 9 : Table des 128 caractères ASCII
Wikipedia. 2020. « American Standard Code for Information Interchange. », consulté le 30 décembre 2020. https://fr.wikipedia.org/wiki/American_Standard_Code_for_Information_Interchange. Modifié.

Fig. 10 : Les dimensions du BIM
Elise Hautecoeur, « BIM - Notions de base » (Module N°1 du cours *AR-484 Introduction au BIM* de Elise Hautecoeur, Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2019). Non accessible au public. Modifié.

Fig. 11 : Profil des agences d'architecture françaises qui travaillent en BIM
Elodie Hochscheid et Gilles Halin. 2020. « Synthèse Enquête «Le BIM dans les agences d'architecture» », Nancy: MAP-CRAI (ENSA) et CNOA. <https://www.architectes.org/>

[org/le-bim-dans-les-agences-d-architecture](https://www.architectes.org/le-bim-dans-les-agences-d-architecture). Modifié.

Fig. 12 : Le BIM dans le monde en 2016
Elise Hautecoeur, « BIM - Notions de base » (Module N°1 du cours *AR-484 Introduction au BIM* de Elise Hautecoeur, Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2019). Non accessible au public. Modifié.

Fig. 13 : Atom: Graph of use cycle and lifespan
Cedric Price, *Atom: Graph of use cycle and lifespan*, 1967-1968, copie reprographique, 45,7 × 69,2 cm., Cedric Price fonds - Collection Centre Canadien d'Architecture/ - Canadian Centre for Architecture, Montréal, consulté le 22 novembre 2020. <https://www.cca.qc.ca/en/search/details/collection/object/310204>. Modifié.

Fig. 14 : Production dans le monde de la construction
Clément Valente, *Numérisation 3D & Construction* (Lyon: BTP.digital, 2019), 11. Modifié.

Fig. 15 : Capture 3D de la halle 3, Wolf Quartier, Bâle
Aurélien Brun, Romain Kirchhoff, Raphaël Vouilloz et Ahmed Wael. 2020. Bâle. Non accessible au public.

Fig. 16 : 1111 Lincoln Road, Herzog & de Meuron. Projet étudiant de transformation, UE BIM 2020, EPFL

Louis Dupart, Sébastien Léveillé, Florian Millius, Raphaël Vouilloz. Modélisation de l'existant : Elise Hautecoeur. (Projet étudiant dans le cadre du cours *AR-435 UE R : Introduction au BIM* de Elise Hautecoeur, Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, printemps 2020). Non accessible au public. Modifié.

Fig. 17 : Village olympique de Paris 2024 : une même maquette BIM pour deux phases d'existence projetées du bâtiment

Bartolo + Contré Architectes. 2019. «Plans R+3 du bâtiment E1a, Lot E ». <https://www.bartolocontre.com/fr/projets/jo2024-village-des-athletes-lot-e-1376.html>. Dessins non accessibles au public. Modifié.

Fig. 18 : Halle 3, Wolf Quartier, Bâle

Photo personnelle. 2020. Ortophotos depuis Qgis.

Fig. 19 : Wolf Quartier, projet indicatif 2019 (Christ & Gantenbein, EM2N)

Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Städtebau & Architektur. 2019. « Richtprojekt 2019 », consulté le 9 juil-

let 2020. <https://wolf-basel.ch/>. Modifié.

Fig. 20 : Maquette du projet indicatif dans la maquette urbaine du canton de Bâle-Ville

Pitschmann, Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Städtebau & Architektur. 2019. « Richtprojekt 2019 », consulté le 9 juillet 2020. <https://wolf-basel.ch/>. Modifié.

Bibliographie

Livres

- Cache, Bernard. 2011. *Projectiles*. Vol. 6. Architecture Words. London: AA Publications.
- Carpó, Mario. 2001. *Architecture in the Age of Printing: Orality, Writing, Typography, and Printed Images in the History of Architectural Theory*. Traduit par Sarah Benson. 1998. Reprint, Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- — —. 2017. *The Second Digital Turn: Design beyond Intelligence*. Writing Architecture Series. Cambridge Massachusetts: The MIT Press.
- Durand, Jean-Nicolas-Louis. 1802. *Précis des leçons d'architecture données à l'Ecole polytechnique*. Paris: Chez l'Auteur.
- Mayer-Schönberger, Viktor, et Kenneth Cukier. 2014. *Big Data: la révolution des données est en marche*. Traduit par Hayet Dhifallah. Paris: Robert Laffont.
- Mumford, Lewis. (1934) 2015. *Technique et civilisation*. Traduit par Natacha Cauvin et Anne-Lise Thomasson. Collection Eupalinos. Série architecture et urbanisme. Marseille: Parenthèses
- Picon, Antoine. 2010. *Culture numérique et architecture: une introduction*. Bâle: Birkhäuser.
- Sadin, Eric. 2015. *La vie algorithmique: critique de la raison numérique*. Pour en finir avec. Paris: L'Echappée.
- Terzidis, Kostas. 2006. *Algorithmic Architecture*. Amsterdam: Elsevier.
- Trachtenberg, Marvin. 2010. *Building-in-Time: from Giotto to Alberti and Modern Oblivion*. New Haven: Yale University Press.
- Valente, Clément. 2019. *Numérisation 3D & Construction*. Lyon: BTP. digital.

Articles de revue et essais

- Cavaleri, Chiara, et Elena Cogato Lanza. 2020. « Territories in Time: Mapping Palimpsest Horizons ». *Urban Planning* 5 (2): 94-98 <https://doi.org/10.17645/up.v5i2.3385>.
- Corboz, André. 1983. « Le territoire comme palimpseste ». *Diogène* 121 : 14-35. http://www.jointmaster.ch/file.cfm/document/Le_territoire_comme_palimpseste.pdf?contentid=1042.

- Hewitt, Mark. 1985. « Representational Forms and Modes of Conception; an Approach to the History of Architectural Drawing ». *Journal of Architectural Education* 39 (2): 2-9. <https://doi.org/10.1080/10464883.1985.10758387>.
- Marot, Sébastien. 2011. « Sub-urbanisme / sur-urbanisme ». *Marnes, documents d'architecture*. Vol. 1. Sous la direction de Sébastien Marot et Éric Alonzo, 301-353. Paris: La Vilette.
- Viganò, Paola. 2020. « Palimpsest Metaphor: Figures and Spaces of the Contemporary Project ». *Urban Planning* 5 (2): 167-71. <https://doi.org/10.17645/up.v5i2.3251>.

Thèses

- Balitrond, Maxime. 2020. « L'intégration du BIM dans le processus des méthodes ». Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur CNAM spécialité BTP, Toulouse: IPST-CNAM, Université de Toulouse.
- Chaillou, Stanislas. 2019. « AI + Architecture ». Thèse de Master, Cambridge Massachusetts: Harvard University Graduate School of Design.
- Hamieh, Ahmed. 2018. « Planification automatique de chemins à l'intérieur de bâtiments basée sur un modèle BIM ». Mécanique des structures [physics.class-ph]. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. Français. NNT : 2018VALE0037 . tel-01962131

Rapports

- Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Städtebau & Architektur. 2019. « Entwicklung Wolf Basel, Städtebaulicher Studienauftrag und Richtprojekt, Schlussbericht ». <https://wolf-basel.ch/>
- Bordage, Frédéric. (2015) 2019. « Empreinte environnementale du numérique mondial ». GreenIT.fr. <https://www.greenit.fr/empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>.
- Hochscheid, Elodie et Gilles Halin. 2020. « Synthèse Enquête "Le BIM dans les agences d'architecture" ». MAP-CRAI (ENSA de Nancy) et CNOA. Nancy. <https://www.architectes.org/le-bim-dans-les-agences-d-architecture>.

The Shift Project. 2018. « Pour une sobriété numérique ». Groupe de travail "Lean ICT". Paris. <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>.

Documents

Isdant, Raphaël. 2009. « Traitement numérique de l'image ». http://raphael.isdant.free.fr/traitement_numerique/2-traitement_numerique_de_l%27image.pdf.

Cours

Aureli, Pier Vittorio. 2019. Cours *AR-437 A History of Abstraction in Architecture*. Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, semestre d'automne.

Hautecoeur, Elise. 2019. Cours *AR-484 Introduction au BIM*. Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, semestre d'automne.

Hautecoeur, Elise. 2020. Cours *AR-435 UE R : Introduction au BIM*. Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, semestre de printemps.

Picon, Antoine. 2019. Cours *AR-521 De la structure à l'ornement*. Ecublens: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, semestre d'automne.

Conférences

Alahi, Alexandre. 2020. « Will Artificial Intelligence Reshape Architecture? ». Ecublens: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, septembre 29. <https://www.youtube.com/watch?v=JtLCUc-tr-d8&feature=youtu.be>.

Jancovici, Jean-Marc. 2020. « Jancovici : James Finance contre Docteur Carbone ». Genève: Atlanti Forward Thinking Series, septembre 17. <https://www.youtube.com/watch?v=xMpTDcuHl9w>.

LeCun, Yann. 2016. « L'apprentissage profond : une révolution en intelligence artificielle ». Leçon inaugurale. Paris: Collège de France, février 04. <https://www.college-de-france.fr/site/yann-lecun/inaugural-lecture-2016-02-04-18h00.htm>

- Decq, Odile, Gilles Delalex, Nicolas Dorval-Bory, Valentine Guichardaz-Versini et Philippe Rahm. 2020. « Quel futur pour l'architecture ? Nouveaux contextes, nouveaux paradigmes ». Paris: Journées nationales de l'architecture 2020, octobre 17. https://www.youtube.com/watch?v=fAp4SzZVNyA&t=340s&ab_channel=Cit%C3%A9del%27architectureetdupatrimoine.
- Price, Cedric. 1991. « Time and the City . . . ». Londres: AA School of Architecture, janvier 31. https://www.youtube.com/watch?v=GQ_13n161XA&t=3029s.

Documentaires

- Orlowski, Jeff. 2020. *The Social Dilemma*. Documentaire-drame. Netflix.

Interviews

- Krim, Tariq, et Bernard Benhamou. 2020. Tariq Krim et Bernard Benhamou : Souveraineté numérique, la douche froide ? Entretien réalisé par Sky. Thinkerview. <https://www.thinkerview.com/tariq-krim-et-bernard-benhamou-souverainete-numerique-la-douche-froide/>.
- Mall, Salomé. 2020. Rencontre à propos du Smart City Lab Basel. Entretien personnel. Bâle, 29 juillet 2020.
- Sadin, Éric. 2018. Éric Sadin : l'asservissement par l'Intelligence Artificielle ? Entretien réalisé par Sky. Thinkerview. <https://www.thinkerview.com/eric-sadin-lasservissement-par-lintelligence-artificielle/>.

Vidéos

- Louapre, David. 2016. Le deep learning. ScienceEtonnante, 20 :06. <https://www.youtube.com/watch?v=trWrEWfhTVg>.

Pages Web

- Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt. s. d. « Wolf ». Planungsamt. Consulté le 21 décembre 2020. <https://www.planungsamt.bs.ch/arealentwicklung/wolf.html>.
- BIM+. 2020. « Q&A: OMA's Alex Mortiboys – pitch perfect digital

- design ». 26 juillet 2020. <https://www.bimplus.co.uk/analysis/q-omas-alex-mortiboys-pitch-perfect-digital-design/>.
- Chaillou, Stanislas, et Espen Kristian Wulff Wold. 2020. « What's New for Apartments in Spacemaker ». 27 octobre 2020. Spacemaker. <https://www.spacemakerai.com/blog/whats-new-for-apartments-in-spacemaker>.
- CNIL. s. d. « Qu'est-ce que le Bouclier de Protection des Données ? ». CNIL. Consulté le 27 décembre 2020. <https://www.cnil.fr/fr/cnil-direct/question/quest-ce-que-le-bouclier-de-protection-des-donnees>.
- EPFL. 2020. « Enoncé théorique de master, AR-598 ». EPFL, Fiches de cours. <https://edu.epfl.ch/coursebook/fr/enonce-theorique-de-master-AR-598>.
- EPFL. 2021. « Venice Time Machine ». EPFL. <https://www.epfl.ch/research/domains/venice-time-machine/>.
- Jollien, Nathalie. 2020. « Détecter les occupants d'un bâtiment grâce aux vibrations du sol ». EPFL. 27 octobre 2020. <https://actu.epfl.ch/news/detecter-les-occupants-d-un-batiment-grace-aux-vib/>.
- Muncanovic, Tamara. 2019. « Quand l'intelligence artificielle concurrence les artistes ». RTS. 20 mars 2019. <https://www.rts.ch/info/culture/10265675-quand-lintelligence-artificielle-concurrence-les-artistes.html>.
- Objectif BIM. s. d. « BIM et maquette numérique. Découvrir et apprendre sur Objectif BIM ». Objectif BIM. Consulté le 29 octobre 2020. <http://www.objectif-bim.com/>.
- Penn State University's Computer Integrated Construction Research Group. s. d. « BIM Planning ». Penn State University's Computer Integrated Construction Research Group. Consulté le 29 octobre 2020. <http://bim.psu.edu/>.
- Pessina, Laure-Anne. s. d. « Le bâtiment de mécanique fonctionnera comme un laboratoire géant : petite visite guidée – STI – School of Engineering ». EPFL, sciences et techniques de l'ingénieur. Consulté le 31 décembre 2020. <https://sti.epfl.ch/fr/le-batiment-de-mecanique-fonctionnera-comme-un-laboratoire-geant-petite-visite-guidee/>.
- Smart City Lab Basel. s. d. « Smart City Lab Basel ». Smart City Lab Basel. Consulté le 21 décembre 2020. <https://smartcitylabbasel.ch/>.

Walmsley, Kean. s. d. « Hands-on with Project Rediscover: Generatively Designing the Autodesk Toronto Office ». Autodesk University. Consulté le 21 décembre 2020. <https://www.autodesk.com/autodesk-university/fr/node/125929>.

Wuillemin, Pierre-Henri. 20 octobre 2016. « Deep learning pour l'acquisition d'information dans des inférences bayésiennes ». Consulté le 4 janvier 2021. <http://androide.lip6.fr/?q=node/225>.

Billets de blog

Coldewey, Devin, et Frederic Lardinois. 2017. « DeepL Schools Other Online Translators with Clever Machine Learning ». *TechCrunch* (blog). 29 août 2017. <https://social.techcrunch.com/2017/08/29/deepl-schools-other-online-translators-with-clever-machine-learning/>.

Di Giacomo, Emmanuel. 2020. « Autodesk rachète Spacemaker et met à disposition des architectes, la conception générative basée sur l'intelligence artificielle pour explorer les meilleures options d'aménagement urbain ». ABCD Blog (blog). 18 novembre 2020. <https://www.abcdblog.fr/autodesk-rachete-spacemaker-et-met-a-disposition-des-architectes-la-conception-generative-basee-sur-lintelligence-artificielle-pour-explorer-les-meilleures-options-damenagement-urba/>.

Rameaux, Marc. 2020. « La Querelle Raoult (Série) : A la recherche de la raison dans la controverse sur l'hydroxychloroquine ». *European Scientist* (blog). 21 avril 2020. <https://www.europeanscientist.com/fr/redactions-choice-fr/la-querelle-raoult-serie-a-la-recherche-de-la-raison-dans-la-controverse-sur-lhydroxychloroquine/>.

